МАТЕРИАЛЫ III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ»

18–19 марта 2026 г.

Санкт-Петербург
Издательско-полиграфическая ассоциация
высших учебных заведений
2026

УДК 551.51
ББК 26.233
М43

Редколлегия:
Анискина О. Г., к.ф.-м.н., доцент
Волобуева О. В., к.г.н., доцент

Материалы III Международной научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». 18–19 марта 2026 г. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2026. – 360 с.

В издании представлены материалы докладов участников конференции по направлениям научных исследований в области математического моделирования окружающей среды, анализа и прогноза атмосферных процессов разных пространственно-временных масштабов, современных методов наблюдений и системы обработки гидрометеорологических данных, фундаментальных и прикладных проблем океанологии и гидрологии. В конференции участвовали учёные и студенты научно-исследовательских организаций и учреждений Российской академии наук, Росгидромета, Минобрнауки России, а также учёные Белоруссии, Узбекистана. В рамках конференции работали две студенческие секции.

Материалы конференции могут быть полезными специалистам в области геофизики, физики атмосферы, гидрометеорологии, гидрологии, океанологии, экологии, а также студентам соответствующих специальностей.

Материалы докладов выходят в редакции авторов.

Подписано в печать 24.07.2026. Формат 70×100/16.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 29,25. Тираж 50. Заказ 189.

Выпущено Издательско-полиграфической ассоциацией
высших учебных заведений с готового оригинал-макета,
предоставленного заказчиком
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 28, литера А,
помещ. 3-н, ком. 191. Тел.: (812) 987-75-26
mediapapir@gmail.com www.mediapapir.com www.mediapapir.ru

© Коллектив авторов, 2026
© Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2026

ISBN 978-5-91155-617-4

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Николаев А.А., Мирсаева Н.А., Аухадеев Т.Р. Тенденции изменения и взаимосвязи полей температуры воздуха, атмосферного давления, общей облачности и суммарной радиации на территории северного полушария в период 1966-2025 гг.	8
Смышляев С.П., Яковлев А.Р., Ткаченко М.А., Иманова А.С., Окуличева А.А., Ромащенко Д.Д., Швец П.А. Бесшовное моделирование атмосферных физических и химических процессов	10
Жуков В.Ю. Современное состояние радиолокации	15
Федулов А.А., Соломатина Ю. А. Северный морской путь. будущее глобальной логистики	15

СЕКЦИЯ 1
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Лобанов В.А., Литюшкина С.А. Альтернативный механизм влияния роста CO2 на климат (пример температуры воздуха акватории Баренцева моря)	19
Торопова М.Л., Михайловский Ю.П. О связях напряженности электрического поля с параметрами грозовых облаков по результатам трехмерного численного моделирования	24
Докукин С.А., Тихоненко Н.Д. Изучение с помощью моделей COSMO и WRF температурного и ветрового режима зимнего периода в центре ЕТР	28
Груздев А.И., Лобанов В.А. Оценка эффективности моделей и сценариев климата для Санкт-Петербурга и Ленинградской области	29
Клецова В.А., Анискина О.Г. Влияние уточнения вертикальной сетки в пограничном слое на характеристики планетарного пограничного слоя над Санкт-Петербургом по результатам моделирования WRF-ARW	33
Бухарев А.А., Булгаков К.Ю., Фокина К.А. Использование машинного обучения для прогноза максимальной высоты волны с использованием фазо-разрешающей модели и спектра плотности волновой энергии	37
Харченко М.А., Анискина О.Г. Адаптация модели WRF-ARW для прогноза тумана на аэродроме Санкт-Петербург	41
Черкашин Д.М., Анискина О.Г. Верификация моделирования осадков моделью WRF-Chem	46
Кулижская П.В. Численный эксперимент разработанной математической модели на основе нейронных сетей в оперативной работе Авиаметеорологического центра	48
Шнайдер А.В., Савенкова Е.Н. Оценка вклада активности десятидневной волны в вариации атмосферной циркуляции	54
Новикова О.А. Динамика теплообеспеченности и оценка агроклиматического потенциала Курганской области в 1980–2023 годах для развития виноградарства	58

СЕКЦИЯ 2
АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ

Цепелев В.Ю., Ильющенкова И.А. Использование синоптического подхода для уточнения ансамблевого прогноза погоды на месяц	65
Рябова С.А. Поиск точки изменения среднемесячных значений температуры воздуха на высокогорной метеостанции Цугшпитце	66
Горбатовская А., Синькевич А.А., Тарабукин И.А., Куров А.Б. Сравнение радиолокационных и микрофизических характеристик облаков с грозовыми разрядами и без грозовых разрядов	67
Небышинец А.М. Гледко Ю.А. Изменение температурного режима на территории Беларуси в условиях изменения климата	71

Вдовенко А.И. Определение районов с климатическими изменениями температур воздуха на территории Узбекистана 76

Закусилов В.П., Касымжомарт Е.Г. Анализ повторяемости радиационного тумана в низменных равнинных и возвышенных плоскогорных районах Республики Казахстан 79

Романов Д.А., Пензин М.С., Кучинская О.И., Пустовалов К.Н., Акимов И.М., Брюханов И.Д. Вероятностное восстановление наличия облаков верхнего яруса с использованием методов машинного обучения 83

Рябова С.А. Вариации магнитного поля земли, опережающие прохождение холодного фронта над Москвой 20 июня 2024 г. 86

Михайловский Ю.П., Торопова М. Л., Абшаев А.М, Геккиева Ж.М., Синькевич А. А., Кашлева Л.В. Об эмпирической модели электризации конвективных облаков 88

Агаяба Дж. К., Кашлева Л.В., Офори М.К. Об особенностях режима осадков и температурного режима Ганы 92

Ада Атангана Сюзанн Франсуаз, Лебедев А.Б. Анализ физико-географических особенностей Республики Камерун для исследования климата 96

Восканян Е.И., Иванова Т.И., Кузнецов А.Д. К вопросу о климатической стабильности в северных регионах РФ 102

Кошин А.Ю., Лопух П.С. Региональные различия увлажнения водосборов рек Беларуси 105

Алексеева Е. Г., Анискина О.Г. Температурные аномалии на территории Российской Федерации в холодный период года 110

Иванова И.А., Лаврова И.В., Топтунова О.Н. Исследование связи между температурой воздуха на поверхности 850 гПа и приземными суточными экстремумами в г.Санкт-Петербурге 113

Соломатина Ю.А., Цветков И.С. Влияние судоходства на гидрологию: от глобального загрязнения до «шумового» воздействия 117

Газал А., Сероухова О.С. Оценка пригодности сельскохозяйственных земель Сирийской Арабской Республики в условиях изменения климата 121

Петухов Г.М. Механизмы и физические закономерности образования вулканических мезоциклонов 126

Дубских А.А., Балтаханов Т.М. Метод прогнозирования максимальной температуры воздуха по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы 130

Мироненко В.В. Отбор наиболее информативных предикторов в задаче прогнозирования максимальной температуры воздуха 135

СЕКЦИЯ 3
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Черных О.А., Иванов В.Э., Гусев А.В., Кудинов С.И., Носков В.Я. Результаты экспериментальных исследований транзисторного автодинного приемопередатчика системы радиозондирования атмосферы в асинхронном режиме приема запросных сигналов 139

Головков-Енин А.Е. Современные системы гидрометеорологического мониторинга 147

Матюков М.А., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Применение данных измерений пассивной СВЧ-радиометрической системы и методов машинного обучения для сверхкраткосрочного прогнозирования опасных метеоявлений 149

Горбатенко В.П., Кижнер Л.И., Мордус Д.П.Сравнение радиолокационных параметров облачности внутримассовых и фронтальных гроз Западной Сибири 153

Букрин И.В., Плохих О.В., Иванов В.Э., Ширшов Н.В. Разработки средств радиозондирования атмосферы на уральских предприятиях 157

Писный А.С., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н. Особенности калибровки многодиапазонной СВЧ - радиометрической системы с компенсацией фоновых помех 161

Снегуров А.В. Сравнение данных грозопеленгационных систем 165

Акимов И.М., Кучинская О.И., Брюханов И.Д., Пустовалов К.Н. Зависимость матрицы обратного рассеяния света облаков верхнего яруса от метеорологических параметров 170

Николаев Е.Н., Антонов С.В., Двоеглазов С.М., Петрунин А.М., Платонов Н.А., Частухин А.В., Щукин Г.Г. Измерительный комплекс для мониторинга параметров переохлажденных туманов с использованием беспилотных авиационных систем	174
Добровольский А.В., Восканян К.Л. Программа для обработки данных с АМС и их визуализации	180
Потапова И.А., Дьяченко Н. В., Михтеева Е. Ю., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Яковлева Т. Ю. Определение характеристик микроструктуры аэрозоля и моделирование его оптических свойств	182
Кудинов С.И., Иванов В.Э., Плохих О.В., Гусев А.В., Букрин И.В. Импульсно-фазовый метод измерения дальности до аэрологического радиозонда	188
Владимирова Н.А., Гершензон О.Н., Никитская К.Е., Куракина И.Н., Алейников А.А., Балагуров А.А., Лисицын Д.В., Савостин А.А. Спутниковый мониторинг прибрежного рыболовства как инструмент экологического обеспечения и контроля для органов власти	192
Шейнов Р.А. База – как мера идентификации вертикальных потоков	195

СЕКЦИЯ 5
ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ ФОИВ

Алексеева А.В., Давыдов В. Е., Зинкина М.Д., Палей А.А., Писанко Ю.В. Рассеивание тумана неоднородным электрическим полем: результаты экспериментов	199
Акселевич В.И., Мазуров Г.И. Современное состояние проблем диагноза и прогноза природных и лесных пожаров	201
Тарасова Л.Л. Агрометеорологическое обслуживание отрасли в новом формате: от статистического прогноза к программированию урожаев	206
Простакевич К.С., Абрамова А.Л., Юрин И.В., Абрамов В.М. Геоинформационная поддержка управления природными рисками для судоходства в условиях арктического усиления	208
Юрин И.В., Абрамова Е.Н., Простакевич К.С., Абрамова А.Л., Смышляев С.П., Абрамов В.М. Реархивация данных о температуре и химическом составе арктической тропосферы в задачах исследования феномена арктического усиления	212
Абрамова А.Л., Простакевич К.С., Абрамова Е.Н., Юрин И.В., Козлов Ю.В., Абрамов В.М. Взаимосвязь арктического усиления и роста хозяйственной деятельности в Арктике и Субарктике	216
Дорофеев В.В., Степанов А.В., Голунов А.С., Подгузов М.Ю. Методика оценивания метеорологических условий для пилотируемой авиации с применением беспилотных воздушных судов	219
Авдеев С.М., Кочешкова А.А., Крупин П.Ю., Свистунова Н.Ю., Канунникова В.Ю., Ромашкина С.И., Карлов Г.И., Дивашук М.Г. Агрометеорологические факторы для обеспечения селекционного процесса в целях поддержания продовольственной безопасности	224
Кузнецов И.Е., Слащёв С.В. Методика мониторинга атмосферной турбулентности с использованием метеорологических радиолокационных комплексов типа «Монокль»	227
Расторгуев И.П., Денега И.З., Покусаев И.Н. Исследование зависимости метеорологических условий в зоне атмосферных фронтов от параметров фронтальных инверсий	232
Рогожкин В.В., Горынин В.И., Воронов Н.В., Горба Р.И., Ильинский К.М., Тхор И.А. Перспективы турбоконденсатных станций питьевого водоснабжения на базе приморских АЭС и ТЭС	237
Черепанов Д.В., Черепанова М.А. Методика прогноза высоты нижней границы внутримассовой облачности на периферии антициклона	239

СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 1
ИССЛЕДОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Андреева Д.О., Лебедева Л.С. Оценка качества воспроизведения осадков и температуры воздуха различными климатическими продуктами в бассейне р. Лены	243
Набойкина Г.А., Волобуева О.В. Особенности формирования и развития затяжного адвективного тумана в Нижнем Новгороде 11 ноября 2025 года	248
Колотова Т.В., Волобуева О.В. Пространственно-временная изменчивость циклонов и антициклонов над северо-западом России в 2020–2024 гг.	251
Калиниченко А.А. Исследование траекторий внетропических циклонов	257
Швец П.А., Смышляев С.П. Чувствительность арктического усиления к пространственному разрешению климатической модели	261
Гриц С.Ю., Попова Е.А., Смагина А.Е. Ветроэнергетический потенциал Ленинградской области и перспективы применения ветроэнергетических установок	264
Кочнева В.А., Мирсаева Н.А. Оценка биоклиматических ресурсов Курганской области в период 1991-2022 годы	269
Плюшко В.С., Волобуева О.В. Оценка потенциальной опасности вулкана Крашенинникова для полетов авиации	272
Зоммер В.П., Волобуева О.В., Дробжева Я.В. Анализ причин возникновения смерчей в Краснодарском крае: случай 3 августа 2025 года	276
Сунгурова Т.Г., Волобуева О.В. Метеорологические условия образования селей в Эльбрусском районе на примере схода грязевых потоков летом 2025 г.	279
Зотова В.К., Лаврова И.В. Изменение климата Самарканда на фоне глобального потепления	283
Смирнова П.Д., Кашлева Л.В. Анализ особенностей грозового режима в Белгородской области	288
Копылова С.Д. Об особенностях радиолокационных наблюдений неметеорологических целей	292
Щербакова Ю.Е., Анискина О.Г. Моделирование полярных мезоциклонов	294
Аль Меклафи Ясер Фуад Абдо, Лобанов В.А. О проблеме изменения климата на Ближнем Востоке	296
Бессуднова А.Г., Урсул Д.С. Исследование эффекта «остров тепла» на примере Москвы и Можайска	297
Буравцова Е.В., Топтунова О.Н. Изэнтропический метод как перспективное направление совершенствования оперативных синоптических прогнозов	301
Комбарова А.А., Анискина О.Г. Исследование влияния облаков на скорость фотолиза озона	306
Шишкин А.Д., Анискина О.Г. Атмосферные реки и их влияние на погоду	308
Шаповалов А.Г., Курова В.Д., Лаврова И.В., Иванова И.А. Исследование тропических циклонов над акваторией Японского моря	310
Черемных В.С., Кашлева Л.В. Исследование грозовой активности в г. Якутск	313

СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 2
ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ

Балджи П.С. Совместный анализ поведения характеристик проявления солнечной активности и потоков галактических космических лучей в околоземном пространстве в 25 солнечном цикле	317
Нестерова А.Ю. «Энума Ану Энлиль» как корпус ранних метеорологических наблюдений: структура, методы, значение	322
Черкасова А.В. Анализ временных рядов влагозапасов в метровом слое почвы в европейской части России	325
Морева Е.А., Сабирова М.В. Повторяемость опасных погодных явлений в аэропорту Казани	329

Беланович В.А., Акимов И.М. Сопоставление данных лидарного и спутникового зондирования облаков верхнего яруса над г. Томск	332
Басакина А.В., Ефимова Ю.В. Исследование арктических вторжений на северо-запад России в зимний сезон	336
Ламанов П.Д., Ефимова Ю.В. Анализ изменения термического режима п.Оймякон за период с 1961 по 2020	338
Строчиков Б.Д., Иванова И.А. Синоптические условия формирования явления «ладожский снег»	344
Митюшина В.С., Соловьёва А.С., Малыгина Т.И., Кашлева Л.В. Мезомасштабные структуры в зоне обложных осадков	347
Петренко Е.С., Анискина О.Г. Химия тропосферного озона и её воздействие на окружающую среду	352
Касьянова А.М. Эффект аэродинамической трубы в бухте Тикси	357

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ И ВЗАИМОСВЯЗИ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА, АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ОБЩЕЙ ОБЛАЧНОСТИ И СУММАРНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В ПЕРИОД 1966-2025 ГГ.

Переведенцев Ю.П., Гурьянов В.В., Николаев А.А., Мирсаева Н.А., Аухадеев Т.Р.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
ypereved@kpfu.ru

Аннотация. Рассматриваются пространственно-временные изменения и взаимосвязи основных климатических показателей полей температуры воздуха, атмосферного давления, облачности и радиации на территории Северного полушария в период 1966-2025 гг. Дана оценка роли циркуляционных колебаний в формировании климатических аномалий.
Ключевые слова. Климат, температура воздуха, давление, облачность, радиация, тенденции, корреляция, циркуляционные индексы.

TRENDS IN CHANGES AND INTERRELATIONSHIPS OF THE FIELDS OF AIR TEMPERATURE, ATMOSPHERIC PRESSURE, TOTAL CLOUD COVER AND TOTAL RADIATION IN THE NORTHERN HEMISPHERE IN THE PERIOD 1966-2025

Perevedentsev Yu.P., Guryanov V.V., Nikolaev A.A., Mirsaeva N.A., Aukhadeev T.R.
Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Annotation. The spatial and temporal changes and interrelationships of the main climatic parameters of the fields of air temperature, atmospheric pressure, clouds and radiation in the Northern Hemisphere in the period 1966-2025 are considered. The role of circulation fluctuations in the formation of climatic anomalies is assessed.
Keywords. Climate, air temperature, pressure, cloud cover, radiation, trends, correlation, circulation indices.

Проблема изучения современных климатических изменений остается по-прежнему актуальной. Так, в [1] рассматриваются возможные изменения климата планеты в XXI веке при увеличении глобальной температуры на 1,5-2°C за счет антропогенной эмиссии CO_2 и их последствия для природных и социально-экономических систем. С другой стороны, согласно [3], наблюдаемые изменения климата имеют естественную природу и являются следствием резонансов и биений собственных частот климатической системы Земли и частот повторяющихся внешних воздействий на нее со стороны Солнечной системы. В любом случае необходима регулярная работа по выявлению современных тенденций климатических изменений и разработке мер по адаптации к ним в настоящем и будущем.

В данном сообщении в развитие ранее опубликованной авторами работы [2] рассматриваются пространственно-временные изменения и взаимосвязи основных характеристик приземных полей температуры воздуха, атмосферного давления, суммарной солнечной радиации и общей облачности с учетом влияния атмосферной циркуляции и теплового состояния Атлантического и Тихого океанов на территории Северного полушария в период 1966-2025 гг. (60 лет).

С этой целью использовались базы данных о приземной температуре воздуха по всему земному шару (1850-2025 гг.) Университета Восточной Англии (CRU), реанализов

ERA-5 и др., содержащих данные о температуре, атмосферном давлении, индексах атмосферной циркуляции, общей облачности и суммарной радиации.

Многолетние данные по указанным метеовеличинам подвергались статистической обработке. Находились среднемесячные и среднесезонные значения, СКО, коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ), низкочастотные компоненты (НЧК), коэффициенты корреляции (r) между метеовеличинами и индексами атмосферной циркуляции.

Рассмотрим вначале фон, на котором развивались долгопериодные климатические изменения на Земле в период 1850-2025 гг. С этой целью производились расчеты по данным CRU. Так, в Северном полушарии скорость роста среднегодовой температуры воздуха (СГТВ) за весь период составила 0,078°С/10 лет, а в период современного потепления (1970-2025 гг.) величина КНЛТ СГТВ возросла до 0,28°С/10 лет. В Южном полушарии процесс современного потепления начался на 7 лет раньше, чем в Северном, но скорость повышения СГТВ там вдвое меньше. При этом во временном ходе СГТВ, особенно в Северном полушарии, отчетливо проявляется 60-70-летнее колебание, которое также прослеживается в колебаниях угловой скорости вращения Земли и индекса Атлантико-мультидекадной осцилляции (AMO).

Сравнение полученных карт разности температуры и значений КНЛТ между двумя подпериодами 1996-2025 и 1966-1995 гг. показало, что в более поздний период на всем Северном полушарии значительно теплее, чем в ранний, особенно в арктической зоне (арктическое усиление). Более сложная картина отмечается на картах разностей атмосферного давления. Так, если зимой более заметный рост давления отмечается в более поздний период в западном полушарии, то летом более заметно его повышение на территории Евразии. Причем давление, согласно значениям КНЛТ, растет в субтропических поясах Северного и Южного полушарий и понижается в приполярных зонах.

Сравнение разностей в полях облачности и суммарной радиации между указанными периодами выявляют четкую закономерность – в местах увеличения облачности приход солнечной радиации уменьшается.

Для оценки вклада атмосферной циркуляции и теплового состояния Атлантического и Тихого океанов в изменчивость метеорологических полей рассчитывались коэффициенты корреляции между показателями этих полей и индексами атмосферной циркуляции: NAO, SCAND, SOI, PNA, AMO, PDO. Выявлены сезонные и пространственные зоны наиболее активной реакции этих полей на внешние возмущения.

К числу основных выводов к данному сообщению можно отнести следующие:

1. В изменениях приземной средней годовой температуры воздуха Северного полушария, угловой скорости вращения Земли и индекса AMO проявляются квазипериодические вариации с периодом около 60 лет.

2. Пространственная структура распределения коэффициентов корреляции между NAO и атмосферным давлением зимой включает в себя меридиональный диполь в Атлантике: в районе Азорского ЦДА значения r=+0,8, а в районе Исландского ЦДА r=-0,8. Противофазные изменения атмосферного давления в отмеченных ЦДА приводят к усилению NAO.

3. Выявляется зональность в чередовании зон с ростом и падением приземного атмосферного давления на Земном шаре в период 1940-2023 гг. В субтропической зоне давление растет (КНЛТ>0), а в полярных областях падает (КНЛТ<0). При этом в арктической зоне скорость потепления максимальная. Происходит так называемое арктическое усиление.

4. Тихоокеанско-Североамериканский индекс (PNA) создает меридиональный диполь зимой в поле корреляции с температурой – в северной части Тихого океана

(Алеутский минимум) образуется очаг с r<0 (r=-0,6), а в районе Аляски и Канады возникает положительный очаг (r=+0,6).

5. В приатлантической и притихоокеанской частях Арктики формируются аномалии давления противоположного характера. Колебания временного хода НЧК давления в Исландской и Алеутской депрессиях имеют противоположный характер.

6. В приатлантической Арктике к северо-западу от Гренландии наблюдается похолодание, а северо-восточнее Гренландии, наоборот, потепление, что объясняется циркуляционным фактором.

7. Выявляется положительная тенденция температуры над северо-западом Северной Америки и над Аляской, в то же время в районе Охотского моря формируется область с отрицательной адвекцией температуры, что обусловлено углублением Алеутского минимума и его смещением на восток.

В заключение отметим, что полученные оценки трендов ряда климатических показателей на территории Северного полушария в 1966-2025 гг. свидетельствуют о достаточно согласованном характере поведения метеополей в условиях современного потепления климата и соответствуют физическим представлениям о природе этих изменений.

Список литературы

1. *Гладильщикова А.А., Дмитриева Т.П., Семенов С.М.* Специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата «Глобальное потепления на 1,5°С» // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2018. - № 4. – С. 5-17.
2. *Переведенцев Ю.П., Васильев А.А., Гурьянов В.В., Мирсаева Н.А., Николаев А.А.* Тенденции изменения основных климатических показателей на территории России в период 1976-2023 годов // Метеорология и гидрология. – 2025. - № 10. – С. 44-62.
3. *Шерстюков Б.Г.* Колебательная система климата, резонансы, дальние связи, прогнозы. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2021. – 222 с.

БЕСШОВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Смышляев С.П.[1], Яковлев А.Р.[1], Ткаченко М.А.[2], Иманова А.С.[1], Окуличева А.А.[1], Ромащенко Д.Д.[1], Швец П.А.[1]
[1]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный университет
smyshl@rshu.ru

Аннотация. В работе представлен подход к бесшовному моделированию, объединяющий глобальную химико-климатическую модель ИВМ РАН – РГГМУ и региональную модель прогноза погоды и качества воздуха WRF-Chem. Единство химических схем достигнуто использованием общей расширенной схемы тропосферной и стратосферной химии MOZART-TS2. Разработан специализированный интерфейс для переноса метеорологических и химических полей из глобальной модели в региональную. Проведены расчёты для трёх климатических периодов: 1981–1985, 2016–2020 (2021–2025) и 2051–2055 гг. по сценарию IPCC SSP2-4.5. Показана значительная региональная неоднородность изменений приземной температуры: на большей части Евразии потепление составило 1–2 °C, однако в ряде районов отмечено похолодание до 2,5 °C. Созданная бесшовная система позволяет эффективно преодолевать разрыв между глобальными и региональными масштабами и может служить основой для оперативных и долгосрочных прогнозов качества воздуха.

Ключевые слова. Бесшовное моделирование, изменения климата, качество воздуха, приземный и стратосферный озон, химико-климатическая модель, WRF-Chem, полярный вихрь, циркуляция Брюера-Добсона.

SEAMLESS MODELING OF ATMOSPHERIC PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES

Smyshlyaev S.P.[1], Yakovlev A.R.[1], Tkachenko M.F.[2], Imanova A.S.[1], Okulicheva A.A.[1], Romoshenko D.D.[1], Shvetch G.A.[1]
[1]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[2]Saint Petersburg State University

Abstract. The report addresses modern approaches to integrated Earth system modeling based on the seamless modeling concept. It discusses the transition from isolated dynamic models of individual components (atmosphere, ocean, land) to a unified modeling system with a common grid, uniform time steps, and direct two-way interactions between blocks. Special attention is given to atmospheric chemistry, which differs significantly across the troposphere, stratosphere, and mesosphere, and its impact on radiative and dynamic processes. Within the framework of a federal scientific and technical program in Russia, a national modeling system is being developed, including an atmospheric chemistry module and integration with other Earth system components. Examples of model applications are presented, including studies of annual ozone variability, polar vortices, ozone depletion processes, and the assessment of global factors affecting regional climate and atmospheric composition changes over Eurasia. Results are compared with satellite measurements and other models. The need to minimize interpolation errors when transitioning between global and regional scales and across atmospheric layers is emphasized.
Keywords. Seamless modeling, atmospheric chemistry, dynamic modeling, Earth system, polar vortex, ozone, regional modeling, radiative processes, federal program, modeling system.

Последние экспериментальные и теоретические исследования предоставили убедительные доказательства наличия динамической и химической связи между процессами в атмосфере, океане и на суше в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Модели Земной системы, создаваемые на базе глобальных климатических моделей, объединяют описание атмосферы, океана, суши, ледовых щитов, а также физических и химических процессов в различных оболочках. Многие современные МЗС включают физические процессы от нижней до верхней атмосферы. Однако большинство существующих моделей недостаточно полно учитывают двустороннюю связь процессов разных пространственных масштабов — от уровня улицы до регионального и глобального [1].

Региональные модели обладают высоким пространственным разрешением, но обычно применяются на ограниченной территории и имеют верхнюю границу в нижней стратосфере. Использование же глобальных моделей с разрешением в несколько километров оказывается вычислительно неэффективным для долгосрочных климатических расчётов. Кроме того, разделение на глобальные и региональные модели подразумевает и разделение по временным масштабам: современные региональные прогнозы погоды и качества воздуха ограничены всего несколькими днями, что недостаточно для принятия решений по смягчению негативных последствий климатических изменений и загрязнения воздуха. С другой стороны, оценки глобальных изменений климата и химического состава атмосферы на основе модели земной системы затруднены из-за низкого разрешения, что требует применения параметризаций подсеточных процессов, не всегда точных [2, 6, 7].

Проблемы задания начальных и граничных условий для ограниченной области, а также необходимость более точного учёта влияния региональных физико-химических

процессов на глобальные изменения требуют тесного взаимодействия между глобальными и региональными моделями, желательно в бесшовном формате и в оперативном режиме. Расширение прогнозов погоды и качества воздуха до 1–2 недель требует корректного учёта процессов за пределами расчётной области, а переход к субсезонным, сезонным и десятилетним масштабам — преодоления разрыва между региональными моделями погоды и глобальными химико-климатическими МЗС.

В настоящей работе для исследования изменчивости погоды и качества воздуха в разные климатические периоды использовалась бесшовная объединённая система, состоящая из глобальной химико-климатической модели ИВМ РАН – РГГМУ и региональной модели WRF-Chem. Цель работы — продемонстрировать возможности этой системы для анализа региональных особенностей изменений температуры, озона и его предшественников на территории Евразии в прошлом и будущем, а также выявить механизмы, определяющие эти изменения [1, 2, 4].

Для исследования влияния изменений климата на погоду, качество воздуха, аэрозольный и газовый состав атмосферы была создана бесшовная связка глобальной химико-климатической модели ИВМ РАН – РГГМУ и региональной модели WRF-Chem. Бесшовность химических схем достигается использованием единой расширенной схемы тропосферной и стратосферной химии MOZART-TS2 (Model of OZone And Related chemical Tracers, troposphere-stratosphere version 2). В глобальной модели применяется итерационное сокращение количества рассматриваемых газов и фотохимических реакций на основе сравнения порядков реакций для каждого узла сетки, что позволяет сохранить точность при снижении вычислительных затрат. Для улучшения описания тропосферной химии в схему включены процессы окисления неметановых углеводородов, включая изопрен, а алгоритм расчёта коэффициентов фотодиссоциации заменён на алгоритм CLOUD-J, который детальнее учитывает влияние аэрозоля и облаков на скорости фотолиза, изменение химического состава и нагрев атмосферы [3-5].

Конфигурация глобальной модели. Используемая химико-климатическая модель ИВМ РАН – РГГМУ построена на базе новой версии климатической модели ИВМ РАН – INMCM60 и является ядром Национальной модели Земной системы. Для данной задачи применялась конфигурация с горизонтальным разрешением 1,5×2 градуса по широте/долготе и 73 вертикальными уровнями с переменным шагом от земной поверхности до высоты ~60 км. Бесшовное взаимодействие фотохимических процессов в тропосфере и стратосфере основано на итерационном уточнении количества используемых газов и реакций до единого списка для нижней и средней атмосферы [1. 2].

Конфигурация региональной модели. Размер внутренней области моделирования составил 151×151 ячейку с пространственным разрешением 30 км, вертикальное распределение — 45 гибридных уровней от поверхности до ~50 гПа. Область охватывает территорию России и Евразии. Использовались следующие схемы параметризации: Yonsei University Scheme (пограничный слой), RRTMG (коротко- и длинноволновая радиация), Unified Noah Land Surface Model (подстилающая поверхность), Revised MM5 (приземный слой), Grell 3D Ensemble (конвективная облачность). Метеорологические и химические граничные условия задавались из глобальной модели с шагом 6 ч, данные о температуре поверхности океана также обновлялись каждые 6 ч. Антропогенные выбросы газов и аэрозолей брались из глобальной части. Для химии использовалась схема MOZART-TS2, для аэрозолей — GOCART [6, 7].

Результаты моделирования глобальной модели для разных климатических периодов.

Модель демонстрирует повышение температуры на всей территории Евразии с региональными особенностями: в основной части — на 1–2 °C, максимальное увеличение (>3 °C) — на Урале и Дальнем Востоке, минимальное — над Скандинавией и в Юго-Восточной Азии, где в отдельных районах отмечено даже понижение. Поскольку сценарий задавал одинаковый рост парниковых газов для всей Евразии, региональные различия связаны с изменениями динамических параметров атмосферы.

Изменчивость приземного озона за 2016–2020 гг. относительно 1981–1985 гг. показывает рост на несколько процентов в Азиатской части с максимумом до десятков процентов в Юго-Восточной Азии и малые изменения или даже уменьшение в Европейской части.

В соответствии со сценарием, в период с начала 80-х до начала 20-х годов содержание метана, NO_x и CO увеличивалось, но для NO_x и CO наблюдались региональные различия из-за антропогенных выбросов. В Европе и на севере России предполагалось снижение выбросов NO_x (промышленность и транспорт), тогда как в Юго-Восточной Азии — значительный рост. Для CO также отмечены очаги повышенных концентраций в Юго-Восточной Азии, на Дальнем Востоке, в Индии и на Ближнем Востоке. Региональные особенности изменения озона в большей степени соответствуют изменчивости NO_x, чем CO или метана, что указывает на ключевую роль оксидов азота в формировании тропосферного озона.

В отличие от тропосферы, в нижней стратосфере отмечается охлаждение, максимальное в Арктике и на севере Евразии, минимальное — в Южной Азии и Западной Европе. Охлаждение влияет на скорости химических реакций, определяющих каталитическое разрушение стратосферного озона.

Содержание озона в нижней стратосфере в начале 2020-х годов более чем на 10 % меньше, чем в начале 80-х, с максимумом уменьшения в Центральной Сибири и локальным увеличением в Южной Азии и Юго-Западной Европе. Это связано с сохраняющимся высоким содержанием хлорных и бромных газов, несмотря на запрет большинства озоноразрушающих веществ. При этом региональная изменчивость галогенов в стратосфере объясняется циркуляцией Брюера-Добсона (перенос из тропиков к полюсам) и более интенсивными химическими реакциями в низких широтах.

В зимние месяцы температура в тропической стратосфере (20 км) понизилась на 10 К с 1980-х по 2020-е гг., но к 2060-м не меняется. В арктической стратосфере (30–40 км) температура повысилась на 10 К к 2020-м, а на высотах 15–25 км — снизилась на 10 К. В летние месяцы на высоте 10 км в Арктике температура понизилась к 2020-м, но к 2060-м восстанавливается.

Концентрация озона в тропосфере (0–10 км) повышается на 0,05 ppm осенью и зимой с 1980 по 2020 гг., но к 2060-м снижается. В стратосфере (30–40 км) озон уменьшается на 2 ppm к 2020-м в Арктике зимой, но увеличивается на 2–3 ppm к 2060-м. Общее содержание озона (рис. 4.20) минимально в 2020-е годы (максимум в Северном полушарии ~400 еД, минимум в Южном ~200 еД), тогда как в 1980-е максимум достигал 520 еД, а к 2060-м восстанавливается до ~480 еД.

Концентрация NO_x растёт примерно на 0,001–0,005 ppm за каждые 40 лет: в 1980-е среднее ~0,01 ppm, в 2060-е ~0,015 ppm, с максимумом в Южном полушарии до 0,02 ppm. Это указывает на усиление полярного вихря в 2020-е годы и повышение газов, разрушающих озон.

Зональный ветер в 1980-е годы более устойчив в январе (40–50 м/с в стратосфере северного полушария), чем в 2020-е и 2060-е, но в феврале-марте, наоборот, устойчивее в 2020-е и 2060-е (20 м/с против <10 м/с в 1980-е). Остаточная меридиональная циркуляция в Арктике достигает 0,5 м/с в феврале 1980-х, в январе 2020-х — также 0,5 м/с, тогда как в 2060-е она близка к нулю. Полярный вихрь в 2020-е годы ослабляет

меридиональный перенос озона из тропиков, что приводит к снижению общего содержания озона. В 1980-е годы разрушение вихря усиливало циркуляцию Брюера-Добсона и перенос озона к полюсам.

Поток волновой активности в январе 1980-х годов был максимальным (меридиональная компонента до 80–100 м²/с², вертикальная до 1,5 м²/с²), что способствовало разрушению вихря. В 2020-е годы поток слабее, особенно в марте, что соответствует устойчивому вихрю. В 2060-е годы вертикальный поток больше, а меридиональный — ещё меньше.

Разработанная бесшовная система «ИВМ РАН – РГГМУ/WRF-Chem» позволяет проводить согласованные расчёты климата и химического состава атмосферы от глобального до регионального масштаба. Единая химическая схема MOZART-TS2 и созданный интерфейс обеспечивают непротиворечивую передачу полей, что критически важно для долгосрочных прогнозов качества воздуха.

Результаты моделирования выявили существенную региональную неоднородность климатических изменений на территории Евразии. Даже при равномерном росте парниковых газов динамические факторы (изменения циркуляции, волновой активности, полярного вихря) приводят к появлению зон с противоположными температурными трендами. Это означает, что усреднённые по континенту оценки могут маскировать важные локальные эффекты, что необходимо учитывать при адаптационных стратегиях.

Дальнейшее развитие системы должно быть направлено на повышение пространственного разрешения, усовершенствование параметризаций аэрозольных процессов и включение обратных связей между климатом и химией. Также требуется валидация модели на более широком наборе наблюдений, включая спутниковые данные и наземные станции. Тем не менее, уже сейчас представленная бесшовная система является эффективным инструментом для изучения многомасштабных взаимодействий в системе Земли и может служить основой для оперативных прогнозов качества воздуха на субсезонных и сезонных масштабах.

Список литературы

1. Smyshlyaev S. P., Yakovlev A. R., Usacheva M. A., Imanova A. S., Romashchenko D. D., Motsakov M. A. Chemistry module for the Earth system model // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. — 2024. — Vol. 39, No. 6. — P. 345–358. — DOI: 10.1515/rnam-2024-0030.
2. Володин Е. М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2023. — Т. 59, № 1. — С. 19–26. — DOI: 10.31857/S0002351523010133.
3. Imanova A. S., Rozanov E. V., Smyshlyaev S. P., Zubov V. A., Egorova T. A. Investigation of the Influence of Atmospheric Scattering on Photolysis Rates Using the Cloud-J Module // Atmosphere. — 2025. — Vol. 16, No. 1. — P. 58. — DOI: 10.3390/atmos16010058.
4. Usacheva M. A., Smyshlyaev S. P., Rozanov E. V., Zubov V. A. Modeling Climate Changes and Atmospheric Ozone Variations from 1980 to 2020 Using the Chemistry-Climate Model SOCOLv3 // Atmospheric and Oceanic Optics. — 2024. — Vol. 37, No. 3. — P. 409–414.
5. Usacheva M., Rozanov E., Zubov V., Smyshlyaev S. Temperature and Ozone Response to Different Forcing in the Lower Troposphere and Stratosphere // Atmosphere. — 2024. — Vol. 15, No. 11. — P. 1289. — DOI: 10.3390/15111289.
6. Chin M., Rood R. B., Lin S.-J., Muller J. F., Thompson A. M. Atmospheric sulfur cycle in the global model GOCART: Model description and global properties // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2000. — Vol. 105, No. D20. — P. 24671–24687.

7. Chin M., et al. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sunphotometer measurements // Journal of the Atmospheric Sciences. — 2002. — Vol. 59, No. 3. — P. 461–483.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАДИОЛОКАЦИИ

Жуков В.Ю.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. В докладе рассматривается эволюция метеорологических радиолокаторов в России — от первых советских моделей (МРЛ-1, МРЛ-2) до широко известного некогерентного МРЛ-5, который, несмотря на ограниченные возможности (измерение только средней мощности сигнала), позволял надёжно выявлять три опасных явления благодаря отработанным методикам. Переломным этапом стал переход к когерентным и поляризационным системам. В 2010-х годах был разработан отечественный многофункциональный радиолокатор ДМРЛ-С (доплеровский, поляриметрический с импульсным сжатием), который позволил измерять не только отражаемость, но и скорость частиц, их разброс, а также поляризационные характеристики, что добавило возможности распознавания микропорывов, турбулентности, зон смерчей и других явлений. Присутствуют две серьёзные проблемы. Во-первых, программное обеспечение отечественных радаров осталось на уровне некогерентной эпохи и не использует все преимущества поляриметрии (автоматическая классификация целей типа «осадки», «град», «снег» и т.п.). Во-вторых, крупные радары из-закривизны Земли теряют эффективность на дальностях свыше 100 км, а зоны их покрытия плохо перекрываются, что создаёт «слепые» пространства. В качестве перспективного пути предлагается переход к сети малых недорогих радаров (один большой эквивалентен пяти малым), но экономическая целесообразность пока не достигнута. В целом, сеть требует модернизации ПО и пересмотра концепции размещения, чтобы эффективно использовать современные возможности.
Ключевые слова. Метеорологическая радиолокация, некогерентная и когерентная радиолокация.

CURRENT STATE OF RADAR

Zhukov V.Yu.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. The report examines the evolution of meteorological radars in Russia — from the early Soviet models (MRL-1, MRL-2) to the widely known incoherent MRL-5, which, despite its limited capabilities (measuring only average signal power), reliably detected three hazardous phenomena thanks to well-developed methodologies. A turning point was the transition to coherent and polarimetric systems. In the 2010s, a domestic multi-functional radar, the DMRL-C (Doppler, polarimetric, with pulse compression), was developed. It enabled measurements not only of reflectivity but also of particle velocity, spectral width, and polarimetric characteristics, adding the ability to recognize microbursts, turbulence, tornado zones, and other phenomena. Two major problems remain. First, the software of domestic radars has largely stayed at the incoherent-era level and does not fully exploit polarimetry (e.g., automatic target classification into rain, hail, snow, etc.). Second, large radars lose effectiveness beyond 100 km due to the Earth's curvature, and their coverage zones overlap poorly, creating blind spots. As a promising way forward, a transition to a network of small, low-cost radars is proposed (one large radar equivalent to five small ones), but cost-effectiveness has not yet been achieved. Overall, the network requires software upgrades and a revised siting concept to make full use of modern capabilities.
Keywords. Meteorological radar, incoherent and coherent radar.

СЕВЕРНЫЙ МОРСКОЙ ПУТЬ. БУДУЩЕЕ ГЛОБАЛЬНОЙ ЛОГИСТИКИ

Федулов А.А., Соломатина Ю.А.
Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург
jas@mail.ru

Аннотация. Данное исследование посвящено анализу перспектив Северного морского пути (СМП) как ключевого элемента будущей глобальной логистики. В работе рассматриваются экономические драйверы развития СМП: сокращение времени транзита, экономия топлива и уменьшение издержек. Так же на основе актуальных данных рассматривается влияние СМП на экологию и океанологию. Анализируются феномены, влияющие на безопасность и устойчивость судоходства.
Ключевые слова. Северный морской путь, изменение климата, Арктика, глобальная логистика, экология, океанология.

NORTHERN SEA ROUTE. THE FUTURE OF GLOBAL LOGISTICS

Fedulov A. A., Solomatina Yu.A.
Admiral Makarov state university of maritime and island shipping, St. Petersburg

Annotation. This study is devoted to the analysis of the prospects of the Northern Sea Route (SE) as a key element of future global logistics. The paper considers the economic driver of the development of SMP: reducing transit time, saving fuel and reducing costs. Also, on the basis of current data, the impact of SMP on ecology and oceanology is considered. The phenomena affecting the safety and sustainability of navigation are analyzed.
Keywords. Northern Sea Route, climate change, Arctic, global logistics, ecology, oceanology.

Северный морской путь (СМП) – судоходная магистраль, проходящая вдоль северного побережья Российской Федерации, по Карскому, Лаптевых, Восточно-Сибирскому, Чукотскому морям Северного Ледовитого океана [1]. Длина СМП от Карских ворот до Бухты провидения составляет 5600 км, что делает его кратчайшим морским маршрутом между Европейской частью России и Дальним Востоком [1].

Ключевое преимущество Северного морского пути – колоссальное сокращение расстояния и транзитного времени. Маршрут из Лондона во Владивосток по Суэцкому каналу составляет 20-22 тыс. км, в то время как по Северному морскому пути составляет 12-14 тыс. км [1]. В переводе на время это означает экономию в 15-20 дней [2].

В условиях глобального потепления, когда арктические льды тают, СМП становится экономически привлекательным маршрутом торговли, но также источником серьёзных экологических и океанологических противоречий. Предполагается, что к 2035 году в Арктике в летний период может растаять весь морской лёд, а к 2050 году станет возможным круглогодичное судоходство без ледокольной проводки [1].

Безусловно, у Северного морского пути, как у привлекательного маршрута торговли, есть свои экономические преимущества и перспективы. Так, например, главное преимущество СМП является скорость доставки. Так, например, грузовое судно из Китая в Европу, сократило транзитное время с 30 дней до 18 дней [4]. Вскоре, такие грузоперевозки смогут быть регулярными.

Так же в одно из преимуществ северного морского пути, мы можем сказать про отсутствие геополитических рисков. Ведь, в том же, Суэцком канале до сих пор сохраняются риски пиратства и политической нестабильности. А СМП проходит во внутренних водах Российской Федерации, что обеспечивает относительную безопасность судоходства [5]. Здесь отсутствуют очереди, для этого можем вспомнить 2021 год, когда судно развернуло в Суэцком канале, из-за которого движение по каналу было заблокировано, эта «пробка» обходилась мировой торговле в $9,6 млрд в день. И отсутствует плата за проход судов (взимается только ледокольный сбор), а также нет ограничений на тоннаж и размер судов (через Суэц не могут пройти суда с осадкой более 20,1 м) [5].

Ничего не стоит на месте, инфраструктура развивается, в будущем Российская Федерация реализует концепцию «Большого Северного морского пути» – единого

морского транспортного коридора от Калининграда до Сахалина протяженностью около 8 тыс. морских миль [2]. В бюджете на 2026-2028 годы на его реализацию заложено почти 138 млрд. рублей [5]. И, конечно, сегодня ключевую роль играет атомный ледокольный флот России, которым управляет ФГУП «Атомфлот» (структура «Росатома») [2].

Развитие судоходства на Северном морском пути создают некие проблемы, которые требуют полного осмысления, а в последствии, их решения. Нелогичность ситуации в том, что глобальное потепление, открывающее СМП для навигации, одновременно усиливает уязвимость арктических экосистем.

Так, например, особую озабоченность, в списке экологических проблем, вызывает выброс судовыми двигателями черного углерода, то есть сажи. Эти частицы оседают на снег и лёд, в последствии чего, ускоряют таяние. По данным Международного совета по чистому транспорту, потенциал глобального потепления от черного углерода за 100-летний период в 900 раз выше, чем у углекислого газа [8].

Так же, согласно исследованию, опубликованному в журнале «Nature Communications», использование Арктического морского пути увеличит глобальные выбросы от судоходства на 8,2% к 2100 году, при этом доля выбросов в самой Арктике вырастет с 0,22% до 2,72%. Авторы подчеркивают, что существующие стратегии сокращения выбросов недостаточны для защиты арктической среды [7].

Но всё-таки, наиболее катастрофической угрозой остается возможный разлив нефти. Интенсивное судоходство несет серьезные риски для экосистемы Арктики, поскольку сложность ликвидации разливов во льдах многократно возрастает [4]. Ведь в условии низких температур естественное разложение нефти практически невозможно, а ледовые поля способны переносить загрязнения на тысячи километров. И инфраструктура для ликвидации аварий в Арктике остается недостаточно развитой.

Ещё тревогу вызывает использование «теневого флота» – старых танкеров с низкими страховыми и экологическими стандартами. Эти суда частенько ходят с выключенными транспондерами, плохо обслуживаются и практически не подлежат надзору.

Безусловно есть противоречия между экономикой и экологией. Анализируя таяние арктических льдов, вызванное потеплением, можно определенно сказать, что это облегчает навигацию [4]. Если раньше сезон длился с июля по ноябрь, то в 2021 году он продлился до конца января, а с 2024 года объявлена круглогодичная навигация для судов ледового класса в сопровождении ледоколов [4].

Однако, развитие судоходства создает дополнительные нагрузки на экосистему. Как отмечается в исследованиях, существует конфликт интересов между стремлением к экономическому развитию и необходимостью защиты окружающей среды. Арктические проекты обеспечивают до 20% отечественного экспорта и около 10% ВВП страны [2], но экологические проблемы часто остаются на периферии.

Конечно, экологические проблемы, которые возникают, надо решать. Поэтому можно предложить данные решения. Например, для того, чтобы снизить выбросы, можно развивать судоходство на СПГ, хотя это и создает проблему метановых утечек, но стратегия нулевых выбросов, предусматривающая более строгие стандарты топлива и поэтапное внедрение на региональном уровне, может существенно снизить вредные выбросы.

Так же необходимо дальнейшее расширение природоохранных аспектов правового регулирования. Прямо сейчас администрация Северного морского пути уже выполняет важные функции: выдачу разрешений на плавание, мониторинг гидрометеорологической и ледовой обстановки, содействие в проведении операций по ликвидации последствий загрязнения [5].

Ещё очень важно, как мы считаем, создание системы государственного экологического мониторинга, которое позволит контролировать состояние окружающей среды, а также оперативно реагировать на кризисные ситуации. «Росатом», например, реализует программу экологического мониторинга акватории СМП [4].

В заключение стоит сказать, что Северный морской путь постепенно превращается из нишевого маршрута в полноценный международный транспортный коридор. Его развитие открывает для мировой торговли новые экономические возможности: сокращение транзитного времени на 15-20 дней, по сравнению с маршрутом через Суэцкий канал, экономию топлива, а в следствие уменьшение издержек.

Однако эти преимущества достигаются ценой растущего давления на хрупкую арктическую экосистему. Выбросы черного углерода, риски разливов нефти, всё это одновременно делает СМП доступным, но в тоже время, это усиливает уязвимость и разрушает красоту природы данного региона.

Ключевой вывод заключается в том, что успешное развитие СМП невозможно без решения экологических проблем и задач. Для достижения устойчивого развития необходимы: внедрение более строгих экологических стандартов, развитие «зеленых» технологий судоходства, создание систем комплексного мониторинга и активное использование цифровых решений для минимизации рисков. Только такой подход позволит сохранить Арктику для будущих поколений, реализуя при этом ее экономический потенциал.

Список литературы

1. Северный морской путь // Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Северный_морской_путь
2. Арктическая магистраль XXI века: как развивается Северный морской путь // RT на русском. — 18 февраля 2026. — URL: https://russian.rt.com/russia/article/1597349-sevmorput-istoriya-razvitie
3. 500 лет Севморпути: от поморских кочей до атомных ледоколов // Островской музей. — 1 декабря 2025. — URL: https://www.ostmuzey.ru/uncategorized/500-let-sevmorputi-ot-pomorskih-kochej-do-atomnyh-ledokolov/
4. Северный морской путь: «коридор» между Тихим и Атлантическим океаном // Моя Планета. — 23 сентября 2025. — URL: https://moya-planeta.ru/travel/view/severnyj_morskoj_put
5. Северный морской путь (СМП) // Мегаэнциклопедия Кирилла и Мефодия. — URL: https://megabook.ru/article/Северный%20морской%20путь%20(СМП)
6. Дорога во льдах — 500 лет Северному морскому пути // Русское географическое общество. — 16 сентября 2025. — URL: https://www.rgo.ru/ru/article/doroga-vo-ldah-500-let-severnomu-morskomu-puti
7. Nature Communications. Доступ к Арктическому морскому пути меняет глобальные выбросы углерода в судоходстве // Климатический центр Росгидромета. — 14 октября 2025.
8. ICCT (2025). *Black carbon and CO_2 emissions from EU-regulated shipping in the Arctic.* International Council on Clean Transportation. URL: https://theicct.org/publication/black-carbon-and-co2-emissions-from-eu-regulated-shipping-in-the-arctic-may25/

СЕКЦИЯ 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ РОСТА CO_2 НА КЛИМАТ (ПРИМЕР ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ)

Лобанов В.А., Литюшкина С.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
va_lobanov56@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются два возможных механизма влияния роста CO_2 на температуру воздуха: прямое и опосредованное через изменение атмосферной циркуляции. На примере температуры воздуха средней для акватории Баренцева моря показано, что ее изменениям больше соответствует механизм ступенчатых переходов от одного стационарного состояния к другому, что также проявляется в индексах атмосферной циркуляции, таких как: северо-атлантическое колебание (NAO), атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO) и арктическое колебание (AO). При этом квази-однородным стационарным периодам в индексах и температуре воздуха соответствуют периоды разных скоростей роста в динамике CO_2.
Ключевые слова: Температура воздуха, CO_2, индексы атмосферной циркуляции, механизмы влияния, Баренцево море.

AN ALTERNATIVE MECHANISM OF THE INFLUENCE OF CO_2 GROWTH ON CLIMATE (EXAMPLE OF AIR TEMPERATURE IN THE BARENTS SEA)

Lobanov V.A., Lityushkina S.A.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Annotation. Two possible mechanisms of the influence of CO_2 growth on air temperature are considered: direct and indirect through changes in atmospheric circulation. Using the example of the average air temperature for the Barents Sea, it is shown that its changes are more consistent with the mechanism of stepwise transitions from one stationary state to another, which is also manifested in atmospheric circulation indices such as the North Atlantic oscillation (NAO), Atlantic multidecadal oscillation (AMO) and the Arctic oscillation (AO). At the same time, quasi-homogeneous stationary periods in the indices and air temperature correspond to periods of different growth rates in the dynamics of CO_2.
Keywords. Air temperature, CO_2, atmospheric circulation indices, mechanisms of influence, Barents Sea.

В современных физико-математических моделях климата учитывается прямое влияние CO_2 на температуру воздуха и другие климатические характеристики [1,2,3]. В связи с тем, что из всех факторов изменения климата только CO_2 растет в виде монотонного тренда, то и расчетные по модели температуры воздуха также должны расти в виде монотонного тренда. Однако многочисленные исследования структуры многолетних рядов температур воздуха свидетельствуют о том, что во многих случаях современным изменениям больше соответствует модель ступенчатого роста среднего значения при переходе от одного квазистационарного состояния к другому, чем модель монотонного тренда [4-7]. Аналогичные ступенчатые изменения имеют место в индексе Северо-Атлантического колебания [8]. Поэтому можно проверить гипотезу, что рост CO_2

влияет на климатические характеристики не прямо, а косвенно через изменения атмосферной циркуляции, которая представлена соответствующими индексами.

В данном исследовании в качестве климатического отклика рассматривается температура воздуха средняя по Баренцеву морю, полученная на основе данных многолетних наблюдений на 25 метеорологических станциях южного побережья моря и островов. Осреднение температуры по территории выполнено для того, чтобы исключить влияние локальных особенностей и уменьшить случайную естественную составляющую. В качестве предполагаемых факторов, влияющих на изменение этих средних температур выбраны как естественные факторы атмосферной циркуляции, оказывающие влияние на рассматриваемый регион, так и антропогенные в виде концентрации углекислого газа CO_2 в ppm. К естественным факторам атмосферной циркуляции для рассматриваемого региона относятся: северо-атлантическое колебание (NAO); атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO) и арктическое колебание (AO).

Прежде всего были построены регрессионные уравнения с оценкой статистической значимости их коэффициентов за весь период наблюдений [9]. В результате получены следующие эмпирические зависимости за весь рассматриваемый период с 1960 по 2024 гг. для средних месяцев всех сезонов года, где в скобках под каждым фактором дан его вклад в объясненную уравнением сумму квадратов отклонений от среднего значения в % [10]:

$$T_1 = 1.01\ САК + 0.0286\ CO_2 - 20{,}3 \qquad R=0{,}63, \qquad (1)$$
$$(71{,}8) \quad (28{,}2)$$
$$T_4 = 0.569\ САК + 0.0334\ CO_2 - 17{,}2 \qquad R=0{,}57, \qquad (2)$$
$$(21{,}0) \quad (79{,}0)$$
$$T_7 = 1.01\ АК + 0.01\ CO_2 + 3.61 \qquad R=0{,}45, \qquad (3)$$
$$(58{,}9) \quad (41{,}1)$$
$$T_{10} = 0.87\ САК + 0.04\ CO_2 + 3.61 \qquad R=0{,}69, \qquad (4)$$
$$(42{,}1) \quad (57{,}9)$$

где: R – коэффициент множественной корреляции уравнения, T_1, T_4, T_7, T_{10} – средние температуры воздуха января, апреля, июля и октября.

Полученные уравнения, хотя и имеют невысокие коэффициенты корреляции, но включают в себя при статистически значимых коэффициентах уравнений как естественные факторы (САК или АК), так и антропогенные в виде CO_2. При этом вклады факторов циркуляции в уравнения варьируют от 21% в апреле до 71,8% в январе, а вклады CO_2 изменяются от 28,2% в январе до 79% в апреле.

Для повышения эффективности уравнений и увеличения R было осуществлено скользящее осреднение временных рядов с периодами 3 и 5 лет с целью уменьшить высокочастотную случайную составляющую временных рядов. В результате получены следующие уравнения при периоде скользящего осреднения 3 года:

$$T_{1(3)} = 0.715\ АК + 0.0364\ CO_2 - 22{,}7 \qquad R=0{,}77, \qquad (5)$$
$$(20.0) \quad (80.0)$$
$$T_{4(3)} = 0.615\ САК + 0.0363\ CO_2 - 22{,}7 \qquad R=0{,}77, \qquad (6)$$
$$(8.3) \quad (91.8)$$
$$T_{7(3)} = -0.04\ AMO - 0.02\ CO2 + 0.07 \qquad R=0.65 \qquad (7)$$
$$(85.1) \quad (14.9)$$
$$T_{10(3)} = 0.615\ САК + 0.0363\ CO_2 - 22{,}7 \qquad R=0{,}77, \qquad (8)$$
$$(8.3) \quad (91.8)$$

Для скользящего осреднения в 5 лет уравнения имеют вид:

$$T_{1(5)} = 0.674\ АК + 0.0374\ CO_2 - 23{,}2 \quad R=0{,}84, \quad (9)$$
(16.7) (87.9)

$$T_{4(5)} = 0.717\ САК + 0.0371\ CO_2 - 18{,}6 \quad R=0{,}89 \quad (10)$$
(6.5) (93.5)

$$T_{7(5)} = -0.05\ АМО - 0.02\ CO_2 + 0.07 \quad R=0.73, \quad (11)$$
(86.7) (13.3)

$$T_{10(5)} = 0.615\ САК + 0.0363\ CO_2 - 22{,}7 \quad R=0{,}77 \quad (12)$$
(8.3) (91.8)

Как следует из полученных уравнений (5)-(12), их коэффициенты корреляции при увеличении периода скользящего осреднения увеличиваются, но в то же время изменяются вклады факторов, особенно быстро растет вклад CO_2 , и происходит изменение одних факторов на другие, как АК на АМО для температур июля. Увеличение связанности температуры с CO_2 за счет процедуры осреднения справедливо, если она в действительности растет также монотонно. В целом скользящее осреднение увеличивает автокорреляцию временного ряда и вносит в него искажения за счет сглаживания. Поэтому необходимо соблюсти оптимум между периодом сглаживания и достоверностью в представлении структуры ряда.

Однако, многолетние ряды температур разных месяцев, показанные на рис.1 свидетельствуют, что изменений может и не быть как в июле, или они могут носит характер резких переходов от одного стационарного среднего к другому, как для температур остальных месяцев.

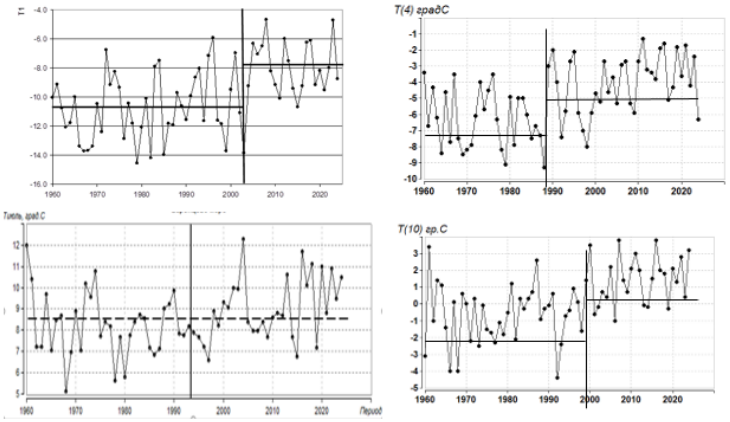


Рисунок 1 − Многолетние ряды средних температур по станциям побережья и островов Баренцева моря и их аппроксимация моделями стационарного и нестационарного среднего

Выполненная оценка стационарности средних значений, полученных для двух частей ряда, по критерию Стьюдента показала, что для температур января, апреля и октября средние статистически значимо отличаются при уровне значимости менее 1%, а для температур июля не отличаются при уровне значимости 5%. Поэтому можно предположить, что резкие изменения обусловлены не влиянием монотонного роста CO_2, а какими-то другими факторами, которые имеют такие же резкие изменения. Поэтому временные ряды температур были разделены на две стационарные части и для каждой из них построены уравнения от факторов.

Так, для температуры января за первый стационарный период (1960-2003гг.) получены следующие уравнения:

$$T_1 = 1.13\ САК - 10,8 \qquad R=0,52, \qquad (13)$$

$$T_{1(3)} = 0.915\ АК - 10,4 \qquad R=0,66, \qquad (14)$$

$$T_{1(5)} = 0.968\ АК - 10,4 \qquad R=0,73, \qquad (15)$$

а за второй стационарный период (2004-2024 гг.):

$$T_1 = 5.26\ АМО - 8,5 \qquad R=0,53, \qquad (16)$$

$$T_{1(3)} = 5.301АМО + 0.671\ АК - 8,42 \qquad R=0,74 \qquad (17)$$

(68,4) (31,6)

Как следует из уравнений (13)–(17) в первую половину ряда динамику температуры января определяли САК или АК, а во вторую половину появился новый фактор – АМО.

Из графиков рис.2 следует, что САК и АМО также, как и температура января, практически ступенчато увеличились, но с переходом к новым условиям в разные годы.

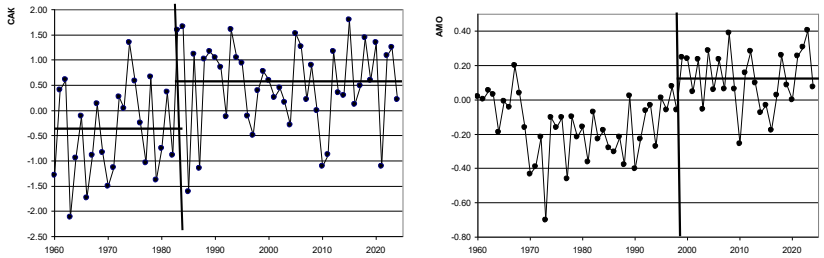


Рисунок 2 − Многолетние ряды январских индексов САК и АМО с переходом средних значений из одного стационарного состояния в другое

Дополнительное увеличение АМО видимо и привело с запаздыванием к увеличению январской температуры. Поэтому можно предположить, что влияние роста концентрации CO_2, скорость которой выросла в самом конце 1990х, на резкое увеличение температуры воздуха января Баренцева моря с 2004 г. происходило не прямо, а опосредовано: вначале через увеличение зимнего САК в 1980х, а затем и через резкое увеличение АМО в самом конце 1990х.

На графике роста CO_2 (рис.3) можно также видеть увеличение скорости роста концентрации с конца 1990х.

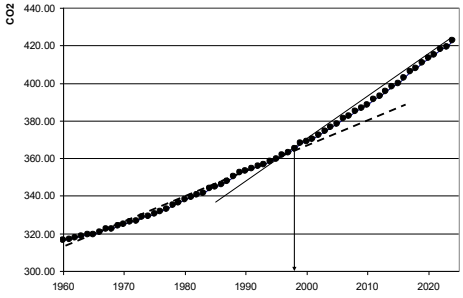


Рисунок 3 − Многолетний ряд CO_2 за январь месяц с выделением периодов разных по скоростям роста

Таким образом, если рассматривать весь период наблюдений, то формируется «ложная» корреляция между температурой воздуха января T_1 и CO_2, т.к.. та и другая переменные увеличиваются. Но это увеличение имеет разный вид: ступенчатые переходы от одного стационарного состояния к другому для температуры воздуха января и монотонных рост для CO_2. Если же построить уравнения отдельно для каждого стационарного периода, то будут влиять и разные факторы: АК или САК до 2003 г. и АМО после 2003 г. Для частичного исключения высокочастотной случайной составляющей и повышения надежности уравнений между температурой воздуха и индексами атмосферной циркуляции можно осуществлять скользящее осреднение, но с шагом не более 3 лет.

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. *Chen, D.* et al., 2021: Framing, Context, and Methods [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (ed.)]. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, In Press, Cambridge University Press. Available t: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_01.pdf
3. *Chen, C.-A.; Hsu, H.-H.; Liang, H.-C.* (2021). Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the seasonal extreme precipitation in the Western North Pacific and East Asia. Weather Clim. Extrem. 31, 100303.
4. *Лобанов В.А., Тощакова Г.Г.* Проявление современных изменений климата на территории Костромской области. — Кострома: ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», 2013. — 179 с.
5. *Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С.* Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография. СПб.: РГГМУ, 2018. 190 с.
6. *Лобанов В. А., Наурозбаева Ж. К.* Влияние изменения климата на ледовый режим Северного Каспия. СПб.: РГГМУ, 2021. 140 с.
7. *Мами Магбини Токпа, Лобанов В.А.* Современные климатические изменения температуры воздуха в Центральной Африке. // Гидрометеорология и экология, РГГМУ Санкт-Петербург. № 69, 2022, с.722-745.
8. *Лобанов В. А., Тощакова Г. Г.* Особенности и причины современных климатических изменений в России // Географический вестник. Пермский университет. 2016. No 3(38). С. 79—89.
9. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб, РГГМУ, 2008. 408 с.
10. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ [Текст]: [в 2 кн.] / Н. Дрепер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Финансы и статистика, 1986-1987. - 22 см. - (Математико-статистические методы за рубежом).

О СВЯЗЯХ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПАРАМЕТРАМИ ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Торопова М.Л., Михайловский Ю.П.
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург
marina-toropova@mail.ru

Аннотация. Исследованы связи напряженности электрического поля в облаке, под облаком и вблизи его верхней границы с выбранными параметрами облака по данным численного моделирования. Показано, что напряженность электрического поля под облаком лучше коррелирует с напряженностью внутри облака, чем соответствующее значение над верхней границей. Показано, что существуют достаточно сильные связи напряженности поля в облаке и объемов, занятых частицами осадков и эти связи могут иметь различную силу для всего временного ряда развития облака и отдельно для стадии развития.
Ключевые слова. Численное моделирование, конвективное облако, напряженность электрического поля.

ON THE RELATIONSHIP BETWEEN ELECTRIC FIELD STRENGTH AND THUNDERSTORM CLOUDS PARAMETERS BASED ON 3D NUMERICAL SIMULATION

Toropova M.L., Mikhailovskii Yu.P.
Voeikov Main Geophysical Observatory, St.Petersburg

Annotation. The relationships between the electric field strength in, beneath, and near the cloud top height with selected cloud parameters were studied using numerical modeling data. It was shown that the electric field strength beneath the cloud correlates better with the strength inside the cloud than the corresponding value above the upper boundary. It was shown that there are fairly strong relationships between the field strength in the cloud and the volumes occupied by precipitation particles, and these relationships can vary in strength for the entire cloud development time series and for specific stages of development.
Keywords. Numerical modeling, convective cloud, electric field strength.

Введение. Формирование электрических разрядов в облаках является одним из наиболее востребованных направлений исследований как с точки зрения физики, так и в целях прогноза погоды. Многочисленные работы (в том числе и авторов доклада) посвящены вопросам установления и оценки связей между частотой электрических разрядов и различными (радиолокационными) параметрами облаков [1]. Считается, что ключевая роль в электризации принадлежит крупным ледяным частицам – крупе и граду. Натурные измерения электрических параметров в таких работах обеспечиваются системами мониторинга грозовой активности, предоставляющими данные о координатах и времени разрядов, их типе и связанных с ними токами.

Одним из измеряемых электрических параметров является приземная напряженность электрического тока (градиент потенциала). Известно, что ее вертикальная составляющая Ez является крайне чувствительной к различным изменениям состояния среды параметром. Показано, что из всех явлений погоды (туманы, различные виды осадков) грозам соответствуют наибольшие значения стандартного отклонения средней относительной флуктуации [2]. Наблюдения демонстрируют, что приземные значения Ez под грозовыми облаками могут колебаться с амплитудой, достигающей 20 кВ/м [3-6]. Измерения флюксметров могут использоваться для дополнения данных систем мониторинга грозовой активности и для восстановления структуры заряда в облаках. В то же время интерпретация таких измерений осложняется

множеством факторов, влияющих на показания флюксметров. Кроме того, перемещение облаков относительно стационарных приборов не позволяет определить с достаточной точностью изменения Ez под облаком во времени.

Другим параметров, представляющим интерес, является напряженность электрического поля над верхней границей облака. Такие измерения, выполняемые с борта самолета, также являются важным показателем электризации облаков [7].

В настоящем докладе представлены результаты исследования связей напряженности электрического поля в облаке со значением напряженности над его верхней границей, под облаком (вблизи подстилающей поверхности), а также всех этих параметров с объемами, занятыми различными микрофизическими фракциями. Исследование выполнено при помощи трехмерной нестационарной модели облачной конвекции, разработанной в Росгидромете под руководством ФГБУ «ГГО» [8]. Начальными данными указанной модели являются температурно-влажностное строение атмосферы и распределение напряженности электрического поля, соответствующее хорошей погоде (при отсутствии облачности). Электрические характеристики рассчитываются при помощи уравнения Пуассона, учитываются микрофизические процессы заряжения облачных частиц. Результаты моделирования представляют собой трехмерные поля элементов, таких как водности (ледности) микрофизических фракций, поле скоростей, объемная плотность заряда и проч. Расчет выполнен для 1 июля 2023 г., в этот день в Санкт-Петербурге наблюдались мощные грозы.

Динамика развития облака. При используемых в численном расчете атмосферных условиях облако появляется в расчетной области на 23 мин. Максимальная высота верхней границы облака составила 11,6 км, наибольшие значения скорости восходящего потока – 22 м/с. Облако перешло в грозовую стадию на 40 мин расчета. В это время высота его верхней границы была равна 7,5 км, а восходящие потоки не превышали 18 м/с.

Для моделируемого облака получены большие значения водности частиц осадков. Максимальное значение водности дождевых капель (QR) было равно 11,7 г/м^3, а ледности градин (крупы, QI) – 9,6 г/м^3. Представляет интерес исследование изменения объемов облака, занятых этими микрофизическими фракциями. На рис. 1 временной ход демонстрирует, что к 45 мин расчета прекращается увеличение абсолютных значений QR и QI (в это время облако переходит в стадию зрелости, пройден пик максимальной интенсивности выпадающих осадков), однако продолжается увеличение переохлажденных объемов, занятых дождевыми каплями (VQR_{cold}) и градинами (VQI_{cold}). Уменьшение обозначенных объемов начинается тогда, когда облако по всем признакам находится в стадии диссипации: уменьшается водность частиц, скорости восходящих потоков, вертикальная мощность облака и др. параметры.

Напряженность электрического поля под облаком изменяется от −18 до 4 кВ/м. На стадии развития облака она имеет положительные значения, в дальнейшем – отрицательные. Наибольшие зафиксированные значения получены для облака на стадии зрелости (рис. 2). Напряженность электрического поля над верхней границей облака преимущественно отрицательна, ее значения варьируются от −23 до 0,3 кВ/м.

Временной ход $Ez|^{НГО}$, $Ez|^{ВГО}$ и экстремумов напряженности электрического поля в облаке (рис. 2) демонстрирует, что напряженность вблизи подстилающей поверхности сильнее реагирует на начало разрядов – в то время как напряженность над верхней границей имеет в момент начала разрядов величину 0,3 кВ/м. При этом наибольшие абсолютные значения Ez в облаке при начале разрядов связаны являются отрицательными и наблюдаются на высоте 3 км. Очевидно, что на знак $Ez|^{НГО}$ оказывает влияние электрическая структура облака: положительным значениям $Ez|^{НГО}$ соответствует расположение положительного экстремума Ez вблизи нижней границы

облака. Отрицательные значения $Ez|^{НГО}$ наблюдаются в то время, когда отрицательный экстремум Ez в облаке располагается в нижней части облака (ниже основного положительного максимума Ez). В целом, как и ожидалось, значения напряженности под облаком и над его верхней границей повторяют экстремумы напряженности поля в облаке.

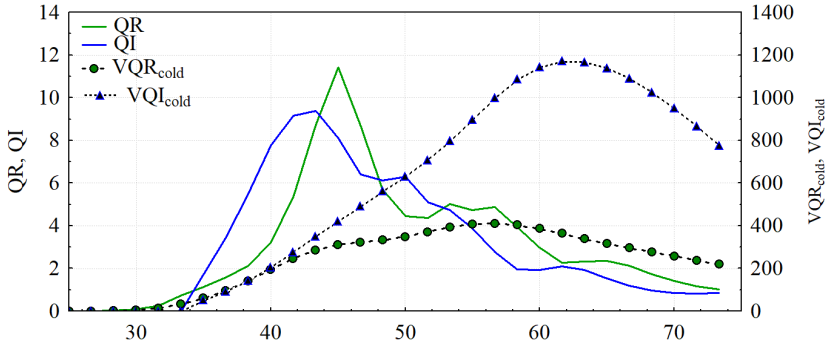


Рисунок 1 – Временной ход максимальных в расчетной области значений водности дождевых капель (QR, г/м^3), ледности градин (QI, г/м^3), переохлажденного объема с дождевыми каплями (VQR$_{cold}$, км^3) и градинами (VQI$_{cold}$, км^3) с шагом по времени 100 с.

Оценка связей напряженности электрического поля. Для оценки связей между параметрами было выполнено Z-преобразование и рассчитан коэффициент корреляции.

Показано, что существует сильная связь между абсолютными значениями напряженности электрического поля под облаком и максимумом напряженности поля в облаке: коэффициент корреляции составил 0,82 для всего рассматриваемого периода развития облака и 0,88 – только для стадии развития. В то время как связи $|Ez|^{ВГО}|$ с |Ez| слабее: коэффициент корреляции был равен 0,68 и 0,35 соответственно.

Для исследований связи напряженности поля в облаке с объемами, занятыми микрофизическими фракциями и другими параметрами, была рассчитана величина $ABSE|^{MAX100}$, представляющая собой максимум абсолютного значения Ez в облаке за 100 сек (время вывода трехмерных пространственных файлов). Получено, что наиболее сильные связи существуют с отношениями объемов с градом (переохлажденного к «теплому», r = 0,75 – для всего временного ряда). Для прочих рассматриваемых параметров показано, что связи сильнее, если рассматривать отдельно стадию развития облака. Так, коэффициент корреляции между $ABSE|^{MAX100}$ и суммарным объемом, занятым дождевыми каплями, на стадии развития составил 0,77; для суммарного объема градин аналогичная величина была равна 0,73. Корреляция между напряженностью поля в облаке и отношениями объемов, занятыми дождевыми каплями, имела r = 0,79.

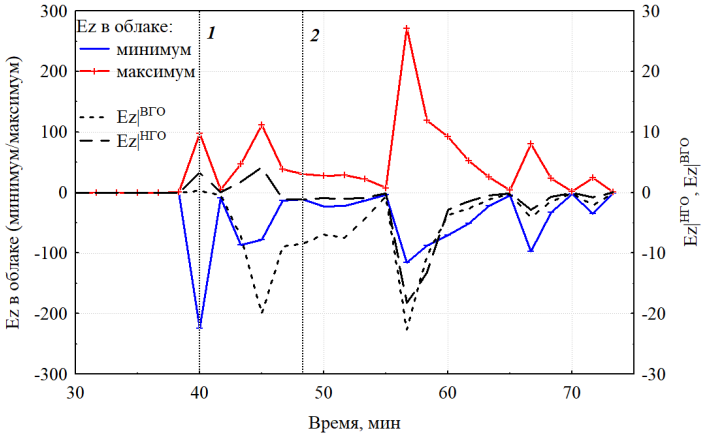


Рисунок 2 – Временной ход экстремальных значений вертикальной составляющей напряженности электрического поля (Ez, кВ/м) с шагом по времени 100 с: максимального и минимального значения в облаке, экстремальных значений над его верхней границей ($Ez|^{ВГО}$) и под облаком вблизи подстилающей поверхности ($Ez|^{НГО}$). Вертикальными линиями обозначено начало молниевой активности (1) и окончание стадии развития облака (2)

Выводы. При помощи численного моделирования исследованы связи напряженности электрического поля в облаке, под облаком и над его верхней границей и некоторых параметров облаков. Получено, что значения Ez под облаком сильнее связаны со значениями внутри облака, чем напряженность поля над верхней границей облака. Показано, что существуют связи между напряженностью поля в облаке и объемами, занятыми частицами осадков и их отношениями. Получено, что эти связи могут иметь различную силу для всего временного ряда и отдельно для стадии развития.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00219, https://rscf.ru/project/25-27-00219/.

Список литературы

1. *Довгалюк Ю. А., Веремей Н. Е., Синькевич А. А. и др.* Исследование механизмов электризации и связи частоты электрических разрядов с радиолокационными характеристиками грозового облака в Китае // Метеорология и гидрология. 2020. № 10. С. 63-72.

2. *Попов И. Б.* Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // Труды ГГО. 2008. Вып. 558. С. 152−161.

3. Bennett A. J., Harrison R. G. Atmospheric electricity in different weather conditions // Weather. 2007. Vol. 62. Pp. 277–283. https://doi.org/10.1002/wea.97

4. Козлов В. И., Муллаяров В. А., Стародубцев С. А., Торопов А. А. Всплески нейтронов во время молниевых разрядов облако−земля // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77, № 5. С. 652.

5. *Клименко В. В., Мареев Е. А., Шаталина М. В., Шлюгаев Ю. В., Соколов В. В., Булатов А. А., Денисов В. П.* О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 11−12. С. 864−874.

6. *Пустовалов К. Н., Нагорский П. М.* Сравнительный анализ электрического состояния

приземного слоя атмосферы при прохождении кучево-дождевых облаков в теплый и холодный периоды года // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 451−455.
7. *Михайловский Ю. П.* Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков // Труды ГГО. 2015. Вып. 577. С. 197-211.
8. *Веремей Н. Е., Довгалюк Ю. А., Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Морозов В. Н., Пастушков Р. С.* Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. Вып. 582. С. 45−91.

ИЗУЧЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛЕЙ COSMO И WRF ТЕМПЕРАТУРНОГО И ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ЗИМНЕГО ПЕРИОДА В ЦЕНТРЕ ЕТР

Докукин С. А.[1], Тихоненко Н. Д.[1,2]
[1] Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова, Москва
[2] НПЦ «Мэп Мейкер», Москва
dokukinsa@ifaran.ru, n.tikhonenko@gismeteo.com

Аннотация. Обсуждение отличий, наблюдаемых при моделировании температурного и ветрового режима на Европейской территории России с помощью мезомасштабных моделей COSMO-CLM и WRF-ARW с учетом влияния урбанизированных территорий.
Ключевые слова. COSMO, WRF, ЕТР, городской остров тепла.

STUDYING THE WINTER TEMPERATURE AND WIND REGIME IN THE CENTER OF THE ER USING THE COSMO AND WRF MODELS

Dokukin S. A.[1], Tikhonenko N. D.[1,2]
[1] A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow
[2] Mapmakers Group LTD, Moscow

Annotation. The discussion of differences in temperature and wind regimes in the European territory of Russia observed in the simulations with mesoscale models COSMO-CLM and WRF-ARW, taking into account the influence of urbanized areas.
Keywords. COSMO, WRF, ER, urban heat island.

Для описания мезоклиматических процессов широко используются мезомасштабные модели COSMO-CLM [1] и WRF-ARW [2]. Использование городских параметризаций, таких как TERRA-URB [3] и SLUCM [4], позволяет учитывать влияние городской подстилающей поверхности. Однако при моделировании температурного и ветрового режима эти модели дают несколько отличающиеся результаты. Ранее было обнаружено, что наибольшие отличия наблюдаются в зимний период [5].

Отличия в результатах моделирования связаны с наличием в моделях особенностей математического описания и отличиями в схемах параметризации, в частности с различным подходом к описанию городской модели подстилающей поверхности. Например, в схемах TERRA-URB и SLUCM установленные по умолчанию значения антропогенных потоков тепла (АПТ) несколько отличаются - в SLUCM представлены АПТ в большем количестве населенных пунктов на ЕТР, а в TERRA-URB существенно больше величина АПТ в крупных городах.

Данная работа посвящена исследованию многолетнего (10 сезонов) температурного и ветрового режима зимнего периода в центре ЕТР. Результаты, полученные с помощью моделей COSMO-CLM со схемой TERRA-URB и WRF-ARW со схемой SLUCM, сравниваются с массивом метеонаблюдений и данными реанализа ERA5. Выявлено сходство между распределением антропогенных потоков тепла и увеличением приземной температуры, а также между распределением антропогенных

потоков тепла и увеличением приземной скорости ветра. Обнаружено уменьшение интенсивности городского острова тепла при увеличении скорости ветра.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФА им. А.М. Обухова РАН, регистрационный номер 125021001827-3.

Список литературы

1. http://www.clm-community.eu
2. *Skamarock, W. C. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Version 4 // NCAR Tech. Note (2019) 145, https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97.
3. http://www.cosmo-model.org/content/tasks/workGroups/wg3b/docs/terra_urb_user.pdf
4. *Kusaka H., Kimura F.* Coupling a Single-Layer Urban Canopy Model with a Simple Atmospheric Model: Impact on Urban Heat Island Simulation for an Idealized Case // JMSJ Ser. II (2004) 82, 67- 80, https://doi.org/10.2151/jmsj.82.67.
5. *Manco I. et al.* A Comparative Performance Study of WRF, COSMO and ICON Atmospheric Models for the Italian Peninsula at Very High Resolution //Tethys: revista meteorología y climatología mediterránea. (2023) 20. 1-20, https://doi.org/10.3369/tethys.2023.20.01.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ И СЦЕНАРИЕВ КЛИМАТА ДЛЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Груздев А.И., Лобанов В.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
gruzdev2542022@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на 22 метеорологических станциях на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга для оценки современных и будущих климатических изменений. Проведено сравнение результатов исторического эксперимента для пяти моделей климата проектов CMIP5 и CMIP6 с данными наблюдений на метеостанциях. Установлено, что модели проекта CMIP6 не эффективнее, чем проекта CMIP5, и выбрана наиболее подходящая модель климата проекта CMIP5 для данной территории. Оценка эффективности сценариев климата осуществлена для совместного периода наблюдений и эксперимента по модели за 2006–2026 гг. и показано, что сценарные данные необходимо корректировать. Также установлена наиболее подходящая проекция климата.
Ключевые слова. Оценка будущего климата, Ленинградская область, Санкт-Петербург, среднемесячная температура воздуха, проекты CMIP5 и CMIP6, сценарии.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF CLIMATE MODELS AND SCENARIOS FOR ST. PETERSBURG AND THE LENINGRAD REGION

Gruzdev A.I., Lobanov V.A.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Abstract. The long-term series of average monthly air temperatures at 22 meteorological stations in the Leningrad Region and St. Petersburg are considered to assess current and future climatic changes. The results of the historical experiment for five climate models in the CMIP5 and CMIP6 projects are compared with the data from observations at meteorological stations. It was found that the CMIP6 project models are no more effective than the CMIP5 project and the most suitable climate model of the CMIP5 project for this area was selected. The efficiency of climate scenarios was assessed for a joint observation period and an experiment based on the model for 2006–2026. It is shown that the scenario data needs to be adjusted. The most suitable climate projection has also been established.

Keywords. Assessment of future climate, Leningrad Region, Saint Petersburg, mean monthly temperature, CMIP6, CMIP5 projects, scenarios.

В современный период по всему миру, в том числе и в Российской Федерации [1] происходят климатические изменения, поэтому необходимо изучать и проводить оценку климатического состояния, не только всей климатической системы, но и различных регионов в отдельности. Изучение индивидуально взятых территорий, помогает тщательнее выявить особенности случающихся изменений.

В Ленинградской области и в Санкт-Петербурге расположены важнейшие административные и промышленные центры, функционирование которых находится в большой зависимости от климата и его колебаний.

Основным инструментом для будущей оценки изменений климата являются физико-математические модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), разработанные в различных центрах по всему миру в рамках проектов CMIP5/CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5/6), их насчитывается уже более 50 [2,3].

Использована созданная авторами региональная база данных многолетних рядов наблюдений продолжительностью, в среднем, около 110 лет с последним годом наблюдений 2026 г. для среднемесячной температуры воздуха, и состоящая из 22 пунктов наблюдений [4].

Расположение рассматриваемых метеостанций приведено на рисунке 1.

В работе применена методика, основанная на совместном использовании результатов статистического моделирования современных изменений климата и будущих сценарных оценок по физико-математическим моделям, включающая выбор наиболее подходящей для территории модели климата и корректировку сценарных оценок по выбранной модели с учетом поправок на локальные особенности климата [5,6].

В данной работе решались две задачи:

– выбор наиболее подходящей версии модели климата для территории из двух проектов CMIP5 и CMIP6;

– оценка достоверности и эффективности сценарных значений.

Для решения первой задачи проведено сопоставление средних значения температуры из исторического эксперимента по 5 моделям и двум проектам CMIP за три периода в прошлом (1946–2005 гг., 1946–1975 гг. и 1976–2005 гг.) с данными наблюдений на метеостанциях.



Рисунок 1 – Расположение метеостанций с наблюдениями за температурой воздуха

В таблице 1 представлены средние по территории погрешности (в ºС), которые являются разностями средних за период температур между данным исторического эксперимента и наблюдений, для 5 климатических моделей: канадской CanESM, японской MIROC, китайской BCC, французской IPSL, российской INM в двух проектах. В табл.1 также приведены средние квадратические отклонения (СКО) для территории как по данным исторического эксперимента, так и наблюдений (СКОфакт). Жирным шрифтом представлены наименьшие систематические погрешности.

Из таблицы 1 следует, что все модели занижают температуру воздуха января на территории Ленинградской области из-за недоучета отепляющего влияния Финского залива. Получено, что модели BCC и IPSL проекта CMIP5 дают лучший результат, чем проекта CMIP6, т.к. средние погрешности по территории ниже в 1,3–1,6 раза. Хотя модели проекта CMIP6 считаются улучшенной версией моделей проекта CMIP5, но это оказалось справедливо только в модели MIROC, для которой в CMIP6 погрешности для всех периодов меньше, чем в проекте CMIP5.

Результаты по модели канадского центра сопоставимы для разных периодов времени и имеют наименьшую систематическую погрешность, поэтому для дальнейшего исследования будет использована модель CanEsm проекта CMIP5.

Также необходимо отметить, что сравнивались средние за период температуры, а не температуры каждого года, т.к. климатические модели не воспроизводят естественную климатическую изменчивость. Это показывают низкие и статистически незначимые коэффициенты корреляции (R=0,0–0,1) между многолетними рядами температур в пунктах наблюдений и данных исторического эксперимента, интерполированных в точку пространства с координатами метеостанций. Также не связаны между собой даже средние многолетние температуры по данным наблюдений и исторического эксперимента по территории. Отсюда вывод, что климатические модели не воспроизводят не только межгодовую, но и пространственную изменчивость.

Таблица 1 – Погрешности и СКО (в ºС*) моделей климата для территории Ленинградской области в проектах CMIP5 и CMIP6 для температур воздуха января*

	Модель	CanEsm		MIROC		BCC		IPSL		INM	
Период	Проект	CMIP5	CMIP6	CMIP5	CMIP6	CMIP5	CMIP6	CMIP5	CMIP6	CMIP5	CMIP6
1946–2005	Средн. Погр.	**-2,4**	**-2,5**	-3,7	**-2,8**	-7,3	-9,6	-4,6	-6,4	-6,3	-4,4
	СКО (СКОфакт =4,3 ºС)	4,2	4,0	3,6	4,3	5,0	5,6	4,6	5,5	4,5	4,4
1946–1975	Средн.Погр.	**-2,6**	**-2,5**	**-2,8**	**-2,2**	-7,9	-8,8	-4,7	-6,9	-6,1	-4,7
	СКО (СКОфакт =4,4ºС)	4,6	4,8	3,7	4,7	5,4	5,6	4,5	4,7	4,9	4,2
1976–2005	Средн.Погр.	**-2,3**	**-2,5**	-4,6	-3,2	6,7	10,4	-4,8	-5,9	-4,2	-6,3
	СКО (СКОфакт =4,3ºС)	3,8	3,1	3,5	3,9	4,4	5,6	4,7	6,0	4,2	4,4

Вторая задача данного исследования – это оценка достоверности сценарных значений для выбранной наиболее подходящей для территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга климатической модели CanEsm проекта CMIP5. В связи с тем, что для проекта CMIP5 сценарные оценки имеют место с 2005 г., а данные наблюдений за

температурой января имеются уже до 2026 г. включительно, то можно сравнить средние значения за период 21 год (2005–2026 гг.) по наблюденным данным и трем сценариям RCP 2,6, RCP 4,5 и RCP 8,5. Здесь же можно отметить, что по данным наблюдений за период 2005–2026 гг. коэффициенты корреляции между температурой и временем (годом наблюдений) невелики и статистически незначимы (R=0,0–0,2). Поэтому вычисление среднего значения за период правомерно.

В таблице 2 представлена средняя по территории разница $\Delta T=T_{набл}–T_{модел}$ (погрешность) между фактически наблюденными и модельными значениями средних за период 2006–2026 гг. по каждой метеостанции по различным сценариям RCP2,6/4,5/8,5 модели CanESM проекта CMIP5.

В таблице 2: «ΔТ без корр.» – это ΔТ непосредственно по данным сценариев без корректировки в (ºС), «ΔТ с корр.» – это ΔТ с корректировкой (в ºС) по среднему градиенту изменения средних значений в настоящем и будущем [5], ΔТ/СКО – отношение к естественной изменчивости за период 2006–2026 гг.

Из таблицы следует, что модель занижает значения в среднем по территории на 3–3,4 ºС в зависимости от проекции, что составляет 1–1,2СКО. Такие оценки будущего изменения температур воздуха использовать ненадежно, поэтому необходимо корректировать эти значения. С учетом корректировки средняя разность по территории варьирует от -0,2 ºС для проекции RCP2,6 до -1,4 ºС для проекции RCP8,5, что соответственно составляет 0,05СКО и 0,5СКО.

Таблица 2 – Погрешности климатических сценариев RCP2,6, 4,5, 8,5 модели CanESM за период 2006–2026 гг. без корректировки и с корректировкой сценарных значений для территории Ленинградской области

Погрешности	Сценарии (проекции)		
	RCP2,6	RCP4,5	RCP8,5
ΔТ без корр. (ºС)	3,1	3,0	3,4
ΔТ/СКО	1,0	1,0	1,2
ΔТ с корр. (ºС)	-0,2	-0,5	-1,4
ΔТ/СКО	0,05	0,17	0,47

По результатам табл.2 можно сделать вывод, что для территории Ленинградской области и г. Санкт-Петербург изменения температуры воздуха происходят по благоприятной проекции RCP2,6, так как в этом случае погрешность наименьшая и составляет -0,2 ºС против -0,5 ºС для средней проекции RCP4,5 и даже -1,4ºС для наименее благоприятной проекции RCP8,5.

Исследование выполнено *в научной Лаборатории «Экология и климат» Российского государственного гидрометеорологического университета* ***за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-20034 «****Обоснование и разработка адаптационных мероприятий к изменениям климата и их последствиям для успешного развития агломерации Санкт-Петербурга и Ленинградской области с учетом экосистемных особенностей водно-зеленого каркаса, функционирования сельского хозяйства, транспортной и энергетической инфраструктуры и возникающих экологических рисков»* ***при поддержке Санкт-Петербургского научного фонда.***

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 676 с. EDN: JNIXIE

2. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY // USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
3. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge University Press. 3949 p.
4. *Груздев А. И.* Будущие климатические изменения температуры воздуха и осадков января и июля на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области / А. И. Груздев, В. А. Лобанов // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды: адаптация к изменениям климата: Материалы IV всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 24–28 ноября 2025 года. – Москва: ФГБУ "Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля", 2025. – С. 79-83. – EDN WSFFCL.
5.*Мами Магбини Токпа, Лобанов В. А., Короткова Н. В.* Оценка будущих температур воздуха Центральной Африки по сценариям проектов CMIP5 и CMIP6 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2023. Т. 23, вып. 1. С. 8–20. https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-1-8-20, EDN: NBJJYY
6. *Дроздов В.В.* Современные и будущие изменения температуры воздуха в Калининграде и Калининградской области / В.В. Дроздов, А.И. Груздев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2026. — №2 (164). — URL: https://research-journal.org/archive/2-164-2026-february/10.60797/IRJ.2026.164.33 (дата обращения: 19.02.2026). — DOI: 10.60797/IRJ.2026.164.33

ВЛИЯНИЕ УТОЧНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СЕТКИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД САНКТ-ПЕТЕРБУРГОМ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ WRF-ARW

Клецова В.А., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
vlada.kletsova@yandex.ru

Аннотация. Исследовано влияние уточнения вертикального разрешения в пограничном слое на характеристики планетарного пограничного слоя над Санкт-Петербургом в модели WRF-ARW 4.6. Урбанизированная поверхность задавалась с использованием городской схемы BEP и классификации локальных климатических зон LCZ на основе глобального набора CGLC-MODIS-LCZ. Сравнивались два численных эксперимента, различающиеся только вертикальной сеткой: базовая конфигурация с 34 массовыми уровнями и конфигурация с дополнительным сгущением уровней в нижней тропосфере, содержащая 49 уровней. Показано, что увеличение числа уровней внутри текущей высоты планетарного пограничного слоя приводит к локальным изменениям высоты PBLH и турбулентной кинетической энергии, наиболее заметным в ночные часы. При этом существенных различий в профилях потенциальной температуры не выявлено. Сопоставление с данными метеостанции показало, что уточненная вертикальная сетка улучшает воспроизведение скорости и направления ветра у поверхности, однако сопровождается увеличением ошибки температуры воздуха на высоте 2 м. Сделан вывод о целесообразности использования уточненной вертикальной сетки в дальнейших исследованиях структуры пограничного слоя над городом.
Ключевые слова. WRF-ARW, планетарный пограничный слой, PBLH, турбулентная кинетическая энергия, городская схема BEP, LCZ, Санкт-Петербург.

IMPACT OF REFINED VERTICAL RESOLUTION IN THE BOUNDARY LAYER ON PLANETARY BOUNDARY LAYER CHARACTERISTICS OVER ST. PETERSBURG FROM WRF-ARW SIMULATIONS

Kletsova V.A., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The study examines the impact of refined vertical resolution in the boundary layer on planetary boundary layer characteristics over St. Petersburg using the WRF-ARW 4.6 model. The urbanized surface was represented with the BEP urban canopy scheme and Local Climate Zones derived from the global CGLC-MODIS-LCZ dataset. Two numerical experiments differing only in vertical discretization were compared: a base configuration with 34 mass levels and an extra configuration with enhanced clustering of levels in the lower troposphere and 49 mass levels. The results show that the increased number of levels within the current planetary boundary layer depth leads to local changes in PBL height and turbulent kinetic energy, most clearly during nighttime conditions. At the same time, potential temperature profiles remain nearly unchanged. Comparison with meteorological station data indicates that the refined grid improves near-surface wind speed and wind direction, but increases the error of 2 m air temperature. The extra configuration is therefore considered preferable for further analysis of boundary layer structure over the city.
Keywords. WRF-ARW, planetary boundary layer, PBLH, turbulent kinetic energy, BEP urban scheme, LCZ, St. Petersburg.

Численные эксперименты с атмосферой города в модели WRF-ARW требуют корректного описания не только подстилающей поверхности, но и вертикальной структуры атмосферы в пределах планетарного пограничного слоя. Для урбанизированных территорий это особенно важно, поскольку интенсивность турбулентного перемешивания, высота слоя перемешивания и приземные метеорологические параметры чувствительны к вертикальному разрешению модели [1-4].

В работе анализируются результаты двух численных экспериментов, выполненных с использованием модели WRF-ARW 4.6 для района Санкт-Петербурга. В обоих расчетах урбанизированная поверхность задавалась с помощью городской схемы BEP и классификации локальных климатических зон LCZ на основе глобального набора CGLC-MODIS-LCZ [3-4]. Эксперименты различались только вертикальной сеткой. В конфигурации base использовалось 34 массовых уровня, в конфигурации extra - 49 уровней за счет дополнительного сгущения уровней в нижней тропосфере (auto_levels_opt = 2, dzbot = 30 м, dzstretch_s = 1.2, dzstretch_u = 1.06). Верхняя граница модели задавалась на уровне 50 гПа.

Диагностика выходных полей для 00 UTC 3 января 2021 г. показала, что высота первого модельного уровня над подстилающей поверхностью составляет около 24 м в варианте base и около 14 м в варианте extra. При высоте планетарного пограничного слоя порядка 0,40 км и 0,55 км соответственно это означает, что внутри ППС располагаются 5 уровней в базовой конфигурации и 9 уровней в уточненной. Следовательно, конфигурация extra обеспечивает более детальное описание структуры нижней части атмосферы над городом.

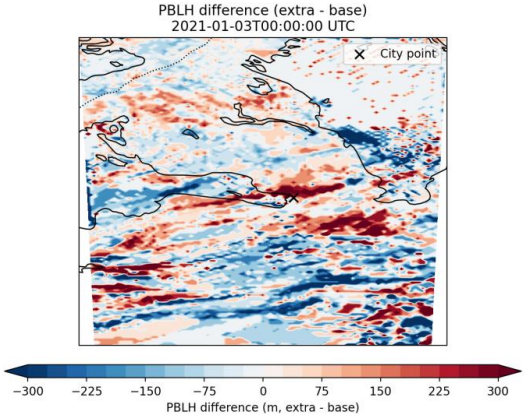


Рисунок 1 - Разность высоты планетарного пограничного слоя PBLH между экспериментами extra и base на 00 UTC 3 января 2021 г.

Пространственное поле разности PBLH между экспериментами extra и base для 00 UTC 3 января 2021 г. представлено на рисунке 1. В окрестности Санкт-Петербурга и вдоль побережья Финского залива наблюдаются чередующиеся положительные и отрицательные аномалии, где модуль разности достигает 250-300 м. При этом устойчивого крупномасштабного смещения, строго совпадающего с границами урбанизированной территории, не формируется.

Временной ход PBLH над точкой, соответствующей району Санкт-Петербурга, показан на рисунке 2. В обоих экспериментах высота ППС в зимних условиях меняется преимущественно в диапазоне 400-750 м, однако ее эволюция различается. Наиболее заметные расхождения возникают в ночные и переходные часы, когда значения PBLH в конфигурации extra могут как превышать, так и быть ниже значений base. Это указывает на отсутствие устойчивого систематического смещения, но на наличие чувствительности моделируемого ППС к выбору вертикальной сетки.

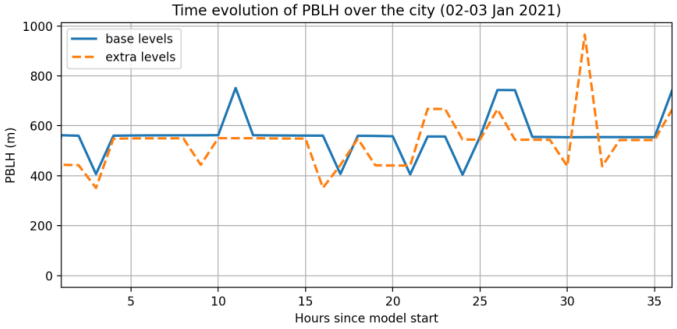


Рисунок 2 - Временной ход высоты планетарного пограничного слоя PBLH над Санкт-Петербургом в экспериментах base и extra за период с 00 UTC 2 января по 12 UTC 3 января 2021 г.

Дополнительную информацию о турбулентной структуре слоя дают вертикальные профили TKE_PBL (рисунок 3). Днем оба эксперимента демонстрируют близкие профили и практически одинаковую высоту ППС. Ночью различия усиливаются: в конфигурации extra турбулентная кинетическая энергия сохраняется на большей высоте, а диагностируемая высота ППС увеличивается примерно с 0,40 до 0,55

км. Следовательно, основное влияние уточнения вертикальной сетки проявляется в более глубоком и интенсивном ночном пограничном слое.

Проверка по данным метеостанции (59,9691º. с.ш., 30,2839º в.д.) показала неоднозначный эффект уточнения вертикальной сетки (таблица 1). Ошибка температуры воздуха на высоте 2 м возрастает с 0,37 до 0,85 ºС, однако ошибка скорости ветра на высоте 10 м уменьшается с 0,60 до 0,24 м/с, а ошибка направления ветра - с 2,2 до 1,0º. Таким образом, более детальное вертикальное разрешение улучшает воспроизведение ветрового режима у поверхности, хотя и не приводит к одновременному улучшению температуры воздуха.

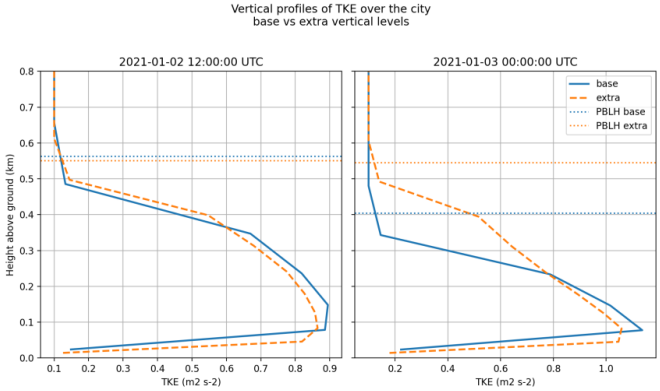


Рисунок 3 - Вертикальные профили кинетической энергии турбулентности TKE_PBL над Санкт-Петербургом в экспериментах base и extra для 12 UTC 2 января и 00 UTC 3 января 2021 г.

Таблица 1 - Ошибки прогноза по данным метеостанции для двух конфигураций модели WRF-ARW

Модель	Ошибка T2 (ºC)	Ошибка V10 (м/с)	Ошибка d10 (°)
BEP + LCZ (BASE)	0,3691	0,6	2,2
BEP + LCZ (EXTRA)	0,8459	0,237	1,0

В целом сравнение экспериментов BEP + LCZ base и BEP + LCZ extra показало, что выбор вертикальной сетки заметно влияет на динамико-турбулентные характеристики планетарного пограничного слоя над городом. Наиболее выраженный эффект наблюдается в ночное время, когда увеличение числа уровней внутри ППС сопровождается ростом TKE и высоты PBLH. С учетом того, что дальнейшая работа связана с детальным исследованием структуры пограничного слоя, для последующего моделирования целесообразно использовать конфигурацию extra.

Список литературы

1. *Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4. NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR, 2019. 145 p.
2. *Martilli A., Clappier A., Rotach M.W.* An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models // Boundary-Layer Meteorology. 2002. Vol. 104. P. 261-304.
3. *Stewart I.D., Oke T.R.* Local Climate Zones for Urban Temperature Studies // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93. No. 12. P. 1879-1900.
4. *Demuzere M., Kittner J., Martilli A. et al.* A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 3835-3873.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ВОЛНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАЗО-РАЗРЕШАЮЩЕЙ МОДЕЛИ И СПЕКТРА ПЛОТНОСТИ ВОЛНОВОЙ ЭНЕРГИИ

Бухарев А.А., Булгаков К.Ю., Фокина К.В.
Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН Москва
anton.bukharev@gmail.com

Аннотация. Исследуется комбинированный подход к оперативному прогнозированию максимальной высоты волн, основанный на совместном использовании спектральных моделей, фазо-разрешающих расчётов и методов машинного обучения. Численные эксперименты, выполненные для условий Балтийского моря, показали, что обученная нейронная сеть воспроизводит максимальную высоту волны со средней относительной ошибкой порядка 5%. Полученные результаты свидетельствуют о способности модели восстанавливать характеристики нелинейной волновой статистики на основе информации о линейном спектре.
Ключевые слова. ветровое волнение, максимальная высота волны, спектральные волновые модели, фазо-разрешающее моделирование, машинное обучение, нейронные сети, Балтийское море.

USING MACHINE LEARNING TO PREDICT MAXIMUM WAVE HEIGHT USING A PHASE-RESOLVING MODEL AND WAVE ENERGY DENSITY SPECTRUM

Bukharev A.A., Bulgakov K.Yu., Fokina K.V.
Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow

Abstract. A combined methodology to the operational forecasting of maximum wave height, based on the combined use of spectral models, phase-resolving calculations, and machine learning methods, is investigated. Numerical experiments carried out for the conditions of the Baltic Sea showed that the trained neural network reproduces the maximum wave height with an average relative error of about 5%. The obtained results indicate the model's ability to reconstruct the characteristics of nonlinear wave statistics based on information about the linear spectrum.
Keywords. Wind waves, maximum wave height, spectral wave models, phase-resolving modeling, machine learning, neural networks, Baltic Sea.

Введение. Прогноз ветрового волнения остаётся важной составляющей гидрометеорологического обеспечения морской деятельности. В прикладных расчётах волнового режима в настоящее время широко используются спектральные модели, прежде всего WAVEWATCH III (WW3) [1], в которых состояние морской поверхности описывается распределением волновой энергии по частотам и направлениям в узлах расчётной сетки. Такая схема позволяет корректно воспроизводить статистические параметры волнения, однако не содержит информации о фазах гармоник и потому не описывает нелинейную трансформацию формы волн. При линейной реконструкции поверхность оказывается симметричной относительно среднего уровня, что приводит к недооценке вероятности возникновения экстремальных волн [2]. Фазо-разрешающие модели позволяют напрямую учитывать нелинейную динамику, однако их использование существенно ограничено высокой вычислительной стоимостью расчётов.

В последние годы активно развиваются подходы, основанные на применении методов машинного обучения [3–5]. Особый интерес представляют нейронные сети, способные решать задачи с учётом физических законов [6], в которых обучение проводится с учётом физических ограничений, задаваемых нелинейными уравнениями в частных производных. Это позволяет формировать вычислительно эффективные модели, сохраняющие связь с фундаментальной динамикой волнового поля.

Одним из ключевых параметров нелинейного волнения является максимальная высота волны, величина которой в линейных моделях систематически занижается из-за отсутствия учёта асимметрии волнового профиля.

Методология. Формирование входных данных осуществлялось с использованием сопряжённого модельного комплекса WRF/WW3. Атмосферные параметры — скорость ветра на высоте 10 м, а также температура и влажность на уровне 2 м, рассчитанные моделью атмосферной циркуляции WRF, задавали граничные условия для спектральной волновой модели WW3, формирующей распределения волновой энергии. Анализ проводился в пяти точках Балтийского моря, расположенных в районах с наибольшими глубинами соответствующих акваторий (центральная и южная части моря, а также Финский и Ботнический заливы). В этих узлах сохранялись почасовые волновые спектры на протяжении всего рассматриваемого интервала расчётов.

Формирование нелинейного волнового поля выполнялось с применением фазо-разрешающей модели потенциальных течений TRIDWAVE [7], реализованной для периодической области при предположении бесконечной глубины. В основе метода лежит разложение потенциала скорости на аналитически заданную линейную составляющую и численно определяемую нелинейную поправку. Линейная часть удовлетворяет уравнению Лапласа и описывает распространение линейных волн, тогда как нелинейная компонента находится из решения эллиптической краевой задачи с граничным условием на свободной поверхности. В ускоренной версии алгоритма трёхмерная задача редуцируется к уравнению, заданному на поверхности, в котором присутствуют вертикальные производные потенциала; их взаимосвязь задаётся в линейном приближении. Пространственная аппроксимация выполняется псевдоспектральным методом на основе быстрого преобразования Фурье, а интегрирование по времени осуществляется явной схемой Рунге–Кутты четвёртого порядка.

Для оперативного прогнозирования максимальной высоты волны была построена полносвязная нейронная сеть прямого распространения. Её задача состоит в замене вычислительно затратного фазо-разрешающего моделирования компактным аппроксиматором, способным выдавать оценку практически мгновенно после задания входных параметров. Использование полного частотно-углового спектра (3600 компонент) оказалось неэффективным из-за избыточности признакового пространства и склонности модели к переобучению, поскольку значительная доля спектральных значений близка к нулю. Поэтому перед подачей на вход сети выполнялось независимое осреднение спектра по частоте и направлению, что позволило представить его двумя одномерными распределениями. В окончательной конфигурации сеть содержит три последовательно расположенных скрытых линейных слоя и формально описывается следующим образом:

$$x \in R^{122} \to ReLU(W_1 x + b_1) \to ReLU(W_2 h_1 + b_2) \to W_3 h_2 + b_3 \in R$$

$$h_1 = ReLU(W_1 x + b_1), W_1 \in R^{128\times 122}$$

$$h_2 = ReLU(W_2 h_1 + b_2), W_2 \in R^{64\times 128}$$

$$\hat{y} = W_3 h_2 + b_3, W_3 \in R^{1\times 64}$$

где x – нормализованный вектор; h_1 и h_2 – вектора активации первого и второго скрытых слоев; $\hat{y}$ – скалярный выход модели; W_i и b_i – получаемые матрица весов и векторы смещений. Используется функция активации ReLU (Rectified Linear Unit).

В качестве функции потерь при обучении использовалась среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error, MSE). Данный функционал применялся для подбора параметров модели и обеспечивает устойчивую работу градиентных алгоритмов

оптимизации. Следует подчеркнуть, что MSE в рассматриваемой постановке выступает исключительно как вычислительный критерий минимизации ошибки, используемый на этапе обучения, и не может трактоваться как непосредственный показатель физической достоверности моделирования.

Настройка параметров нейронной сети выполнялась с использованием алгоритма Adam (Adaptive Moment Estimation), широко применяемого в задачах стохастической оптимизации. На каждой итерации t вычисляются экспоненциально сглаженные оценки первого и второго моментов градиента функции потерь, после чего производится их корректировка с учётом начального смещения и обновление вектора параметров модели:

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t ,$$
$$v_t = \beta_2 m_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2 ,$$
$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1-\beta_1^t} , \hat{v}_t = \frac{v_t}{1-\beta_1^t} ,$$
$$\Theta_{t+1} = \Theta_t - \alpha \frac{m_t}{\sqrt{\hat{v}_t}-\varepsilon},$$

где g_t – градиент функции потерь, β_1, β_2 – параметры сглаживания, Θ_t – вектор параметров модели (W_i, b_i), α – скорость обучения.

Описание и результаты экспериментов. Для построения обучающей выборки на основе сопряжённой системы WRF/WW3 было выполнено моделирование волнового режима Балтийского моря в безлёдный период 2014 года (1 мая — 30 ноября). За этот интервал получено 25 680 спектров. Проведение фазо-разрешающих расчётов для всего массива потребовало бы значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, спектральная структура волнения в Балтийском море отличается сравнительно невысоким разнообразием, поэтому использование полного набора данных для обучения нейронной сети представляется избыточным.

Из общего массива были отобраны случаи со значимой высотой волны более 1 м; для них максимальная высота волны определялась с помощью фазо-разрешающей модели. Данные, полученные в пяти исследуемых точках, объединялись в единую выборку. В результате сформирован набор из 1028 спектров, который был разделён на обучающую и валидационную части — 950 и 78 случаев соответственно. На рис. 1 приведены результаты экспериментов: распределение нейросетевых значений относительно референсных, среднеквадратичная ошибка для лучшей эпохи (MSE), средняя относительная ошибка (MRE). Качество аппроксимации оценивалось по относительному отклонению предсказанных значений от эталонных, полученных в фазо-разрешающих расчётах. Во всех экспериментах эта величина не превышала 5%. Полносвязная нейронная сеть продемонстрировала способность воспроизводить результаты детализированного моделирования, оценивая максимальную высоту волны на основе входного спектра.

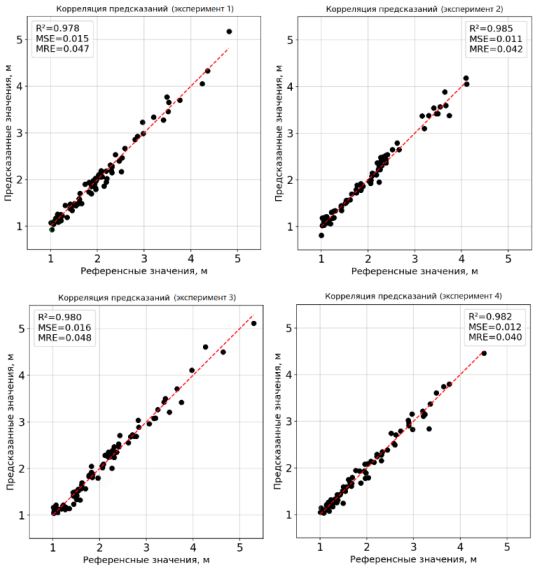


Рисунок 1 – Распределение данных, спрогнозированных нейросетевой моделью относительно референсных значений фазо-разрешающей модели в 4-х экспериментах; красной пунктирной линией показаны точные совпадения

Заключение. Полносвязная нейронная сеть продемонстрировала способность успешно обобщать результаты фазо-разрешающего моделирования, предсказывая максимальную высоту волны по входному спектру. Средняя относительная ошибка прогноза на независимой выборке составила около 5%. Наибольшие ошибки (до 18–35%) наблюдались для случаев с незначительным волнением (Hs ~ 1–2 м). Это, вероятно, связано с меньшей выраженностью нелинейных эффектов в таких условиях и повышенным влиянием шума в данных. При этом в абсолютном выражении ошибки моделирования для всего диапазона рассматриваемых волн примерно одинаковые. Относительная погрешность, соответственно, снижается по мере увеличения высоты волны. Ключевое практическое преимущество представленной методики заключается в значительном увеличение скорости прогноза. Нейронная сеть выдаёт результат крайне быстро, что делает предложенный подход принципиально пригодным для оперативного применения.

Список литературы

1. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. Technical Report. NOAA/ NWS/NCEP/MMAB. May 2009.
2. *Chalikov D.V., Bulgakov K.Yu.* Estimation of extreme waves statistics based on the statistics of significant wave height. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2017. doi: 10.1007/s40722-017-0093-7
3. *Adytia, D.; Saepudin, D.; Pudjaprasetya, S.R.; Husrin, S.; Sopaheluwakan A*. A deep learning approach for wave forecasting based on a spatially correlated wind feature, with a case study in the Java Sea, Indonesia. Fluids. 2022, 7(1), 39. doi: 10.3390/fluids7010039
4. *Castro, E., Iuppa, C., Musumeci, R.E.et al.* Optimizing neural network training for nearshore sea state forecasts using maximum dissimilarity algorithm. J. Ocean Eng. Mar. Energy. 2025 11, 1119–1128. doi: 10.1007/s40722-025-00426-5

5. *Minuzzi F.C, Farina L.,* Artificial neural networks ensemble methodology to predict significant wave height, Ocean Engineering. 2024, 300, 117479. doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117479
6. *Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.* Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations, Journal of Computational Physics. 2018, 378, 686-707. doi: 10.1016/j.jcp.2018.10.045
7. *Чаликов Д.В., Фокина К.В.* Прямая (фазо-разрешающая) модель поверхностных волн. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2025, 18(1), 8-18. doi.:10.59887/2073-6673.2025.18(1)-1

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ WRF-ARW ДЛЯ ПРОГНОЗА ТУМАНА НА АЭРОДРОМЕ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА (ПУЛКОВО)

Харченко М.А., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
makar_kharchenko@inbox.ru,

Аннотация. Приводятся следующий этап исследования прогноза туманов на Аэродроме Санкт-Петербург (Пулково) с применением региональной гидродинамической модели WRF-ARW. А именно производится сравнение некоторых схем параметризацией, которые применялись в ряде исследований, просвещенных прогнозу тумана. В рассмотренных исследованиях были отмечены сильные и слабые стороны применявшихся схем параметризации. В нынешнем исследовании акцентируется внимание на применимости схем, в частности на сколько улучшается качество прогнозирования, по сравнению с стандартной схемой, которая применялась на ранних этапах исследования**.**
Ключевые слова. Аэродром, туман, гидродинамические модели, численные методы, Пулково, численный прогноз.

FOG FORECAST AT ST. PETERSBURG AIRFIELD (PULKOVO) BASED ON THE WRF-ARW MODEL

Kharchenko M.A., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This paper presents the next stage of a study on fog forecasting at St. Petersburg Airport (Pulkovo) using the WRF-ARW regional hydrodynamic model. Specifically, it compares several parameterization schemes used in a number of studies on fog forecasting. The strengths and weaknesses of the parameterization schemes used were identified in the studies reviewed. This study focuses on the applicability of the schemes, specifically the improvement in forecast quality compared to the standard scheme used in the earlier stages of the study.
Keywords. Airport, fog, hydrodynamic models, numerical methods, Pulkovo, numerical forecast.

Введение. Данное исследование затрагивает одно из особо опасных явлений, приводящих к ухудшению видимости – в именно Туман. Очевидную опасность туман оказывает на транспортную отрасль, и особенно на авиацию. Данная особенность отражена в полётных минимумах для аэродрома (ВПП), воздушного судна и командира воздушного судна. И соблюдение минимумов необходимо для осуществления безопасности полётов. Из существующих типов воздушных судов, туман представляет особую опасность для малой авиации, представленной в виде: вертолётов, лёгких самолётов и беспилотных летательных аппаратов, так как для данной категории используются достаточно серьёзные ограничения по видимости и высоте нижней границы облаков.

Данное исследование является продолжением исследования прогноза тумана на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково). Для прогноза применяется региональная гидродинамическая модель WRF-ARW [1]. И в предыдущем исследовании, применяя стандартную конфигурацию схем параметризации были проведен прогноз на 32 случая тумана. Для сравнения полученных результатов использовался журнал погоды АВ-6, полученного из АМЦ «Пулково». Результаты исследования показали наличие систематических расхождений фактических и модельных данных.

Анализ 32 случаев показал результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Итоговые результаты сравнения стандартной конфигурации с фактическими данными по 32 случаям тумана

Параметр	|ΔT|,°C	|ΔTd|,°C	|ΔRh|,%	|Δff|,m/s	|Δdd|,°
Среднее по случаям	1,8	1,4	6,3	1,0	83

Рассматривая полученные результаты, можем наблюдать сравнительно небольшую абсолютную ошибку по отношению к фактическим данным, однако с точки зрения оценки краткосрочного прогноза [2], погрешность должна составлять: ±2.0 °C для температуры воздуха и точки росы, $\pm\ 2.0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ для скорости ветра и ± 10 ° - для направления ветра. Относительную влажность не оценивают, но тем не менее возьмём величину из постановления о единстве измерений №1847[3] ± 5%. Таким образом более близким к таким значениям можно отнести относительную влажность и скорость ветра. В то время как ошибка по направлению ветра исходит из не учёта местных особенностей циркуляции. В то же время температура воздуха и температура точки росы имеют подобную ошибку тоже из-за не учёта местных особенностей и влиянием подсеточных процессов, так как, по сути, при обработке данные интерполировались из регулярной сетки с шагом 1 км, в координатную точку в которой расположена метеостанция.

Используемые схемы параметризации при прогнозе тумана приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Схемы параметризации применённые в ходе данного исследования

Стандартная конфигурация		
Параметризация	Схема	параметр в namelist
Микрофизика	WRF Single-moment 3-class	mp_physics = 3
Планетарный пограничный слой	Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)	bl_pbl_physics = 2
Длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)	ra_lw_physics = 1
Коротковолновая радиация	Dudhia	ra_sw_physics = 1
Физика приземного слоя	Revised MM5	sf_sfclay_physics = 1
Модель приземного подслоя	Unified Noah land surface scheme	sf_surface_physics = 2
Taylor et al (2021) [3]		
Параметризация	Схема	параметр в namelist
Микрофизика	Thompson scheme	mp_physics = 8
Планетарный пограничный слой	MYNN scheme	bl_pbl_physics = 5
Длинноволновая радиация	New Goddard longwave scheme	ra_lw_physics = 5
Коротковолновая радиация	New Goddard shortwave scheme	ra_sw_physics = 5
Физика приземного слоя	MYNN scheme	sf_sfclay_physics = 5
Модель приземного подслоя	Unified Noah land surface scheme	sf_surface_physics = 2

Pithani et al (2019) 1099 – 1113[4]		
Параметризация	Схема	параметр в namelist
Микрофизика	WRF Single-moment 6-class (WSM6)	mp_physics = 6
Планетарный пограничный слой	MYNN scheme	bl_pbl_physics = 5
Длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)	ra_lw_physics = 1
Коротковолновая радиация	Dudhia	ra_sw_physics = 1
Физика приземного слоя	MYNN scheme	sf_sfclay_physics = 5
Модель приземного подслоя	Unified Noah land surface scheme	sf_surface_physics = 2
Pithani et al (2019) 1099 – 1113[5]		
Параметризация	Схема	параметр в namelist
Микрофизика	WRF Double-moment 6-class (WDM6)	mp_physics = 16
Планетарный пограничный слой	Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE-EDMF)	bl_pbl_physics = 4
Длинноволновая радиация	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)	ra_lw_physics = 1
Коротковолновая радиация	Dudhia	ra_sw_physics = 1
Физика приземного слоя	Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE)	sf_sfclay_physics = 4
Модель приземного подслоя	Pleim-Xiu (PX)*	sf_surface_physics = 7

* - при попытке запустить модель с данной моделью приземного подслоя возникла ошибка из-за отсутствия необходимых модулей, и как следствие вместо Pleim-Xiu применялась Unified Noah land surface scheme.

В дальнейшем было проведено изучение опыта, полученного другими исследователями, которые рассматривали прогноз тумана при помощи модели WRF-ARW. В ходе изучения были отмечены следующие выводы: большая часть схем имеет систематическую ошибку в прогнозе параметров температуры, влажности и скорости ветра. Также отметим наличие запаздывания или раннего появления тумана, в зависимости от применяемой схемы.

Для эксперимента было решено взять конфигурацию схем параметризации из исследования, в котором рассматривалось моделирование осаждения капель морского тумана на побережье Канады [3], исследование чувствительности модели WRF в зависимости от применяемой схемы параметризации при прогнозе адвективного тумана в Индо-Гангской равнине [4], а также исследование прогноза плотного адвективного тумана, произошедшего в зимний период в Дели с 23 по 24 января 2016 годах [5]

Применённые выше схемы прогнозирования показали достаточно хорошие результаты в рамках исследований, но в то же время возникает вопрос – на сколько хорошо данные схемы могут применяться в прогнозе тумана на Аэродроме Санкт-Петербург (Пулково), и это по сути является главной целью в рамках данного исследования.

В остальном параметра модели WRF-ARW следующие: Численное прогнозирование проводилось с шагом по времени равным 60 с и заблаговременностью прогноза 48 часов, 35 уровней по вертикали. Использованы три сетки (рисунок 1) со следующими характеристиками: самая большая – шаг 9 км, 170x150 узлов, средняя – шаг 3 км, 214x172 узла, самая мелкая (по которой производилась верификация) – шаг 1 км, 199x157 узлов.



Рисунок 1 - Область прогнозирования и сетки

Результаты моделирования. В данном исследовании был рассмотрен один случай радиационного тумана, который наблюдался в период с 22:00 13 сентября 2025 по 05:00 14 сентября 2025 года. Период прогнозирования составлял 48 часов с 13 по 15 сентября 2025 года. И таким образом туман попал в середину прогностического периода. Для сравнения применялись данные наблюдения из журнала погоды АВ6[6]. Полученные результаты были обобщены в таблицу 3.

Таблица 3 Обобщенная таблица по результатам моделирования

	Среднее	Медиана	Мода	Дисперсия	Ср.кв.отклонение	Корреляция(Пирс.)
T(ПК1), °C	15,0	14,0	13,6	8,0	2,8	0,90
T(ПК2), °C	15,6	15,7	12,0	8,9	3,0	0,93
T(ПК3), °C	14,7	14,1	12,5	6,8	2,6	0,94
T(ПК4), °C	14,8	14,2	13,8	7,2	2,7	0,93
T(Ф), °C	15,9	16,0	17,8	9,3	3,1	
Td(ПК1), °C	9,5	9,8	9,8	2,2	1,5	0,66
Td(ПК2), °C	10,0	10,1	10,1	1,8	1,3	0,66
Td(ПК3), °C	10,1	10,1	10,1	1,9	1,4	0,59
Td(ПК4), °C	10,7	10,8	10,1	1,5	1,2	0,57
Td(Ф), °C	12,0	12,5	12,7	1,8	1,3	
Rh(ПК1), %	72,7	70,6	84,4	151,9	12,3	0,96
Rh(ПК2), %	72,5	67,0	59,3	207,8	14,4	0,94
Rh(ПК3), %	76,3	75,2	93,3	179,4	13,4	0,95
Rh(ПК4), %	78,6	78,0	65,6	166,0	12,9	0,93
Rh(Ф), %	78,8	76,8	91,3	187,6	13,7	
ff(ПК1), m/s	5,2	5,0	4,5	1,1	1,0	0,67
ff(ПК2), m/s	4,7	4,5	4,5	1,5	1,2	0,74
ff(ПК3), m/s	4,4	4,5	5,2	1,7	1,3	0,81
ff(ПК4), m/s	5,1	5,1	4,3	2,3	1,5	0,82
ff(Ф), m/s	4,4	4,0	6,0	3,1	1,8	

Анализ полученных результатов.

Рассматривая обобщённую таблицу, отметим отмеченные закономерности, наблюдающиеся в метеорологических величинах:

- Значение по температуре воздуха имеют по большей части систематическую ошибку в меньшую сторону. По средней, медиане, дисперсии и СКО – ближе всего ПК2, по корреляции – ПК3, по моде – ПК4.
- Температура точки росы имеет схожую тенденцию по систематической ошибке. По медиане и средней – ближе к ПК4, по дисперсии, СКО и корреляции – ПК2.
- Относительную влажность неплохо описывает с точки зрения средней и медианы – ПК4, а по моде, дисперсии, СКО и корреляции – ПК3.
- Скорости ветра тоже имеют систематическую ошибку по части максимальных значений. По среднему, медиане и моде – лучше описывает ПК3, а дисперсия, СКО и корреляция – ПК4.

Выводы. Анализируя полученные результаты отметим наличие схожей тенденции, которую обнаружили исследователи, ранее применявшие схожие конфигурации параметризации. Отметим, что систематическое занижение температуры воздуха и точки росы может быть вызвано как недостаточно хорошего учёта микроклиматических особенностей, так и влиянием мелкомасштабных процессов, имеющих место на метеоплощадке которые модель не в состоянии описать. Систематическое занижение скорости ветра вызвано разными периодами осреднений модельных и прогностических данных – модельные данные усредняют ветер за час, тогда как в сводку журнала погоды входят данные за 10 минутное осреднение.

Отметим также что оценивать качество параметризации только по одному случаю радиационного тумана не является корректным, но в то же время следует провести исследование на основе контрольной группы наиболее характерных случаев, в том числе и случаи адвективного тумана

Список литературы

1. *Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D.-L. Wang, W. W. Wilfong, J. S. Barker, and D. D. Halley* (2008): A Description of the Advanced Research WRF Model Version 7. NCAR Technical Note TN-475+STR, 113 pp.

2. Наставление, по краткосрочным прогнозам, погоды общего назначения: РД 52.27.724–2019: утверждено руководителем Росгидромета 14.11.2019 / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — Москва, 2019. — URL: mosecom.mos.ru (дата обращения: 16.03.2026). — Текст: электронный.

3. Российская Федерация. Правительство. Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: постановление Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2020 г. № 1847 // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2020. — № 47. — Ст. 7551.

4. Surface deposition of marine fog and its treatment in the Weather Research and Forecasting (WRF) model / P. A. Taylor, Z. Chen, L. Cheng [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2021. — Vol. 21, no. 19. — P. 14687–14702. — DOI: 10.5194/acp-21-14687-2021.

5. WRF model sensitivity to choice of PBL and microphysics parameterization for an advection fog event at Barkachha, rural site in the Indo-Gangetic basin, India / P. Pithani, S. D. Ghude, T. Prabhakaran [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. — 2019. — Vol. 136, no. 3–4. — P. 1099–1113. — DOI: 10.1007/s00704-018-2530-5.

6. *Pithani, P.* WRF model prediction of a dense fog event occurred during the Winter Fog Experiment (WIFEX) / P. Pithani, S. S. Ghude, P. Prabhakaran [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. — 2019. — Vol. 136, no. 3-4. — P. 1031–1046. — DOI: 10.1007/s00704-018-2530-5.

7. Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» Журнал погоды АВ-6 аэродрома Санкт Петербург (Пулково) (период 2011-2025 гг.),[Электронная форма].

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ МОДЕЛЬЮ WRF-ARW

Черкашин Д.М., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
denny.axov@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты валидации численного моделирования осадков, выполненные с помощью мезомасштабной модели WRF-Chem для территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Верификация проводилась на основе данных 34 пунктов наблюдений автоматизированной информационной системы «Осадки» (АИС «Осадки») за июль 2021 года. Для оценки качества воспроизведения осадков использовались три численных эксперимента с разным уровнем учёта городской среды. Анализ показал, что все конфигурации модели систематически завышают количество осадков по сравнению с фактическими измерениями. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшей калибровки физических параметризаций модели WRF-Chem для улучшения воспроизведения режима осадков в регионе.
Ключевые слова. WRF-Chem, валидация осадков, численное моделирование, категориальные статистики, матрица сопряженности, городской климат.

VERIFICATION OF PRECIPITATION SIMULATION BY THE WRF-ARW MODEL

Cherkashin D.M, Aniskina O.G
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This paper presents the results of precipitation numerical simulation validation performed using the WRF-Chem mesoscale model for the territory of Saint Petersburg and Leningrad Oblast. The verification was carried out based on data from 34 observation points of the Automated Information System "Precipitation" (AIS "Precipitation") for July 2021. To assess the quality of precipitation reproduction, three numerical experiments with different levels of urban environment consideration were used. The analysis showed that all model configurations systematically overestimate precipitation amounts compared to actual measurements. The obtained results highlight the need for further calibration of the WRF-Chem model's physical parameterizations to improve the reproduction of the precipitation regime in the region.
Keywords. WRF-Chem, precipitation validation, numerical modeling, categorical statistics, contingency table, urban climate.

Численное моделирование атмосферных процессов является важнейшим инструментом для прогнозирования погоды и оценки климатических изменений. Одной из ключевых задач является адекватное воспроизведение полей осадков, особенно в урбанизированных районах со сложными физико-географическими условиями. Модель WRF-Chem (Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) широко применяется для комплексных расчетов метеорологических и химических параметров. Однако точность ее прогнозов требует постоянной верификации по данным наземных наблюдений.

Данное исследование посвящено валидации моделирования осадков на примере Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Цель работы — оценить эффективность различных настроек параметризации города (Urb, Simple Urb и CTRL) и выявить наиболее адекватную конфигурацию для данного региона на основе сравнения с данными АИС «Осадки».

Для верификации использовались фактические данные о количестве осадков, полученные от «Водоканал Санкт-Петербурга» по 34 пунктам наблюдений АИС «Осадки» за период июль 2021 года. Исходная дискретность данных составила 5 минут. Для почасового и категориального анализа данные были агрегированы к часовым интервалам.

Были проанализированы результаты трех численных экспериментов с моделью WRF-Chem:

Urb — полноценная городская параметризация;

Simple Urb — упрощенная городская параметризация;

CTRL — контрольный эксперимент (без учета городских эффектов).

В работе использовались два подхода для валидации осадков:

Статистический анализ непрерывных величин: расчет средней разности (смещение) и ее стандартного отклонения (СКО) между модельными и фактическими значениями [1-3].

Категориальный анализ: построение матрицы сопряженности для заданных порогов количества осадков (0.3–2, 3–14, 15–49 мм/12ч) с расчетом следующих показателей:

POD (Probability of Detection) — доля верно предсказанных событий;

FAR (False Alarm Ratio) — доля ложных тревог;

BIAS — отношение числа предсказанных событий к наблюдаемым;

ETS (Equitable Threat Score) — индекс справедливой угрозы (0 — случайный уровень, 1 — идеальное попадание).

Сравнение накопленных осадков за месяц

Анализ суммарных осадков за июль 2021 года показал, что все три численных эксперимента с моделью WRF-Chem значительно завышают количество осадков по сравнению с фактическими данными:

Urb — завышение в 3.4 раза;

Simple Urb — завышение в 3.3 раза;

CTRL — завышение в 3.8 раза.

Наибольшее отклонение от измерений отмечено в контрольном эксперименте, что указывает на важность учета городских процессов для корректного воспроизведения осадков в мегаполисе.

Почасовой статистический анализ (Bias и STD)

По данным 26 станций было выявлено, что во всех пунктах наблюдений модель систематически завышает осадки. Значения средней разности лежат в диапазоне 0.03–0.23 мм, а СКО — 0.42–1.3 мм.

Наилучшие результаты достигнуты в эксперименте Simple Urb:

Смещение: медиана равна -0.12 мм (ближе всего к нулю);

СКО: медиана равна 0.85 мм (минимальный разброс ошибок);

Межквартильные размахи смещения и СКО для эксперимента Simple Urb меньше, чем для экспериментов Urb и CTRL.

Категориальный анализ

Результаты верификации по традиционному методу представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Статистические показатели качества прогноза осадков

Показатель	Порог (мм/12ч)	Urb	Simple Urb	CTRL
POD	3–14	0.55	0.56	0.20
FAR	3–14	0.82	0.83	0.82
BIAS	0.2–2	1.96	1.72	6.77
ETS	3–14	0.11	0.12	0.03

Интерпретация:

- POD (56%) в диапазоне 3–14 мм/12ч показывает, что чуть больше половины реальных осадков модель смогла воспроизжвести.
- FAR (82–83%) чрезвычайно высок, что означает преобладание ложных тревог над верными попаданиями.
- BIAS минимален при пороге 0.2–2 мм/12ч для Simple Urb (1.72) и Urb (1.96), что говорит о двукратном завышении количества слабых осадков. При высоких пороговых значениях (15–49 мм/12ч) BIAS резко падает (≤0.36), указывая на неспособность модели воспроизводить сильные осадки.
- ETS (0.11–0.12) — крайне низкое значение, близкое к нулю. Это означает, что точность прогноза находится практически на уровне случайного угадывания и не имеет существенной прогностической ценности для данного региона в летний период.

4. Выводы

Модель WRF-Chem во всех трех конфигурациях (Urb, Simple Urb, CTRL) систематически завышает количества осадков над территорией Санкт-Петербурга и Ленобласти в июле 2021 года.

Экспериментс использованием для параметризации города схемы Simple Urb является наиболее предпочтительным среди протестированных схем, так как обеспечивает наименьшие ошибки и более узкий диапазон их изменчивости.

Категориальный анализ показал неудовлетворительные результаты моделирования:

Высокий уровень ложных тревог (FAR >0.8) делает прогноз малонадежным.

Необходима дальнейшая настройка физических параметризаций модели (особенно параметризации осадков и учета городских поверхностей) с целью коррекции систематической ошибки завышения.

Список литературы

1. *Wilks D. S.* Statistical methods in the atmospheric sciences. – Academic press, 2011. – Т. 100.
2. *Cassola F., Ferrari F., Mazzino A.* Numerical simulations of Mediterranean heavy precipitation events with the WRF model: A verification exercise using different approaches //Atmospheric Research. – 2015. – Т. 164. – С. 210-225.
3. *Pennelly C., Reuter G., Flesch T.* Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta //Atmospheric Research. – 2014. – Т. 135. – С. 172-192.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ОПЕРАТИВНОЙ РАБОТЕ АВИАМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

Кулижская П.В.[1,2]
[1]Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Санкт-Петербург
[2]ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», Санкт-Петербург
kulizhskaya.polina@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается актуальная задача прогнозирования туманов на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково) с использованием технологий машинного обучения. На основе многолетних метеорологических данных (2010–2023 гг.) были разработаны две модели полносвязных нейронных сетей: бинарный классификатор для определения наличия тумана и мультиклассовый классификатор для определения его типа. Для практического применения создан веб-интерфейс на базе фреймворка FastAPI. В период с августа по октябрь 2025 года

система прошла опытную эксплуатацию в авиаметеорологическом центре Пулково. Система зарекомендовала себя как надежный вспомогательный инструмент в работе синоптиков.
Ключевые слова. Туман, авиация, прогноз погоды, нейронные сети, глубокое обучение, опытная эксплуатация.

NUMERICAL EXPERIMENT OF THE DEVELOPED MATHEMATICAL MODEL BASED ON NEURAL NETWORKS IN THE OPERATIONAL WORK OF THE AVIATION METEOROLOGICAL CENTER

Kulizhskaya P.V.[1,2]
[1]North Western Branch FSBE «Aviamettelecom of Roshydromet», St. Petersburg
[2]FSBE «Arctic and Antarctic Research Institute», St. Petersburg

Annotation. This paper examines the pressing problem of fog forecasting at St. Petersburg's Pulkovo Airport using machine learning technologies. Based on long-term meteorological data (2010–2023), two fully connected neural network models were developed: a binary classifier for detecting the presence of fog and a multi-class classifier for determining its type. A web interface based on the FastAPI framework was created for practical use. From August to October 2025, the system underwent trial operation at the Pulkovo Aviation Meteorological Center. The system proved itself to be a reliable auxiliary tool for meteorologists.
Keywords. Fog, aviation, weather forecast, neural networks, deep learning, pilot project.

Введение. Образование тумана — сложный физический процесс, определяемый не только сочетанием метеорологических факторов, но и местными орографическими особенностями. Физический механизм образования тумана хорошо известен и включает конденсацию водяного пара в приземном воздухе с последующим образованием мельчайших капель воды и кристаллов льда. Конденсация происходит либо при охлаждении воздуха ниже точки росы, либо при попадании избытка водяного пара в воздух.

Туманы относятся к категории наиболее опасных метеорологических явлений для авиации в силу их способности критически снижать горизонтальную и вертикальную видимость до значений, делающих визуальный заход на посадку и приземление воздушного судна сложным или даже трудно реализуемым. Выполнение посадки в таких условиях возможно лишь воздушным судам, оснащенным системами автоматического захода на посадку (категории II и III ИКАО), к которым относятся современные авиалайнеры и военная авиация. При этом критическим требованием является наличие соответствующего радиоэлектронного оборудования как на борту самолета, так и в инфраструктуре аэродрома.

Важно отметить, что даже при наличии технических возможностей и высокой квалификации экипажа, действующие федеральные авиационные правила могут запрещать посадку в условиях крайне низкой видимости.

Для повышения точности прогнозов погоды и тумана в аэропортах синоптики используют различные инструменты и программные решения, позволяющие собирать и анализировать большие объемы метеорологических данных. Сегодня технологические достижения способствуют появлению новых методов прогнозирования, в том числе подходов, основанных на машинном обучении.

Машинное обучение становится все более популярным для разработки моделей прогнозирования. Это связано с тем, что такие модели значительно сокращают время, необходимое для генерации прогнозов, а также с тем, что накопленные исторические наборы данных позволяют обучать их с высокой точностью.

Часто разработка моделей для метеорологического обеспечения основывается на многослойных нейронных сетях, которые состоят из множества нейронов,

организованных в несколько уровней. Такие методы машинного обучения, основанные на нейронных сетях, называют глубоким обучением.

В данном исследовании рассматривается задача определения наличия тумана на аэродроме и классификации его типа с использованием двух алгоритмов машинного обучения:

1. Бинарного классификатора на основе полносвязной нейронной сети;
2. Мультиклассового классификатора на основе полносвязной нейронной сети.

Данные. В данном исследовании для обучения двух моделей нейронной сети использовались метеорологические данные, представляющие собой массив местных сводок аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) (далее – Аэродром) из журнала АВ-6. Данные были предоставлены Северо-Западным филиалом ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета».

Для корректного проведения исследования запрашивались не все параметры местной сводки, а лишь: дата, скорость и порывы скорости ветра (м/с), направление ветра (градусы), видимость (м) в трех точках полосы, общая облачность (октанты), облачность нижнего яруса (октанты), высота нижней границы облаков (м), температура воздуха (°C), температура точки росы (°C), давление (гПа), метеорологическое явление, форма облаков, курс полосы. Временной интервал данных составляет с 2010 по 2023 год, где последний год использовался для контрольной проверки работы модели.

Описание выбора нейронной сети, её гиперпараметров, функций активации, условия предварительной обработки данных и обучения нейронных сетей представлены в выпускной квалификационной работе (магистерской диссертации) [1], а также в опубликованных работах [2, 3, 4].

Численные эксперименты на основе разработанной математической модели. Значимость любых математических моделей и алгоритмов определяется их эффективностью в реальных условиях и способностью решать практические задачи. Поэтому данный этап посвящен основной фазе исследования — экспериментальной проверке разработанных моделей нейронных сетей и созданию функционального программного прототипа.

Главная цель на данном этапе работы — точная оценка прогностических возможностей моделей в условиях эксплуатации аэродрома. Это требует не только тщательного планирования эксперимента, но и разработки специализированного программного обеспечения, позволяющего взаимодействовать моделям с метеорологическими данными.

Разработка веб-интерфейса на базе современного фреймворка FastAPI, предоставляющего синоптикам интуитивно понятный инструмент взаимодействия с системами искусственного интеллекта и динамическое отображение результатов в режиме реального времени подробно были представлены в Материалах III Международной научно-практической конференции «Авиационная и спутниковая метеорология», посвященной 95-летию образования РГГМУ. Санкт-Петербург, 19–20 сентября 2025 г. [5].

В течение нескольких месяцев (с августа по октябрь 2025 года включительно) система прогнозирования тумана проходила практическую апробацию в реальных условиях эксплуатации в авиаметеорологическом центре Пулково. Синоптики ежедневно использовали разработанный программный комплекс в дополнение к традиционным методам прогнозирования, сверяя полученные результаты с данными фактических наблюдений.

После нескольких месяцев эксплуатации метода был проведён комплексный анализ его производительности (Таблица 1).

Таблица 1 – Комплексный анализ производительности метода прогноза тумана и его сравнение с классическими методами

№	Дата	Время расчета (ВСВ)	Время, на которое рассчитывался туман (ВСВ)	Результат 1 (наличие тумана 1 или 0)	Результат 2 (тип тумана)	Фактически был (1)/не был (0)	Тип фактического тумана	Метод А.С. Зверева (наличие тумана 1 или 0)	Метод Н.В. Петренко (наличие тумана 1 или 0)	Метод ИРАМ (наличие тумана 1 или 0)
1	07.08.2025	16.37	16.37	0		0		0	0	0
2	08.08.2025	19.25	19.25	0		0		1	0	1
3	11.08.2025	16.30	18.00	0		0		0	0	0
4	12.08.2025	16.30	18.00	0		0		0	0	0
5	13.08.2025	18.25	24.00	0		1	PRFG	0	0	0
6	27.08.2025	16.02	24.00	1	MIFG	0		0	0	0
7	28.08.2025	16.22	21.00	0		0		0	0	0
8	02.09.2025	20.00	20.00	1	MIFG	1	PRFG	0	0	0
9	06.09.2025	20.00	20.00	1	FG	1	FG	0	0	0
10	08.09.2025	14.00	00.00	1	PRFG	1	PRFG	0	0	0
11	09.09.2025	16.37	18.00	0		0		0	0	0
12	11.09.2025	17.02	17.05	0		0		0	0	0
13	12.09.2025	16.25	23.00	0		0		0	0	0
14	13.09.2025	22.45	00.00	1	MIFG	1	PRFG	1	1	0
15	14.09.2025	11.30	21.00	0		0		0	0	0
16	14.09.2025	17.45	22.00	0		0		0	0	0
17	16.09.2025	18.20	00.00	0		0		0	0	0
18	25.09.2025	20.07	20.07	1	PRFG	1	PRFG	1	0	0
19	25.09.2025	22.40	22.40	1	MIFG	1	PRFG	0	0	0
20	26.09.2025	19.00	19.00	1	MIFG	1	PRFG	0	0	0
21	26.09.2025	20.45	20.45	1	MIFG	1	MIFG	0	0	0
22	29.09.2025	16.00	18.00	0		0		0	0	0
23	01.10.2025	02.00	02.00	1	MIFG	1	MIFG	1	0	0
24	01.10.2025	23.00	23.00	1	PRFG	1	PRFG	1	0	0
25	06.10.2025	16.35	16.35	0		0		0	0	0
26	06.10.2025	16.50	00.00	0		0		0	0	0
27	07.10.2025	16.14	18.00	0		0		1	0	0

28	07.10.2025	22.00	23.00	1	FG	1	PRFG	0	0	0
29	08.10.2025	22.30	00.00	0		0		1	0	0
30	19.10.2025	18:48	21.00	0		0		0	0	0
31	20.10.2025	22.45	22.45	1	MIFG	1	PRFG	1	0	0

За три месяца использования метода его точность превысила 73%. По мере накопления опыта работы с веб-сервисом наблюдалась положительная динамика качества прогнозов. В первые недели использования отмечалась некоторая осторожность в применении рекомендаций системы, но по мере подтверждения ее надежности уверенность возросла.

Заблаговременность расчетов была различной: от нескольких минут до 7-10 часов. Вводимыми прогностическими параметрами служил полноценный синоптический и численный анализ конкретного специалиста.

Также параллельно проводились расчеты с использованием традиционных методов прогнозирования тумана, результаты которых также представлены в таблице проверки метода (Таблица 1). Все расчеты выполнялись одновременно в идентичных условиях.

За период с августа по октябрь оправдываемость традиционных методов прогноза тумана составила:

- прогноз радиационного тумана по методу А.С. Зверева – 61%;
- прогноз радиационного тумана по методу Н.В. Петренко – 67%;
- прогноз радиационного тумана по методу ООО «ИРАМ» – 68%.

Прогноз адвективного тумана по методу Н.В. Петренко за указанный период времени рассчитывался крайне редко, а потому не подлежит объективному сравнению.

Синоптики отметили, что в сложных метеорологических ситуациях, когда традиционные методы давали противоречивые результаты, модель нейронной сети обеспечивала более точный прогноз. К концу периода тестирования система стала полноценным инструментом в арсенале синоптиков.

Выводы. Завершенные экспериментальные исследования и разработка программного обеспечения представляют собой заключительный этап комплексного подхода к созданию интеллектуальной системы прогнозирования тумана для аэродрома. Результаты не только подтвердили теоретические принципы исследования, но и продемонстрировали высокую практическую значимость разработанного метода в реальных условиях эксплуатации.

Стоит отметить результаты оценки модели на тестовых данных, которые неизменно демонстрируют высокое качество метрик. Точность бинарной классификации 90% и точность многоклассовой классификации 85% подтверждают релевантность выбранных архитектур нейронных сетей и качество подготовки данных. Детальный анализ матриц ошибок выявил специфические характеристики классификации различных типов тумана, в частности, сложность идентификации частичного тумана (ЧПМ), что согласуется с практическим опытом синоптиков и характеристиками этого типа образования тумана.

Трехмесячное практическое тестирование системы прогнозирования в реальных условиях в аэропорту Пулково продемонстрировало значительное статистическое преимущество разработанного метода по сравнению с традиционными методами прогнозирования. Точность прогнозов составила 73% по сравнению с 61–68% для существующих методов, что свидетельствует об улучшении точности прогнозов.

Другим важным результатом стало постепенное повышение доверия к системе со стороны синоптиков по мере накопления положительного опыта. Разработанный метод доказал свою эффективность в качестве инструмента взаимодействия сложных нейросетевых алгоритмов с конечным пользователем.

В ходе эксплуатации были выявлены и систематизированы ограничения системы прогнозирования, в частности, ее зависимость от параметров облаков и статический характер модели, не учитывающей временную динамику. Эти ограничения послужили основой для формулирования конкретных направлений дальнейшего развития, включая создание адаптивных механизмов обработки недостающих данных, разработку гибридных моделей, интегрирующих физические подходы, и применение методов обработки временных рядов.

Список литературы

1. *Кулижская П.В.* Выпускная квалификационная работа (магистерская диссертация) на тему: «Разработка метода прогноза тумана на основе нейросетевых технологий» - РГГМУ, 2023 г.
2. *Кулижская П. В.* Прогноз типа тумана на аэродроме Пулково с помощью нейронных сетей / П. В. Кулижская // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2023. – С. 60-64. – ISBN 978-5-91155-218-3.
3. *Kulizhskaya, P. V.* A Method for Predicting Fog and Identifying Its Type Based on Neural Networks for the Saint Petersburg (Pulkovo) Airfield / P. V. Kulizhskaya // Russian Meteorology and Hydrology. – 2024. – Vol. 49, No. 4. – P. 375-382. – DOI 10.3103/s1068373924040125.
4. *Кулижская П.В.* Решение задачи классификации наличия тумана и его типа с помощью методов машинного обучения для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) – Enviromis 2024: международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды, Томск, 01–06 июля 2024 года. – Томск: Томский центр научно-технической информации, 2024. – с. 238-243 – ISBN 978-5-89702-497-1.
5. *Кулижская П. В.* Метод прогнозирования тумана с использованием нейронных сетей и его динамическая визуализация на основе FASTAPI / П. В. Кулижская // Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития: Материалы III Международной научно-практической конференции «Авиационная и спутниковая метеорология», посвященной 95-летию образования РГГМУ. Санкт-Петербург, 19–20 сентября 2025 г. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2025. – 370 с. – ISBN 978-5-91155-445-3.

ОЦЕНКА ВКЛАДА АКТИВНОСТИ ДЕСЯТИДНЕВНОЙ ВОЛНЫ В ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Шнайдер А.В.[1], Савенкова Е.Н.[2]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург
anscheinend21@yandex.ru

Аннотация. В работе выполнена оценка вклада 10-дневной бегущей волны в изменчивость остаточной средней меридиональной циркуляция в весенние месяцы в средней атмосфере

Северного полушария. Полученные результаты показывают, что в весенние месяцы 10-дневная бегущая на запад волна имеет высокую изменчивость от года к году. В годы с высокими значениями амплитуды волны вклад в вариации остаточной меридиональной циркуляции по сравнению с вкладом от других волновых компонент имеет доминирующий характер.
Ключевые слова. Циркуляция атмосферы, волновая активность, вейвлет-анализ.

ASSESSMENT OF THE CONTRIBUTION OF TEN-DAY WAVE ACTIVITY TO THE VARIATIONS OF ATMOSPHERIC CIRCULATION

Shnaider A.V.[1], Savenkova E.N.[2]
[1] Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[2] Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg

Annotation. In this study an assessment was made of the contribution of the 10-day westward-propagating wave to the variability of the residual mean meridional circulation in the middle atmosphere of the Northern hemisphere during the spring months. The obtained results show that in spring the 10-day wave exhibits high year-to-year variability. In years with large wave amplitude values, its contribution to variations in the residual meridional circulation becomes dominant compared to other wave components.
Keywords. Atmospheric circulation, wave activity, wavelet analysis.

Основной механизм глобального переноса в атмосфере Земли — это меридиональная циркуляция [1, 2, 3]. В нижней и средней атмосфере тропосферный воздух поступает в стратосферу в тропиках, затем перемещается в сторону полюса и опускается в средних и высоких широтах. На больших высотах токи меридиональной циркуляции направлены из летнего полушария в зимнее, обеспечивая, таким образом, обмен массой и количеством движения в глобальном масштабе. С другой стороны, известно, что волны планетарного масштаба могут существенно изменять среднюю эйлерову меридиональную циркуляцию.

Чтобы обеспечить оценку влияния волн на средний поток и рассчитывать меридиональный перенос массы и трассеров в атмосфере, удобно использовать метод, в котором используется преобразованная эйлерова средняя циркуляция (Transformed Eulerian Mean, TEM) [4]. В таком случае, рассматривается так называемая остаточная средняя меридиональная циркуляция – суперпозиция индуцированных вихрями и адвективных зонально-средних потоков [5]. В данной работе рассматривается оценка вклада доминирующей в весенние месяцы моды атмосферы в вариации атмосферной циркуляции с учетом отклика изменчивости амплитуды в рассчитываемые компонентах остаточной меридиональной циркуляции (ОМЦ).

Анализ волновой активности в весенние месяцы.

В качестве исходных данных были использованы данные о геопотенциальной высоте реанализа UK Met Office. Рассматривалась волновая активность в марте – апреле за период с 2011 по 2022 год. Известно, что в связи с переходом средней атмосферы с зимнего режима на летний, волновая активность может сильно варьировать от года к году. Чтобы выделить амплитуды зональных гармоник, поля геопотенциальной высоты раскладывались в ряд Фурье по долготе. Далее выполнялся анализ только первой гармоники (СПВ1), так как она имеет наибольшие значения амплитуд, и её влияние на общую циркуляцию и меридиональный перенос наиболее значим.

Для выделения временных периодик, которые имеют максимальные амплитуды, было выполнено вейвлет-разложение Морле [6]. Таким образом, для каждого года было получено распределение амплитуд с периодами от 2 до 40 дней. Для построения вейвлетов был выбран высотный уровень 50 км и широта 62N. На рисунке 1 представлен

пример вейвлет-преобразований, полученных для 2012 и 2016 годов по данным UK Met Office.

Анализ вейвлет-спектров показывает, что наиболее часто максимальные значения амплитуд наблюдаются у 10-дневной волны, которая представляет собой нормальную моду атмосферы и имеет период 220 часов. В течение всего рассматриваемого периода наблюдаются сильные вариации как самой амплитуды десятидневной волны, так и времени наблюдения максимума. За рассматриваемые 12 лет значение амплитуды 10-дневной волны варьирует от 40 гп. м. до 320 гп. м. Такой разброс значений, отличающихся примерно на порядок, свидетельствует о значительной межгодовой изменчивости динамических процессов в средней атмосфере.

Для дальнейшего рассмотрения вклада десятидневной волны в вариации циркуляции средней атмосферы были выбраны год с довольно слабой 10-дневной волной в течение весенних месяцев (2012 год) и сильной (2016 год). На рисунке 2 представлены высотно-широтные разрезы амплитуды 10-дневной волны, наблюдаемой в рассматриваемые годы. Величина амплитуды в 2016 году в 5 раз больше, чем в 2012 году.

Чтобы оценить влияние десятидневной волны на общую циркуляцию, рассматривались остаточная средняя циркуляция (ОМЦ) v* и вертикальная компонента потока Элиассена-Палма F_z, характеризующие взаимодействие волн со средним потоком. Результаты расчетов для 2012 и 2016 года показаны на рисунках 3 и 4. Расчёты показали, что вклад десятидневной волны в диагностические характеристики циркуляции существенно различается в условиях разной волновой активности. В год с низкой активностью десятидневной волны значение вихревой части ОМЦ находилось примерно в диапазоне (-0.054..0.040), в год с высокой активностью – (-0.1..1.2). Значения вертикальной составляющей потока ЭП находились соответственно в диапазонах (-0.006..0.015) в год с низкой активностью и (-0.02..0.22) в год с высокой активностью.

На рисунках 5 и 6 представлены остаточная средняя циркуляция (ОМЦ) и вертикальная компонента потока Элиассена-Палма, полученные для всего динамического режима атмосферы. При сравнении вклада десятидневной волны со значениями диагностических характеристик в целом по атмосфере можно заметить, что 10-дневная волна существенно влияет на меридиональную циркуляцию.

Полученные результаты согласуются с физическими представлениями о взаимодействии планетарных волн со средним потоком [7]. Усиление волновой активности приводит к увеличению потоков Элиассена–Палма и, как следствие, к более интенсивному индуцированному переносу импульса и массы в рамках остаточной меридиональной циркуляции.

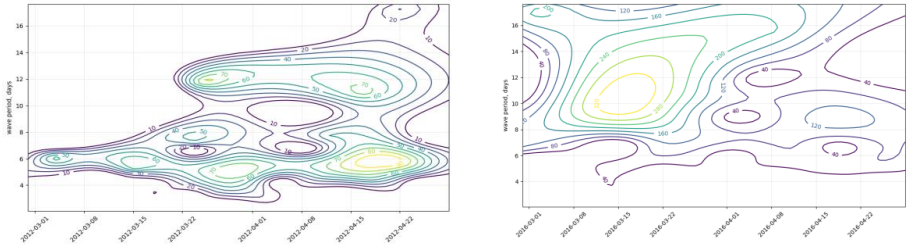


Рисунок 1 – Вейвлет-разложение зональной гармоники с волновым числом 1 в поле геопотенциальной высоты за 2012 (слева) и 2016 (справа) по данным UK MetOffice за март-апрель.

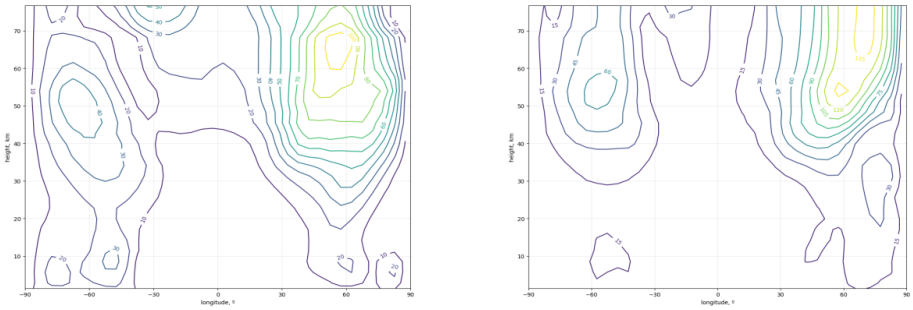


Рисунок 2 – Высотно-широтный разрез амплитуды бегущей на запад десятидневной волны в поле геопотенциальной высоты, усредненной за март-апрель в 2012 (слева) в 2016 (справа) по данным UK MetOffice реанализа.

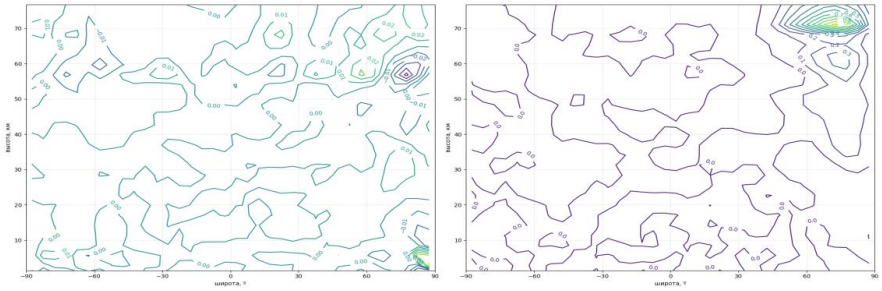


Рисунок 3 – Меридиональная компонента остаточной циркуляции, вызванная за счет активности 10-дневной волны в весенние месяцы 2012 год (слева) и 2016 год (справа)

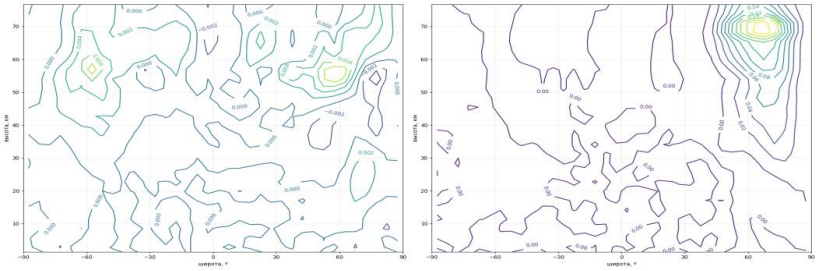


Рисунок 4 – Вертикальная компонента потока волновой активности (нижняя панель), вызванная за счет активности 10-дневной волны в весенние месяцы 2012 год (слева) и 2016 год (справа)

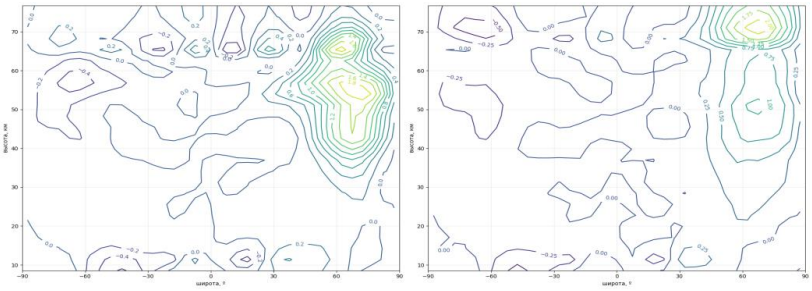


Рисунок 5 – Меридиональная компонента остаточной циркуляции, наблюдаемая в весенние месяцы 2012 год (слева) и 2016 год (справа)

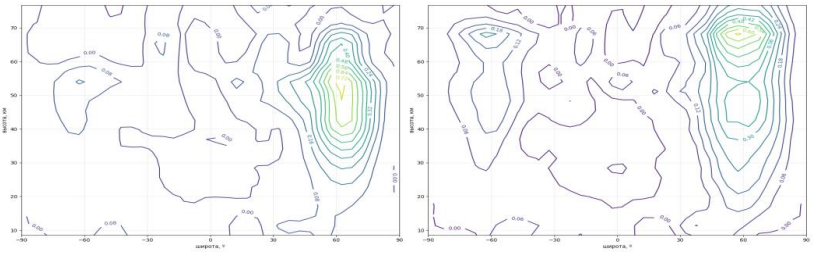


Рисунок 6 – Вертикальная компонента потока волновой активности, наблюдаемая в весенние месяцы 2012 год (слева) и 2016 год (справа)

Список литературы

1. *Dobson G. M. B*.: Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere, P. Roy. Soc. A-Math. Phy., 236, 187–193, 1956.
2. *Dobson G. M. B., Harrison, D. N., and Lawrence, J.*: Measurements of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, P. Roy. Soc. A-Math. Phy., 122, 456–486, 1929.
3. *Brewer A. W.:* Evidence for a world circulation provided by measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, Q. J. Roy. Meteor. Soc., 75, 351–363, https://doi.org/10.1002/qj.49707532603, 1949.
4. *Andrews D. G., Holton, J. R., and Leovy, C. B.:* Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press, Orlando, Florida, USA, 1987.
5. *Koval A.V., Wen Chen, K Didenko, T Ermakova, N. Gavrilov, A. Pogoreltsev, O. Toptunova, Ke Wei, A. Yarusova, A. Zarubin*.: Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events. Ann. Geophys., 39, 357–368, 2021, https://doi.org/10.5194/angeo-39-357-2021
6. *Daubechies I.* The wavelet transform, time–frequency localization and signal analysis. IEEE Transactions on Information Theory 5, 961–1005, 1990.
7. *Grose W. L.* (1984). Recent advances in understanding stratospheric dynamics and transport processes: Application of satellite data to their interpretation. Advances in Space Research, 4(4), 19-28.

ДИНАМИКА ТЕПЛООБЕСПЕЧЕННОСТИ И ОЦЕНКА АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ В 1980–2023 ГОДАХ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ВИНОГРАДАРСТВА

***Новикова О.А.*[1,2]**
[1] ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ), г. Санкт-Петербург, Россия,
[2]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, Россия, xelga.tyan@mail.ru

Аннотация. В статье представлен детальный анализ многолетней динамики и пространственного распределения сумм активных температур (САТ, $\geq 10^0$C) для 10 метеорологических станций Курганской области за период 1980–2023 гг. Описан метод расчета САТ (графический метод Давитая) и проведена статистическая оценка линейного тренда роста теплообеспеченности с использованием F- и t-критериев. Выявлен устойчивый положительный тренд, сопровождающийся высокой межгодовой стохастичностью. На основе рассчитанных значений САТ и номограммы Давитая произведена оценка агроклиматического потенциала региона, подтверждающая пригодность территории для культивирования среднеранних сортов винограда, и выявляющая лимитирующий характер тепла для среднепоздних сортов. Полученные данные служат основой для дальнейшего прогностического моделирования.
Ключевые слова. Сумма активных температур, агроклиматический потенциал, расчет САТ, графический метод Давитая, Курганская область, динамика температуры, виноградарство, климатические изменения.

DYNAMICS OF HEAT SUPPLY AND ASSESSMENT OF AGROCLIMATIC POTENTIAL OF THE KURGAN REGION IN 1980–2023 FOR THE DEVELOPMENT OF VITICULTURE

***Novikova O.A.*[1,2]**
[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian State Hydrometeorological University» (RSHU), Saint-Petersburg, Russia,
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint Petersburg State University» (SPbU), Saint-Petersburg, Russia, xelga.tyan@mail.ru

Annotation. The article presents a detailed analysis of the long-term dynamics and spatial distribution of the Sums of Active Temperatures (CAT, $\geq 10^0$C) for 10 meteorological stations in the Kurgan Oblast (Kurgan Region) over the period 1980–2023. The method for calculating SAT (Davitaya's graphical method) is described, and a statistical assessment of the linear trend of increasing heat supply is conducted using F. A stable positive trend, accompanied by high inter-annual stochasticity, has been identified. Based on the calculated SAT values and the Davitaya nomogram, the agroclimatic potential of the region is assessed. This assessment confirms the suitability of the territory for the cultivation of mid-early grape varieties but reveals the limiting nature of the heat supply for mid-late varieties. The obtained data serve as a basis for further prognostic modeling.
Keywords. Sums of Active Temperatures, agroclimatic potential, SAT calculation, Davitaya's graphical method, Kurgan Oblast, temperature dynamics, viticulture, climate change.

Введение. Сумма активных температур (САТ) является ключевым агроклиматическим показателем, отражающим тепловой потенциал территории и определяющим возможности выращивания сельскохозяйственных культур, включая виноград. Порог начала активной вегетации для виноградной лозы традиционно принимается при среднесуточной температуре воздуха выше +10 °C [1]. При накоплении необходимой суммы температур растение проходит основные фенологические фазы: от распускания почек до полного созревания ягод, и величина САТ напрямую определяет

достижение биологической зрелости.

Исследования показывают, что сорта винограда различаются по требованиям к теплу: для очень ранних сортов достаточно 2200–2400°С, для ранних — 2400–2600°С, для среднепоздних — 2600–2800°С, а для поздних — более 2800°С [2]. В Оренбургской области, близкой по климату к Зауралью, за вегетационные периоды 2020-2022 гг. САТ выше +10°С оценивались в диапазоне от 2496 до 3093°С, что позволяет уверенно выращивать сорта с требованиями в пределах 2200-2600°С, а для некоторых регионов и более теплолюбивые сорта могут пройти полный цикл созревания [3]. Согласно моделям районирования, территории, где САТ превышает 2500°С, считаются пригодными для стабильного возделывания винограда [4].

В последние десятилетия в Курганской области и на Южном Урале фиксируется устойчивая тенденция к потеплению климата. Среднегодовая температура воздуха за период наблюдений (в среднем с 1970-х по 2020 гг.) увеличилась на 1,2–1,8°С [5], что сопровождается ростом сумм активных температур и удлинением продолжительности теплого периода. Эти изменения создают предпосылки для расширения ареала возделывания теплолюбивых культур, включая виноград, в регионах Зауралья, ранее считавшихся недостаточно теплыми.

Таким образом, исследование динамики сумм активных температур в Курганской области представляет собой актуальную задачу для оценки перспектив адаптации виноградарства к меняющимся климатическим условиям и определения оптимальных зон культивации сортов различной скороспелости.

Материал и методика. Материалом для исследования послужили многолетние данные метеорологических наблюдений за период 1980–2023 гг., а именно среднемесячные температуры, по 10 метеостанциям Курганской области (Курган, Куртамыш, Лебяжье, Макушино, Половинное, Шатрово, Целинное, Шумиха, Звериноголовское, Шадринск).

На первом этапе работы была рассчитана целевая переменная — сумма активных температур (САТ) с порогом 10^0С. Расчет производился графическим методом Давитая с использованием среднемесячных температур, что позволяет определить количество накопленного тепла за период активной вегетации. Схема расчёта приведена на Рисунке 1.

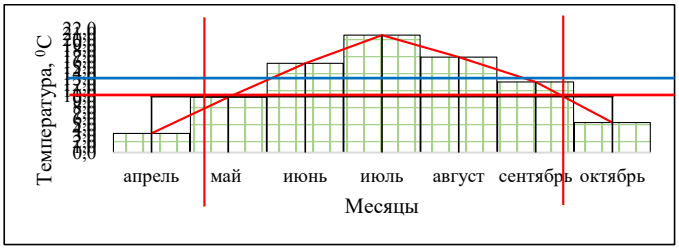


Рисунок 2 – Схема расчёта графического расчёта САТ методом Давитая. Расчётная диаграмма представлена для станции Курган за 2018 год

Для полных месяцев САТ рассчитывается по формуле 1. Для неполных месяцев требуется использование графического метода (Рисунок 1). Для корректного использования данного метода требуется использовать миллиметровую бумагу. Для каждого года строится среднемесячная температура воздуха (обычно ограничивают период месяцами, в которые происходит устойчивый переход через 10ºС) в виде гистограммы. Далее эту гистограмму необходимо аппроксимировать функцией тех же средних значений температуры. По горизонтали откладывают изотерму 10°С (черная линия на Рисунке 1), которая является индикатором начала и окончания периода

устойчивого перехода. Точки пересечения аппроксимирующей функции с изотермой $10°C$ проецируют на ось времени (месяцев) перпендикулярными линиями, определяя граничные даты периода с активными температурами. Горизонтально оси месяцев откладывают две линии. На Рисунке 1 красная линия отвечает за среднюю температуру неполного мая, а синяя — за среднюю температуру неполного сентября. Ближайшая справа точка пересечения ближайшей к полному месяцу с аппроксимирующей функцией температуры является индикатором средней температуры в мае. Для осеннего сезона ближайшая слева точка пересечения ближайшей к полному месяцу с аппроксимирующей функцией температуры является индикатором средней температуры в сентябре. Далее производится расчет по формуле 2.

$$\sum \mathrm{CAT}_{\text{полн}} = \sum_i (\overline{T}_i \cdot N_i), \quad (1)$$

где $\sum \mathrm{CAT}_{\text{полн}}$ – сумма активных температур за полные месяцы, $\overline{T}_i$– среднемесячная температура i-го месяца, Ni – количество дней в i-м месяце.

$$\sum \mathrm{CAT}_{\text{неполн}} = \sum \left(\frac{10+\overline{T}_{\text{нач}}}{2}\right) \cdot N_{\text{нач}} + \sum \left(\frac{10+\overline{T}_{\text{кон}}}{2}\right) \cdot N_{\text{кон}}, \quad (2)$$

где $\sum \mathrm{CAT}_{\text{неполн}}$ – сумма активных температур за переходные месяцы, $\overline{T}_{\text{нач}}$ и $\overline{T}_{\text{кон}}$ - среднемесячные температуры за активную часть соответствующего месяца (начала и конца вегетации), $N_{\text{нач}}$ и $N_{\text{кон}}$ – количество дней с температурой 10^0C в начале и конце вегетации, определенное графическим методом.

После расчета САТ была произведена статистическая оценка многолетней динамики. Для проверки устойчивости и статистической значимости выявленного линейного тренда роста САТ (зависимости САТ от года) были применены:

- Критерий Фишера (F-критерий): использовался для оценки общей значимости построенной линейной регрессии.
- Критерий Стьюдента (t-критерий): применялся для оценки значимости коэффициента наклона линейного тренда при уровне доверия а=0,05.

Результаты анализа подтвердили наличие значительной дисперсии остатков, что послужило основанием для дополнительной двухвыборочной оценки изменчивости характеристики.

Результаты исследования и их обсуждение**.** *Многолетняя динамика и изменчивость сумм активных температур (САТ).* Анализ многолетнего временного ряда САТ, рассчитанных по данным 10 метеорологических станций Курганской области за период 1980–2023 гг., выявил устойчивую положительную тенденцию к росту теплообеспеченности региона на 50% станций.

Этот тренд соответствует общемировым и общероссийским климатическим изменениям, характеризующимся увеличением продолжительности безморозного и активного вегетационного периодов за счёт сдвига начала активной вегетации с мая на третью декаду апреля [6].

Несмотря на наличие явного тренда, временной ряд САТ демонстрирует высокую межгодовую изменчивость. По результатам анализа, диапазон колебаний ежегодного показателя САТ относительно многолетней нормы составляет в среднем ±230°С. Столь значительные колебания подтверждают высокий климатический риск для сельскохозяйственного производства в регионе и обусловливают необходимость перехода от использования усредненных климатических норм к прогностическим моделям. Многолетние средние значения САТ (1980–2023 гг.) по территории

Курганской области распределены неравномерно, что отражает локальные неоднородности в распределении. Был выявлен градиент теплообеспеченности, направленный с юго-запада на северо-восток:

- Наибольшие значения САТ зафиксированы на юго-западных и южных станциях, таких как Звериноголовское (≈2388,5°С) и Половинное (≈2342,7°С).
- Минимальные значения САТ характерны для северо-восточных районов, в частности, для станции Шатрово (≈2083,5°С).
- Средний показатель САТ для центральных станций, включая Курган, Макушино и Шадринск, находится в диапазоне 2250–2270°С.

Таблица 4 - Оценка значимости тренда по статистическому критерию Стьюдента и Фишера

Станция	Оценка значимости температурного тренда								
	t-критерий Стьюдента				По Фишеру				Коэффициент корреляции
	Наблюдаемое	Табличное	P-Значение	Значим/ Незначим	Наблюдаемое	Табличное	Значимость F	Значим/ Незначим	
Курган	2,75	2,02	0,0088	Значим	10,25	4,07	0,000976	Значим	0,44
Куртамыш	1,89	2,02	0,0655	Незначим	5,54	4,07	0,055627	Значим	0,34
Лебяжье	2,25	2,02	0,0294	Значим	7,57	4,07	0,015850	Значим	0,39
Макушино	2,11	2,02	0,0412	Значим	6,72	4,07	0,021743	Значим	0,37
Половинное	2,49	2,02	0,0170	Значим	8,55	4,07	0,008873	Значим	0,41
Шатрово	1,70	2,02	0,0962	Незначим	4,79	4,07	0,039815	Значим	0,28
Целинное	1,74	2,02	0,0894	Незначим	4,78	4,07	0,045063	Значим	0,32
Шумиха	1,94	2,02	0,0592	Незначим	5,60	4,07	0,010013	Значим	0,34
Зверного-ловское	1,43	2,02	0,1600	Незначим	3,63	4,07	0,052290	Незначим	0,28
Шадринск	2,58	2,02	0,0134	Значим	9,18	4,07	0,004029	Значим	0,42

Следовательно, разница в теплообеспеченности между наиболее теплыми и наиболее холодными районами региона составляет порядка 300^0С, что является критическим фактором при районировании новых сельскохозяйственных культур. Пространственное распределение среднего многолетнего значения САТ за полный исследуемый период 1980–2023 гг. наглядно иллюстрирует выявленный региональный градиент (Рисунок 2).

Для оценки климатической изменчивости и её влияния на агроклиматические зоны, было проведено сравнение ключевых статистических параметров (среднее значение САТ и среднеквадратическое отклонение, СКО САТ) для двух временных выборок, отражающих старую и новую климатические нормы:

1. Первая выборка: 1980–2002 гг.
2. Вторая выборка: 2003–2023 гг.

Сравнение позволило количественно оценить увеличение теплообеспеченности и изменение стохастичности (СКО) в более поздний период, что видно на рисунке 4. Рисунок 3 демонстрирует пространственное распределение САТ для каждой выборки, позволяя визуально оценить общее потепление.

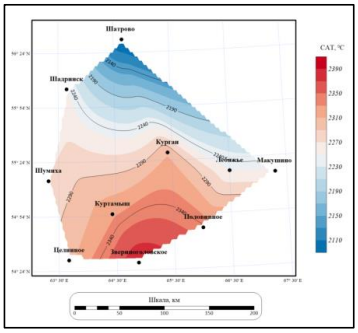
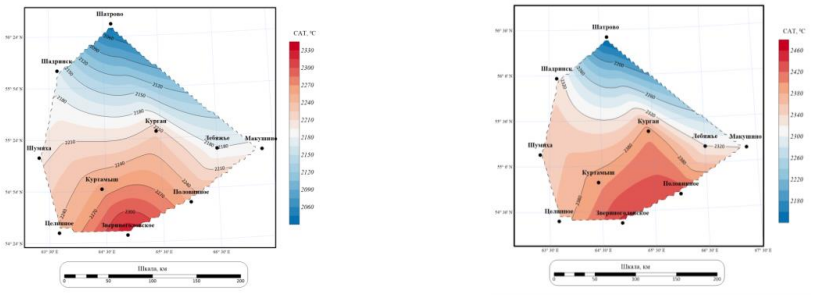


Рисунок 3 – Пространственное распределение нормы сумм активных температур (САТ, 10ºС) в Курганской области (1980–2023 гг.)



a b

Рисунок 4 – Пространственное распределение и эволюция теплообеспеченности (САТ) Курганской области в двух климатических периодах: 1980–2002 гг. (a) и 2003–2023 гг. (b)

Для детального анализа изменений был также рассчитан и картографирован прирост среднего значения САТ (ΔСАТ) и изменение дисперсии (ΔСКО) между второй и первой выборками. Рисунок 4 демонстрирует, что потепление не является равномерным и сопровождается значительными изменениями в межгодовой изменчивости, что имеет ключевое значение для оценки рисков.

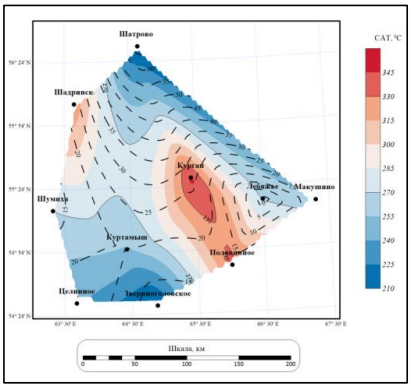


Рисунок 5 - Разница средних значений ΔСАТ (цветная заливка) и ΔСКО (пунктирная линия) между периодами 2003–2023 гг. и 1980–2002 гг.

Пространственный анализ, представленный на Рисунке 4, демонстрирует выраженную пространственную неоднородность климатических изменений. В исследуемый период по области зафиксирован средний прирост теплообеспеченности ΔСАТ>0, составивший 271.6ºС. Выявлен повсеместный положительный тренд, наиболее интенсивно проявляющийся в северо-западных, центральных и юго-западных районах Курганской области. Одновременно в большинстве исследованных районов фиксируется отрицательное значение ΔСКО, что свидетельствует о существенном снижении межгодовой стохастичности САТ в периоде 2003–2023 гг. по сравнению с периодом 1980–2002 гг. Данный факт указывает на повышение климатической предсказуемости тепловых ресурсов, что является благоприятным фактором для культивирования винограда. Максимум ΔСКО приходится на северные участки, по мере смещения к центру области, ΔСКО падает. Небольшой прирост ΔСКО=2.5ºС наблюдается на станции Лебяжье. В среднем по области ΔСКО уменьшилось на 21.5ºС.

На основе полученных расчетов САТ была проведена оценка агроклиматического потенциала региона для выращивания теплолюбивых культур. Диапазон многолетних средних значений САТ (2080–2390ºС) подтверждает пригодность территории Курганской области для культивирования раннеспелых, среднеранних и зимостойких сортов винограда. Используя показатели средних многолетних САТ и номограмму Ф.Ф. Давитая, была определена дата накопления необходимых температур для различных сортов. Результаты для уже активно выращиваемых сортов представлены в Таблице 2.

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что для сортов винограда с высокими требованиями к теплу (Изабелла, Двиевский, Мускат, Кишмиш) номограмма Ф.Ф. Давитая не позволяет установить прогнозируемые даты накопления необходимой суммы активных температур (САТ). Тем не менее, факт невозможности определения этих дат не исключает потенциальной возможности или целесообразности культивирования данных сортов. Как было отмечено, дефицит среднего многолетнего показателя САТ может быть компенсирован за счет высокой межгодовой изменчивости тепловых ресурсов (стохастичности). Поскольку осреднение сглаживает экстремумы, годовое значение САТ может колебаться в пределах 230ºС относительно нормы, тем самым обеспечивая растения требуемым объемом тепла в отдельные годы.

Таблица 5 - Даты накопления САТ от средней многолетней для различных сортов винограда на станциях Курганской области (1980-2023 гг.)

Станция	Средняя много-летняя	Изабелла	Алёшенькин	Двиевский	Мускат розовый	Поплавский	Кишмиш
		3100	2000	2400	2900	2200	3200
Курган	2307,9	-	26.авг	-	-	14.сен	-
Куртамыш	2326,0	-	25.авг	-	-	12.сен	-
Лебяжье	2250,1	-	29.авг	-	-	19.сен	-
Макушино	2253,5	-	29.авг	-	-	19.сен	-
Половинное	2342,7	-	25.авг	-	-	10.сен	-
Шатрово	2083,5	-	10.сен	-	-	-	-
Целинное	2304,6	-	26.авг	-	-	14.сен	-
Шумиха	2272,1	-	31.авг	-	-	17.сен	-
Звероного-ловское	2388,5	-	25.авг	-	-	10.сен	-
Шадринск	2251,7	-	29.авг	-	-	19.сен	-

Заключение

Анализ многолетней динамики сумм активных температур (САТ, $\geq 10°C$) в

Курганской области (1980–2023 гг.) выявил устойчивый и статистически значимый положительный тренд, сопровождающийся средним приростом САТ на 271.6°C. Важным результатом является зафиксированное в большинстве районов снижение межгодовой стохастичности, что повышает климатическую предсказуемость тепловых ресурсов для сельского хозяйства. При сохранении выраженного теплового градиента (от 2390°C на юго-западе до 2080°C на северо-востоке), теплообеспеченность региона подтверждает пригодность территории для культивирования раннеспелых и среднеранних сортов винограда. Для теплолюбивых сортов САТ остается лимитирующим фактором в среднемноголетнем разрезе, однако их потенциальное возделывание возможно в отдельные теплые годы, благодаря высокой межгодовой изменчивости. Таким образом, полученный массив данных составляет необходимую и надежную основу для следующего этапа работы: разработки и обучения моделей машинного обучения с целью сценарного прогнозирования сумм активных температур, что обеспечит научную базу для адаптации и оптимизации региональных агростратегий.

Список литературы

1. Червяк С. Н., Рыбалко Е. А., Олейникова В. А., Ермихина М. В. Оценка влияния климатических факторов на показатели качества винограда красных сортов // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 367–386. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-997.
2. Новикова Л. Ю., Озерский П. В. Прогноз зоны возделывания винограда на европейской территории России в условиях изменения климата // Вавиловский журнал генетики и селекции. — 2022. — Т. 26, № 3. — С. 264–271. DOI: 10.18699/VJGB-22-33.
3. Таблицы нормативов САТ для различных групп сортов винограда // Виноградарство и виноделие. — 2022. — Т. 74, № 2. — С. 50–61. DOI: 10.30679/2219-5335-2022-2-74-50-61.
4. Тихонова М. А. Хозяйственно-биологическая оценка темноягодных столовых сортов винограда (Vitis L.) в условиях Южного Урала // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. — 2023. — Т. 16, № 3(78). — С. 87–93. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_3_87
5. Ленская О. Ю., Ботова М. Г. Особенности текущих климатических изменений в регионе Южного Урала // Вестник Челябинского государственного университета. Экология. Природопользование. — 2011. — № 5 (220). — С. 44–49.
6. Новикова О. А., Двалишвили М. П. Анализ дат устойчивого перехода через 10°C на станциях Курганской области // Материалы II Международной научно-практической конференции. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2021. — С. 407–410.

СЕКЦИЯ 2

АНАЛИЗ И ПРОГНОЗ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНОПТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗА ПОГОДЫ НА МЕСЯЦ

Цепелев В.Ю.[1], Ильющенкова И.А.[2]
[1] Московский Физико-технический университет (МФТИ)
[2] ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ)
v0010200@mail.ru

Аннотация. Представлен метод сезонного прогноза «дрессинг», который уточняет ансамблевый прогноз погоды на месяц за счёт комбинирования двухмесячных предиктов модели CFSv2 с историческими аналогами циркуляции из архива наблюдений.
Ключевые слова. ансамблевый прогноз, синоптический метод

APPLICATION OF THE SYNOPTIC APPROACH FOR REFINING THE MONTHLY ENSEMBLE WEATHER FORECAST

Tsepelev V.Yu. [1], Ilyushchenkova I.A. [2]
[1] Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)
[2] State Research Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute (AARI)

Abstract. The seasonal forecasting method "dressing" is presented, which refines the monthly ensemble weather forecast by combining two-month lead predictors of the CFSv2 model with historical circulation analogues from the observational archive.
Keywords. Ensemble forecast, synoptic method.

В докладе представлен метод сезонного прогноза «дрессинг», разработанный для уточнения ансамблевых прогнозов погоды. Метод сочетает использование прогностического ансамбля модели CFSv2 с заблаговременностью два месяца и исторических аналогов (гомологов циркуляции), выбранных из архива наблюдений. Представленный подход позволяет учесть траекторию развития крупномасштабных циркуляционных процессов на длительном промежутке времени и скорректировать ансамблевый численный прогноз, в котором учтено влияние фактических начальных и граничных условий атмосферы. Метод предполагает статистическую калибровку использованного прогностического материала и его адаптивное взвешивание при формировании окончательного прогноза. Верификация метода проведена для Западной Арктики за период 2010–2018 гг. В исследовании показано, что метод «дрессинг» повышает такие оценки качества прогнозов температуры воздуха, как коэффициент корреляции (на 35%) и коэффициент геометрического подобия полей аномалий метеопараметров (на 10%) по сравнению с традиционным ансамблевым подходом.

ПОИСК ТОЧКИ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА ВЫСОКОГОРНОЙ МЕТЕОСТАНЦИИ ЦУГШПИТЦЕ

Рябова С.А.[1,2]
[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва
[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва
riabovasa@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются вариации среднемесячных значений температуры воздуха на высокогорной метеостанции Цугшпитце за период с августа 1900 г. по июль 2025 г. С целью выделения трендовой составляющей и нахождения точки изменения вариаций температуры использовались несколько методов: тест Манна-Кендалла, оценочная функция Тейла-Сена, метод сингулярного спектрального анализа, алгоритм CUSUM и метод сегментированного регрессионного анализа. Установлено, что в изменениях температуры воздуха наблюдается тенденция к росту температуры со временем, изменение темпа роста температуры отмечается примерно в 1969 г.
Ключевые слова. Температура воздуха, тест Манна-Кендалла, оценочная функция Тейла-Сена, метод сингулярного спектрального анализа, алгоритм CUSUM, сегментированный регрессионный анализ, темп изменения.

SEARCH FOR THE POINT OF CHANGE IN THE AVERAGE MONTHLY AIR TEMPERATURE AT THE HIGH-ALTITUDE WEATHER STATION OF ZUGSPITZE

Riabova S.A.[1,2]
[1] Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow
[2] Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Annotation. The variations in the average monthly air temperature at the high-altitude weather station of Zugspitze for the period from August 1900 to July 2025 are studied. Several methods were used to identify the trend component and locate the point of change in temperature variations, including Mann-Kendall test, Theil-Sen estimator, singular spectrum analysis, CUSUM algorithm, and segmented regression analysis. It was found that there is a trend towards an increase in air temperature over time, and the rate of temperature increase changed around 1969.
Keywords. Air temperature, Mann-Kendall test, Thiele-Sen estimator, singular spectrum analysis, CUSUM algorithm, segmented regression analysis, rate of change.

Период с 2023 г. по 2027 г. провозглашен Генеральной Ассамблеей ООН «Пятилетием действий по развитию горных регионов» [1], в связи с этим представляется актуальным исследование климатических особенностей высокогорных регионов, в том числе проведение анализа динамики температуры воздуха. К высокогорным районам относится гора Цугшпитце, где выполняется регистрация температуры воздуха с 1900 г. до настоящего момента (125 лет).

В ходе настоящей работы выполняется анализ временных вариаций среднемесячных и среднегодовых значений температуры воздуха по данным инструментальных наблюдений за вариациями температуры на высокогорной метеостанции Цугшпитце.

В рамках выполнения настоящих исследований рассматривались вариации среднемесячных значений температуры воздуха за период с августа 1900 г. по июль 2025 г. Следует отметить, что в данных имеется единственный разрыв, с мая по август 1945 г. Метеостанция Цугшпитце расположена на горе, на высоте 2574 м; географические координаты: 47°25'00" с.ш., 10°58'59" в.д.

Гора Цугшпитце – самая высокая точка Германии (высота составляет 2962 м), входит в состав хребта Веттерштайн, который является частью Северных Известняковых Альп. Цугшпитце находится в 11 км от немецкого города Гармиш-Партенкирхен и в 6 км от австрийского поселка Эрвальд. Несмотря на то, что гора Цугшпитце располагается на территории умеренного пояса, для ее вершины характерен тундровый климат с большим количеством осадков и довольно высокими температурами.

В настоящей работе с целью выделения трендовой составляющей и нахождения точки изменения скорости изменения температуры использовались: тест Манна-Кендалла, оценочная функция Тейла-Сена, метод сингулярного спектрального анализа и метод сегментированного регрессионного анализа.

В целом в период с 1901 г. по 2024 г. для условий горы Цугшпитце наблюдается повышение температуры воздуха с интенсификацией этих изменений в период с 1969 г. по 2024 г. Двухсегментная регрессия с точкой останова в примерно 1969 г. хорошо аппроксимирует вариации температуры за период с 1901 г. по 2024 г. (коэффициент детерминации составляет 0.61).

Представленные в работе результаты будут полезны для понимания временной динамики температуры воздуха в высокогорных (в настоящее время все еще слабо изученных) регионах и дополнят обширные исследования, проведенные в области метеорологии и атмосферных наук.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8) и рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Резолюция*, принятая Генеральной Ассамблеей 14 декабря 2022 года [по докладу Второго комитета (A/77/443/Add.11, пункт 7)] 77/172. Устойчивое горное развитие. https://docs.un.org/ru/A/RES/77/172

СРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАКОВ С ГРОЗОВЫМИ РАЗРЯДАМИ И БЕЗ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

Горбатовская А.С., Синькевич А.А., Тарабукин И.А., Куров А.Б.
Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
Ardnaxelai@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию радиолокационных и микрофизических характеристик грозовых и негрозовых облаков и основана на анализе 45 обзоров радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в поселке Воейково. Основная цель исследования - выявление специфических признаков грозовых облаков по сравнению с негрозовыми. Авторы использовали программу WRS для расчета радиолокационных и микрофизических характеристик облаков. Основные выводы подтверждают важную роль крупы низкой и высокой плотности в формировании грозовых разрядов. Обнаружено, что в облаках с грозовыми разрядами объемы облака с крупой значительно превышают аналогичные показатели в негрозовых облаках. Эти результаты способствуют лучшему пониманию механизмов электризации облаков и развитию методик прогнозирования и мониторинга опасных погодных явлений.
Ключевые слова. Радиолокационные данные, микрофизические характеристики облака, грозовые разряды, прогнозирование ОЯ.

COMPARISON OF RADAR AND MICROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CLOUDS WITH AND WITHOUT LIGHTNING DISCHARGES

Gorbatovskaya A.S.[1], Sin'kevich A.A.[1], Tarabukin I.A.[1], Kurov A.B.[1]
[1]The Voeikov Main Geophysical Observatory

Annotation. This study investigates the radar and microphysical characteristics of convective clouds with and without lightning discharges, based on the analysis of 45 scans from the DMRL-C weather radar located in Voeikovo. The main objective of the research is to identify specific features of thunderstorm clouds in comparison with non-thunderstorm clouds. The authors have used the WRS software to calculate the radar and microphysical characteristics of the clouds. The main results confirm the significant role of low- and high-density graupel in the formation of lightning discharges. It was found that in clouds with lightning discharges, the volumes of cloud with graupel significantly exceed those observed in non-thunderstorm clouds. These findings help to a better understanding of cloud electrification mechanisms and support the development of methods for forecasting and monitoring hazardous weather phenomena.
Keywords. Radar data, cloud microphysical characteristics, lightning discharges, hazardous weather forecasting.

Гроза является опасным явлением погоды и в большинстве случаев ее формирование связано с кучево-дождевыми облаками. Из таких облаков выпадают осадки ливневого характера в виде дождя, снега, мокрого снега, крупы и града, а также в них образуются грозы [1, 2, 3].

Целью данной работы является сравнение радиолокационных и микрофизических характеристик грозовых и негрозовых облаков.

В данной работе проанализировано 45 обзоров радиолокатора ДМРЛ-С, установленного в п. Воейково. Зафиксированы характеристики конвективных облаков за 12 выбранных дней. Выбирались дни с грозами и сильными осадками. Методика выбора случаев для анализа заключалась в следующем:

- рассматривались дни теплого периода года с грозами и сильными осадками,
- исследовался период с 8:00 – 22:20 – период интенсивного развития конвекции,
- за час (например, в р/л сроки с 13:10 до 14:00) выбиралось облако с наиболее интенсивными осадками среди всего поля облаков в зоне обзора радиолокатора.

Синоптическая ситуация характеризовалась прохождением фронтов разных типов (ХФ, ТФ, ФО). Как правило, рассматриваемые облака находились в центре циклона, но в нескольких случаях и в тыловой части циклона. Рассматриваемые облака представляли собой как одноячейковые, так и часть многоячейковой системы конвективных облаков.

Для статистического анализа выбраны следующие характеристики: Z_{max} – максимальная отражаемость в выбранном облаке в dBZ, h_{top5} (5 dBZ) высота верхней границы в км по уровню 5 dBZ, h_{Zmax} – высота расположения пикселя с максимальной отражаемостью в км.

По программе WRS для каждого случая были рассчитаны радиолокационные характеристики и параметры микроструктуры облака, определенные по методике [4]. В данной работе рассмотрена микроструктура облака выше нулевой изотермы. Представлены объемы облаков ($км^3$) с рассматриваемыми частицами.

Наиболее важными частицами, влияющими на формирование грозовых разрядов, являются ледяные кристаллы (вертикально расположенные кристаллы VI, кристаллы CR, сухой снег DS, крупа низкой LDG и высокой плотности HDG). Формирование интенсивных осадков связано с наличием снежных кристаллов (DS – сухой снег, WS – мокрый снег), дождевых капель RN, крупы и градовых частиц (HA).

Был выполнен статистический анализ всего массива данных. Отдельно анализировались характеристики облаков с разрядами и без них. Результаты этого анализа представлены в таблицах 1, 2 и на рисунке 1.

Таблица 1 - Статистические характеристики (микрофизические) облаков с грозовыми разрядами (числитель) и без грозовых разрядов(знаменатель)

	Vl	CR	DS	WS	RN	LDG	HDG	HA
Среднее значение	65,1/67,3	4,6/0,9	491,4/293,3	0,9/0,7	122,8/86,1	486,1/55,4	258,3/86,1	69,4/9,4
Макс	203,4/489,7	26,2/22,2	2250/1597	6,4/6,1	377,0/307,1	1769/327	714,8/279,3	291,0/46,8
Мин	4,4/0	0,0/0,0	100,7/0,4	0,0/0,0	30,7/2,4	55,9/0	61,7/0,3	7,8/0
Медиана	44,9/26,8	0,0/0,0	312,6/165,3	0,4/0,4	102,8/60,5	332,3/31,9	204,0/75,9	42,1/1,5

Таблица 2 - Статистические характеристики (радиолокационные) облаков с грозовыми разрядами (числитель) и без грозовых разрядов(знаменатель)

	Z_{max}	h_{toh5}	h_{Zmax}
Среднее значение	63,3/59,5	12,0/9,0	2,3/1,8
Макс	69,0/67,5	15,0/13,4	4,6/4,9
Мин	56,5/44,5	8,6/4,1	1,0/1,0
Медиана	63,3/60,3	12,0/9,6	1,7/1,5

В 90% всех случаев Z_{max} находится в пределах 54-68 dBZ. Отражаемость Z_{max} меняется в пределах от 56,5 до 69 dBZ в грозовых, и от 44,5 до 67,5 dBZ в негрозовых облаках, при этом медианное значение равно 63,3 и 60,3 соответственно. Наличие больших значений максимальной отражаемости указывает на то, что в облаках обоих типов присутствовали крупные частицы.

На рисунке 1 приведена повторяемость значений Z_{max} в рассматриваемых группах облаков.

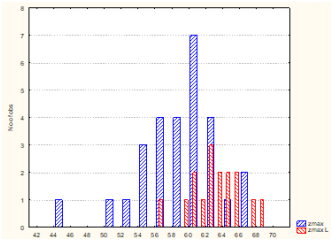


Рисунок 1 - Z_{max} в облаках с грозовыми разрядами (красный) и без них (синий)

Из графика (рис.1) видно, что Z_{max} в облаках без грозовых разрядов имеют меньшие значения, чем в облаках с грозовыми разрядами. Видимо, это связано с существенной разницей в наличии крупных частиц.

Высота максимальной отражаемости h_{Zmax} в большинстве случаев составляла 1-3 км (рис. 2, таблица 2). Как правило, пиксель с максимальной отражаемость располагался вблизи 2 км. Это указывало на наличие выпадающих осадков, что подтверждает карта метеоявлений ДМРЛ-С. Повторяемость более высоких значений h_{Zmax} в облаках без разрядов оказалась больше, чем в облаках с разрядами.

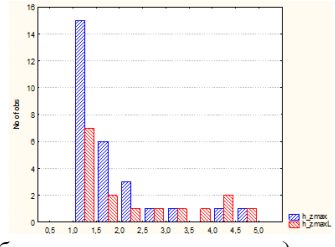


Рисунок 2 – h_{Zmax} в облаках с грозовыми разрядами (красный) и без них (синий)

Уровень отражаемости 5 dBZ, который может рассматриваться в качестве высоты верхней границы облака, находился в пределах 4-8 км. В 82% случаев h_{top5} колеблется в диапазоне 8 – 15 км. Из рисунка 3 видно, что данный уровень при наличие грозовых разрядов превосходит тот, который наблюдается в отсутствии грозовых разрядов. Медианное значение h_{top5} в грозовых облаках равно 12 км, а в негрозовых облаках 9,6 км.

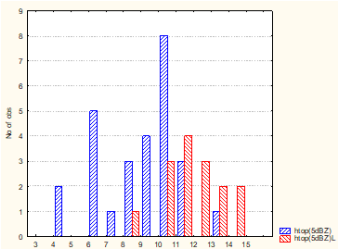
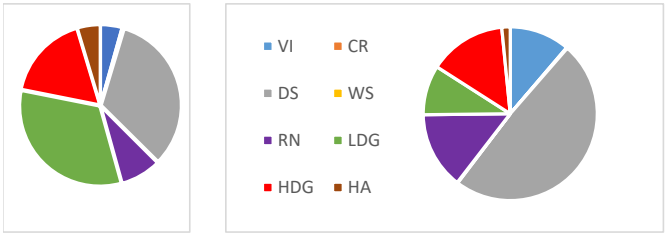


Рисунок 3 - h_{top5} в облаках с грозовыми разрядами (красный) и без них (синий)

Данные об объемах облака с выбранной микроструктурой представлены на рисунке 4.



а б

Рисунок 4 - Состав переохлажденной части облака с грозовыми разрядами (а) и без грозовых разрядов (б)

Анализируя круговые диаграммы можно сделать выводы:

1. В облаках с грозовыми разрядами рассчитанные объемы с сухим снегом (DS) меньше, чем в облаках без разрядов. По полученным данным переохлажденная часть негрозовых облаков практически на 50% состоят из сухого снега, а грозовые примерно на 33%.
2. В грозовых облаках объемы с крупой малой плотности (LDG) значительно больше, чем в негрозовых (медианные значения 332,3 и 31,9 км^3 соответственно). Объемы с крупой высокой плотности (HDG) примерно одинаковы. Суммарно общие объемы облака с крупой высокой и низкой плотности в облаках с грозовыми разрядами значительно больше, чем в облаках без грозовых разрядов.
3. В грозовом облаке объемы с кристаллами (CR) и каплями дождя (RN) оказались меньше, чем в негрозовых облаках. При этом в них наблюдается большие объемы с градовыми частицами (HA) (медианные значения в грозовых облаках 42,1, а в негрозовых – 1,5 км^3).
4. Объемы с остальными рассматриваемыми частицами оказались в очень незначительном количестве.

Выводы

В данной работе исследовалась связь грозовых разрядов с параметрами облаков, полученных по радиолокационным измерениям. Весь массив данных был поделен на случаи с разрядами и без разрядов. Результаты анализа показали, что в грозовых облаках

объемы с крупой в 5 раз больше, чем в облаках без грозовых разрядов. Этот результат соответствует принятой гипотезе о важнейшей роли крупы в электризации облака.

Список литературы

1. *Степаненко В.Д.* Радиолокация в метеорологии. Л: Гидрометеоиздат, 1973. 343 с.
2. *Синькевич А.А., Куров А.Б., Торопова М.Л., Тарабукин И.А., Михайловский Ю.П., Федотова Г.Д., Юсупов И.Е.* Структура кучево-дождевого облака при переходе в грозовую стадию и при наибольшей грозовой активности. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2025. № 618. С. 58-83.
3. *Веремей Н.Е., Торопова М.Л., Куров А.Б., Довгалюк Ю.А., Михайловский Ю.П., Синькевич А.А.* Взаимосвязь между молниевой активностью грозового облака и образованием и распределением града крупы.
4. Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2024. № 612. С. 109-124.
5. *Dolan B., Rutledge S. A., Lim S.* A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset. J. Appl. Meteorol. Climatol. 2013. vol. 52. P. 2162–2186; doi: 10.1175/JAMC-D-12-0275.1.

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Небышинец А.М., Гледко Ю.А.
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
arinanebyshinec@gmail.com, gledko74@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены особенности изменения температурного режима на территории Беларуси в условиях современного изменения климата. Исследование выполнено на основе данных 45 метеостанций за 1989–2024 гг. Проанализированы пространственно-временные закономерности распределения абсолютных минимумов и максимумов температуры воздуха, а также среднегодовых значений минимальной и максимальной температуры. Выявлены региональные различия в проявлении температурного режима, что позволяет рассматривать температурные экстремумы как один из индикаторов климатической уязвимости территории.
Ключевые слова. Изменение климата, температурный режим, экстремальные температуры, пространственно-временной анализ.

CHANGES IN TEMPERATURE PATTERNS IN BELARUS UNDER CLIMATE CHANGE CONDITIONS

Nebyshynets A.M., Hledko Y.A.
Belarusian State University, Minsk, Belarus

Annotation. The article examines the characteristics of temperature changes in Belarus under conditions of modern climate change. The study is based on data from 45 weather stations for the period 1989–2024. The spatio-temporal patterns of the distribution of absolute minimum and maximum air temperatures, as well as the average annual minimum and maximum temperatures, were analysed. Regional differences in temperature patterns were identified, which allows temperature extremes to be considered as one of the indicators of the climate vulnerability of the territory.
Key words. Climate change, temperature regime, extreme temperatures, spatio-temporal analysis.

Вопрос изучения климата и температурного режима на территории Беларуси освещен в ряде работ. В работе [1] показано, что в период 1900-2014 гг. годовые температуры воздуха на территории Беларуси колеблются около климатологической нормы (1881– 1990 гг.). Только 1996 г. выпал из череды теплых лет: его средняя годовая температура воздуха была несколько ниже нормы. За послевоенный период (с 1945 г.) из 20 самых теплых лет 17 приходятся на нынешний период потепления, так же отмечено, что рост температуры наиболее значителен в зимние и первые весенние месяцы. Современный период потепления на территории Беларуси отмечается с 1989 года, превышение среднегодовой температуры воздуха за период 1989-2019 гг. по сравнению с нормой 1961-1990 гг. составило 1,3°С [2].

Происходящее в настоящее время глобальное потепление климата не прекращает находить подтверждение в данных наблюдений. По данным гидрометеорологических наблюдений в Беларуси за последние несколько лет среднегодовая температура воздуха увеличилась на 1,1°С, при этом количество осадков, выпадающих на территории республики, изменилось незначительно [3]. Изменение климата в Беларуси приводит не только к увеличению числа засушливых явлений, но и к увеличению экстремальности таких неблагоприятных явлений, вызванных природными факторами, как заморозки, очень сильный ветер, шквалы, сильные ливни и др.

На фоне изменения климата особый интерес представляет анализ экстремальных температур воздуха, поскольку именно они наиболее ярко отражают климатическую изменчивость и позволяют оценить степень уязвимости природных и хозяйственных систем к современным климатическим изменениям. Изучение пространственного распределения абсолютных минимумов и максимумов температуры, а также среднегодовых значений минимальной и максимальной температуры даёт возможность выявить региональные особенности температурного режима и определить территории, которые наиболее чувствительны к климатическим изменениям.

В рамках анализа температурного режима в качестве временного интервала был выбран период 1989–2024 гг., характеризующийся устойчивой тенденцией к потеплению климата, что делает его репрезентативным для оценки современных климатических изменений. Данный отрезок охватывает как начальные этапы усиления глобального изменения климата, так и его наиболее актуальные проявления в последние годы. За выбранный период были рассмотрены абсолютные экстремумы (максимальные и минимальные температуры), а также средние годовые значения абсолютных минимумов и максимумов температуры воздуха по 45 метеостанциям [4]. На основе собранных данных построены график и карты, отражающие пространственно-временное распределение температуры на территории Беларуси.

Анализ временного распределения случаев абсолютных экстремумов температуры воздуха (рисунок 1) показывает неоднородный характер их проявления в течение 1989–2024 гг. В 1990-х и начале 2000-х годов преобладали абсолютные минимумы, что указывает на частые зимние похолодания. С 2010-х годов отмечается сдвиг в сторону абсолютных максимумов, особенно в 2010 году (23 случая) — это свидетельствует о резком усилении летней жары и подтверждает тенденцию к потеплению климата. Пик минимумов зафиксирован в 2012 году (12 случаев). В ряде лет экстремумы не обновлялись, что связано с климатической устойчивостью. График отражает усиливающуюся климатическую изменчивость и рост частоты температурных аномалий.

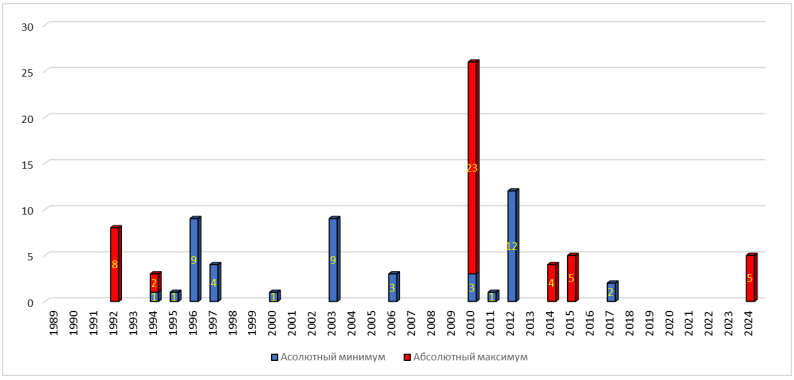


Рисунок 1 – Число случаев абсолютных минимумов и максимумов температуры

Анализ пространственного распределения экстремальных температур воздуха позволяет выделить следующие закономерности. Абсолютные минимумы температуры демонстрируют тенденцию к возрастанию в направлении с юго-запада на северо-восток, что может быть связано с особенностями циркуляции воздушных масс, континентальностью климата и рельефом региона. В то же время абсолютные максимумы температуры увеличиваются в направлении с запада на восток, что, вероятно, отражает нарастание континентальности климатических условий и уменьшение влияния атлантических воздушных масс.

Абсолютные минимумы температуры воздуха варьируют от –26,2 °С (Брест) до –36,3 °С (Кличев). Наименьшие значения характерны для юго-западных регионов, в то время как наиболее экстремальные отрицательные температуры зафиксированы в центральной, южной и юго-восточной частях страны (рисунок 2). Абсолютные максимумы температуры воздуха демонстрируют диапазон от 34,2 °С (Новогрудок и Ошмяны) до 38,9 °С (Гомель). Максимальные значения сосредоточены преимущественно на юго-востоке и востоке, где фиксируются наиболее высокие температуры в летний период (рисунок 3).

Анализ пространственного распределения среднегодовых температур воздуха на территории Беларуси позволяет установить следующие закономерности. Средние минимальные температуры воздуха увеличиваются в направлении с северо-востока на юго-запад. Когда средние максимальные температуры воздуха также увеличиваются с севера на юг.

Среднегодовые значения минимальных температур воздуха варьируют от 2,10 °С (Езерище) до 5,02 °С (Брест). Наименьшие средние минимумы наблюдаются в северо-восточной части, тогда как более высокие значения характерны для юго-западных районов, включая Полесье и Брестскую область (рисунок 4). Распределение характеризуется отчётливым градиентом от юго-запада к северо-востоку с понижением средних минимумов температуры, что обусловлено как широтным положением, так и различиями в циркуляционных и рельефных факторах.

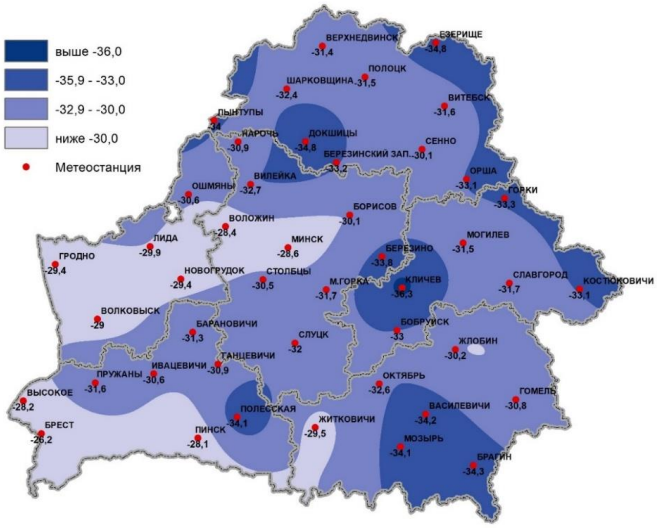


Рисунок 2 – Распределение абсолютных минимумов температуры воздуха по территории Беларуси за период 1989-2024, °С

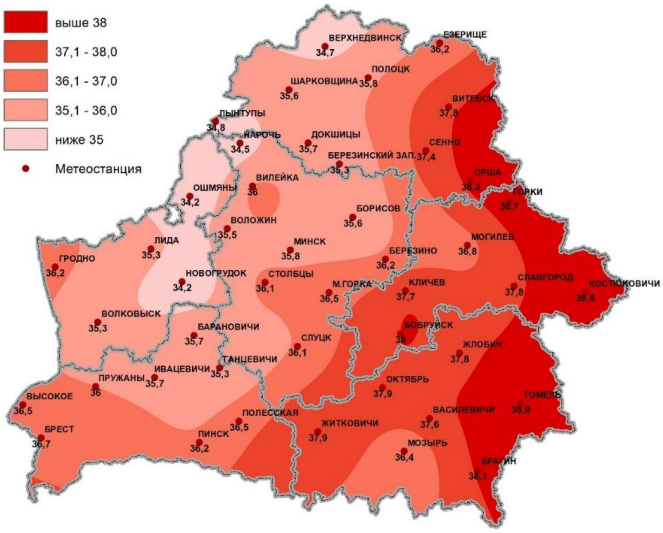


Рисунок 3 – Распределение абсолютных максимумов температуры по территории Беларуси за период 1989-2024, °С

Среднегодовые значения максимальных температур воздуха изменяются от 10,20 °С (Езерище) до 13,22 °С (Брест). Территориально наблюдается чёткий градиент от северо-востока к юго-западу, где фиксируются наивысшие значения температуры воздуха (рисунок 5). Прослеживается ярко выраженный юго-запад — северо-восточный градиент, отражающий постепенное снижение среднегодовых максимумов температуры воздуха с запада и юга к северо-востоку страны.

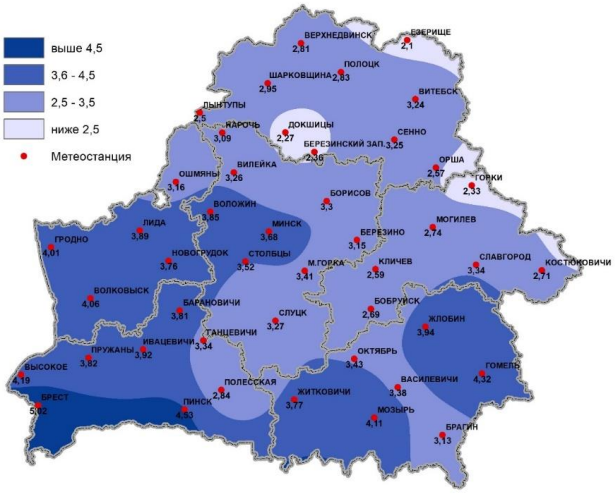


Рисунок 4 – Распределение средних годовых значений минимумов температуры воздуха за период 1989-2024, °С

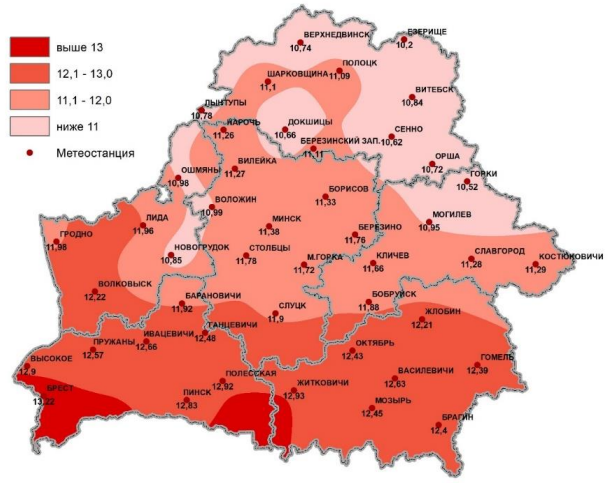


Рисунок 5 – Распределение средних годовых значений максимумов температуры воздуха за период 1989-2024, °С

В результате проведённого исследования установлено, что на территории Беларуси в период 1989–2024 гг. наблюдаются выраженные изменения температурного режима, связанные с современным потеплением климата. Выявлена тенденция к увеличению среднегодовых температур воздуха и росту числа абсолютных максимумов, особенно в последние десятилетия. Одновременно сохраняется пространственная неоднородность распределения как минимальных, так и максимальных температур, что указывает на различную степень проявления климатических изменений в пределах территории страны.

Полученные результаты свидетельствуют о нарастании температурной экстремальности и позволяют рассматривать экстремальные температуры воздуха как

важный показатель климатической уязвимости Беларуси. Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных закономерностей при климатическом районировании, оценке природных рисков и разработке адаптационных мер в условиях изменяющегося климата.

Список литературы

1. *Подгорная Е., Мельник В., Комаровская Е.* Особенности изменения климата на территории Беларуси в последние десятилетия // Труды Гидрометеорологического научного центра Российской Федерации. 2015. №358. С. 112–120.
2. Прогноз состояния окружающей среды Беларуси на период до 2035 года: отчет о НИР (промежут.) / Институт природопользования НАН Беларуси: рук. В.С. Хомич. – Минск, 2020. - 315 с. - № ГР 20192690.
3. Национальный доклад: Уязвимость и адаптация к изменению климата в Беларуси. – Минск: Форум восточных стран по климату, 2014. – 45 с.
4. ГКК. (1989-2024 гг.). Государственный климатический кадастр: материалы наблюдений Государственной сети гидрометеорологических наблюдений Республики Беларусь. № свид-ва 0870100021. Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЙОНОВ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ УЗБЕКИСТАНА

Вдовенко А.И.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
alena-meteo@mail.ru

Аннотация. В статье выполнено исследование временных рядов и осуществлено моделирование среднемесячных температур воздуха за период наблюдений с 1960-2024гг. (января, апреля, июля и октября месяцев) по территории Узбекистана. Оценка изменений климата по территории Узбекистана за более длительные периоды выполнена по среднемесячным данным с 75 метеорологических станций.
Ключевые слова. Изменение климата, многолетние ряды наблюдений среднемесячных температур воздуха, пространственные закономерности

IDENTIFYING AREAS WITH CLIMATIC AIR TEMPERATURE CHANGES IN UZBEKISTAN

Vdovenko A.I.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg,

Abstract. The article presents a study of time series and modeling of average monthly air temperatures for the observation periods from 1960–2024 (January, April, July, and October) across Uzbekistan. Climate change in Uzbekistan over longer periods is assessed using average monthly data from 75 meteorological stations.
Keywords. Climate change, long-term series of average monthly air temperature observations, spatial patterns.

Проблема современного изменения климата является одной из главных проблем человечества. В соответствии с тем, что причины изменения климата однозначно не определены, связанное потепление и темпы роста температур воздуха, это преобладание изменения с естественной или антропогенной причиной, и в разных частях

Земли темпы роста температур определяются по разному, в том числе и на территории Республики Узбекистан [1, 5, 6].

Для этого возникает необходимость в региональной оценке климатических изменений на территории Узбекистана. В исследовании и моделировании по наиболее продолжительным рядам наблюдений за температурой воздуха их причины изменения температурного режима в исследуемой территории.

Рассчитаны необходимые характеристики за интервал времени с 1960–2024 годы, когда современные изменения климата стали наиболее ощутимы.

Оценка климатических изменений среднемесячных температур воздуха станциям расположенных на территории Узбекистана. В данной работе была использована методика, основанная на сравнении остаточных дисперсий нестационарных моделей, которая была успешно применена в работах [8, 9, 10, 11].

Проведено моделирование и рассчитаны показатели нестационарности моделей для рядов температур воздуха всех месяцев года на 75 станциях за период 1960–2024 гг. Результаты в виде коэффициентов корреляции (r) между температурой воздуха и годом наблюдений (временем) по территории Узбекистана изменяются в широких пределах с максимальными значениями 0.72–0.78 в апреле и июле на северо-западе (рисунок 1).

На основе вычисленных изменений температур ΔT в ºС за период 1960-2024 гг. для среднемесячных температур по всем 75 метеостанциям было проведено их пространственное обобщение, представленное в виде пространственных распределений ΔT в °С для средних месяцев всех сезонов года (рисунок 2).

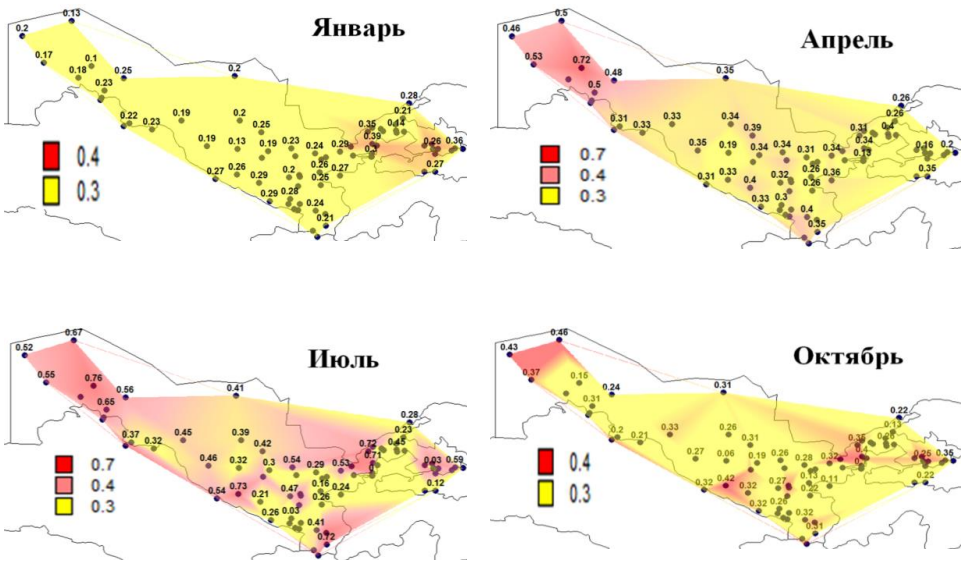


Рисунок 1 – Пространственные распределения коэффициентов r температур воздуха со временем за период 1960-2024 гг.

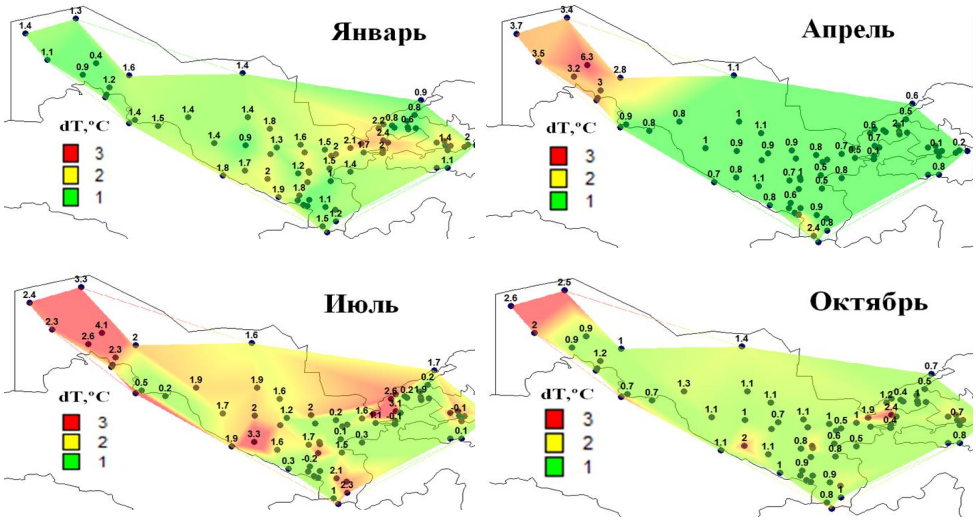


Рисунок 2 – Показатели количественных изменений температур воздуха ΔT, ºC за период 1960-2024 гг.

По территории летом и в теплые сезоны года (весна – осень) наибольший рост температур до 3-4°С имеет место на северо-востоке Каракалпакстана около побережья высыхающего Аральского моря. Если рассматривать по отдельным месяцам теплого периода года, то в апреле рост средних температур от 2,3 ºС до 3,7 ºС приходится на северо-западные, западные, южные и юго-восточные части республики. В июле изменения температур имели место на большей части республики и составляли от 3,2 ºС до 4,1 ºС в северных, северо-западных и западных районах Устюрта, низовьях Амударьи и Приаралья Каракалпакской Республики, а также на станциях городского типа. расположенных в южной и центральной частях страны. В октябре изменения приходятся на северо-западные районы Устюрта, юго-западную, южную и центральную части республики, составляя от 2,0 º до 2,6 ºС.

Список литературы

1. *В.Е. Чуб* «Изменение климата и его влияние на природно–ресурсный потенциал Республики Узбекистан», г. Ташкент, 2000 г. —252 с.
2. Первое национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата, 1999 г. — 78—85 с.
3. Четвертое национальное сообщение Республики Узбекистан по рамочной конвенции ООН об изменении климата, 2024 г. —115—125 с.
4. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) климатический центра Росгидромета. Сборник избранных работ М.И. Будыко, Санкт-Петербург, 2020 г. 212 с.
5. *Будыко М.И., Гройсман П.Я.* Потепление 80-х годов. Метеорология и гидрология, № 3. 1989 г. —5—10 с.
6. *Ким И.С.* Короткопериодные колебания климата Средней Азии и методики прогнозирования. Ташкент, САНИГМИ, 1996 г. —149 с.
7. *Малинин В. Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб., Изд. РГГМУ, 2008 г. —408 с.

8. *Лобанов В. А., Лемешко Н. А., Жильцова Е. Л. и др.* Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на Европейской территории России. Метеорология и гидрология, № 2. 2005 г. 5—14 с.
9. *Лобанов В. А., Абанников В. Н., Окуличева А. А., Григорьева А. А.* Современные и будущие изменения климата Ленинградской области и их влияние на агроклиматические характеристики. Метеорология и гидрология, №9. 2023 г., —100—113 с.
10. *Тощакова Г. Г.* Особенности и причины современных климатических изменений в России. Географический вестник. Пермский университет, № 3(38). 2016 г. —79—89 с.
11. *Шукри О. А. А., Лобанов В. А., Хамид М. С.* Современный и будущий климат Аравийского полуострова. Монография, СПб.: РГГМУ, 2018 г. —190 с.

АНАЛИЗ ПОВТОРЯЕМОСТИ РАДИАЦИОННОГО ТУМАНА В НИЗМЕННЫХ РАВНИННЫХ И ВОЗВЫШЕННЫХ ПЛОСКОГОРНЫХ РАЙОНАХ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Закусилов В.П., Касымжомарт Е.Г.
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж
zakusilov04@yandex.ru

Аннотация. В статье приведен анализ повторяемости возникновения радиационного тумана в республике Казахстан на территориях с различными физико-географическими условиями: в низменных равнинных и возвышенных плоскогорных районах.
*Ключевые слова. Р*еспублика Казахстан, повторяемость радиационного тумана, низменный равнинный район, возвышенный плоскогорный район. сравнительный анализ, пространственно-временной анализ.

ANALYSIS OF THE REPETITION OF RADIATION FOG IN LOW-LAND PLAIN AND HIGH-LAND PLATEAU AREAS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Zakusilov V.P., Kasymzhomart E.G.
Military Educational and Scientific Center of the Air Force «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»

Abstract. The article provides an analysis of the frequency of occurrence of radiation fog in the Republic of Kazakhstan in areas with different physical and geographical conditions: in low-lying plains and elevated plateau regions.
Keywords. Republic of Kazakhstan, radiation fog recurrence, low-lying flat area, high-lying plateau area. comparative analysis, space-time analysis.

Горизонтальная дальность видимости – это метеорологическая характеристика, которая, в сочетании с высотой нижней границы облаков, определяет степень сложности метеорологических условий для применения авиации. При ограниченной видимости на взлетно-посадочной полосе, по курсу взлета или посадки полеты могут ограничиваться или не производиться [1].

Метеорологическим явлением, существенно ограничивающим видимость, является туман, характеризующийся совокупностью взвешенных в воздухе капель воды или кристаллов льда, ухудшающих дальность горизонтальной видимости до значений менее одного километра. Это явление существенно влияет на безопасность полетов в метеорологическом отношении. Для подавляющего большинства типов воздушных судов в тумане руководящими документами, как правило, взлет и посадка запрещены [2, 3].

В процессе функциональной деятельности военного инженера-метеоролога

особенно важен точный прогноз метеорологических величин, влияющих на безопасность полетов, в том числе явлений, существенно ухудшающих видимость, к которым относится туман. Как известно, точность прогнозов во многом зависит от учета местных физико-географических условий [4].

Целью работы является исследование повторяемости возникновения радиационного тумана на территории республики Казахстан, выявление климатических особенностей его пространственно-временного распределения в относительно низменных равнинных и возвышенных плоскогорных районах, которые могут быть использованы в прогностической деятельности.

Рельеф местности Казахстана разнообразен. Северную часть региона занимает Западно-Сибирская низменность, к югу от которой территория повышается. На западе Казахстана находится Прикаспийская низменность; в районах, прилегающих с востока и северо-востока к Аральскому морю – Туранская низменность. Центральную и восточную часть занимает Казахский мелкосопочник – древняя сильно разрушенная горная страна.

На территорию Казахстана поступают воздушные массы различного происхождения. Арктические – приходят из Гренландии и сибирского сектора Арктики, умеренные (полярные) формируются над Атлантикой, Европой и Западной Сибирью, а тропические поступают со Средиземного моря, из Северной Африки и Юго-Восточной Азии. В летнее время тропический воздух формируется непосредственно над территорией Казахстана, становясь местной воздушной массой [3].

Анализ атмосферных процессов показал, что в среднем за год на территории Казахстана наблюдается антициклонов 10%, циклонов 6%, малоградиентных барических образований 22%, гребней 32%, ложбин 18%, волновых возмущений 12%. Благоприятные условия для возникновения радиационного тумана складываются в антициклоне, гребне, малоградиентном барическом поле.

В работе проведено уточнение повторяемости возникновения радиационных туманов на территории республики Казахстан в относительно низменном равнинном (на западе территории) и возвышенном плоскогорном (в центре территории) районах. Анализ возникновения туманов проведен по месяцам в течение всего года, с детализацией особенностей возникновения явления в течение суток. Данные, привлекаемые к исследованию включали в себя суточные ежечасные наблюдения за 10-летний период: с 2016 по 2025 годы по данным аэропортов Уральск (низменный равнинный район) и Астана (возвышенный плоскогорный район).

Среднее число дней с радиационным туманом по месяцам характерное для низменных равнинных районов республики Казахстан приведено на рисунке 1. Из его анализа следует, что в низменных равнинных районах радиационный туман наблюдается в холодный и переходные периоды года, с сентября по апрель, с максимумом от 5 до 18 дней (в среднем около 9 дней), в феврале, от 5 до 8 дней в период с ноября по февраль и в марте, 2-3 дня – в октябре и апреле. В период с мая по август радиационный туман бывает крайне редко и не каждый год.

Это подтверждается и общей продолжительностью радиационного тумана. В период максимальной повторяемости средняя продолжительность радиационного тумана составляет чуть больше 60 часов в месяц, с ноября по январь и в марте отмечается от 29 до 35 часов, в апреле, октябре – 9-12 часов, в остальные месяцы не более 3 часов в месяц.

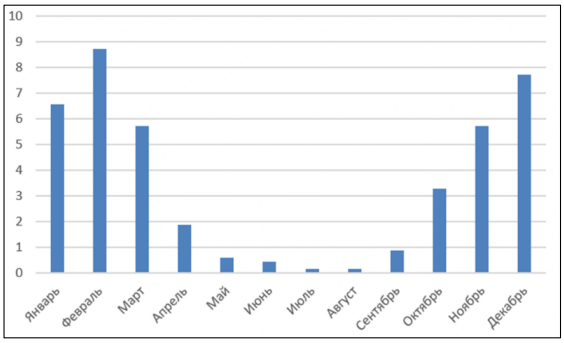


Рисунок 1 – Среднее числа дней с радиационным туманом по месяцам (низменный равнинный район)

Среднее число дней с радиационным туманом по месяцам характерное для возвышенных плоскогорных районов республики Казахстан приведено на рисунке 2. Из его анализа следует, что здесь радиационный туман наблюдается чаще также в холодный и переходные периоды года, однако особенностью является существенное уменьшение числа дней и продолжительности радиационного тумана, а также смещение пика его повторяемости с февраля на март. Максимальное число дней с туманом отмечаемое в марте от 5 до 13 дней (в среднем около 8 дней), в период с ноября по февраль отмечается 3-4 дня, с августа по сентябрь и в апреле – 1-2 дня. В период с мая по июль радиационный туман бывает крайне редко и не каждый год.

Это подтверждается и общей продолжительностью радиационного тумана. В период максимальной повторяемости средняя продолжительность радиационного тумана составляет чуть больше 40 часов в месяц, с ноября по февраль и в апреле отмечалось от 11 до 15 часов с локальным максимумом в декабре до 20 часов, в остальные месяцы от 1 до 6 часов.

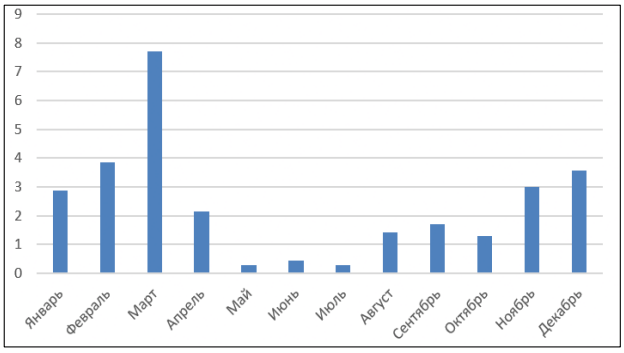


Рисунок 2 – Среднее числа дней с радиационным туманом по месяцам (возвышенный плоскогорный район)

Распределение продолжительности радиационного тумана для низменного равнинного района республики Казахстан по шестичасовым временным отрезкам в течение суток: [1-6], [7-12], [13-18], [19-24] часов по месяцам, а также в среднем за весь период, представлено на рисунках 3, 4.

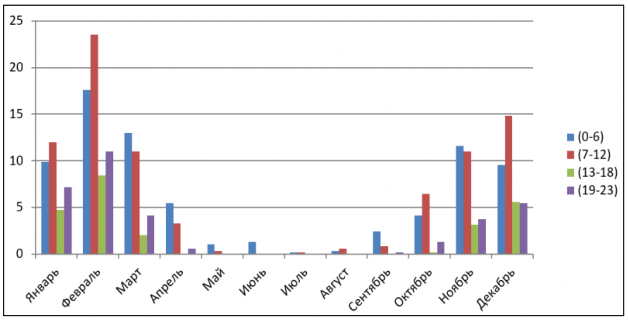


Рисунок 3 – Продолжительность радиационного тумана по шестичасовым временным отрезкам в течение суток по месяцам (низменный равнинный район)

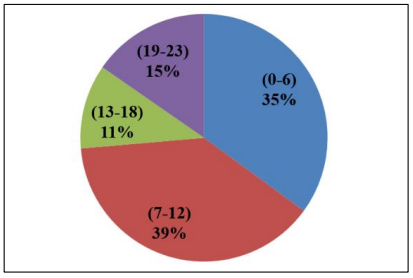


Рисунок 4 – Средняя продолжительность радиационного тумана (%) по исследуемым временным отрезкам за год (низменный равнинный район)

Продолжительность радиационного тумана для возвышенного плоскогорного района Казахстана по тем же шестичасовым временным отрезкам в течение суток по месяцам, а также в среднем за весь период, представлено на рисунках 5, 6.

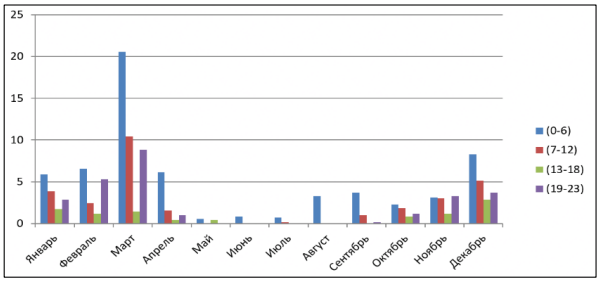


Рисунок 5 – Продолжительность радиационного тумана по шестичасовым временным отрезкам в течение суток по месяцам (возвышенный плоскогорный район)

Из рисунка 5 следует, что во всех рассматриваемых месяцах продолжительность радиационного тумана здесь значительно больше в ночные часы (период с 01 до 06 часов) и значительно меньше в утренние часы (период с 01 до 12 часов).

Это подтверждается и распределением средней продолжительности радиационного тумана по исследуемым временным отрезкам за год для возвышенного плоскогорного района, приведенной на рисунке 6: 48% радиационных туманов, приходится на временной период с 01 до 06, 23% на период с 07 до 12 и чуть меньше 21% на вечерний период с 19 до 24 часов и только 8% на дневное время суток с 13 до 18 часов.

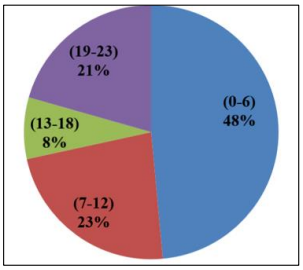


Рисунок 6 – Средняя продолжительность радиационного тумана (%) по исследуемым временным отрезкам за год (возвышенный плоскогорный район)

Из проведенного исследования можно сделать обобщенный вывод:

1. Период возможного влияния радиационных туманов на деятельность авиации на территории республики Казахстан длится с августа (для возвышенных плоскогорных районов), сентября (для низменных равнинных районов) по апрель.

2. Наиболее чаще и продолжительнее радиационные туманы отмечаются в низменных равнинных районах республики.

3. Максимальная повторяемости радиационного тумана в низменных равнинных районах отмечается в феврале (изменчивость от 5 до 18 дней, в среднем около 9 дней, более 60 часов по продолжительности), в возвышенных плоскогорных – в марте (изменчивость от 5 до 13 дней, в среднем около 8 дней, более 40 часов по продолжительности).

4. Большая повторяемость радиационного тумана отмечается в низменных равнинных районах в утренние (39%) и ночные (35%) часы, в возвышенных плоскогорных районах в ночные часы (48%), в утренние часы (23%) и вечерние часы (21%).

Выявленные особенности возникновения радиационного тумана на территории республики Казахстан могут быть использованы при фоновом прогнозе радиационного тумана по территории республики, а также как исходные данные для расчетно-графических способов прогноза [4].

Список литературы

1. *Богаткин О.Г.* Основы авиационной метеорологии. Учебник. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2009. 339 с.
2. *Богаткин О.Г., Еникеева В.Д* Анализ и прогноз погоды: для авиации. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 231с.
3. *Зверев А.С.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1997. 711 с.
4. *Скирда И.А., Ульшин И.И., Мартьяшкин А.Б.* Авиационные прогнозы погоды. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. 475 с.

ВЕРОЯТНОСТНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ НАЛИЧИЯ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО

Романов Д.А., Пензин М.С., Кучинская О.И.,
Пустовалов К.Н., Акимов И.М., Брюханов И.Д.
Национальный исследовательский Томский государственный университет
denrom@internet.ru

Аннотация. В работе исследуется возможность восстановления информации о наличии облаков верхнего яруса на основе вертикальных профилей метеорологических величин. Для анализа использованы данные атмосферного реанализа ERA5, стандартных метеорологических наблюдений и поляризационного лазерного зондирования атмосферы лидаром НИ ТГУ. В качестве признаков использованы основные метеорологические параметры в высотном диапазоне

6–12 км. Для решения задачи применялись различные алгоритмы машинного обучения. Наиболее высокое качество показали модели градиентного бустинга над деревьями решений (XGBoost, LightGBM, CatBoost), обеспечившие значение ROC AUC до 0,87–0,88. При валидации на независимых лидарных данных качество модели составило около 0,77–0,78. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов машинного обучения для оценки вероятности наличия облаков верхнего яруса.
Ключевые слова. Облака верхнего яруса, машинное обучение, вертикальные профили метеорологических величин, реанализ ERA5, высотный матричный поляризационный лидар (ВМПЛ), градиентный бустинг.

PROBABILISTIC RECONSTRUCTION OF HIGH-LEVEL CLOUDS PRESENCE USING MACHINE LEARNING METHODS

Romanov D.A., Penzin M.S., Kuchinskaia O.I.,
Pustovalov K.N., Akimov I.M., Brykhanov I.D.
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Annotation. This paper addresses the problem of estimating the probability of high-level cloud presence using vertical profiles of meteorological variables. The study uses ERA5 atmospheric reanalysis data, standard meteorological observations, and ground-based lidar measurements. The input features include key meteorological parameters within the altitude range of 6–12 km. Several machine learning algorithms were applied to solve the binary classification problem. The best results were obtained with gradient boosting models (XGBoost, LightGBM, CatBoost), achieving ROC AUC values up to 0,87–0,88. Validation using independent lidar observations showed ROC AUC values of approximately 0,77–0,78. The results demonstrate the potential of machine learning methods for estimating the probability of high-level cloud presence.
Keywords. High-level clouds, machine learning methods, vertical profiles of meteorological variables, ERA5 reanalysis, high-altitude matrix polarization lidar, gradient boosting.

Введение. Облака верхнего яруса (ОВЯ) оказывают значительное влияние на радиационный баланс Земли и, следовательно, на климатические процессы, что определяет актуальность задач их обнаружения и прогнозирования [1, 2]. Кроме того, облачность существенно влияет на качество данных дистанционного зондирования Земли, ограничивая возможности наблюдения подстилающей поверхности и интерпретации природных и антропогенных процессов [3, 4]. В последние годы для анализа атмосферных состояний и выявления закономерностей формирования облачности всё более активно применяются методы машинного обучения, позволяющие учитывать совокупность метеорологических и дистанционных данных и выявлять сложные нелинейные зависимости между параметрами атмосферы и облачными процессами [5, 6]. Как показывают исследования, посвящённые анализу облачного покрова на основе результатов наземных и дистанционных наблюдений, между данными из различных источников могут существовать как согласованные закономерности, так и систематические различия, обусловленные чувствительностью метода, геометрией наблюдений и подходами к классификации облачных структур [3–5].

Целью работы является разработка алгоритма машинного обучения, способного оценивать вероятность наличия ОВЯ на основе вертикальных профилей метеорологических величин. В работе рассматривается подход, основанный на использовании признаков, характеризующих термодинамическое состояние атмосферы и циркуляционные условия, влияющие на облакообразование. Для построения и верификации подхода использовались данные атмосферного реанализа ERA5 [7], стандартных метеорологических наблюдений [8] и поляризационного лазерного зондирования атмосферы лидаром НИ ТГУ [9]. Такой подход позволяет учитывать как

вертикальную структуру полей метеорологических величин, так и особенности реального инструментального обнаружения ОВЯ.

Материалы и методы. В проведённом исследовании реализованы сбор и подготовка данных с гидрометеостанции «Томск» (№ 29430) за период с 2010 по 2024 гг. [8]. Данные сопоставлены по месту и времени проведения лидарного эксперимента [9]. Расстояние между лидаром НИ ТГУ и гидрометеорологической станцией не превышает 1 километра. Для количественной оценки согласованности между лидарными и метеорологическими наблюдениями были использованы критерий χ^2 Пирсона для таблиц сопряжённости и отношение шансов. Анализ показал наличие статистически значимой зависимости между двумя способами регистрации ОВЯ. Дополнительная фильтрация наблюдений по общему количеству облачности позволила повысить согласованность выборок, что делает возможным более корректное совместное использование данных разных типов в задаче обучения и верификации моделей. Расхождения между лидарной и метеорологической регистрацией ОВЯ имеют физически объяснимый характер. Лидар обладает более высокой чувствительностью к тонким и локализованным облачным образованиям, тогда как визуальные наблюдения учитывают облачность в более широком секторе небосвода. В результате часть случаев фиксируется только одним из методов, что необходимо учитывать при интерпретации качества модели и выборе схемы верификации.

Из общего массива данных были выделены основные метеорологические величины: температура воздуха, абсолютная и относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра. Анализ был ограничен высотным диапазоном, соответствующим типичным условиям формирования ОВЯ. Поскольку вертикальные уровни в исходных данных реанализа ERA5 задаются в зависимости от давления, на этапе подготовки данные были приведены к высотной шкале с последующим выделением слоя 6–12 км, соответствующего типичным высотам формирования ОВЯ.

На этапе предварительной обработки данных проводились визуальный и статистический анализ взаимосвязей между признаками (метеорологические величины) и целевой переменной (наличие/отсутствие ОВЯ). Полученные зависимости показали, что отдельные метеорологические величины не обеспечивают полного разделения классов, однако их совместный учёт позволяет выделять характерные состояния атмосферы, ассоциированные с наличием и отсутствием ОВЯ. Дополнительный анализ с использованием методов визуализации многомерных данных показал наличие различий между классами и подтвердил перспективность использования многопараметрических моделей машинного обучения для оценки вероятности формирования ОВЯ.

Результаты. В рамках исследования были рассмотрены различные алгоритмы бинарной классификации, включая логистическую регрессию, метод опорных векторов, k-ближайших соседей, наивный байесовский классификатор, многослойную нейронную сеть и ансамблевые методы на основе градиентного бустинга. Наиболее устойчивые результаты продемонстрировали модели бустинга над деревьями решений, что связано с их способностью эффективно работать с табличными многопараметрическими данными и выявлять нелинейные зависимости между метеорологическими признаками и вероятностью наличия ОВЯ. Качество моделей оценивалось с использованием стандартных метрик бинарной классификации, включая ROC AUC, Precision, Recall и F1-score. Для метеорологических данных лучшие модели продемонстрировали ROC AUC на уровне 0,87–0,88, что свидетельствует о хорошей разделимости классов. Наиболее устойчивые результаты были получены для моделей XGBoost, LightGBM и CatBoost. При валидации на лидарных данных качество несколько снижалось, однако сохранялось на приемлемом уровне: ROC AUC составлял около 0,77–0,78.

Вывод. Полученные результаты свидетельствуют о том, что модели машинного обучения способны выявлять устойчивые связи между состоянием атмосферы и вероятностью наличия ОВЯ. Направления дальнейших исследований связаны с расширением набора входных параметров, сравнением различных алгоритмов машинного обучения и более детальным учётом пространственно-временной изменчивости параметров атмосферы. Перспективным представляется также развитие подходов, сочетающих данные наземных наблюдений, дистанционного зондирования и методов интеллектуального анализа данных для более надёжного прогноза облачных состояний [3–6, 10].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации № 075-15-2025-009 от 28.02.2025.

Список литературы

1. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2000. – 777 с.
2. *Houze R.A.* Cloud Dynamics, 2nd Edition // International Geophysics Series, Volume 104. – New York–London: Academic Press, 2014. – 496 p.
3. *Zhao Q., Yu L., Du Z., Peng D., Hao P., Zhang Y., Gong P.* An Overview of the Applications of Earth Observation Satellite Data: Impacts and Future Trends // Remote Sens. 2022. Vol. 14. 1863.
4. *Zhang Z., Lu L., Zhao Y., Wang Y., Wei D., Wu X., Ma X*. Recent Advances in Using Chinese Earth Observation Satellites for Remote Sensing of Vegetation // ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 2023. Vol. 195. P. 393–407.
5. *Donnelly J., Abolfathi S., Pearson J., Chatrabgoun O., Daneshkhah A*. Gaussian process emulation of spatio-temporal outputs of a 2D inland flood model // Water Res. 2022. Vol. 225. 119100.
6. *Yeganeh-Bakhtiary A., EyvazOghli H., Shabakhty N., Kamranzad B., Abolfathi S*. Machine learning as a downscaling approach for prediction of wind characteristics under future climate change scenarios // Complexity. 2022. 8451812.
7. ECMWF Confluence Wiki. ERA5: Data Documentation. Available online: https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Introduction (дата обращения 20.02.2025).
8. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Основные метеорологические параметры (срочные данные) [http://meteo.ru/data/basic-parameters/]. Официальная библиографическая ссылка на этот массив: Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 от 10 апреля 2014 г.)
9. Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы и Томская ионосферная станция «ЛИДАР-ИОНОЗОНД». URL: https://ckp-rf.ru/usu/73573 (дата обращения: 21.01.2026 г.)
10. *Zhang J., Wu J., Wang H., Wang Y., Li Y.* Cloud Detection Method Using CNN Based on Cascaded Feature Attention and Channel Attention // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2022. Vol. 60. P. 1–17.

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ, ОПЕРЕЖАЮЩИЕ ПРОХОЖДЕНИЕ ХОЛОДНОГО ФРОНТА НАД МОСКВОЙ 20 ИЮНЯ 2024 Г.

Рябова С.А.[1,2]

[1] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, Москва
[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва
riabovasa@mail.ru

Аннотация. Рассматривается отклик в микробарических вариациях и вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, приуроченных к прохождению холодного атмосферного фронта 20 июля 2024 г. Для регистрации прохождения атмосферного фронта использованы данные микробарографа, а также магнитометрические измерения в обсерватории «Москва». Перед холодным фронтом наблюдаются как вариации атмосферного давления, так и вариации геомагнитного поля, вероятно связанные с распространением атмосферных внутренних гравитационных волн.
Ключевые слова. вариации атмосферного давления, вариации геомагнитного поля, холодный атмосферный фронт, атмосферная внутренняя гравитационная волна.

VARIATIONS OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD, PRECEDING THE PASSAGE OF THE COLD FRONT OVER MOSCOW ON JUNE 20, 2024

Riabova S.A.[1,2]
[1] Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow
[2] Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Annotation. The response in microbaric variations and variations of the Earth's eastern horizontal component of the magnetic field, timed to the passage of a cold atmospheric front on July 20, 2024, is considered. Microbarograph data and magnetometric measurements at the Moscow Observatory are used to register the passage of the atmospheric front. Both variations in atmospheric pressure and variations in the geomagnetic field are observed before the cold front, which are likely related to the propagation of atmospheric internal gravitational waves.
Keywords. variations in atmospheric pressure, variations in the geomagnetic field, a cold atmospheric front, and an atmospheric internal gravitational wave.

20 июня 2024 г. Москву пересекал холодный атмосферный фронт, в его зоне сформировалась гряда мощных кучево-дождевых облаков, верхняя граница «грозовых башен» достигала 12 км. В столице разыгралась конвективная буря. Порывы шквалистого ветра достигали 25 м/с, местами наблюдались начальные формы смерчевых завихрений. Фронтальный раздел сменил субтропический воздух воздушной массой средних широт.

В ряде работ [1–2] сообщалось об обнаружении магнитного сигнала до момента прихода атмосферного фронта.

В настоящей работе для регистрации прохождения атмосферного фронта использованы данные микробарографа, а также магнитометрические измерения в обсерватории «Москва». Предполагалось, что регистрация магнитных сигналов позволит получить дополнительную информацию об источнике и структуре сигналов, регистрируемых микробарографами. При этом основное внимание уделено сигналам, возникающим до момента прихода фронта в точку наблюдения.

Для исследования отклика в микробарических вариациях и вариациях восточной горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, приуроченных к прохождению холодного атмосферного фронта 20 июля 2024 г., была применена полосовая фильтрация Баттерворта 6 порядка в диапазоне 5–90 мин (диапазон атмосферных внутренних волн).

Спектральный анализ на основе вейвлет-преобразования свидетельствует о том, что перед холодным фронтом наблюдаются как вариации атмосферного давления, так и

вариации геомагнитного поля в диапазоне от 19 до 68 мин. Это соответствует диапазону атмосферных внутренних гравитационных волн (ВГВ). Сигналы, опережающие приход фронта, могут обладать прогностическим потенциалом.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН «Преобразование геофизических полей как основной фактор межгеосферных взаимодействий» (№ 125012700798-8) и рамках государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. *Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Рябова С.А*. Комплексный прогностический признак опасных атмосферных явлений // Доклады академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 504. № 1. С. 69–74. DOI: 10.31857/S2686739722050152.
2. *Спивак А.А., Рябова С.А*. Геофизические эффекты сильных атмосферных фронтов // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 1. С. 26–31. DOI: 10.31857/S268673972201008X.

ОБ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ

Михайловский Ю.П. [1,2], Торопова М.Л. [1], Абшаев А.М.[3], Геккиева Ж.М.[4], Синькевич А.А.[1], Кашлева Л.В.[2]
[1] Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 194098, Санкт-Петербург,
[2] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[3] Научно-Производственный Центр «Антиград», Нальчик,
[4] Высокогорный геофизический институт, Нальчик
yupalych@ya.ru

Аннотация. Представлены и обсуждаются результаты экспериментальных исследований различных стадий процесса электризации конвективных облаков. А именно: условия начала организованной электризации и перехода облака в грозовую стадию для различных регионов, связи частот молний с радиолокационными параметрами в процессе развития облака.
Ключевые слова. Электризация облака, радиолокационные параметры, молнии

ABOUT THE EMPIRICAL MODEL OF CONVECTIVE CLOUD ELECTRIFICATION

Mikhailovskii Yu.P., Toropova M.L., Abshayev A.M., Gekkieva J.M., Sin’kevich A.A., Kashleva L.V.

Annotation. The results of experimental studies of various stages of the process of electrification of convective clouds are presented and discussed. Namely: the conditions for the beginning of organized electrification and the transition of the cloud to the thunderstorm stage for various regions, the connection of lightning frequencies with radar parameters during the development of the cloud.
Keywords. Electrification of the cloud, radar parameters, lightning

Введение. Электризация конвективных облаков (ЭКО) является причиной появления молниевых разрядов, являющихся одними из наиболее опасных явлений погоды (ОЯП) связанных с облаками. Разряды молний представляют опасность, как для различных летательных аппаратов, так и для целого ряда наземных объектов. Опасность представляет, как непосредственное воздействие токов молний, так и их мощное электромагнитное излучение. Скачкообразное изменение электрического поля во время разряда молнии может являться, по-видимому, одной из основных причин возникновения в облаках «внезапных ливней» («Rain Gushes») и, как следствие, сильных порывов и турбулентности в целом («micro- и macrobursts»), которые также относятся к

ОЯП (Williams,1989). С другой стороны, электрические явления в облаках являются важнейшей частью глобальной электрической цепи, обеспечивающей существование электрического поля Земли. Процессы ЭКО не являются уникальными и имеют столь же широкое распространение в природе, как и конвективные облака. Живой научный и общественный интерес к электрическим процессам в облаках существует уже достаточно длительное время. Тем не менее, приходится, к сожалению, констатировать, что до настоящего времени проблема далека от разрешения. Можно даже говорить об отсутствие ощутимого прогресса в понимании физики процессов ЭКО. Основной причиной такого состояния является, по-видимому, отсутствие достаточного количества надежных экспериментальных данных полевых и лабораторных исследований ЭКО, позволяющих ощутимо сузить круг возможных гипотетических механизмов электризации. В представленном докладе будут кратко обсуждены основные результаты экспериментальных исследований процесса ЭКО для различных регионов

Начало процесса организованной электризации**.** На основании данных более чем о 50 облаках был проведен анализ закономерностей развития ЭКО [1]. При анализе данных мы пытались ответить на следующие вопросы:

- на какой стадии развития облака, при каких значениях контролируемых параметров начинаются процессы организованной электризации, понимаемой как совокупность процессов микроэлектризации частиц в облаке и их последующим разделением в пространстве;
- каким образом меняются контролируемые параметры в процессе развития облака;
- какие устойчивые связи контролируемых в экспериментах параметров наблюдаются и о каких физических процессах они могут свидетельствовать;

ЭСО контролируется по напряженности электрического поля (Е) над облаком. Как только в облаке начинается процесс организованной электризации, при пролете СМЛ над облаком наблюдаются характерные изменения Е на фоне значений, наблюдаемых в безоблачной атмосфере на данной высоте. Современные средства и методики измерения Е с помощью самолетов позволяют надежно фиксировать момент начала организованной электризации [2]. Фиксируя одновременно с Е другие контролируемые параметры, мы можем рассчитать вероятность начала организованной электризации по каждому параметру в отдельности и их различным сочетаниям. На Рисунке 1 и 2. представлены зависимости этой вероятности от температуры атмосферы на уровне верхней границы облака (Твг), максимальной отражаемости под облаком у земли (Zoc), толщины переохлажденной части облака (dH т<0). Крестиками отмечено количество режимов, использованное для оценок Р в каждой точке.

Из приведенных зависимостей следует, что даже для начала организованной электризации необходимо наличие значительной переохлажденной части облака и крупных частиц (осадков).

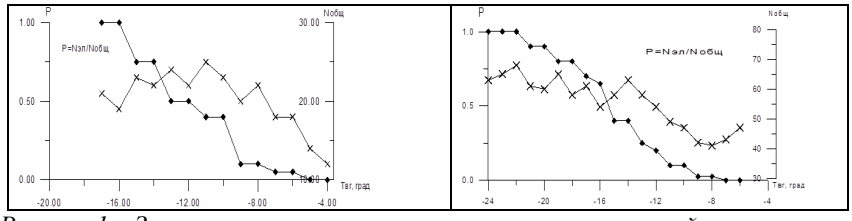


Рисунок 1 – Зависимость вероятности начала организованной электризации конвективных облаков от температуры атмосферы на верхней границе облака (Твг) слева - для Кубы, справа- для России Крестиками отмечено количество режимов, использованное для оценок Р в каждой точке.

На рисунке 1 представлена аналогичная зависимость для осенних облаков в районе Кубы. Как видно, и для этого региона необходимым условием начала электризации конвективного облака является наличие переохлажденной части. Таким образом, обобщая результаты, представленные на рис.1 и рис.2, можно сказать, что необходимым условием начала организованной электризации К.О. даже в условиях тропиков является наличие крупных частиц в переохлажденной зоне, т.е. наличие крупных ледяных частиц.

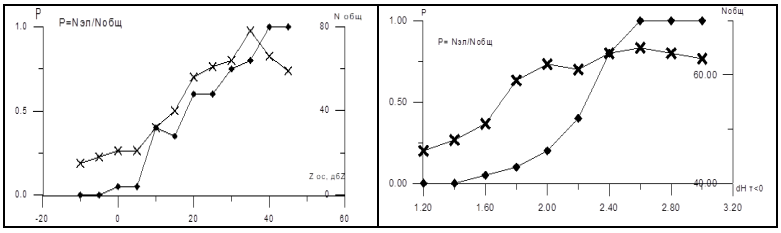


Рисунок 2 – Зависимость вероятности начала организованной электризации конвективных облаков от максимальной отражаемости под облаком у земли (Zoc) и толщины переохлажденной части облака (dH m <0). Крестиками отмечено количество режимов, использованное для оценок P в каждой точке.

Переход облака в грозовое состояние. Для каждого исследуемого района было отобрано около 60 конвективных облаков, переходящих в своем развитии в грозовую стадию. Для них были рассчитаны радиолокационные характеристики в моменты времени: за 10 минут до начала грозовой активности и при первых разрядах [3,4].

Таблица 1 – Статистические характеристики исследуемых параметров

Регион	Параметр	p-value	Среднее	Ст. отклонение	Медиана	Макс
Северо-Запад России	H_{top}	0.00	8.7/10	1.4/1.6	8.5/9.5	12.5/13.5
	Z_{max}	0.00	49.2/52.7	4.4/3.3	49/52	60.5/59
	H_{Zmax}	0.00	2.2/1.8	0.9/0.5	1.5/1.5	4.5/3.5
	dH_{Zmax}	0.00	-0.5/-0.9	0.8/0.7	-0.7/-0.8	2.1/0.6
	dH_{35}	0.00	2.6/3.2	1.1/1.2	2.6/3.2	5.8/5.7
	dH_{45}	0.00	0.7/1.3	0.7/1	0.6/1.2	2.6/4.6
	dV_{35}	0.00	65/108	48.6/82.2	53.5/79	234/422
	dV_{45}	0.00	7.9/19.5	12/23.4	3/11	62/114
Северный Кавказ	H_{top}	0.00	10.1/11.4	2/2.4	9.5/11.1	16/16
	Z_{max}	0.00	46.3/52.6	7/6	46/51	61/70
	H_{Zmax}	0.1	4.9/4.6	1.1/1.6	4.5/4.5	9.5/8
	dH_{Zmax}	0.1	1.2/0.9	1.7/1.4	1/1	4.6/4.6
	dH_{35}	0.00	3.2/4.7	1.8/1.8	3.2/4.4	7.9/8.4
	dH_{45}	0.00	1.2/2.5	1.9/2.2	0/1.7	7.2/7.7
	dV_{35}	0.00	178/335	251/318	62/206	1040/1730
	dV_{45}	0.00	33.3/76.5	81.1/139	1/25	387/719
Индия	H_{top}	0.01	12.7/13.2	1.6/1.5	12.5/13.5	14.5/14.5
	Z_{max}	0.8	44.7/44.5	4.4/4.4	45/45.5	53.5/54
	H_{Zmax}	0.38	5.4/5.2	1.7/1.7	5.8/5.8	8/8.75
	dH_{Zmax}	0.38	0.4/0.2	1.7/1.7	0.8/0.8	3/3.75
	dH_{35}	0.59	3.6/3.5	1.5/1.9	4.5/3.5	7.5/8.5
	dH_{45}	0.92	1/1.1	1.4/1.6	0/0	4.5/5.5
	dV_{35}	0.41	64.5/76.3	72/86.5	30/42	336/370
	dV_{45}	0.79	5.1/5.7	12.1/11.3	0/0	74/56

Примечание: Числитель — значение характеристики за 10 мин до разрядов, знаменатель- в период первых разрядов

В Индии облака были выбраны для периода окончания муссона, в Северо-Западном регионе России и на Северном Кавказе- облака теплого периода года, имевшие континентальный тип строения). Анализировались следующие радиолокационные характеристики: высота верхней границы облака по уровню отражаемости 5 dBZ H_{top} (км), максимальная отражаемость Z_{max} (dBZ), высота H_{zmax} (км), на которой обнаружена Z_{max} и высота dH_{Zmax} (км) относительно изотермы 0 °С, толщина облака dH_{35} и dH_{45} (км) и объемы облака dV_{35} и dV_{45} (км^3) выше изотермы 0 °С с отражаемостью выше 35 и 45 dBZ.

Были сформированы выборки указанных выше радиолокационных характеристик для всех трех регионов. Выполнен анализ различий выборок до и в момент первых разрядов для каждого параметра и по каждому региону. В связи с тем, что выборки в большинстве своем не подчиняются нормальному закону распределения, для их сравнения использовался непараметрический метод проверки различия зависимых выборок – критерий знаковых рангов Уилкоксона. С его использованием рассчитаны уровни значимости p-value схожести значений медиан исследуемых характеристик в облаках - с разрядами и без них для каждого региона. В таблице 2 представлены полученные значения p-value и статистические характеристики исследуемых параметров для трех регионов до и в момент появления первых разрядов молний.

Известно, что чем больше p-value, тем меньше различий между распределениями двух выборок. Полученные значения p-value указывают на то, что в облаках Индии переход в грозовую стадию не сопровождается заметными изменениями радиолокационных характеристик (p-value >0.1), кроме высоты верхней границы облаков (p-value = 0.01). На Северном Кавказе и на Северо-Западе России наблюдаются статистически значимые различия характеристик облаков до начала грозовой активности и при первых разрядах за исключением характеристик H_{zmax} и dHZ_{max} для региона Северного Кавказа.

Связи частот молний с радиолокационными параметрами**.** Авторы работ [5,6], основываясь на результатах самолетных экспериментов с синхронным измерением радиолокационных характеристик и напряженности электрического поля (Е) облаков, для описания характеристик электрического состояния облака предлагают использовать интегральные радиолокационные параметры, характеризующие количество крупных ледяных частиц в облаке. К таким параметрам относится в частности объем переохлажденной части облака. Используя этот подход, были определены статистические связи частоты разрядов в VHF и LF диапазоне с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 *дБZ* (dV_{35}, *км*^{3}) за весь цикл жизни облака (рис. 2*В*). Следует отметить, что полученные результаты во многом сходны с данными работ [13, 14, 16, 17]. Коэффициенты корреляции dV_{35} с F_{LF} и F_{VHF} превышают аналогичные для *Y*,

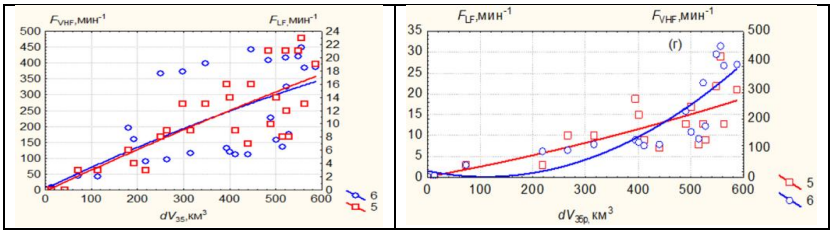
$$r = 0{,}88,\ p = 0{,}00;\ F_{LF} = -0{,}04 + 0{,}03dV_{35};$$
$$r = 0{,}77,\ p = 0{,}00;\ F_{VHF} = 9{,}7 + 0{,}58dV_{35}.$$

Важным фактором, влияющим на взаимосвязь характеристик облака, является период его существования, состоящий из стадий развития (индекс «р»), зрелости и разрушения. На рис. 2*Г* представлены связи интенсивности молниевых разрядов в LF и VHF диапазоне с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 *дБZ* на стадии развития (с 40-й по 130-ю минуту эксперимента). Видно, что на стадии развития грозового облака связь F_{LF} с dV_{35} близка к линейной, а связь F_{VHF} с dV_{35} хорошо описывается квадратичным полиномом. Линейные и квадратичные регрессионные уравнения, аппроксимирующие эти связи, представлены ниже:

$$r = 0{,}81,\ p = 0{,}000;\ F_{LFp} = -0{,}21 + 0{,}031dV_{35},$$

$$r = 0{,}82\ ,\ p = 0{,}000\ ;\ F_{\text{VHFp}} = -25{,}52 + 0{,}549 dV_{35}\ ,$$
$$F_{\text{VHFp}} = 22{,}71 - 0{,}36 dV_{35} + 0{,}0016\left(dV_{35}\right)^2\ ,$$
$$F_{\text{LFp}} = 0{,}21 + 0{,}023 dV_{35} + 1{,}4\times 10^{-5}\left(dV_{35}\right)^2\ .$$

Выбор этого критерия основан на принятой в настоящее время гипотезе об определяющей роли ледяных частиц в электризации облаков [1-6].



Выводы. Представленные результаты экспериментальных исследований различных аспектов процесса электризации облаков указывают на определяющую роль крупных ледяных частиц в этом процессе на всех его стадиях.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 25-27-00219)

The research was supported by the Russian Science Foundation (grant no. 25-27-00219)

Список литературы

1. *Михайловский Ю.П.* Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования численной модели. Труды ГГО. 2003. № 552. С. 66-75.
2. *Михайловский Ю.П.* О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации. Труды ГГО. Вып. 580. 2016. С.125-138.
3. *Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М. и др.,* Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию. Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 12 (383). С. 932-936.
4. *Sin'kevich A., Boe B., Pawar S. et al.* Investigation of thundercloud features in different regions // Remote Sens. 2021. V. 13, N 16. DOI: 10.3390/rs13163216.
5. *Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., и др.* Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков. Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64. № 5. С. 341-353.
6. *Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д. и др.,* Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза электрического состояния облаков. Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31-45.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕЖИМА ОСАДКОВ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГАНЫ

Агаяба Дж. К., Кашлева Л.В., Офори М.К.
Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург
kashleval@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается особенности режима температуры и осадков в Гане, отдельно экваториальной и тропической зоны. В анализе были использованы данные всех метеорологических станций Ганы за 2024 год. Выделены зоны роста и понижения температуры и годовых сумм осадков. Сформулированы предложения для сельскохозяйственного планирования и обеспечения продовольственной безопасности Ганы.
Ключевые слова. Метеорологический режим, режим осадков, температурный режим.

ABOUT THE FEATURES OF THE RAINFALL AND TEMPERATURE REGIME IN GHANA

Agayaba J., Kashleva L.V., Offory M.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. The article examines the features of the temperature and precipitation regime in Ghana, separately for the equatorial and tropical zones. The analysis used data from all meteorological stations in Ghana for the year 2024. The article identifies areas of temperature increase and decrease, as well as areas of annual precipitation. The article provides suggestions for agricultural planning and food security in Ghana.
Keywords. Meteorological regime, precipitation regime, temperature regime.

Гана расположена в Западной Африке на берегу Гвинейского залива в экваториальной и тропической зонах между 4° северной широты и 12° северной широты и 1,5° восточной долготы и 3,5° западной долготы. Климат Ганы [1] не является однородным, но характеризуется градиентом параметров, включая температуру и суммы осадков, с юга на север, и традиционно делится на три основные зоны, что обусловлено главным образом сезонным перемещением зоны внутритропической конвергенции. Схематическое расположение климатических зон в Гане представлено на рисунке 1.

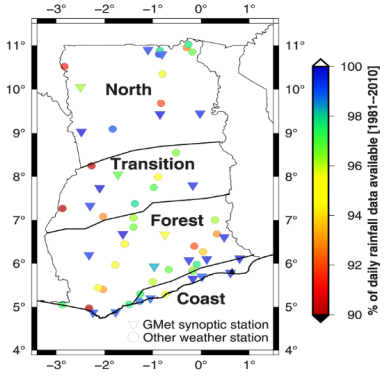


Рисунок 1 – Карта климатических он Ганы

Отметим, что в Гане различаются 3 основные климатические зоны:

- Прибрежная зона (e.g., Accra),
- Лесная зона (e.g., Kumasi,
- Зона Северной саваны (e.g., Tamale)
- Переходные зоны (e.g. Kete Krachi).

Краткий обзор климатических зон Ганы представлен [1] в таблице 1.

Таблица 1 – Обзор климатических зон Ганы

Зона	Годовое распределение осадков	Годовая сумма осадков (мм))	Средняя температура (°C)	Характерные особенности
Прибрежная	Бимодальное (большой и малый сезоны дождей и сухие сезоны)	800–1200	26–28	Влажный климат, малый сухой сезон в августе
Лесная	Бимодальное (большой и малый сезоны дождей и сухие сезоны)	1500–2000	25–27	Сильные ливни, бурная растительность
Саванна	Одномодальное	1000–1300	27–29	Один длинный сезон дождей, сильный Harmattan

Основные особенности режима осадков в Гане по многолетним наблюдениям состоят в следующем. В прибрежной зоне наблюдается бимодальный характер выпадения осадков с двумя сезонами дождей, в лесной зоне также наблюдается бимодальный характер, но с более высокими годовыми показателями, а в северной саванне наблюдается один сезон интенсивных дождей, за которым следует продолжительный сухой период, что делает ее особенно уязвимой к изменчивости количества осадков. Понимание различий между этими режимами является не только научной задачей, но прежде всего отвечает практическим потребностям общества для эффективного зонального планирования и распределения ресурсов.

В работе был выполнен всесторонний анализ режима осадков и температурного режима Ганы в 2024 году и проведена оценка аномалии 2024 года по сравнению с долгосрочными нормами. Были использованы данные всех метеорологических станций Ганы (22 станции) [2, 3, 4].

В таблице 2 приведены значения годовых сумм осадков, среднегодовые температур, абсолютные температурные максимум и минимум для каждой зоны.

Ключевые особенности:

Выраженный широтный градиент:

- Наибольшие суммы осадков в лесной зоне (Kumasi),
- Наибольшие температуры в Северной саванне (Tamale).

Анализ годовых сумм осадков позволил сделать следующие выводы:

- Лесная зона является наиболее влажной;
- Прибрежная зона - наиболее сухая (>800 mm);
- Северная саванна - промежуточный зона увлажнения, но избыточные суммы осадков по сравнению со средними за многолетний период;
- Переходная зона - промежуточный зона увлажнения, но избыточные суммы осадков по сравнению со средними за многолетний период.

Таблица 2 - Годовая сумма осадков и среднегодовая температура на станциях климатических зон, Гана, 2024

Климатическая зона (станция)	Годовая сумма осадков(mm)	Среднегодовая температура (°C)	Максимальная температура (°C)	Минимальная температура (°C)
Прибрежная станция (Accra)	715	26.9	32.1	21.7
Станция лесной зоны (Kumasi)	1387	28.1	33.1	23.1
Станция переходной зоны (Kete Krachi	981	29.25	34.1	24.4
Станции северной зоны (Tamale)	920.5	31.05	35.5	25.6

В таблице 3 представлены отклонения годовых сумм осадков в 2024 году от среднегодовых значений за длинные ряды наблюдений для всех климатических зон. Представленные данные свидетельствуют, что в 2024 году было перераспределение осадков по территории Ганы: в прибрежной и лесной зоне годовые суммы осадков уменьшились на 24-39% (за исключением станции Axim, где суммы осадков возросла на 9%), а на станциях Северной саванны годовые суммы осадков возросли на 14-24%.

Таблица 3 - Годовые суммы осадков в 2024 году, Гана

Станция	Климатическая зона	Годовая сумма осадков 2024 (mm)	Среднегодовая сумма осадков (mm)	Отклонение он нормы (mm)	Отклонение от нормы (%)
Sefwi Bekwai	Лесная	~850	~1400	~ -550	~ -39%
Takoradi	Прибрежная	~950	~1300	~ -350	~ -27%
Axim	Прибрежная	~1850	~1700	~ +150	~ +9%
Tamale	Северная Саванна	~1250	~1100	~ +150	~ +14%
Wa	Северная саванна	~1300	~1050	~ +250	~ +24%

Далее проведен анализ годового хода месячных сумм осадков в каждой из климатических зон. Результаты свидетельствуют:

- в Прибрежной зоне уменьшение сумм осадков малого дождливого сезона (сентябрь–октябрь) привел к значительному ежегодному дефициту в прибрежных районах;
- в Лесной зоне произошло повсеместное уменьшение сумм осадков в малые сезоны в лесных районах, что осложнило производство какао;
- в Переходной зоне отмечалось раннее начало, интенсивные пики и продолжительный сезон осадков, что привело к избытку осадков;
- в Северной зоне саванн наблюдалось раннее начало, интенсивные пики и длительный сезон дождей привели к избыточным осадкам — это приносит пользу, но с риском наводнений.

Таким образом, необходимо подчеркнуть, что в 2024 году отмечались значительные изменения режима осадков, что привело к их перераспределению и смещению зоны интенсивных осадков на север. Необходимо в дальнейшем продолжить наблюдения за режимом осадков.

Был проведен подробный анализ температурного режима. На рисунке 2 представлены превышения абсолютных максимальных и минимальных значений температур на каждой станции Ганы.

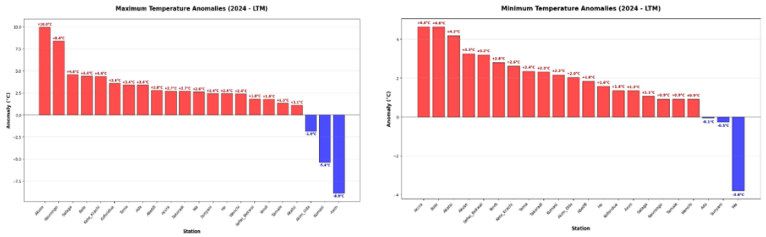


Рисунок 2 – Превышения абсолютных максимальных и минимальных значений температур на каждой станции Ганы в 2024 году

Анализируя представленные данные, приходим в выводы, что наблюдалось почти повсеместное потепление — аномалии максимальной температуры превышали +4°C в некоторых лесных районах; минимальные температуры также повышены, особенно в прибрежных зонах; однако на 6 станциях произошло понижение температур – на юге максимальных, на севере минимальных.

В целом в Гане в 2024 году произошли следующие изменения:

на севере: наблюдаются наибольшие максимальные температуры (>35°C) и наименьшие минимальные температуры, что приводит к росту годовых амплитуд.

на юге: более понижение максимальных температур, но росту минимальные температуры, то может создавать опасность влажного теплового стресса.

В заключение отменим, что анализируемый 2024 год был аномальным для всех климатических зон Ганы. В Прибрежной части Ганы отмечалось уменьшение годовой амплитуды температуры и уменьшение годовых сумм выпадающих осадков. Это создает условия для влажного стресса для населения и сельского хозяйства. В Северной Саване возросли максимальные температуры (выше 35° C) и понизились минимальные значения температуры, что увеличило годовую амплитуду температуры. Увеличились годовые суммы выпадающих осадков, что создавало условия для наводнения.

Список литературы

1.*Dickson, K. B., & Benneh, G. (1988).* A New Geography of Ghana. Longman.
2.*Mohammed, A. S., Nkrumah, F., & Vlek, P. L. G. (2022).* Influence of Atlantic Sea Surface Temperatures on Rainfall Variability in Ghana. Journal of Climate and Applied Meteorology, 45(2), 112-125.
3.*Antwi-Agyei, P., & Stringer, L. C. (2021).* Improving the effectiveness of agricultural extension services in supporting farmers to adapt to climate change in Ghana. Climate Risk Management, 32, 100304.
4.*Goudie, A. S. (2021).* The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future. John Wiley & Sons.

АНАЛИЗ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕСПУБЛИКИ КАМЕРУН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛИМАТА

Ада Атангана Сюзанн Франсуаз, Лебедев А.Б.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
manchou20@yahoo.com

Аннотация. В работе рассматриваются методические вопросы изучения климатических изменений на территории Камеруна. Представлено физико-географическое описание региона, с точки зрения, формирования факторов, влияющих на климат. На основе анализа однородности физико-географических условий выделены шесть климатических районов, которые в основном соответствуют ботанической классификации по Кёппену. Сформирована база данных по осадкам и температуре воздуха. Сформулирована логика дальнейших научных исследований.
Ключевые слова. Камерун, температура, осадки, климатические зоны, изменчивость климата.

ANALYSIS OF PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE REPUBLIC OF CAMEROON FOR CLIMATE RESEARCH

Ada Atangana Suzanne Francoise, Lebedev A.B.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Abstract. This paper examines methodological issues in studying climate change in Cameroon. It presents a physical and geographical description of the region, from the perspective of the formation of climate-influencing factors. Based on an analysis of the homogeneity of physical and geographical conditions, six climatic regions have been identified, which generally correspond to the Köppen botanical classification. A precipitation and air temperature database has been compiled, and a sequence of further scientific research has been formulated.
Keywords. Cameroon, temperature, precipitation, climatic zones, climate variability.

Многочисленные исследования посвящены рассмотрению глобального изменения климата, однако каждый район Земного шара из-за специфики встречающихся только в нем физико-географических и циркуляционных особенностей является по-своему уникальным, поэтому региональные особенности часто остаются недооценёнными [1, 2]. Целью проводимых исследований является получение независимых оценок изменений климата в республике Камерун для разработки рекомендаций по адаптации экономики страны к этим изменениям. Данная тема актуальна и с научной точки зрения, т.к. изучению экваториальных районов Земного шара уделяется меньшее внимание, чем полярным районам, где климатические изменения происходят наиболее быстро.

Район исследования расположен в пределах от 3° ю. ш. до 17° с. ш. и от 4° до 21° в. д. (рис. 1), что обуславливает большое количество солнечной радиации, поступающей на верхнюю границу атмосферы.

Республика Камерун с юго-запада омывается водами Гвинейского залива Атлантического океана. В этом месте побережье Африки претерпевает резкий изгиб, что обуславливает поворот теплого Гвинейского течения, проходящего с запада на восток вдоль южного берега Западной Африки, на юг. При дальнейшем движении на юг теплое Гвинейское течение встречается с холодным Бенгальским течением и поворачивает на запад [3]. Близость Атлантического океана обуславливает муссонный характер климата в Камеруне, а прохождение рядом теплого Гвинейского течения – наличие повышенного влагосодержания в атмосфере.



Рисунок 1 – Физико-географическая карта Камеруна с административными границами [4]

Рельеф Камеруна многообразен. Проведенный в ходе исследований анализ позволил предварительно классифицировать территорию республики на основе однотипности физико-географических условий на следующие субрегионы:

– низменность южного побережья;

– низменность западного побережья;

Южно-Камерунское плоскогорье (выс. 600-900 м) [5];

– вулканический массив Камерун (выс. 4095 м) и западная часть нагорья Адамава (средн. выс. 1000-1500 м) [5];

– восточная часть нагорья Адамава;

– впадины Бенуэ (долина реки на севере страны) и озера Чад.

В данной классификации из-за ограниченных размеров отдельно не выделены восточные склоны нагорья Мандара (выс. 1000-1100 м) на севере республики [5]. Прибрежные низменные районы шириной до 150 км предварительно выделены в 2 класса, поскольку их разделяет горный массив. Нагорье Адамава имеет форму дуги. Ее восточная часть служит естественной границей, отделяющей Южно-Камерунское плоскогорье от впадины Бенуэ, а западная часть – от низменных районов Западной Африки.

Циркуляция атмосферы над Камеруном определяется положением внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) и африканского муссона [6-9]. Зимней относительно прохладный и сухой воздух Северной Африки смещается на юг вслед за движением ВЗК, что обуславливает относительно прохладную зиму. К лету ВЗК, а вслед за ней влажный атлантический воздух смещаются в Северное полушарие. Наличие облачности и несколько более прохладного воздуха с океана приводит также к уменьшению температур летом. В переходные периоды температуры воздуха оказываются более высокими за счет радиационного прогрева.

Климат в Камеруне изменяется от экваториального на юге (теплый, постоянно-влажный) до субэкваториального в центре и тропического на севере (с дождливым летом и сухой зимой). На побережье осадки превышают 3000 мм/год, на крайнем севере – менее 600 мм/год. На Южно-Камерунском плоскогорье год делится на два «сухих» (декабрь-апрель и июнь-август) и два «дождливых» (сентябрь-ноябрь и апрель-июнь) сезона. Не

смотря на значительное количество выпадающих осадков из-за высоких температур испарение в некоторых районах Камеруна преобладает.

Нельзя не упомянуть горный массив Камерун с его климатической высотной поясностью. Кроме того, его западные и юго-западные склоны являются самым влажным местом в Африке (до 9655 мм осадков в год) и одним из самых влажных мест в мире.

Как известно, реки и озера являются продуктом деятельности климата. Речная сеть Камеруна густая и многоводная. Крупнейшей рекой является река Санага, которая разделяет Южно-Камерунское плоскогорье от гор Адамава. Кроме того, на северных склонах нагорья Адамава берет начало река Бенуэ – главный приток реки Нигер. На крайнем севере республики граница проходит по реликтовому бессточному озеру Чад. Начиная с 60-х гг. прошлого века площадь озера уменьшилась более чем в 10 раз, что может свидетельствовать об изменении климата.

Растительность и почвы некоторой местности также является продуктом деятельности климата. Растительный мир Камеруна богат и разнообразен. Больше 30 процентов площади республики заняты лесами. Для выделенных выше субрегионов характерны различные комплексы растительности [10, 11]:

– для прибрежных низменностей характерны мангровые леса постепенно переходящие в вечнозеленые экваториальные леса с деревьями высотой до 70 м;

– для Южно-Камерунского плоскогорья характерны экваториальные леса на красно-жёлтых ферраллитных почвах, которые к северу постепенно сменяются парковыми листопадно-вечнозелёными лесами и высокотравными саваннами гвинейско-суданского типа на красных ферраллитных почвах;

– в возвышенных районах – горные вечнозелёные леса и вторичные саванны на горных гумусно-ферраллитных почвах (на массиве Камерун выше пояса горных лесов – горно-луговая растительность);

– во впадинах Бенуэ и озера Чад – саванны суданского типа и опустыненные саванны на красно-бурых и чёрных тропических почвах.

Следует отметить, что полученная в результате анализа, по сути, ботаническая классификация в основном совпадает с вышеприведенной классификацией на основе однотипности физико-географических условий.

Выводы о текущих изменениях климата делаются на основе климатической обработки временных рядов наблюдений температуры и количества осадков. Первоначально следует сформировать базу данных из рядов наблюдений и проверить качество этих временных рядов.

В процессе формирования базы данных столкнулись с дефицитом метеорологических данных в республике Камерун из-за неудовлетворительного состояния наблюдательной сети и коммерческого характера предоставления некоторых данных. Поскольку климат, как и погода, не признает государственных границ, в дальнейшем анализе предполагается использовать данные не только наблюдательных станций республики Камерун, но и с близлежащих станций на территории других государств с однотипными для рассматриваемого района физико-географическими условиями. На настоящий момент для анализа нам доступны данные 13 станций Дирекции национальной метеорологической службы Камеруна и 10 станций Метеорологического агентства Нигерии. Предварительный анализ климатических рядов за период с 1981 по 2024 гг. подтверждает значительную пространственную неоднородность температурного и осадочного режимов на территории Камеруна.

После формирования базы данных климатологических рядов осуществляется проверка качества этих рядов, которая сводится к их проверке на однородность и стационарность.

В ходе проверке на однородность выявляются экстремумы, резко отклоняющиеся от эмпирического распределения. Основной причиной нарушения однородности является то, что экстремальное событие имеет более редкую вероятность появления, чем та, которая соответствует продолжительности ряда наблюдений. Под стационарностью временных рядов понимается однородность ряда по времени. В ходе проверки на стационарность осуществляется контроль по двум параметрам: дисперсии и среднему.

Статистические методы оценивания однородности и стационарности основаны на статистических критериях, которые при сравнении расчетных значений (статистик) с критическими значениями (критериями) позволяют принять или отклонить нулевую гипотезу однородности или стационарности. Для оценивания однородности и стационарности предполагается использовать методику В.А. Лобанова [12], хорошо зарекомендовавшую себя в научной среде. В данной методике для оценивания однородности последовательно используются критерии Диксона и Смирнова-Граббса, для оценивания стационарности по дисперсии – критерий Фишера, а для оценивания стационарности по среднему – критерий Стьюдента.

Для проверки на стационарность временной ряд разбивается на две части по моменту наиболее вероятного нарушения стационарности. В качестве момента нарушения стационарности может быть использована некоторая априорная информация, например, сведения о дате переносе станции в другое место, изменении методики производства наблюдений или изменении ландшафта местности. Для объективного определения момента нарушения стационарности существует статистические процедуры, типа [13]:

$$\sigma_1^2(n_1\text{-}1)+ \sigma_2^2(n_2\text{-}1)=min, \quad (1)$$

где σ_1^2, σ_2^2 – дисперсии первой и второй частей временного ряда;
n_1, n_2 – объемы первой и второй частей временного ряда.

Для определения момента наиболее вероятного нарушения стационарности, рассчитываются значения по формуле (1) для n_1=10, (1), (n_1+ n_2-9).

В случае выявления нестационарности статистический анализ должен быть дополнен генетическим анализом, т.е. выявлением причин неоднородности. Так, например, сокращение площади озера Чад вполне может служить причиной нарушения стационарности по температуре на метеорологических станциях, находящихся во впадине озера Чад. Сокращение площади озера может быть вызвано не только изменением климата, но и интенсивным использованием воды из рек, питающих озеро для хозяйственных нужд, например, для ирригации.

Для получения наиболее полной информации об изменении климата временные ряды должны быть продолжительными и не иметь пропусков в наблюдениях. Методика восстановления пропусков в рядах наблюдений и приведения непродолжительных рядов к многолетнему периоду описана в [12, 13].

После получения качественных климатологических рядов следует перейти к статистическому моделированию текущих климатических изменений. Предполагается разработать статистические модели, к которым относятся стационарная модель, модель линейного тренда, модель ступенчатых изменений и модель гармонических колебаний. Применение статистических моделей предполагается осуществлять последовательно к станциям для выделенных ранее климатических районов, что позволит детализировать региональные особенности. Так, климатические изменения температуры в районах прибрежных низменностей являются следствием изменений температуры в водах Атлантического океана. По мере удаления от побережья большее влияние будет

оказывать особенности рельефа (высота над уровнем моря) и континентальность климата.

Наиболее распространенной для описания климатических изменений является модель линейного тренда, которая хорошо описывает монотонные изменения характеристик. Учитывая, что в период 1940-1970 гг в Северном полушарии наблюдалось некоторое понижение температуры [14], использование модели линейного тренда целесообразно осуществлять после достижения минимума температуры в этот период.

Основным инструментом для моделирования будущих климатических изменений являются физико-математические модели общей циркуляции атмосферы и океана. Результаты моделирования, например, в рамках международных проектов CMIP-5/CMIP-6 имеются в свободном доступе в Интернете [15]. Очевидно, что из существующего многообразия физико-математических климатических моделей необходимо выбрать наилучшую, т.е. результаты моделирования которой имеют наименьшую ошибку по сравнению с результатами фактических наблюдений (средними многолетними значениями).

На основе полученных оценок текущих изменений климата, а также тенденций изменения климата в будущем предполагается разработать рекомендации по адаптации экономики республики Камеруна к этим изменениям.

Список литературы

1. *Marie M., Madeleine H.* La Variabilité Saisonnière et Journalière des Précipitations, leurs Incidence sur les Activités Agricoles et Adaptation du Calendrier Agricole à Ngaoundéré entre 1927-2022 // African Journal of Climate Change and Resource Sustainability. 2025. Vol. 4, № 1. P. 170-209.
2. *Marie M., Maximilienne Y.H.* Incidence Des Phenomenes Climatiques Planétaires El Niño et La Niña sur les Précipitations Mensuelles à Garoua, Cameroun de 1963 à 2022 // Ibid. 2025. Vol. 4, № 1. P. 84-108.
3. *Vondou D.A., Nzeukou A., Kamga F.M.* Diurnal cycle of convective activity over the West of Central Africa based on Meteosat images // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2010. Vol. 12. P. S58-S62.
4. Атлас стран мира / Камерун: карта и описание страны [Электронный ресурс]: [сайт]. – Режим доступа: URL: https://world-karta.ru/cameroon-map.html (дата обращения: 18.02.2026)
5. *Suchel J.B.* Les climats du Cameroun. Thèse d'État, Université de Bordeaux III, 1987.
6. *Balogun R.A. et al.* Convective characteristics over Nigeria-Cameroon zone // Atmospheric Research. 2019.
7. *Daïka B. et al.* Mousson et précipitations extrêmes dans l'Extrême-Nord Cameroun // Climate Dynamics. 2023.
8. *Onguéné R.* Dynamique côtière du Golfe de Guinée // Journal of Marine Systems. 2015.
9. *Mpounza M., Samba Kimbata M.* Aperçu sur le climat de l'Afrique centrale occidentale. 1990. P. 31-41.
10. *Tiani A.M.* Climate variability in Cameroon: past, present and future. IRAD, 2014.
11. *MINEPDED.* Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques du Cameroun. 2021.
12. *Лобанов В.А., Лебедев А.Б.* Практикум по климатологии. Часть 1. – СПб.: НИЦ АРТ, 2024 – 124 с.
13. *Лобанов В.А.* Лекции по климатологии. Часть 2. Динамика климата: Книга 2. − СПб, РГГМУ, 2018. – 377 с.

14. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И., Рубцова О.А.*. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // Известия Иркутского гос. Университета – 2011. – Т. 4. – № 1. – С. 87–108.
15. *IPCC*. Standard Output from Coupled Ocean-Atmosphere GCMs: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/standard_output.html#Experiments.

К ВОПРОСУ О КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РФ

Восканян К.Л.[1], Иванова Т.И.[2], Кузнецов А.Д.[1]
[1]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2]ООО «МикроСтеп-МАК», Санкт-Петербург
ivanowat04@gmail.com

Аннотация. Климатические изменения и их масштабы оказывают неоспоримое влияние на нашу жизнь и ее безопасность. Именно поэтому изучение и отслеживание характера и масштаба климатических изменений является важным аспектом нашей жизни. В представленной работе будут рассмотрены признаки регионального изменения климата. В качестве климатических индикаторов использовались среднегодовая температуры для северных регионов Российской Федерации. С помощью специального алгоритма, ранее использовавшимся авторами в других работах, найдены точки бифуркации временной изменчивости температуры на восьми полярных станциях.
Ключевые слова. Климатическая стабильность, среднегодовая температура, северный регион, точка бифуркации

ON THE QUESTION OF CLIMATE STABILITY IN THE NORTHERN REGIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION

Voskanyan K. L.[1], Ivanova T. I.[2], Kuznetsov A. D.[1]
[1]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[2]MicroStep-MAK LLC, St. Petersburg

Annotation. Climate change and its scale have an undeniable impact on our life and its safety. That is why studying and monitoring the nature and scale of climate change is an important aspect of our life. The presented work will examine the signs of regional climate change. As climate indicators, the annual average temperatures for the northern regions of the Russian Federation were used. Using a special algorithm, previously used by the authors in other works, bifurcation points of temporal temperature variability were found at eight polar stations.
Keywords. Climate stability, average annual temperature, northern region, bifurcation point

Изменение климата – главная и одна из самых сложных проблем для человечества. К чему же может привести изменение климата? В первую очередь к сильным изменениям в биологическом мире: одни виды будут вымирать, другие – процветать, измениться и газовая составляющая атмосферы, изменимся и мы. Вопрос о том, что нас ждёт впереди: глобальное потепление или великий ледниковый период, постоянно волнует научное сообщество. Однако, как известно, климат цикличен, и чтобы дать ответ на вопрос «Что нас ждёт впереди?», необходимо заглянуть в прошлое.

Северный регион был выбран для исследования не просто так. Именно по самым холодным и самым жарким регионам можно быстрее определить изменчивость метеорологических величин, так как даже самые небольшие вариации будут здесь ощущаться сильнее.

Целью данной работы является изучение изменения климатических характеристик, в данном случае температуры, в северных регионах РФ.

Для анализа изменчивости значений среднегодовой температуры воздуха были выбраны 8 станций, географически расположенные близкого друг к другу, с временными рядами за период с 1917 по 2005 года (рис. 1).



Рисунок 1 – Географическое положение выбранных пунктов наблюдения

Перед началом обработки и нахождения «точек бифуркации» (резких изменений наблюдаемой тенденции в климатических данных) необходимо проверить данные на наличие выбросов и пропусков. Это можно сделать с помощью специальной программы, пример работы которой представлен на рисунке 2.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
22522	Кемь	Кемь	1917	-3,7	3,8	0,2	409	3,9	**Даты**
22522	Кемь	Кемь	1918	-3,1	3,7	0,6	445	3,7	**пропусков**
22522	Кемь	Кемь	1919	-3,4	3,7	0,3	458	3,7	
22522	Кемь	Кемь	1920	-0,5	6,4	3,2	379	3,7	1923
22522	Кемь	Кемь	1921	-2,1	4,9	1,7	665	3,8	1924
22522	Кемь	Кемь	1922	-2,2	4,3	1,3	535	3,5	1927
22522	Кемь	Кемь	1923	-1,7	4,6	1,7	435	3,425	1935
22522	Кемь	Кемь	1924	-1,7	4,8	1,9	455	3,578	1963
22522	Кемь	Кемь	1925	-2,4	4,3	1,3	478	3,7	1995
22522	Кемь	Кемь	1926	-3,5	3,2	0,1	429	3,6	1999
22522	Кемь	Кемь	1927	-2,9	3,4	0,5	394	3,396	2002
22522	Кемь	Кемь	1928	-2,3	4,0	1,1	455	3,4	

Рисунок 2 – Фрагмент представления информации при использовании программы по нахождению и восстановлению пропусков во временных рядах

Далее с помощью программ, разработанной на кафеддре Экспериментальной физики атмосферы РГГМУ, были заполнены выявленные пропуски и найдем точки бифуркации для выбранных пунктов наблюдения [1]. Наличие «точек бифуркации» позволяет выявить алгоритм, который более детально рассматривался в работах [2-3]. В основе данного алгоритма лежит принцип деления временного ряда на небольшие отрезки, в дальнейшем, которые будут заменены моделями. Хороший пример таких моделей – полиномиальная аппроксимация.

На рисунке 3 представлен пример визуализации изменений среднегодовых значений температуры на станции Кемь. Места излома представленных здесь отрезков линейного тренда указывают на положение «точек бифуркации». Можно заметить, что за данный период наблюдалось 4 точки бифуркации (1927, 1945, 1987 и 1993). До точки бифуркации в 1927 году температура воздуха в поселке Кемь понижалась, после преодоления рубежа температура начала повышаться. Однако после зафиксированной точки бифуркации в 1945 году температура вновь начала стремиться вниз. Начиная с

точки бифуркации в 1987 году наблюдается ещё одинок резкое изменение температуры воздуха. В 1993 году температура медленно начала расти.



Рисунок 3 – Пример визуализации изменений среднегодовых значений температуры на станции Кемь за разные временные отрезки

Проведем подобный поиск точек бифуркации для остальных выбранных пунктов. Года с зафиксированными первыми точками бифуркации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Годы обнаружения «точки бифуркации» на выбранных постах наблюдения

Наименование пунктов наблюдения	Год наступления первой «точки бифуркации»
Кандалакша	1917
Кемь	1927
Онега	1927
Веребье	1942
Архангельск	1911
Усть-Цильма	1915
Няксимволь	1913
Березово	1937

Несмотря на то, что выбранные станции находятся близко друг к другу, даты обнаружения точек бифуркации и тенденции изменения среднегодовой температуры на них отличается. Разница дат обнаружения точек бифуркации на станциях в одном районе можно объяснить климатическими и географическими особенностями, которые вносят свое влияние и определенные закономерности в изменении выбранной метеорологической величины, тем самым делая климатическую обстановку того или иного пункта уникальной.

Сумма отклонений значений температуры от модельных значений отрезков перед и после «точки бифуркации» будет определяться параметром SS:

$$SS = \sum_{i=1}^{n_1} \left(a_{01} + a_{11} i - Y_i \right)^2 + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \left(a_{02} + a_{12} i - Y_i \right)^2,$$

где, a_{01}, a_{11} и a_{02}, a_{12} – линейные коэффициента временного тренда для двух отрезков [от 1 до n_1] и [от n_1+1 до n_2], длинна исследуемого ряда n_2; Y_i – i-ое значение временного ряда [4].

Рассчитаем сумму отклонений значений температуры от модельных значений отрезков перед и после «точки бифуркации» для остальных станций (рис. 4).

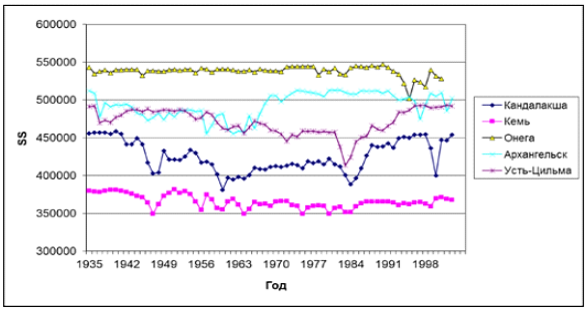


Рисунок 4 – Визуализация параметра SS для станций Кандалакша, Кемь, Онега, Архангельск и Усть-Цильма

Обработав данные среднегодовой температуры для выбранных пунктов, и найдя для них, сумму отклонений значений температуры от модельных значений отрезков перед и после «точки бифуркации», можно выделить две основные группы метеорологических станций. К первой группе будут относиться станции: Кандалакша, Кемь, Онега, Усть-Цильма, Березово и Няксимволь. На этих станциях замечен рост среднегодовой температуры, что говорит о преобладании теплых воздушных масс. Ко второй группе будут относиться такие станции, как Архангельск и Веребье, где наблюдается отрицательная тенденция среднегодовой температуры, что говорит о преобладании в данном районе холодных масс.

Список литературы

1. *Восканян К.Л., Иванова Т.И., Кузнецов А.Д., Никитина В.С., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Оценка климатической стабильности в северной части территории РФ // Дни Арктики в Санкт-Петербурге-2021: Международное сотрудничество в условиях изменения климата: сборник трудов международной научно-практической конференции. СПб., 2021. С. 42-43.
2. *Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Влияние метрик на определение точек бифуркации во временных рядах метеорологических величин // Гидрометеорология и экология. 2019. № 59. С. 28—42. doi: 10.33933/2074-2762-2020-59-28-40.
3. *Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Оценка возможностей метода аналогов для текущего прогноза температуры воздуха // Вестник Тверского государственно го университета. Серия: Прикладная математика. 2019. № 1 (58). С. 101—116. doi: 10.26456/ vtpmk528.
4. *Кузнецов А.Д., Саенко А.Г., Сероухова О.С., Симакина Т.Е.* Алгоритмы определения момента смены тренда во временных рядах метеорологических величин // Вестник Тверского государственного университета. Серия "Прикладная математика". 2019. № 3. С. 74-89.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РАЗЛИЧИЯ УВЛАЖНЕНИЯ ВОДОСБОРОВ РЕК БЕЛАРУСИ

Кошин А.Ю., Лопух П.С.
Белорусский государственный университет, Минск
koshinartur@gmail.com, lopuch@bsu.by

Аннотация. Приводится сравнительная характеристика трех гидрологических регионов Республики Беларусь с разной степенью увлажнения. Исследуется трансформация стока рек в изучаемых гидрологических регионах в связи с изменением увлажнения в период потепления.

Ключевые слова. Трансформация стока, Неман, Западная Двина, Западный Буг, Тарим, изменение климата, гидрологические регионы, Беларусь.

REGIONAL DIFFERENCES IN HUMIDIFICATION OF RIVER CATCHMENTS IN BELARUS

Koshin A.Yu. Lopuch P.S.
Belarusian State University, Minsk

Abstract. The comparative characteristics of three hydrological regions of the Republic of Belarus with different degrees of humidification are given. The transformation of river flow in the studied hydrological regions due to changes in humidification during the warming period is investigated.
Keywords. Runoff transformation, Neman, Western Dvina, Western Bug, Tarim, climate change, hydrological regions, Belarus.

Реки Беларуси принадлежат двум морским бассейнам: Черного и Балтийского морей. К бассейну Черного моря относится Днепр, он формирует 58 % всех ее речных запасов. На долю рек Балтийского склона (бассейны рек Западная Двина, Неман и Западный Буг) приходится 42 % всех запасов речных вод.

Современные наблюдения за гидрологическим режимом рек и водоемов проводятся на 114 постах (104 речных и 10 озерных) и 2 болотных створах. Посты располагаются по всей территории Беларуси на больших, средних и малых реках, на наиболее значительных озерах и водохранилищах. В настоящий момент выделяют семь гидрологических районов: Западнодвинский, Верхнедвинский, Вилейский, Неманский, Центральноберезинский, Припятский и Западнобугский, которые рассматриваются в работе как регионы.

В ходе различных исследований выявлены пространственно-временные изменения метеоусловий для территории Беларуси в последние десятилетия. Эти изменения отражаются на водном режиме рек Беларуси: уменьшается среднегодовой сток; увеличивается среднемесячный расход воды в весеннее половодье, которое наступает раньше среднемноголетних дат; в ледово-термическом режиме отмечается позднее начало ледовых образований на реках [1, 2].

В настоящий момент актуальной задачей является возможность прогнозирования трансформации стоков рек под влиянием метеоусловий. Результаты прогноза необходимо учитывать при планировании мероприятий по защите населения от опасных гидрологических явлений, а также при осуществлении гидротехнического строительства на реках.

В качестве объектов различной увлажненности приняты три региона Беларуси: Западнодвинский (увлажненный), Неманский (средне увлажненный), Западнобугский (засушливый) и бассейн реки Тарим (КНР, аридный).

Западнодвинский гидрологический регион соответствует бассейну р. Западная Двина на территории Беларуси. Природные условия на территории бассейна р. Западная Двина определяются географическим положением — простиранием в северо-восточной части Восточно-Европейской равнины. Бассейн представляет собой неширокую (100–150 км) изогнутую полосу, вытянутую в широтном направлении, открытую в сторону Балтийского моря.

Бассейн р. Неман расположен в западной части страны. Река берёт начало к югу от Минской возвышенности, затем течёт в извилистом русле по Неманской низине на протяжении 431 км, а в нижнем течении — по Среднелитовской и Приморской низменностям. Общая площадь водосбора — 98,2 тыс. км^2, в пределах Беларуси (до впадения р. Чёрная Ганьча) — 34,6 тыс. км^2. Густота речной сети в бассейне Немана изменяется преимущественно от 0,40 до 0,50 км/км^2. От истока до устья река принимает

около 180 притоков. В гидрологическом отношении одноимённый район делится на северный и южный Неманский. Водосборная территория реки Неман имеет характерную грушевидную форму, которая типична для бассейнов крупных рек. Бассейн реки Неман вытянут с северо-востока на юго-запад. Средняя высота водосбора — 75 м над уровнем моря. Средняя ширина водосбора — 180 км.

Западный Буг начинается источниками, расположенными на северной окраине Подольской возвышенности, на высоте 311 м над уровнем моря. Затем протекает через Малое Полесье, Волынскую возвышенность, Полесье, равнины Предполесья и впадает в Загжыньское водохранилище на р. Нарев, правом притоке р. Вислы, на высоте 79 м над уровнем моря. Таким образом, бассейн Западного Буга, вытянутый в меридиональном направлении, входит в состав нескольких физико-географических регионов, что отчётливо влияет на условия формирования стока. Их отличия обусловлены неоднородностью земной поверхности и климата: в первую очередь геологическим строением, особенностями рельефа, грунтов и их использования, количеством и сезонной изменчивостью режима атмосферных осадков и испарения.

Расположенный в Синьцзян-Уйгурском автономном регионе бассейн р. Тарим является типичным внутренним речным бассейном, где процесс формирования водных ресурсов имеет региональные особенности, обусловленные климатическими факторами, такими как осадки и испарение, а также деятельностью человека. Бассейн реки окаймляется горными структурами, с которых стекают реки ледникового питания. Площадь бассейна составляет 1020 тыс. км^2, в пределах бассейна осадков выпадает мало, а испарение сильное. В этих условиях сток бассейна р. Тарим в основном зависит от таяния горного снега, ледников и летних осадков на склонах гор.

Основу исследования составляет материалы наблюдений за стоком, а также анализ ранее выполненных исследований вышеуказанных регионов. Для выявления региональных особенностей использовались методы математического моделирования и прогнозирования, статистический и картографический.

Изучение влияние температурного режима на гидрологические режимы рек Беларуси ведется с 1886 года. Так в работе [3] проанализировано и показано изменение хода среднегодовых температур воздуха в бассейне р. Западная Двина. Изменение среднегодовых температур воздуха произошло главным образом за счет существенного повышения зимних температур, которое по некоторым метеостанциям в отдельные месяцы превышают 3°С.

Анализ данных о среднегодовых температурах воздуха по метеостанциям Витебск, Гродно и Брест за период с 1886 по 2024 год показал, что среднегодовая температура имеет тенденцию к увеличению. По метеостанции Гродно хорошо просматривается тенденция к постепенному увеличению среднегодовой температуры начиная с 1970-х годов. Прирост составляет 0,5 °С на каждые 10 лет. Это в очередной раз подтверждает утверждение, что с конца XX века началось потепление климата.

Основным источником выпадающих атмосферных осадков в Западнодвинском увлажненном регионе являются влажные воздушные массы, поступающие с запада. Начиная с 1970-х годов наблюдается устойчивая тенденция к увеличению среднегодового количества осадков в данном регионе. По состоянию на 2024 год увеличение количества среднегодовой величины осадков составляет около 200 мм по сравнению с 1970-ми годами.

Анализ данных по среднегодовым значениям сумм осадков по метеостанции Гродно за период с 1894 по 2020 гг. показывает, что, начиная с середины XX века, среднегодовая сумма осадков в регионе имеет тенденцию к уменьшению.

Климат Западнобугского засушливого региона определяется морскими и континентальными воздушными массами. Изменения положения основных барических

центров определяют сезонную циркуляцию атмосферы и динамику поступления воздушных масс. Климат имеет переходные черты, к востоку незначительно усиливается его континентальность.

Изучение данных по среднегодовым суммам осадков по метеостанции Брест за период с 1941 по 2024 гг. показало, что осадки за период наблюдения существенно колебались из года в год. Это говорит о том, что изменения осадков в этом регионе, скорее всего, обусловлены естественной изменчивостью климатических процессов. Несмотря на эти выраженные годовые изменения, явно прослеживается долгосрочный тренд – устойчивое снижение осадков.

Бассейн реки Тарим является крупнейшим внутренним бассейном аридной зоны Китая, в условиях изменения климата река Тарим всё чаще подвергается экстремальным засухам и наводнениям.

Данные по среднемесячным значениям сумм осадков по бассейну р. Тарим за период с 1940 по 2024 гг. демонстрируют значительные колебания из года в год, без устойчивой линейной тенденции. Такие волнообразные изменения могут отражать естественную вариабельность климата, где множество факторов – от глобальных климатических циклов до локальных метеорологических явлений – влияют на годовую норму осадков. Вместе с тем отмечается тенденция уменьшения среднемесячных сумм осадков с 1990 года до уровня периода 1945-1950 гг.

Все изучаемые гидрологические регионы характеризуются разной степенью увлажнения и температурными режимами. Так Западнодвинский гидрологический регион является наиболее увлажненным и наименее теплым. Западнобугский – наиболее теплый и наименее увлажненный для территории Беларуси. Неманский гидрологический регион занимает среднее положение среди изучаемых. Таримский гидрологический регион относится к аридным регионам по степени увлажнения и к умеренному – по температурному режиму (таблица 1).

Основное влияние на климат гидрологических регионов Беларуси оказывают Атлантические воздушные массы. Воздушные потоки, сформированные под действием теплого Северо-Атлантического течения Атлантического океана, предопределяют мягкий климат, хорошие условия увлажнения и умеренную температуру.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика гидрологических регионов

Гидрологический регион	Среднегодовая температура, ºС	Среднегодовая сумма осадков, мм	Среднее значение толщины снежного покрова, мм	Характеристика гидрологического региона по степени увлажнённости
Западнодвинский	5,8	691	30-35	увлажнённый
Неманский	7,0	562	15-30	относительно увлажнённый
Западнобугский	8,1	284	10-30	засушливый
Таримский	8,8	148	5-10	аридный

С целью исследования трансформации стоков рек в изучаемых гидрологических регионах получены зависимости средних годовых расходов главных рек гидрологических регионов от трансформации осадков (рисунок 1-3). На рисунках точками указаны значения, прямой пунктирной линией — тренды. Период наблюдений для получения зависимостей составил 55 лет – с 1961 по 2015 года.

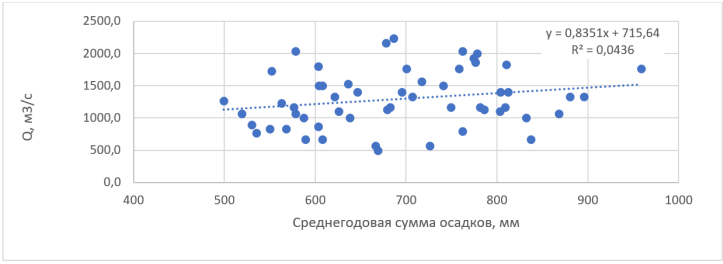


Рисунок 1 – Зависимость среднегодового расхода р. Западная Двина (Витебск) от среднегодовой суммы осадков

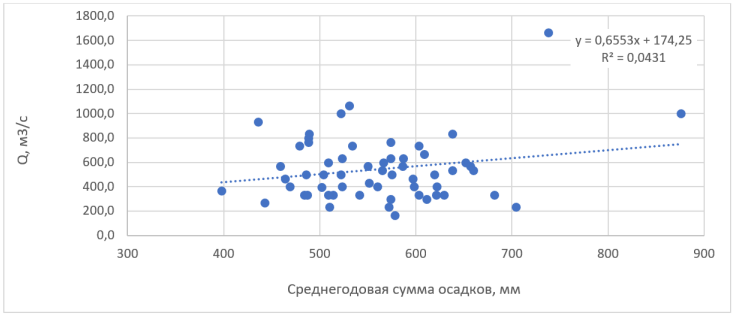


Рисунок 2– Зависимость среднегодового расхода р. Неман (Гродно) от среднегодовой суммы осадков

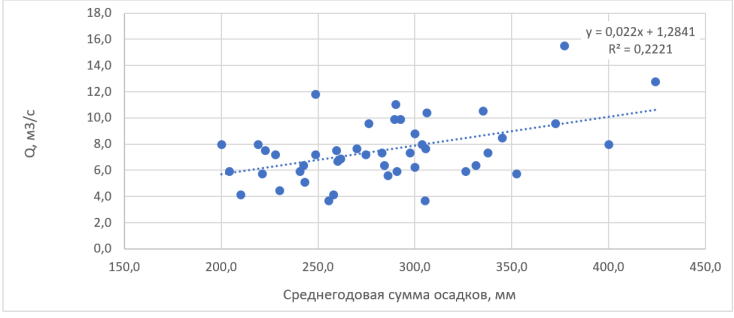


Рисунок 3 – Зависимость среднегодового расхода р. Западный Буг (Брест) от среднегодовой суммы осадков

За последнее столетие наблюдается тенденция к постепенному потеплению климата. Это приводит к изменению не только метеоусловий, но и отражается на гидрологических режимах рек Беларуси.

Повсеместное увеличение среднегодовой температуры приводит к уменьшению стока рек. Степень уменьшения разная для разных гидрологических регионов, и определяется не только характеристиками самой реки, образующей регион (протяженность, водность, лесистость, озёрность и т.д.), но и рядом метеоусловий.

Во всех исследуемых гидрологических регионах Беларуси наблюдается тенденция к увеличению среднегодовой температуры воздуха. Для Западнобугского и Неманского регионов присуще незначительное, но тем не менее снижение суммы среднегодовых осадков. В то же время для Западнодвинского региона наблюдается рост

суммы среднегодовых осадков за последние 50 лет наблюдений.

Зависимость среднегодовых расходов от среднегодовых сумм осадков показывают однозначное увеличение расходов рек с увеличением сумм осадков. Эта зависимость подтверждает постепенное многолетнее снижение расходов рек Беларуси. Данные о среднегодовых суммах осадков в Неманском и Западнобугском регионах говорят о планомерном снижении количества осадков за последнее столетие. В то же время количество осадков по Западнодвинскому гидрологическому региону постепенно увеличивается за период наблюдения, но это не дает значимого эффекта, и мы наблюдаем снижение среднегодовых расходов рек Западнобугского региона.

Различие в степени увлажнённости гидрологических регионов сказывается на скорости уменьшения среднегодовых расходов рек Беларуси. В целом, следует отметить, что для более увлажненных гидрологических регионов характерно более интенсивное снижение расходов.

Выделенные регионы совпадают с гидрологическим районированием территории Беларуси. Полученные результаты условий формирования стока и степени увлажненности регионов необходимо учитывать при моделировании управления водными ресурсами. Выявленные различия гипотетически должны учитываться при разработке сценариев изменения водных ресурсов в перспективе.

Список литературы

1. *Волчек, А. А.* Максимальный сток рек на территории Беларуси / А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICEP – 2023: сборник научных статей Международной научно-практической конференции «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», посвященной памяти доцента кафедры природообустройства, кандидата географических наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 октября 2023 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2023. – С. 130–151.
2. *Логинов В.Ф.* Водный баланс речных водосборов Беларуси / В.Ф. Логинов, А.А. Волчек. - Минск: Тонпик, 2006. - 160 с.
3. *Поликша Д.С. Данилович И.С. Квач Е.Г.* Влияние изменения климата на водный режим бассейна реки Западная Двина на территории Беларуси // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию фак. географии и геоинформатики Белорус, гос. ун-та и 65-летию Белорус, геогр. о-ва, Минск, 13-15 нояб. 2019 г. - Минск: БГУ, 2019. - С. 208–212.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Алексеева Е.Г., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Olga.aniskina@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа многолетних (1951–2018 гг.) изменений приземной температуры воздуха на территории северо-западной и центральной частей Европейской территории России (ЕТР) в холодный период (декабрь–март). На основе данных 45 метеорологических станций проанализированы нормированные аномалии максимальной суточной температуры воздуха. Значительным потеплением считались периоды продолжительностью не менее 5 дней с положительной аномалией, превышающей 90-й процентиль. Установлено, что за последние 30 лет (1985–2018 гг.) общее число аномально

теплых дней возросло в 2,9 раза по сравнению с предшествующим периодом. Наиболее интенсивные и продолжительные аномалии зафиксированы в феврале и марте. Выявлены особенности пространственного распространения волн тепла: в декабре преобладает западно-восточный перенос, в феврале и марте отмечены случаи распространения аномалий с юга на север. Показано, что станция Санкт-Петербург является лидером по суммарной продолжительности аномалий за весь анализируемый период (402 дня).
Ключевые слова. Температурные аномалии, холодный период года, глобальное потепление, Европейская территория России, волны тепла, изменение климата, 90-й процентиль.

TEMPERATURE ANOMALIES IN THE RUSSIAN FEDERATION DURING THE COLD PERIOD

Alexeeva E.G., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This paper presents the results of a long-term (1951–2018) analysis of near-surface air temperature variations in the north-western and central parts of the European territory of Russia (ETR) during the cold period (December–March). Based on data from 45 meteorological stations of the ECA&D project, normalised anomalies of daily maximum temperature were calculated. Significant warming events were defined as periods of at least 5 consecutive days with a positive anomaly exceeding the 90th percentile. It was found that over the last 30 years (1985–2018), the total number of anomalously warm days increased by a factor of 2.9 compared to the preceding period. The most intense and prolonged anomalies were recorded in February and March. Specific patterns of spatial propagation of heat waves were identified: in December, west-to-east transport prevails; in February and March, cases of south-to-north propagation were also observed. The Saint Petersburg station was shown to be the leader in total duration of anomalies over the entire study period (402 days).
Keywords. Temperature anomalies, cold season, global warming, European territory of Russia, heat waves, climate change, 90th percentile.

Изменение приземной температуры воздуха является одной из ключевых характеристик, отражающих современные климатические сдвиги. В контексте глобального потепления особый интерес вызывают экстремальные температурные события, в частности, внезапные и продолжительные потепления в зимние месяцы, которые оказывают существенное влияние на хозяйственную деятельность и экосистемы. Как отмечается в работах [3, 4], зимние потепления нередко носят неожиданный характер и требуют детального анализа их пространственно-временной структуры.

В большинстве исследований, например, в каталогах аномальности зим [1], большее внимание уделяется холодным периодам, тогда как анализу волн тепла посвящено значительно меньше работ. В то же время сценарии формирования аномально теплых зим, как показано в работе [2], могут быть обобщены с помощью синоптического анализа. Данное исследование направлено на восполнение этого пробела и ставит своей целью выявление, классификацию и анализ аномально теплых зимних сезонов на территории Российской Федерации в холодный период года с акцентом на пространственное распространение и длительность событий.

Исследование базируется на данных архива European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) [5], предоставляющего ряды суточных наблюдений за максимальной температурой воздуха, прошедшие контроль однородности. В работу включены данные с 45 метеорологических станций, расположенных в северо-западной и центральной частях ЕТР, за период с декабря по март 1951–2018 гг.

Критерием значительного потепления был выбран период продолжительностью не менее 5 дней подряд, в течение которых ежедневная нормированная положительная аномалия превышала значение 90-го процентиля, рассчитанного для каждой станции

отдельно. Для каждого эпизода фиксировались дата начала и окончания, продолжительность и максимальная амплитуда аномалии. Особое внимание уделялось событиям, охватившим не менее 15 станций (33% от общего числа), что позволяло говорить о масштабных региональных волнах тепла.

За весь рассматриваемый период 1951–2018 гг. суммарное количество аномально теплых дней по всем станциям составило 9721. При этом в период 1985–2018 гг. зафиксировано 7231 день, что в 2,9 раза больше, чем в 1951–1984 гг. (2490 дней). Особенно контрастен рост в феврале (+1596 дней) и марте (+1708 дней). В предыдущее тридцатилетие лидером по числу дней был декабрь (857 дней), а в последнее – март (2452 дня) и февраль (1949 дней).

Станция Санкт-Петербург оказалась абсолютным лидером по общей продолжительности аномалий за весь период – 402 дня, что значительно выше, чем на станции Каменная Степь и Фенино. Наименьшая продолжительность отмечена на станции Краснощелье.

Пространственный анализ показал, что в декабре преобладает перемещение волн тепла с запада на восток (1953, 1972, 2006, 2008 гг.), за исключением 1961 г. (с юга на север). В январе доминируют два типа переноса: с центра на северо-восток (1971) и с запада на восток (2002, 2005). В феврале наиболее типичен западный перенос (1989, 1998, 2002), но отмечены и случаи меридионального переноса с юга на север (2014, 2016). В марте, помимо западно-восточного переноса (2014), зафиксированы эпизоды с движением волн тепла с востока на запад (2002, 2016), что свидетельствует о сложном характере циркуляционных процессов.

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить значительные изменения в режиме температурных аномалий на Европейской территории России в холодный период. Основные выводы:

За последние 30 лет (1985–2018) количество аномально теплых дней в холодный период возросло почти в 3 раза по сравнению с 1951–1984 гг., причем наиболее выраженный рост наблюдается в феврале и марте.

Самыми экстремальными по охвату и продолжительности волнтепла стали декабрь 2006 г., февраль 1990 г. и март 2007 г. Декабрь 2006 г. побил рекорд по числу затронутых станций (39 из 45), а март 2007 г. – по длительности и интенсивности на большей части региона.

Наибольшая уязвимость к продолжительным волнам тепла характерна для крупных городов северо-запада (Санкт-Петербург) и центрально-черноземных областей (Каменная Степь, Фенино).

Список литературы

1. Мещерская А.В., Голод М.П. Каталоги аномальности зим на территории России. – Труды ГГО, 2015, № 579, С.129–161.
2. Семенов Е.К., Соколихина Н.Н., Тудрий К.О., Щенин М.В. Синоптические механизмы зимнего потепления в Арктике. – Метеорология и гидрология, 2015, № 9, С.20–30.
3. Крыжов В.Н. Причины похолоданий в ноябре в 1980–1990-х годах на европейской территории России. – Метеорология и гидрология, 2008, № 1, С.5–14.
4. Кочугова Е.А., Труханов А.Э. Оценка аномальности температурного поля Сибирского федерального округа в холодный период года. – Вестник ВГУ, 2023, № 2, С.64–71.
5. URL: http://www.ecad.eu

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА НА ПОВЕРХНОСТИ 850 ГПА И ПРИЗЕМНЫМИ СУТОЧНЫМИ ЭКСТРЕМУМАМИ В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ

Иванова И.А.[1], Лаврова И.В.[1,2], Топтунова О.Н.[1,3]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2]АО «Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт», Санкт-Петербург
[3]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
ira.nova@mail.ru livspb@yandex.ru olgakolp@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты анализа связи между температурой на уровне 850 гПа и минимальной и максимальной температурой воздуха у земли в период с 1978 г. по 2023 г., выполненного по данным аэрологического зондирования на станции Воейково и приземным наблюдениям на метеостанции Санкт-Петербург. В ходе исследования была рассчитана корреляция, определены разности между температурами и выявлены наиболее вероятные значения по сезонам года. Результаты исследования могут быть использованы для научной и практической работы по прогнозированию приземной температуры воздуха.
Ключевые слова. Температура воздуха, уровень 850 гПа, корреляция, прогноз.

STUDYING THE RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE TEMPERATURE 850 GPA AND SURFACE DAILY EXTREMA IN ST. PETERSBURG

Ivanova I.A.[1], Lavrova I.V.[1,2], Toptunova O.N.[1,3]
[1]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[2]AO "State Scientific Research Navigation and Hydrographic Institute", St. Petersburg
[3]St. Petersburg State University, St. Petersburg

Abstract. This article presents the results of an analysis of the relationship between the 850 hPa temperature and minimum and maximum surface air temperatures from 1978 to 2023, based on upper-air sounding data from the Voyekovo station and surface observations from the St. Petersburg weather station. The study calculated the correlation, determined the temperature differences, and identified the most probable values by season. The results can be used for scientific and practical work on surface air temperature forecasting.
Keywords. Air temperature, 850 hPa level, correlation, forecast.

Фактическая температура воздуха у земли и её прогноз в настоящее время являются востребованными видами информации для многих сфер деятельности человека. Своевременное предупреждение об ожидаемом температурном режиме или его резких изменениях поможет предотвратить возможные негативные последствия и минимизировать экономические потери. Важно развивать точность прогнозирования температуры воздуха у поверхности земли.

На формирование приземного термического режима оказывают влияние ряд факторов синоптического характера, а также особенности подстилающей поверхности. Прохождение атмосферных фронтов несёт с собой смену воздушных масс, которые характеризуются, прежде всего, температурой.

О температуре воздушной массы чаще всего можно судить по её значениям на поверхности 850 гПа. Разница между температурой на изобарической поверхности 850 гПа и приземной температурой будет максимальной для сухого воздуха, так как сухой воздух лучше подвергается прогреву, а также лучше подвергается выхолаживанию,

поскольку не требуется никаких затрат энергии на конденсацию. Для влажного воздуха разница меньше, чтобы его прогреть, необходимо затратить больше солнечной энергии [1].

В [2, 3] приводятся эмпирические формулы и методики прогноза приземных экстремумов, использующие в качестве предикторов температуру воздуха на поверхности 850 гПа.

В Новосибирском бюро погоды разработан метод М.К. Гиляровой, который основан на систематизации повторяемости минимальной и максимальной температуры у поверхности земли и температуры воздуха на высоте 850 гПа при соответствующей облачности. По результатам были составлены таблицы для прогноза Тмин и Тмакс по температуре воздуха на высоте 850 гПа и облачности.

По анализу точности расчетных методов, применяемых в Обь-Иртышском УГМС, оправдываемость прогноза экстремальных температур за 2008-2010 гг. по методу Гиляровой в Омском ЦГМС во все сезоны года составляет 80-90%. Оправдываемость прогноза минимальной температуры в холодный период в Ханты-Мансийском ЦГМС – 91%, максимальной температуры – 88%. Оправдываемость прогноза экстремальных температур в теплый период составила 92-97%, в переходный период – 88-94% [4].

В ходе выполненного исследования были использованы данные о температуре воздуха на уровне 850 гПа, полученные по результатам аэрологического зондирования на станции Воейково, данные по минимальной и максимальной температуре воздуха у земли, по приземным наблюдениям на метеостанции Санкт-Петербург в период с 1978 г. по 2023 г. [5].

По всей выборке были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона между температурой воздуха на АТ-850 за 00UTC и температурами у поверхности: в срок зондирования и минимальной (Таблица 1), а также между температурой воздуха на АТ-850 за 12UTC и температурами у поверхности: в срок зондирования и максимальной (Таблица 2). Полученные коэффициенты проверены на значимость по критерию Стьюдента и значимы при уровне значимости 0,05.

Из данных Таблиц 1 и 2 следует, что во все сезоны наблюдается сильная статистическая связь между температурой на уровне 850 гПа и приземными значениями.

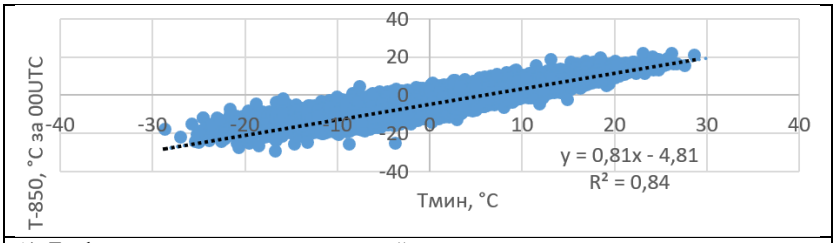
Таблица 1 – Коэффициент корреляции (r) между температурой воздуха на АТ-850 за 00UTC и приземными: в срок зондирования (T_0), минимальной (Тмин) и критерий Стьюдента (t).

Сезон / Параметр	зима	весна	лето	осень
r(T_0)	0,74	0,87	0,86	0,85
r(Тмин)	0,74	0,87	0,86	0,84
t	26,58	39,24	80,15	43,04

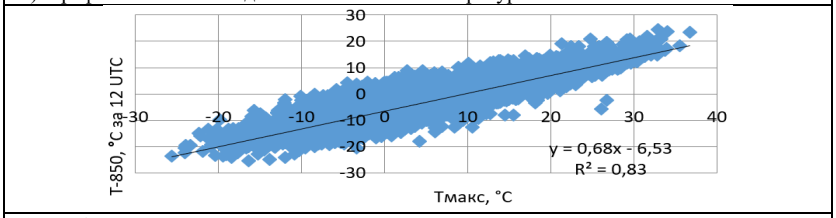
Таблица 2 – Коэффициент корреляции (r) между температурой воздуха на АТ-850 за 12 UTC и приземными: в срок зондирования (T_{12}), максимальной температурой (Тмакс) и критерий Стьюдента (t)

Сезон / Параметр	зима	весна	лето	осень
r(T_{12})	0,73	0,87	0,81	0,82
r(Тмакс)	0,74	0,87	0,83	0,83
t	36,44	73,76	151,06	64,71

Графически эта связь по всей выборке показана на рисунке 1 для минимальных (Рисунок 1.А) и максимальных (Рисунок 1.Б) значений температуры.



А). График зависимости для минимальной температуры



Б). График зависимости для максимальной температуры

Рисунок 1 - Графики зависимости температуры воздуха на поверхности 850 гПа и приземных суточных экстремумов

Для выявления возможности прогнозирования приземных температур по температуре на поверхности 850 гПа были рассчитаны «дельты» - разности между соответствующими значениями. В таблице 3 представлены средние значения «дельта 1» - разности между минимальной температурой и температурой на 850 гПа в 00UTC, «дельта 2» - разности между максимальной температурой и температурой на 850 гПа в 12 UTC, а также их среднеквадратические отклонения (СКО) по сезонам.

Таблица 3 - Средние «дельты» и СКО для разных сезонов года.

Сезон / Параметр	зима	весна	лето	осень
Дельта 1	3,4	5,2	6,32	5,38
СКО Дельта 1	3,46	2,52	1,58	2,43
Дельта 2	4,59	11,61	14,01	9,17
СКО Дельта 2	3,38	3,17	1,92	3,08

По данным Таблицы 3 можно сделать вывод, что использовать средние значения «дельты» можно для прогноза максимальной температуры весной и летом, когда СКО не превышает 30 %.

Далее, были определены наиболее вероятные диапазоны «дельты» по сезонам. В графическом виде результаты представлены на Рисунке 2.

И были построены диаграммы размаха для «дельты 1» и «дельты 2». Результаты представлены на рисунке 3.

Как следует из рисунков 2 и 3 в разные периоды года значения «дельты» имеют свой наиболее вероятный диапазон. В зимние месяцы это значения широкого диапазона 0…+9 С° для «дельты 1» и «дельты 2», в весенние +3…+8 С° для «дельты 1» и +9…+14 С° для «дельты 2», в летние +4...+9 С° для «дельты 1» и +12...+17 С° для «дельты 2», в осенние +3…+8 С° для «дельты 1» и +7…+12 С° для «дельты 2».

Таким образом, полученные результаты показывают возможность использования связи между температурой воздуха на поверхности 850 гПа и приземными суточными экстремумами для разработки нового метода прогноза в районе г.Санкт-Петербурга.

Дальнейшая работа может быть направлена на выявления сопутствующих типичных синоптических ситуаций при одинаковых «дельтах» и анализа «выбросов» в нетипичных ситуациях или при резкой смене воздушной массы.

Полученные результаты могут быть использованы в научной и практической работе по теме исследования.

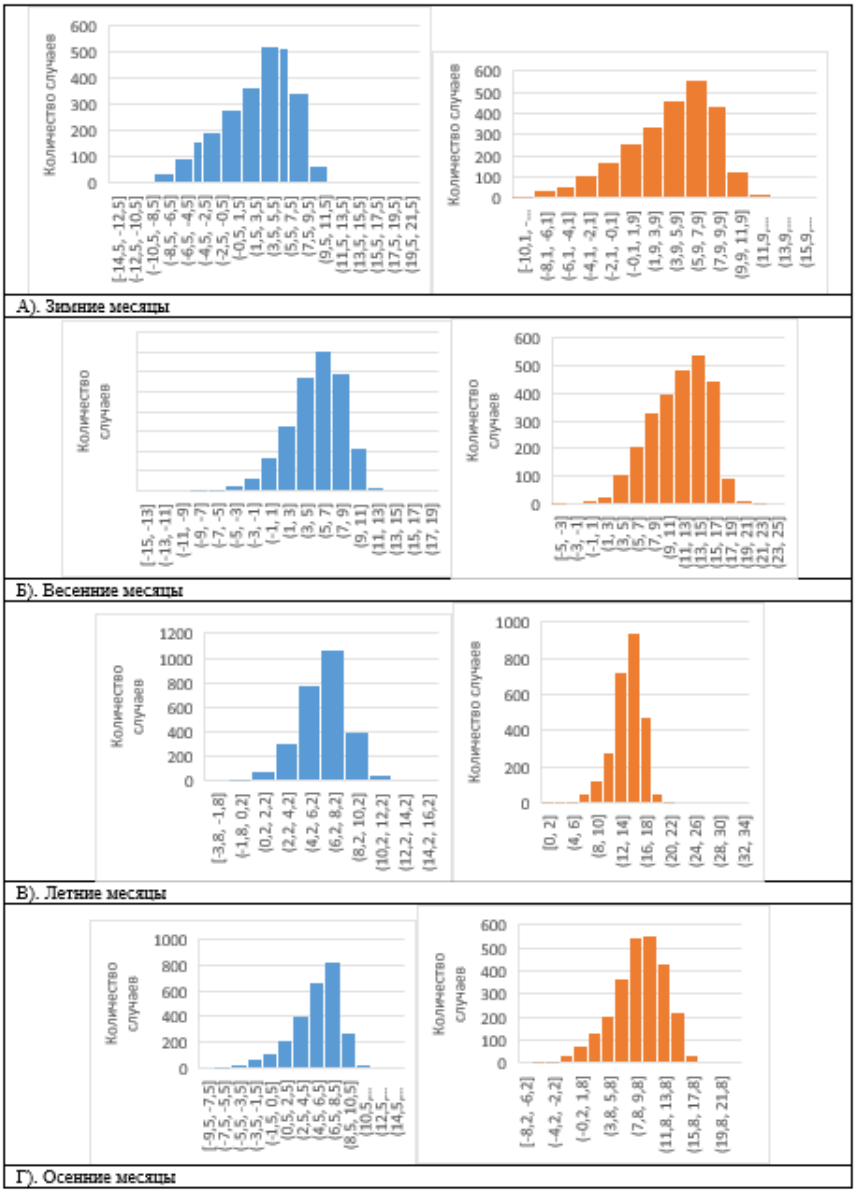


Рисунок 2 - Распределение «дельты» (левая колонка «дельта 1», правая – «дельта 2») по градациям и по сезонам

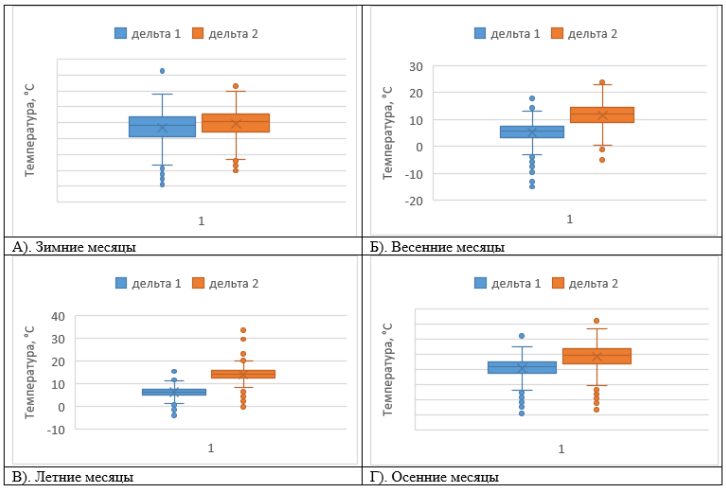


Рисунок 3 - Диаграммы размаха для разных сезонов года для «дельты 1» и «дельты 2»

Список литературы

1. *Вшивкова О.В.* Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений. Учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2017. – 88 с.
2. *Воробьев В. И.* Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 616 с.
3. *Богаткин О. Г.* Авиационные прогнозы погоды учебное пособие по дисциплине "Авиационная метеорология" для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению Гидрометеорология / О.Г. Богаткин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2010. — 284 с.
4. ФГБУ «СибНИГМИ» «Результаты использования гидродинамических прогнозов при применении методов расчета разных метеоэлементов и явлений погоды» отч. изд Новосибирск, 2012г – 29С.
5. ФГБУ «ВНИИГМИ МЦД» [электронный ресурс].

ВЛИЯНИЕ СУДОХОДСТВА НА ГИДРОЛОГИЮ: ОТ ГЛОБАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДО «ШУМОВОГО» ВОЗДЕЙСТВИЯ

Соломатина Ю.А., Цветков И.С.
ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»
jas@mail.ru, zvetkov55@yandex.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу влияния судоходства на гидрологию Мирового океана и внутренних вод. Рассматриваются основные источники загрязнения: нефтесодержащие и балластные воды, пластик, а также нетривиальные факторы — шум от судов и нарушение рельефа дна при дноуглублении. Обосновывается актуальность проблемы и предлагаются пути её решения: переход на альтернативное топливо, очистка балластных вод и международные регулирующие механизмы (МАРПОЛ). Делается вывод о необходимости комплексного подхода для сохранения гидросферы в условиях роста грузооборота.
Ключевые слова. Судоходство, гидрология, загрязнение океана, шумовое загрязнение, дноуглубление, Арктика, экология.

THE IMPACT OF SHIPPING ON HYDROLOGY: FROM GLOBAL POLLUTION TO "NOISE" IMPACT

Solomatina Yu.A., Tsvetkov I. S.
the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Annotation. The article analyzes the impact of shipping on the hydrology of the World Ocean and inland waters. It examines the main sources of pollution, including oily and ballast waters, plastics, as well as non-trivial factors — noise from vessels and seabed disturbance during dredging. The relevance of the problem is substantiated, and solutions are proposed: the transition to alternative fuels, ballast water treatment, and international regulatory mechanisms (MARPOL). The conclusion emphasizes the need for an integrated approach to preserve the hydrosphere amid growing cargo turnover.
Key words. Shipping, hydrology, ocean pollution, noise pollution, dredging, Arctic, ecology.

Введение. Мировой океан и внутренние водные артерии играют фундаментальную роль в развитии человеческой цивилизации. Они выступают не только как источник пресной воды, необходимой для жизни населения и промышленности, но и как источник биологических и минеральных ресурсов. На протяжении всей истории человечества моря и реки служили естественными транспортными путями, связывающими страны и континенты, обеспечивая торговый и культурный обмен между ними.

В современном мире значение водных путей только растет. Сегодня морской транспорт является самым основным элементом глобальной экономики за счет своей дешевизны и возможности перевозить огромное количество грузов. По данным ЮНКТАД, на его долю приходится свыше 80% объема международной торговли. Ежегодно миллиарды тонн грузов — от энергоносителей до потребительских товаров — перемещаются по морям, делая судоходство не просто видом деятельности, а кровеносной системой мирового хозяйства. Судоходство и гидрология связаны и работают как единая система, и невозможно представить их по отдельности – они напрямую зависят друг от друга: Состояние водной среды определяет условия и безопасность перевозок, а само судоходство, в свою очередь, оказывает на нее мощное обратное влияние.

Однако стремительный рост мирового флота и увеличение спроса на осуществление перевозок становятся серьезной угрозой для гидросферы. Увеличение тоннажа судов ведет к росту объемов загрязняющих веществ, попадающих в воду в процессе их эксплуатации. К традиционным проблемам, таким как сброс нефтесодержащих и сточных вод, добавляются новые вызовы такие как: шумовое загрязнение, нарушающее жизненные циклы морских обитателей. Увеличение судов усугубляет ситуацию, и как можно сделать вывод на водной среде это не всегда сказывается положительно. Целью данной работы является комплексный анализ этого воздействия и поиск путей минимизации экологического следа от современного судоходства.

Глобальное загрязнение водной среды. Современное судно, особенно крупнотоннажное, представляет собой плавучий источник нескольких видов загрязнений. В процессе эксплуатации образуются отходы, которые при ненадлежащем обращении неизбежно попадают в гидросферу. Выделяют следующие основные виды сбросов: нефтесодержащие (льяльные) воды, сточные воды, мусор и балластные воды.

Нефтяное загрязнение обычно несет два характера: хроническое и аварийное. Наибольшую опасность для Мирового океана представляют нефтепродукты, используемые в качестве топлива и смазочных материалов. Ключевым источником хронического загрязнения являются льяльные воды – это смесь воды, топлива, масел, моющих средств и технических отходов, скапливающаяся в днище судна. Одно крупное грузовое судно способно накопить до 8 метрических тонн таких вод в сутки.

Несмотря на международные запреты, практика нелегального сброса льяльных вод остается распространенной. Судовладельцы идут на это, чтобы избежать расходов на их хранение и сдачу в портовые приемные сооружения, так называемые очистители. По данным спутникового мониторинга, только в европейских водах ежегодно фиксируется около 3 000 случаев сброса льяльных вод, и это лишь выявленные инциденты. В российской практике ситуация аналогична: например, в 2013 году в реки и каналы Санкт-Петербурга попало порядка 50 тыс. куб. м льяльных вод. Основная причина – это отсутствие должного контроля и реальной возможности сдачи вод на очистку.

Попадание нефти в воду ведет к катастрофическим последствиям. Всего 1 тонна нефти способна покрыть тонкой пленкой до 12 км² водной поверхности. Эта пленка нарушает физико-химические процессы, повышая температуру поверхностного слоя и, что критически важно, ухудшает тем самым газообмен между океаном и атмосферой, снижая поступление кислорода в воду, что способствует отмиранию живых организмов и истреблению морской фауны.

Сточные и хозяйственно-бытовые воды, содержащие органику и моющие средства, попадая в водоемы в больших объемах, вызывают эвтрофикацию — цветение воды и последующее образование "мертвых зон" с дефицитом кислорода.

Отдельная и все более острая проблема — загрязнение пластиком. Пластик составляет более 80% всего морского мусора. Под воздействием волн и солнца он распадается на микропластик — частицы размером менее 5 мм. В рамках своего исследования ученые обнаружили микропластик во всех морях Северного морского пути, в Ладожском озере и даже на дне Марианской впадины. Важно отметить, что значительная доля микропластика в океане (до 16,7% в пробах из Северной Атлантики) — это не только разложившиеся пакеты, но и остатки лакокрасочных покрытий с корпусов судов, которые содержат токсичные металлы: свинец, медь, хром. Микропластик, попадая в организм морских обитателей, становится распространителем «заразы», перенося опасные токсичные вещества по пищевой цепочке вплоть до человека.

Для обеспечения остойчивости суда берут на борт тысячи тонн балластной воды, а затем сбрасывают ее в других районах Мирового океана. Ежегодно таким образом переносится около 10 миллиардов тонн воды вместе с планктоном, личинками и бактериями. Это приводит к неконтролируемому распространению инвазивных видов, которые нарушают сложившиеся экосистемы. Классический пример — вселение гребневика Mnemiopsis в Черное море в 1990-х годах, которое привело к катастрофическому сокращению запасов анчоуса и ущербу рыболовству в размере $350 млн. В 1991 году бактерии холеры в балластном танке пришел в Перу и спровоцировал эпидемию, где до этого вспышек болезни не было более ста лет.

Физическое и «шумовое» воздействие. Помимо химического и биологического загрязнения, современное судоходство оказывает на гидросферу менее очевидное, но не менее разрушительное физическое воздействие. Ключевыми факторами здесь выступают шумовое загрязнение и вмешательство в рельеф дна в ходе дноуглубительных работ.

Подводный шум, создаваемый судами, стал одним из самых быстрорастущих видов воздействия возникшего деятельностью человека на Мировой океан. Основным источником шума является кавитация гребных винтов — процесс образования и схлопывания пузырьков пара при быстром вращении винта. Уровень шума при кавитации сравним со звуком на рок-концерте. По имеющимся оценкам, за последние 50 лет шум на основных судоходных путях увеличился в 32 раза. Кавитация способна

генерировать до 188 дБ подводного шума, который морские обитатели могут слышать на расстоянии до 100 миль.

Последствия для морских обитателей носят комплексный характер. Для китообразных, которые ориентируются и общаются с помощью звука, судовой шум оборачивается серьезными проблемами. Он вызывает фоновый стресс, снижающий иммунитет, и сокращает дистанцию обнаружения звуков, что мешает животным находить добычу и сородичей. В глобальном масштабе последствия шумового загрязнения отражаются в печальной статистике: за последние 30 лет число китов и дельфинов, выбросившихся на побережье Шотландии, выросло более чем в три раза — с 100 до 300 случаев в год, и одной из главных тому причин специалисты называют мощный промышленный шум.

Поддержание судоходных глубин в портах и на фарватерах требует регулярных дноуглубительных работ, которые представляют собой грубое физическое вторжение в донные экосистемы. Негативные последствия проявляются по нескольким направлениям. Во-первых, происходит резкое повышение мутности воды. Создается взвешенная оболочка, ограничивающая проникновение солнечного света, которая в свою очередь препятствует дальнейшему фотосинтезу водных растений. Для животных повышение концентрации взвеси приводит к закупориванию «фильтров» моллюсков, что влечет за собой нарушение функций дыхания и питания.

Во-вторых, дноуглубление наносит прямой удар по обитателям дна — тем самым организмам, которые живут в грунте или на нем. Исследования показывают, что во время таких работ резко сокращается число донных беспозвоночных (например, червей, рачков и моллюсков), особенно тех, кто зарывается в ил или песок. В результате падает и общее количество видов в этом районе. После того как работы заканчиваются, природе требуется до восьми лет, чтобы восстановить условия, пригодные для жизни этих существ. При этом новая экосистема на дне часто оказывается совсем не такой, какой была раньше. Оседающая после землечерпания взвесь буквально душит донные сообщества, перекрывая им доступ к кислороду и пище, что сказывается на их численности и общем состоянии водоема. Рыбы, в свою очередь, избегают зон повышенной мутности, что приводит к сокращению видового богатства и разнообразия их в районах проведения работ.

Таким образом, физическое воздействие судоходства — от шумового фона до прямого разрушения донных организмов — создает дополнительную нагрузку на гидросферу, нарушая естественные процессы жизнедеятельности ее обитателей.

Актуальность и поиск решений. Сегодня проблема влияния судов на гидрологию требует уже не дискуссий, а конкретных действий. Особенно остро она стоит в Арктике. Из-за таяния льдов Северный морской путь становится доступнее, но арктическая природа крайне уязвима: загрязнения разлагаются здесь десятилетиями. Главная угроза — чёрный углерод (сажа), который выбрасывают суда. Оседая на лёд, сажа заставляет его темнеть и быстрее таять. Её потепляющий эффект в 900–1500 раз сильнее, чем у CO_2, а выбросы в Арктике с 2015 по 2021 год выросли вдвое.

Второй фактор — накопление ущерба. Даже малые сбросы нефти, пластика и других отходов за многие годы накапливаются в воде и на дне, и экосистема перестаёт справляться с нагрузкой. Сегодня учёные призывают оценивать не отдельные загрязнения, а их совокупный эффект.

Есть два пути решения: технический и законодательный. Технически главное — менять топливо. Переход с тяжёлого мазута на более лёгкое топливо сокращает выбросы сажи на 50–80%. Также необходимы системы очистки балластных вод: ежегодно суда переносят 10 миллиардов тонн воды с чужеродными организмами, что губит местные экосистемы и рыболовство.

Законодательная база — это конвенция МАРПОЛ, запрещающая сбросы нефти, мусора и химикатов. Для особо уязвимых районов (Балтийское, Средиземное, Чёрное моря, Антарктика) действуют ещё более строгие правила. В зонах контроля выбросов (Северное и Балтийское моря) нельзя использовать топливо с высоким содержанием серы. А для новых судов введён индекс энергоэффективности, который заставляет проектировать их так, чтобы они тратили меньше топлива и меньше загрязняли среду.

Заключение. Подводя итог, можно утверждать, что современное судоходство оказывает на гидросферу комплексное воздействие, которое не ограничивается химическим загрязнением. Помимо традиционных угроз - нефтесодержащим, сточным водам и мусору — добавляются шумовое загрязнение, дезориентирующее морских обитателей, разрушение донных организмов при дноуглублении, а также глобальный эффект от выбросов черного углерода, ускоряющего таяние арктических льдов. Все эти воздействия накапливаются и усиливают друг друга, создавая ущерб, который сегодня уже невозможно игнорировать.

Без внедрения «зеленых» стандартов и технологий сохранение гидросферы в условиях растущего грузооборота представляется невозможным. Переход на чистое топливо, современные системы очистки балластных вод, соблюдение требований МАРПОЛ в особых районах — это не просто рекомендации, а насущная необходимость.

Список литературы

1. Сброс льяльных вод: с кораблей загрязняются океаны // 17 февраля 2023. URL: https://sigmaearth.com/ru/%D1%81%D0%B1%D1%80%D0%BE%D1%81-%D0%BB%D1%8C%D1%8F%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85-%D0%B2%D0%BE%D0%B4-%D1%81-%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BB%D0%B5%D0%B9-%D0%B7%D0%B0%D0%B3%D1%80%D1%8F%D0%B7%D0%BD%D1%8F%D0%B5%D1%82-%D0%BE%D0%BA%D0%B5%D0%B0%D0%BD%D1%8B/ (дата обращения: 20 февраля 2026 года).
2. Системы очистки балластных вод СОБВ // URL: https://cirspb.ru/blog/info-electric-automatic/sistema-ochistki-ballastnykh-vod-sobv// (дата обращения: 20 февраля 2026 года).
3. Российское судоходство. В 2013 году в реки и каналы Санкт-Петербурга попало порядка 50 тыс. куб. м льяльных вод с судов и катеров // 24 октября 2014.URL: https://rus-shipping.ru/ru/service/news/?id=20665&print=1 (дата обращения: 20 февраля 2026 года).
4. Реакцию китов на судовой шум впервые изучат на Чукотке// 20 августа 2020.URL https://goarctic.ru/kultura/reaktsiyu-kitov-na-sudovoy-shum-vpervye-izuchat-na-chukotke/ (дата обращения: 20 февраля 2026 года).
5. Количество выброшенных на берег китов и дельфинов увеличилось в три раза за 30 лет// 28 августа 2025.URL https://moya-planeta.ru/news/view/v_shotlandii_chislo_sluchaev_gibeli_kitov_uvelichilos_bolee_chem_v_tri_raza/ (дата обращения: 20 февраля 2026 года).
6. Выбросы сажи и CO2 от регулируемого ЕС судоходства в Арктике// 28 мая 2025.URL https://theicct.org/publication/black-carbon-and-co2-emissions-from-eu-regulated-shipping-in-the-arctic-may25/ (дата обращения: 20 февраля 2026 года).

ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Газал А., Сероухова О.С.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
ahmed257866@gmail.com

Аннотация. Данное исследование направлено на разработку и применение комплексной методологической основы для оценки пригодности сельскохозяйственных земель в Сирийской Арабской Республике в условиях текущего и прогнозируемого воздействия изменения климата. Методология основана на интеграции географических информационных систем (ГИС) с методом анализа иерархий (МАИ) в рамках модели многокритериального принятия решений (МПР). Исследование проведено с использованием следующих баз данные за периоды 2000-2023 гг.: NASA, CORDEX, MODIS, Всемирная база данных по почвам.
Ключевые слова. Пригодность сельскохозяйственных земель; географические информационные системы (ГИС); метод анализа иерархий (МАИ); многокритериальное принятие решений (МПР); изменение климата; Сирия.

ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF AGRICULTURAL LANDS IN THE SYRIAN ARAB REPUBLIC UNDER CLIMATE CHANGE

Ghazal A., Seroukhova O.S.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This study aims to develop and apply an integrated methodological framework for assessing agricultural land suitability in the Syrian Arab Republic under the current and projected impacts of climate change. The methodology is based on the integration of geographic information systems (GIS) with the analytic hierarchy process (AHP) within a multi-criteria decision-making (MCDM) model. The study was conducted using the following databases for the periods 2000-2023: NASA, CORDEX, MODIS, and the World Soil Database.
Keywords. Agricultural land suitability; geographic information systems (GIS); analytic hierarchy process (AHP); multi-criteria decision making (MCDM); climate change; Syria.

Сельскохозяйственный сектор является краеугольным камнем экономики и продовольственной безопасности Сирийской Арабской Республики. Однако этот сектор сталкивается с растущими угрозами из-за воздействия изменения климата.

В этом контексте оценка пригодности сельскохозяйственных земель выступает в качестве решающего научного инструмента для упреждающего планирования и обоснованного принятия решений. Последние десятилетия ознаменовались значительным развитием инструментов оценки пригодности, особенно с интеграцией географических информационных систем (ГИС) с моделями многокритериального принятия решений (МПР). Эта интеграция позволяет эффективно проводить пространственную обработку данных из множества источников и включать качественный экспертный опыт в количественный анализ.

Несмотря на наличие предыдущих исследований, посвящённых оценке пригодности земель или анализу климатического воздействия в регионе, таких как работа Сейф-Эннаср, выполненная для Марокко, и исследование Ас-Сафади и др., посвящённое культуре пшеницы на юго-западе Сирии, в научной литературе по-прежнему наблюдается ограниченность комплексных исследований. В частности, отсутствует единая методологическая основа для оценки пригодности сельскохозяйственных земель на национальном уровне в Сирии, основанная на интеграции исторических климатических данных и моделей многокритериального принятия решений в среде ГИС. Предыдущие исследования, как правило, фокусировались на отдельных культурах или локальных территориях без всестороннего учёта совокупности влияющих критериев.

Данное исследование направлено на разработку и применение комплексной и надежной методологической основы, основанной на технологиях ГИС и модели МАИ, для оценки пригодности земель для сельского хозяйства в Сирии, с акцентом на анализ чувствительности этой оценки к изменениям ключевых климатических критериев в период 2000-2023 гг.

Район исследования расположен в пределах границ Сирийской Арабской Республики, между 32.19° и 37.33° северной широты и 35.73° и 42.38° восточной долготы. Сирия характеризуется значительным климатическим и геологическим разнообразием: от влажного средиземноморского климата на побережье до континентального сухого и пустынного климата во внутренних районах.



Рисунок 1 – Географическое расположение района исследования

На рисунке 1 показаны границы Сирии и ее расположение в Западной Азии на восточном побережье Средиземного моря, граничащей с Турцией на севере, Ираком на востоке, Иорданией на юге, Ливаном и Палестиной на юго-западе.
Для проведения исследования использовались мировые базы данных, указанные в Таблице (1).

Все данные были приведены к единому пространственному разрешению (1 км × 1 км).

Применяемая в данном исследовании методология основана на интеграции географических информационных систем (ГИС) с методом анализа иерархий (МАИ) в рамках модели многокритериального принятия решений (МПР). Методология включает последовательное выполнение трех взаимосвязанных этапов: (1) формирование иерархической структуры критериев, (2) определение относительных весов критериев с использованием МАИ и (3) пространственную интеграцию критериев методом взвешенного линейного объединения в среде ГИС.

Таблица 1 - Источники данных и их характеристики

Критерий	Основной источник	Описание/ Разрешение	Ссылка/ Источник
Температура	NASA (база данных MERRA-2 или аналогичная)	Ежемесячные/ежедневные данные	https://www.nasa.gov/
Осадки	CORDEX (региональная климатическая модель)	Ежемесячные данные об осадках	https://cordex.org/
Землепользование	MODIS (MCD12Q1)	Ежегодные данные со средним пространственным разрешением (500 м), классифицирующие наземный покров	-
Тип почвы	Всемирная база данных по почвам (HWSD)	Карты текстуры почвы (глина, ил, песок), катионообменная способность, pH	ФАО (ООН)
Уклон	ASTER GDEM (NASA)	Цифровая модель рельефа (ЦМР) для получения карты уклона (в градусах или процентах)	https://www.nasa.gov/

Была сформирована двухуровневая иерархическая структура критериев оценки пригодности сельскохозяйственных земель.

Климатические условия, представленные двумя подкритериями:

- среднегодовая температура воздуха T (°C);
- сумма годовых атмосферных осадков P (мм).

Физико-географические характеристики территории, включающие:

- текущее землепользование (LULC);
- текстуру почвы (Soil);
- топографический уклон поверхности (Slope).

Температурные и осадочные показатели представлены временными рядами среднегодовых значений. Для каждого пикселя расчетной сетки использовались временные ряды T (°C) и P (мм), содержащие по 24 годовых значения за период 2000–2023 гг. Климатические данные были приведены к единому пространственному разрешению 1 км × 1 км.

Исходные климатические показатели (Value) представляют собой физические величины, выраженные в соответствующих единицах измерения (температура — °C, осадки — мм). Эти данные не могут быть напрямую включены в модель многокритериального анализа ввиду различия размерностей между критериями.

С целью обеспечения сопоставимости всех факторов была выполнена процедура переклассификации, в результате которой исходные значения были преобразованы в балльные показатели пригодности (Scores). Полученные Scores применяются на этапе интегральной оценки территории с учетом разработанных авторами в результате процесса анализа иерархий (МАИ) весов основных и второстепенных критериев.

В качестве примера результатов пространственного анализа такого критерия как среднегодовая температура воздуха на рис. 2 приведено пространственное распределение как собственно среднегодовой температуры воздуха за период 2000–2007 гг. (Value, ^{0}C), так и балльные показатели (Scores), где оптимальные температурные диапазоны получали максимальные оценки.

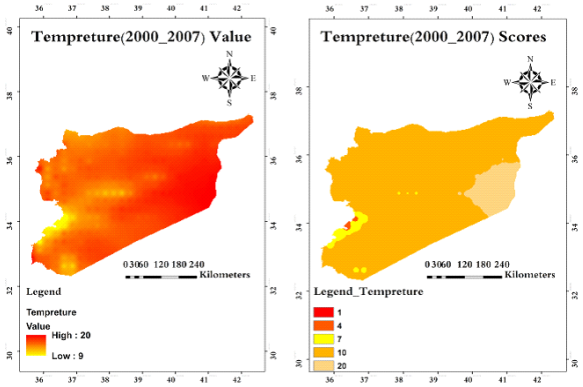


Рисунок 2 – Диапазон температур в Сирии за 2000-2007 годы

Аналогичные данные, но уже для атмосферных осадков, приведены на рис. 3.

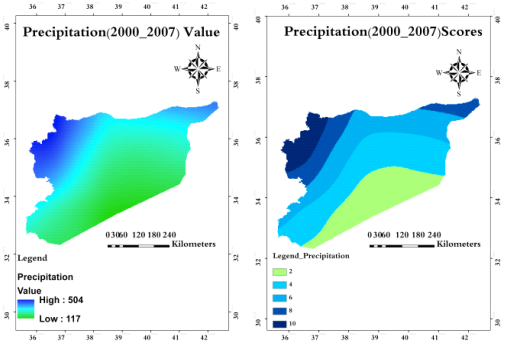


Рисунок 3 – Диапазон осадков в Сирии за 2000-2007

На рис. 4 показана карта землепользование в Сирии в 2005 году, с разбивкой по категориям: городская застройка, сельскохозяйственные угодья, леса, водные объекты и т. д.

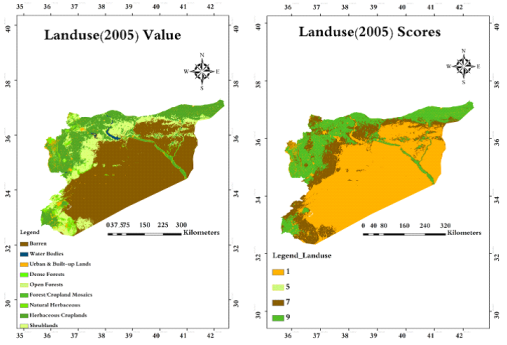


Рисунок 4 – Использование земель в Сирии (2005 г.)

Кроме приведенных примеров в работе получены карты типов почв Сирии, карты уклонов и итоговая карта пригодности использования земель для ведения сельского хозяйства.

В результате данного исследования была разработана и успешно применена комплексная методологическая основа для оценки пригодности сельскохозяйственных земель в Сирии, сочетающую пространственную аналитическую мощь географических информационных систем (ГИС) со способностью обработки качественных экспертных оценок метода анализа иерархий (МАИ).

Список литературы

1. *Аль-Сафади К., Алаут С., Мухаммад С.* Моделирование прогнозируемого воздействия изменения климата на пригодность пшеницы в полузасушливых регионах с использованием индекса климатической пригодности на основе МАИ и CMIP6 на юго-западе Сирии // Agricultural Systems. – 2023. – Т. 205. – С. 103587.
2. *Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution // Scientific Data. – 2018. – Vol. 5. – Article 180214. DOI: 10.1038/sdata.2018.214
3. *Faour G., Meslmani Y., Fayad A.* Climate-change atlas of Syria. – Beirut: National Council for Scientific Research, 2010. – 64 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.26562.17601
4. *Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. –

2005. – Vol. 25, № 15. – P. 1965–1978. DOI: 10.1002/joc.1276
5. IPCC (Межправительственная группа экспертов по изменению климата). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Core Writing Team: H. Lee, J. Romero (Eds.). – Geneva: IPCC, 2023. – 184 p. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
6. *Mullan D.* Soil erosion under the impacts of future climate change: Assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems // CATENA. – 2013. – Vol. 109. – P. 234–246. DOI: 10.1016/j.catena.2013.03.007
7. *Saaty T.L.* The Analytic Hierarchy Process. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 287 p.
8. *Saha S., Sarkar D., Mondal P., Goswami S.* GIS and multi-criteria decision-making assessment of sites suitability for agriculture in an anabranching site of soon river, India // Modeling Earth Systems and Environment. – 2021. – Vol. 7, № 1. – P. 571–588. DOI: 10.1007/s40808-020-00936-1

МЕХАНИЗМЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ВУЛКАНИЧЕСКИХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

Петухов Г.М.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Gena22007@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются физические механизмы и критерии формирования вулканических мезоциклонов — локально организованных циклонических вихрей, развивающихся в атмосфере над действующими вулканами во время эксплозивных извержений.
Ключевые слова. Вулканический мезоциклон, извержения вулканов, атмосферная динамика, бароклинная неустойчивость, критерии циклогенеза.

MECHANISMS AND PHYSICAL PATTERNS OF EDUCATION VOLCANIC MESOCYCLONES

Petukhov G.M.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The paper examines the physical mechanisms and criteria for the formation of volcanic mesocyclones, locally organized cyclonic vortices that develop in the atmosphere above active volcanoes during explosive eruptions.
Keywords. Volcanic mesocyclone, volcanic eruptions, atmospheric dynamics, baroclinic instability, criteria of cyclogenesis.

Извержения вулканов на Земле являются важным процессом в формировании глобальных геохимических циклах, воздействуя на приповерхностную геосферу, гидросферу и атмосферу. Продукты извержения вулканов (пирокластические потоки, лахары, лавовые фонтаны, пепел, газы и др.) могут привести к человеческим жертвам, разрушению зданий и сооружений, нарушить воздушное сообщение, повлиять на климат и значительно изменить окружающий ландшафт. Особую опасность представляют крупномасштабные вулканические взрывные извержения, например, извержение вулкана Пинатубо (Филиппины), произошедшее 15.06.1991, после длительного 611-летнего перерыва. От извержения и его последствий погибло как минимум 875 человек. Извержение уничтожило стратегическую базу ВВС США Кларк, расположенную в 18 км от Пинатубо, и военно-морскую базу США. Окрестности вулкана были опустошены пирокластическими потоками и лахарами [1]. Извержение было признано одним из самых сильных в XX веке — 6 баллов по шкале вулканических извержений (VEI) [2].

Ученые отметили особенность сильного извержения Пинатубо от классической модели в которой предполагается, что эруптивная колонна (столб извержения со шлейфом) всегда остается осесимметричным и не вращающимся. В данном случае, восходящий поток столба продемонстрировал гидродинамический эффект, который ранее в научной литературе не рассматривался – вулканический мезоциклон (ВМЦ) [3]. В исторических записях имеется свидетельство подобного явления при извержении вулкана у острова Святого Михаила на Азорском архипелаге, произошедшего 12.06.1811 одного из капитанов, который в судовом журнале отметил три особенности наблюдаемого извержения: вращение столба вокруг своей оси, молнии внутри и водяные смерчи (или пылевые вихри), приближающиеся к эруптивной колонне [4].

Механизмы зарождения вулканического мезоциклона

Конвективный восходящий поток и сдвиг ветра

Вулканический мезоциклон формируется в основном в результате сочетания мощного конвективного восходящего потока в пепловом столбе и вертикального сдвига ветра. Аналогично грозовым мезоциклонам (МЦ), вращение в столбе возникает за счет наклона горизонтального завихрённости под действием восходящего потока, который *«переворачивает»* вращающийся воздух в вертикальную ось [5]. Для процесса характерны:

резкий градиент температур и плотности между горячими пирокластическими газами и окружающим воздухом;

высокая скорость подъема (до 10-30 м/с) и неоднородность турбулентных потоков в прижерловом слое кратера вулкана.

Вертикальная скорость восходящего потока w в конвективной ячейке определяется уравнением конвективной доступной потенциальной энергии (CAPE):

$$w = \sqrt{2 \cdot \text{CAPE}} \tag{1}$$

где CAPE интегрируется по сухому и влажному адиабатам.

Сдвиг ветра S (0–6 км) усиливает вращение:

$$S = \int_0^6 \left|\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z}\right| dz \geq 15 - 20 \text{ м/с}, \tag{2}$$

критично для формирования МЦ, т.к. при вертикальном сдвиге ветра горизонтально ориентированные вихревые линии наклоняются под действием конвективного восходящего потока. В сочетании с усилением вертикальной завихрённости за счет растяжения вихря на флангах шторма образуются два вихря.

Термическая неустойчивость и энергетический «подсос»

Участки усиленной конвективной неустойчивости внутри пеплового облака могут выступать в качестве центров формирования мезовихрей. В российских работах по мезомасштабным циклонам (ММЦ) и полярным мезоциклонам (ПМЦ) подчеркивается роль турбулентных потоков тепла и влаги от поверхности, а также бароклинных и баротропных градиентов давления в создании потенциала для вихреобразования [6-7]. При вулканическом извержении источником энергии служит: латентное тепло конденсации водяного пара, сопутствующего пепловому потоку; тепло от горячего вулканического пирокласта и газов [8].

Расчет коэффициента устойчивости K_a для плюма (горячий мантийный поток):

$$K_a = N/\lambda_T \cdot \Delta T_1 H, \tag{3}$$

где N — мощность плюма (тепловая мощность), λ_T - теплопроводность твердой мантии вокруг плюма, ΔT_1 — температурный перепад, определяет термическую неустойчивость, H —высота канала [9].

Взаимодействие с крупномасштабными циклонами и фронтами

В ряде исследований по мезомасштабной метеорологии отмечается, что вихри масштаба 10–100 км часто формируются в зонах конвергенции крупных воздушных масс, особенно вблизи фронтальных систем и синоптических депрессий [7]. ВМЦ могут усиливаться или модифицироваться под действием:

крупных циклонов и антициклонов, перемещающих вулканическое облако;

синоптических фронтов, где возникают дополнительные бароклинные и баротропные зоны интенсивного вихря [7].

Физические закономерности динамики развития вулканического мезоциклона

Структура вихря и циркуляция

Вихрь состоит из циклонического восходящего потока в центральной части и периферийного нисходящего потока. Геометрия и размер вихря зависят от:

расхода эруптивного материала (массовый выброс пепла и газов);

термической и гидродинамической структуры атмосферы в момент извержения.

В работах Голицына Г.С. [8] и других авторов показано, что вихревые структуры атмосферы (в том числе ПМЦ) описываются законами подобия и размерности, что позволяет переходить к универсальным параметризациями для вихрей различной природы [10-11].

Роль турбулентных структур и вихревого динамо

Современные модели мезомасштабного циклогенеза (включая тропические и полярные аналоги) указывают на ключевую роль вихревых *«горячих башен»* и конвективных когерентных структур в поддержании вихря [11]. В вулканическом столбе такие структуры:

формируют зоны повышенной завихренности;

поддерживают «*вихревое динамо*», преобразующее энергию мелкомасштабной турбулентности в крупномасштабное вращение. Масштабный поток в турбулентном термике (по числу Льюиса):

$$Le = \frac{\alpha}{D} = 100 - 1000, \quad (4)$$

где: где α — температуропроводность (теплодиффузия), D —коэффициент химической диффузии [12-13].

Временная и пространственная эволюция

В исследовании мезомасштабных вихрей в прибрежных и океанических зонах отмечалось, что многие из них могут существовать десятки дней и даже месяцев, сохраняя циклоническую завихренность [14]. ВМЦ, как правило, более короткоживущие (несколько часов–суток), их длительность зависит от:

интенсивности и длительности извержательного режима;

динамической *«живучести»* их спутниковых циклонических систем [14].

Роль российских исследователей

Голицын Г.С. [8] в ряде работ по атмосферным вихрям (тропическим и ПМЦ) заложил основы теории размерности и подобия для вихревых процессов, которые легко переносятся на ВМЦ [10-14]. Исследования ММЦ над Чукотским морем, в Арктике и в различных частях Мирового океана, показали, что сильные вертикальные градиенты температуры и ветров, а также конвергенция потоков, являются ключевыми факторами формирования вихрей. Эти механизмы имеют прямую аналогию и в динамике вулканических столбов [11-15].

Современные работы по прогнозу ПМЦ и потоков пепла в Арктическом регионе (например, Петриченко и соавт. [6]) показывают, как комбинация индексов конвективной неустойчивости, синоптических полей и спутниковых данных позволяет

выявлять и предсказывать положение и интенсивность мезовихрей, в том числе вблизи вулканов [7].

Заключение. Вулканические мезоциклоны образуются в результате сильных конвективных и ветровых процессов в эруптивной колонне (в вулканическом вертикальном пепловом столбе), усиленных термической и бароклинной неустойчивостью. Ключевым фактором для инициации МЦ является значительный вертикальный сдвиг ветра, который будучи «накланён» мощным восходящим потоком извержения, генерирует существенную вертикальную завихрённость. Бароклинные эффекты, возникающие из-за градиента температуры между горячим шлейфом и холодным воздухом, играют второстепенную, но важную роль в поддержании и организации вращения.

Тепловая мощность извержения вулкана определяет масштабы конвекции и, соответственно, потенциал для генерации и усиления завихрённости. Простейшая модель, учитывающая синергию этих факторов, может быть сформулирована в виде зависимости интенсивности МЦ от мощности эруптивного источника и характеристик сдвига ветра. Формирование ВМЦ является комплексным процессом, в котором термодинамическая «*движущая сила*» (интенсивная конвенция, влажно-статистическая неустойчивость, выделение скрытого тепла) взаимодействует с динамической «*организационной силой*» (сдвиг ветра, бароклинность). Российские исследования полярных и ММЦ, а также работ по вихревой динамике и атмосферным вихрям Голицына Г.С., и других авторов заложили физические основы для описания этих явлений в общем контексте атмосферных вихрей.

Перспективы исследований. Несмотря на значительный прогресс в изучении механизмов и физических закономерностей образования ВМЦ, ряд ключевых вопросов требует дальнейшего внимания. В первую очередь, необходимы высокоточные полевые измерения в зонах активных вулканов (например, на Курилах или Камчатке), включая лидары и доплеровские радары для визуализации микрофизических процессов в эруптивных колоннах на субкилометровых масштабах. Это позволит уточнить роль термохимических неоднородностей и турбулентных взаимодействий в инициации мезоциклонов. Развитие нестационарных численных моделей (WRF-Chem, ICON-EU с модулями вулканического пепла) должно учитывать мультифазные взаимодействия и стохастические эффекты эрупций. Перспективно интегрировать машинное обучение для постобработки данных спутникового мониторинга и прогноза интенсивности МЦ, что повысит точность на 20–30% по сравнению с детерминистическими подходами.

В долгосрочной перспективе стоит исследовать климатические обратные связи: влияние ВМЦ на арктические и полярные циркуляции в условиях глобального потепления. Междисциплинарные проекты с использованием искусственного интеллекта (нейронные сети типа CNN-LSTM для анализа траекторий циклонов) и доступность баз данных для исследователей откроют новые горизонты для оперативного мониторинга и минимизации рисков в авиации и экосистемах.

Список литературы

1. Пинатубо – абсолютная высота, расположение, диаметр кратера. Рувики, официальный сайт. – URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Пинатубо?ysclid=mmbsb9ypvj341970804 (дата обращения 03.03.2026).
2. *Newhall CG, Self S* (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. J Geophys Res 87(C2):1231–1238
3. *Chakraborty P, Gioia G, Kieffer SW.* Volcanic mesocyclones. Nature. 2009 Mar 26;458 (7237):497-500. doi: 10.1038/nature07866. PMID: 19325632.

4. *Tillard, S.* A narrative of the eruption of a volcano in the sea off the island of St. Michael. Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 102, 152–158 (1812).
5. От ливня до торнадо: какие атмосферные проявления скрывает мезоциклон: официальный сайт. – URL : https://www.pravda.ru/news/science/2230675-mesocyclone-weather-event/ (дата обращения 03.03.2026).
6. *Петриченко С.А., Калмыкова О.В., Козлов С.В., Кулижникова Л.К.* Использование композиции индексов конвективной неустойчивости для прогноза зарождения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России // Российская Арктика. 2023. Т. 5. No 2. С. 54-64 https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-2-54-64
7. *Заболотских Е.В., Бобылев Л.П., Дикинис А.В., Неелова Л.О., Смирнова Ю.Е.* Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей // Учен. зап. Рос. гос. гидрометеорolог. ун-та (РГГМУ). СПб., 2010. No 16. С. 59–77.
8. *Бреннинкмайер К.А.М, Гинзбург А.С., Еланский Н.Ф., Мохов И.И.* Двойной портрет: вклад Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена в исследование физики и химии атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, издательство ФГБУ «Издательство «Наука» (Москва), том 57, № 1, с. 3-20
9. *Добрецов Н.Л.* (2008). Геологические следствия термохимической модели плюмов. Геология и геофизика, 49(7), с. 587–604.
10. Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов/ под ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова, С.Н. Куличкова, М.В. Курганского, И.А. Репиной, О.Г. Чхетиани М.: Физматкнига, 2018. — 578 с. ISBN 978-5-89155-312-5.
11. *Курганский, М. В.* Российские исследования в области динамической метеорологии в 2015-2018 гг. / М. В. Курганский, В. Н. Крупчатников. - С. 6-47
12. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н.* Проблемы глубинной геодинамики и моделирование мантийных плюмов // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (12), с. 5—21.
13. *Кирдяшкин А.А., Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Гладков И.Н., Сурков Н.В.* Гидродинамические процессы при подъеме мантийного плюма и условия формирования канала излияния // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (9), с. 891—907.
14. *Розенберг Г.В., Николаева-Терешкова В.В.* Стратосферный аэрозоль по измерениям с космического корабля // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1965. Т. 1. № 4. С. 386-394.
15. *Травкин В.С.* Особенности проявления мезомасштабной вихревой динамики в различных частях Мирового океана = = Features of mesoscale eddy dynamics in various parts of the Global ocean Features of mesoscale eddy dynamics in various parts of the Global ocean: в 2-х т.: диссертация ... кандидата географических наук: 1.6.17. / Травкин Владимир Станиславович; [Место защиты: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»; Диссовет СПбГУ А1.6.17.25.4309]. — Санкт-Петербург, 2025. — 341 с.: т. 1 (177 с.; на рус. яз.), т. 2 (164 с.; на англ. яз.): ил.: 14,5х20,5 см.

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЕТРОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

Дубских А.А., Балтаханов Т.М.
Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Санкт-Петербург
omoykan@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются методы построения и выбор наиболее качественного уравнения регрессии с целью прогнозирования максимальной температуры воздуха, на основе данных полученных с помощью температурно-ветрового зондирования.

Ключевые слова. Уравнение регрессии, предиктант, предиктор, обучающая выборка, коэффициент детерминации, критерий AIC.

A METHODS FOR PREDICTING THE MAXIMUM AIR TEMPERATURE BASED ON ATMOSPHERIC TEMPERATURE AND WIND SANDING DATA

Dubskikh A.A., Baltakhanov T.M.
Military-Space academy named A.F. Mozhaisky (VKA), St.Petersburg

Annotation. Methods of constructing and selecting the most qualitative regression equation for predicting the maximum air temperature based on data obtained using temperature and wind sending are considered.
Keywords. Regression equation, predictor, training sample, coefficient of determination, AIC criterion.

В эпоху климатических изменений атмосферы на планете, а также экстремальных погодных явлений, вычисление максимального суточного значения температуры имеет высокую степень значимости и является важной задачей. Максимальная суточная температура — это ключевой метеорологический параметр, который отражает пиковое значение нагретости воздуха в течение дня, который имеет большое влияние на все процессы, происходящие на поверхности Земли, а также на здоровье населения.

Для расчета этого параметра мы применим метод регрессионного анализа, который состоит в построении модели условного математического ожидания, на основе обучающей выборки, с помощью которого можно прогнозировать значение максимальной температуры, которая выступит в роли предиктанта, на основе других метеорологических параметров – предикторов, имеющих наибольшее статистическое влияние на максимальную температуру [1]. Мы разберём известные методы нахождения уравнения регрессии, определим его статистическую значимость и рассчитаем среднюю абсолютную ошибку прогноза на экзаменационной выборке. Программным обеспечением для реализации идеи этой работы послужит программный пакет для статистического анализа STATISTICA 10.

Исходными данными для проведения статистического анализа послужат данные, взятые с сайта ВНИИ ГМИ МЦД, на котором предоставляется доступ к различным метеорологическим параметрам для различных станций наблюдения за разные сроки. В качестве основных параметры для обучающей выборки взяты следующие метеорологические параметры:

Предиктант – максимальная температура воздуха за сутки;

Предикторы – температура воздуха у поверхности земли (*x1*); влажность воздуха у поверхности земли (*x2*); скорость ветра (*x3*); количество облачности (*x4*); температура воздуха на изобарической поверхности, равной 850 гПа (*x5*); влажность воздуха на изобарической поверхности, равной 850 гПа (*x6*). Все значения предикторов получены на время 00 часов по всемирному координированному времени. Элемент обучающей выборки приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Элемент обучающей выборки

Дата	*Tмакс.*	*Данные на 00:00 UTC*					
		Tзем.	*Uзем.*	*FFзем.*	*N*	*T850*	*U850*
31.08.2015	*20,6*	*15,4*	*85*	*1*	*0*	*5,4*	*84*
28.08.2015	*18,1*	*17,9*	*72*	*1*	*3*	*8,4*	*83*
25.08.2015	*24,2*	*19,2*	*45*	*2*	*0*	*7,8*	*72*
22.08.2015	*23,4*	*16,8*	*81*	*1*	*0*	*9,8*	*72*
19.08.2015	*19,1*	*10,8*	*79*	*0*	*0*	*6,4*	*31*

Данные получены за один месяц, с интервалом в три дня для исключения повторяющихся значений. Для составления уравнения регрессии нужно не менее 30 значений выборки, для этого были взяты значения за 3 года – 2013, 2014 и 2015.

В качестве экзаменационной выборки послужат те же параметры, что и в обучаемой, но за следующий год, то есть 2016, данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Элемент экзаменационной выборки

Дата	*Тмакс.*	*Данные на 00:00 UTC*					
		Тзем.	*Uзем.*	*FFзем.*	*N*	*T850*	*U850*
31.08.2016	*17,7*	*11,9*	*93*	*1*	*3*	*3,4*	*80*
28.08.2016	*17,9*	*12,4*	*50*	*6*	*0*	*3,2*	*85*
25.08.2016	*18,7*	*13,1*	*86*	*0*	*0*	*4,4*	*81*
22.08.2016	*26,3*	*20,0*	*66*	*0*	*6*	*9,6*	*66*
19.08.2016	*23,9*	*17,2*	*92*	*1*	*8*	*8,2*	*84*

В качестве методов получения уравнения регрессии применим метод пошагового регрессионного анализа с включением и пошаговый регрессионный анализ с исключением. Метод пошагового регрессионного анализа с включением — это автоматизированный подход к построению регрессионной модели, где независимые переменные – предикторы добавляются поэтапно на основе их статистической значимости. Процедура начинается с пустой модели без предикторов. На каждом шаге выбирается предиктор, который наиболее увеличивает статистическую значимость модели, на основе прироста коэффициента детерминации, и включается в уравнение, если он дает прирост значения коэффициента детерминации уравнения регрессии, который характеризует степень тесноты корреляционной связи. По аналогичному принципу работает метод пошагового регрессионного анализа с исключением, но отличие заключается в том, что для такого метода на первом шаге берется целое уравнение регрессии со всеми возможными предикторами, а затем проверяется, в какую сторону изменяется коэффициент детерминации при исключении того или иного предиктора [2].

Затем получив два уравнения регрессии включением и исключением выберем наиболее статистически значимое по коэффициенту детерминации, значения которых представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение полученных уравнений регрессии

№ п/п	*Уравнение регрессии*	*Значение коэффициента детерминации*
1.	*y = 3,86 + 1,01*x1 – 0,33*x4 + 1,01*x2 + 1,01*x6*	*0,74*
2.	*y = 6,71 + 0,93*x1 – 0,35*x4*	*0,64*

На основе представленных в таблице №3 данных, можно сделать вывод о том, что мы воспользуемся моделью, полученной с помощью метода прямого включения, так как её статистическая значимость выше.

Таким образом мы получили уравнение регрессии. Теперь с его помощью на экзаменационной выборке можно спрогнозировать значения максимальной температуры для последующего срока наблюдения. Подставив значения метеорологических параметров из экзаменационной выборки в полученное уравнение регрессии получим прогнозируемые значения, выведенные в таблице 4.

Таблица 4 – Значения максимальной температуры за сутки (столбец А), спрогнозированные значения максимальной температуры (столбец Б)

включение	*А*	*Б*
31.08.2016	*17,7*	*10,1*
28.08.2016	*17,9*	*10,9*
25.08.2016	*18,7*	*12,2*
22.08.2016	*26,3*	*18,0*
19.08.2016	*23,9*	*13,5*
16.08.2016	*15,3*	*10,2*
13.08.2016	*19,1*	*12,4*
10.08.2016	*21,2*	*14,6*
07.08.2016	*19,3*	*14,3*
04.08.2016	*22,5*	*15,3*
01.08.2016	*21*	*16,0*

Наглядно видно высокое значение относительной погрешности (более 11%) прогнозируемого параметра, что связано с ем что более сложное уравнение регрессии с большим количеством предикторов идеально подстраивается под обучающую выборку, но плохо отражает реальную ситуацию из-за возникновения погрешностей избыточности данных. Проверим как делает прогноз модель, полученная методом исключения, результаты которого выведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения максимальной температуры за сутки (столбец А), спрогнозированные значения максимальной температуры (столбец В)

исключение	*А*	*В*
31.08.2016	*17,7*	*16,76*
28.08.2016	*17,9*	*18,28*
25.08.2016	*18,7*	*18,94*
22.08.2016	*26,3*	*23,26*
19.08.2016	*23,9*	*19,95*
16.08.2016	*15,3*	*17,47*
13.08.2016	*19,1*	*19,31*
10.08.2016	*21,2*	*20,93*
07.08.2016	*19,3*	*20,60*
04.08.2016	*22,5*	*21,46*
01.08.2016	*21*	*21,53*

Уравнение регрессии показывает совершенно иные результаты прогнозирования (относительная погрешность около 2%), что наглядно видно в таблице 5. Соответственно будем работать с уравнением полученным методом пошагового регрессионного анализа с исключением.

Помочь в выборе лучшей модели уравнения может критерий AIC, которая сочетает оценку качества полученных моделей вместе с учетом штрафа за лишние предикторы. Данный критерий рассчитывается по формуле, где n – объем выборки, k – число параметров, RSS – сумма квадратов регрессии. Таким образом модель чей критерий AIC имеет меньшее значение лучше объясняет данные, либо делает это проще [3].

$$AIC = n\,ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + 2k \quad (1)$$

Рассчитанные критерии AIC представлены в таблице 6, на основе их показателей можно сказать о том, что уравнение регрессии, полученное методом пошагового исключения, будет иметь лучшие результаты прогнозируемых значений по сравнению с уравнением полученным методом пошагового включения.

Таблица 6 – Сравнение полученных уравнений регрессии

№ п/п	*Уравнение регрессии*	*AIC*
1.	*y = 3,86 + 1,01*x1 – 0,33*x4 + 1,01*x2 + 1,01*x6*	*85,24*
2.	*y = 6,71 + 0,93*x1 – 0,35*x4*	*77,26*

Теперь проверим качество полученного уравнения регрессии. А именно, с помощью пакета STATISTICA, ведь в ней после проведения регрессионного анализа доступны все функции для проверки качества.

	Дарбина-Уотсона d (обучающая.sta) и сериальная корреляция остатков	
	Дарбина-Уотсон d	Сериаль Корр.
Оценка	1,919625	-0,011004

Рисунок 1 – Статистика Дарбина-Уотсона в STATISTICA

Статистика Дарбина-Уотсона гласит, что если значение соответствующего коэффициента лежит в окрестности значения 2, то автокорреляции полученного уравнения регрессии нет, у полученного уравнения этот коэффициент получился равным 1,91 (рисунок 2).

С помощью графика распределения предсказанных значений и остатков, можно определить гомоскедастичность (рисунок 3), однако в случае данной модели, по этому графику можно выявить паттерны нарушений допущений уравнения регрессии, которые говорят о гетероскедастичности и нелинейности.

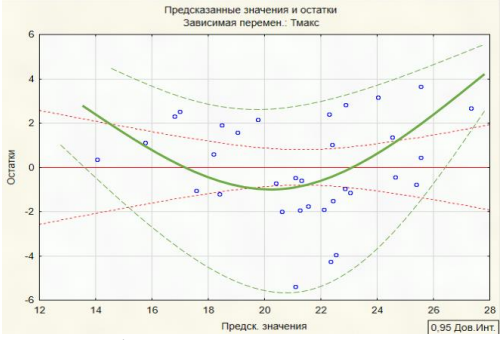


Рисунок 3 – График предсказанных значений и остатков

А также проверив математическое ожидание остатков можно сказать о их независимости, для этого уравнения регрессии так же с помощью STATISTICA рассчитано данное значение, и оно равно нулю (рисунок 4).

32	25,90000	24,58974	1,31026	1,01159	0,63635	0,624
33	18,60000	23,47171	-4,87171	0,67000	-2,36602	0,597
Минимум	14,40000	13,60614	-4,87171	-2,34421	-2,36602	0,493
Максим.	30,00000	28,34183	3,06707	2,15795	1,48957	1,500
Среднее	21,27879	21,27879	0,00000	-0,00000	0,00000	0,776
Медиана	20,60000	21,59701	0,12928	0,09723	0,06279	0,735

Рисунок 4 – Математическое ожидание остатков

В результате проведенной работы были выведены два уравнения регрессии, полученные методом пошагового включения и пошагового исключения. Каждое из них показало разные значения прогноза максимальной температуры, на основе чего было отобрано уравнение, наиболее точно прогнозирующее предиктант, данный выбор проверен и подтвержден критерием AIC. После чего было проверено качество уравнения. Результат указывает на наличие непостоянства дисперсии полученного уравнения, что влияет на результат прогнозирования, то есть в среднем прогноз будет иметь высокую точность, но для точек экстремума прогноз будет иметь погрешность.

Список литературы

1. *Шемелов В.А.* «Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие»;
2. *Гмурман В.Е.* «Теория вероятностей и математическая статистика»;
3. *Дрейпер Н., Смит Г.* «Прикладной регрессионный анализ»;
4. https://ru.ruwiki.ru/wiki/Информационный_критерий_Акаике

ОТБОР НАИБОЛЕЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРЕДИКТОРОВ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Мироненко В.В.
ФГБВОУВО “Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского”,
Санкт-Петербург
v.m.1.09.2006@gmail.com

Аннотация. В работе представлен метод отбора информативных предикторов для задачи прогнозирования максимальной температуры воздуха, основанный на корреляционном анализе. В качестве потенциальных предикторов рассмотрены семь метеорологических параметров: приземные температура, влажность и скорость ветра, количество облаков, а также температура и влажность на уровне 850 гПа. На основе архивных данных выполнен расчёт коэффициентов корреляции между каждым предиктором и максимальной температурой воздуха. Установлено, что ключевыми предикторами являются приземная температура и скорость ветра у поверхности Земли, общее количество облаков. Использование отобранного набора предикторов позволяет упростить прогностическую модель и повысить её эффективность при сохранении высокой точности прогноза.
Ключевые слова. Корреляционный анализ, коэффициент корреляции, предиктор, предиктант

SELECTION OF THE MOST INFORMATIVE PREDICTORS FOR FORECASTING MAXIMUM AIR TEMPERATURE

Mironenko V.V.
Military-Space academy named A.F. Mozhaisky (VKA), St.Petersburg

Annotation. This article presents a method for selecting informative predictors for forecasting maximum air temperature, based on correlation analysis. Seven meteorological parameters were considered as potential predictors: surface temperature, humidity, wind speed, cloud cover, as well as temperature and humidity at the 850 hPa level. Using historical data, correlation coefficients were calculated between each predictor and maximum air temperature. The key predictors are surface temperature, surface wind speed, and total cloud cover. Using the selected set of predictors makes possible to simplify the forecasting model and improve its efficiency while maintaining high prediction accuracy
Keywords. Correlation analysis, correlation coefficient, predictor, predictand.

Прогнозирование максимальной температуры воздуха — одна из ключевых задач метеорологии, имеющая важное прикладное значение для сельского хозяйства, энергетики, транспорта и городского планирования. Повышение точности краткосрочных прогнозов

температуры напрямую зависит от корректного выбора входных параметров — предикторов, отражающих текущее состояние атмосферы.

Традиционные прогностические модели зачастую используют избыточный набор предикторов, что повышает вычислительную сложность и может приводить к переобучению модели без существенного роста точности прогноза. В связи с этим актуальной задачей является отбор наиболее информативных предикторов — тех, которые демонстрируют устойчивую статистическую связь с прогнозируемой величиной.

Цель работы — отобрать наиболее информативные предикторы для прогнозирования максимальной температуры воздуха на основе корреляционного анализа метеорологических параметров.

Задачи исследования:

- сформировать набор потенциальных предикторов, потенциально влияющих на максимальную температуру воздуха;
- рассчитать коэффициенты корреляции между каждым предиктором и максимальной температурой;
- оценить статистическую значимость выявленных связей;
- выделить предикторы с наиболее высокой корреляцией для дальнейшего использования в прогностических моделях.

Объектом исследования являются метеорологические параметры, потенциально пригод ные для использования в качестве предикторов при прогнозировании максимальной температу ры воздуха. В работе рассмотрены следующие параметры:

1. Температура воздуха у поверхности Земли (*T*зем), ∘C.
2. Влажность воздуха у поверхности Земли (*U*зем), %.
3. Скорость ветра у поверхности Земли (*FFзем*), м/с.
4. Количество облаков (общая облачность, *N*).
5. Температура воздуха на уровне 850 гПа (*T*850), ∘C.
6. Влажность воздуха на уровне 850 гПа (*U*850), %.

Данные получены из архива метеорологических наблюдений с сайта ВНИИГМИ-МЦД http://meteo.ru/data/monthly-clouds/ для станции 26063 Санкт-Петербург.

В качестве основного метода отбора предикторов использован корреляционный анализ, сущность которого состоит в исследовании наличия корреляционной связи между предиктантом и предикторами и определения степени её тесноты.

Последовательность выполнения работы:

1. Получение наборов обработанных данных из архива ВНИИГМИ-МЦД.
2. Построение корреляционной матрицы для предиктанта и предикторов.
3. Оценка статистической значимости.
4. Оценка частного коэффициента корреляции и проверка его статистической значимости для каждого предиктора.
5. Анализ результатов.

Ход работы

1. Получена выборка гидрометеорологических параметров, состоящая из 50 наборов данных, где *Тмакс.* – предиктант, *Тзем, Uзем, FFзем, N, T850, U850* - предикторы, за период с 03.08.2012 по 30.08.2016 через каждые трое суток.

2. Для отбора наиболее информативных предикторов были использованы методы корреляционного анализа, строилась корреляционная матрица, был рассчитан множественный коэффициент корреляции. Корреляционная матрица — квадратная симметричная таблица, где строки и столбцы соответствуют исследуемым метеорологическим параметрам. Каждый элемент матрицы r_{ij} (на пересечении i-й строки и j-го столбца) — это коэффициент корреляции i-го и j-го параметров.

3. Коэффициент корреляции показывает тесноту и направление связи между двумя параметрами. Множественный коэффициент корреляции (МКК) показывает то, насколько хорошо данная переменная (предиктант) может быть спрогнозирована с использованием линейной функции от набора переменных (предикторов).

Таблица 1 Корреляционная матрица

	Тмакс.	Тзем.	Uзем.	FFзем.	N	T850	U850
Тмакс.	1,00	0,77	-0,36	-0,36	-0,35	0,75	-0,31
Тзем.	0,77	1,00	-0,39	-0,13	-0,09	0,86	-0,18
Uзем.	-0,36	-0,39	1,00	-0,07	0,17	-0,18	0,33
FFзем.	-0,36	-0,13	-0,07	1,00	0,13	-0,17	0,05
N	-0,35	-0,09	0,17	0,13	1,00	-0,13	0,58
T850	0,75	0,86	-0,18	-0,17	-0,13	1,00	-0,22
U850	-0,31	-0,18	0,33	0,05	0,58	-0,22	1,00

Для изучения эффекта ложной корреляции был вычислен частный коэффициент корреляции. Частный коэффициент корреляции — показатель, характеризующий тесноту линейной связи между результатом и одним из факторов при устранении влияния других факторов, включённых в уравнение регрессии. Он позволяет определить «чистую» взаимосвязь между двумя переменными, исключив искажающее воздействие третьих переменных.

Таблица 2 - Вычисление ложной корреляции для каждого предиктора

Эффекты ложной корреляции	
Для X1, Ложная корреляция равна=	0,44
Для X2, Ложная корреляция равна=	-0,55
Для X3, Ложная корреляция равна=	0,06
Для X4, Ложная корреляция равна=	-0,71
Для X5, Ложная корреляция равна=	0,48
Для X6, Ложная корреляция равна=	-0,28

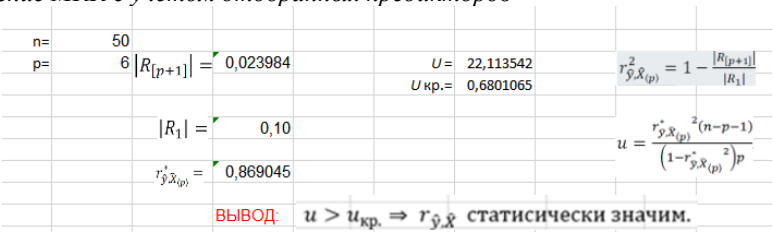
4. В результате проведенных расчётов и проверки статистической значимости были отобраны 3 предиктора с наибольшим частным коэффициентов корреляции: $r_{yx1/x2,x3,x4,x5}$ = 0,34, , $r_{yx3/x1,x2,x4,x5,x6}$ = -0,42, $r_{yx4/x1,x2,x3,x5}$ = 0,36, где y – предиктант *Тмакс.*, x1 – *Тзем,* x2 – *Uзем,* x3 - *FFзем,* x4 – *N,* x5 - *T850,* x6 - *U850* – предикторы. Множественный коэффициент корреляции с учетом всех предикторов равен 0,869045. Множественный коэффициент корреляции для отобранных предикторов равен 0,855807.

Таблица 3 – *Вычисление МКК с учетом всех предикторов*

Вычисление точечной оценки множественного коэффициента корреляции по полной корреляционной матрице и оценивание ее статистической значимости

n= 50	$\lvert R_{[p+1]}\rvert$ =	0,2570728	$r^2_{\hat{y},\hat{x}_{(p)}} = 1 - \frac{\lvert R_{[p+1]}\rvert}{\lvert R_1\rvert}$
p= 3	$\lvert R_1\rvert$ =	0,9606808	$u = \frac{r^{*2}_{\hat{y},\hat{x}_{(p)}}(n-p-1)}{\left(1-r^{*2}_{\hat{y},\hat{x}_{(p)}}\right)p}$
	$r^{*}_{\hat{y},\hat{x}_{(p)}}$ =	0,855807	
	U =	41,967306	
	U кр.=	0,6798606	ВЫВОД: $u > u_{кр.} \Rightarrow r_{\hat{y},\hat{x}}$ статисически значим.

Вычисление МККК с учетом отобранных предикторов



5. Таким образом, в результате сравнения МККК с учетом всех предикторов и МККК для отобранных предикторов можно сделать вывод о том, что оставшиеся предикторы являются практически не информативными, так как значения МККК отобранных предикторов мало отличается от значения общего МККК. Для прогнозирования максимальной температуры воздуха достаточно использовать температуру у поверхности Земли, скорость ветра у поверхности Земли и общую облачность.

Список литературы:

1. *Вентцель, Е. С.* Теория вероятностей и её инженерные приложения [Текст] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
2. *Громыко, Г. Л.* Теория статистики [Текст]: учебник / под ред. Г. Л. Громыко. – М.: ИНФРА-М, 2000. – С. 298–299.
3. *Шемелов, В. А.* Методы статистической обработки ГМИ [Текст]: учебное пособие / В. А. Шемелов. – 2024.

СЕКЦИЯ 3

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ И СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРАНЗИСТОРНОГО АВТОДИННОГО ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА СИСТЕМЫ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ ПРИЕМА ЗАПРОСНЫХ СИГНАЛОВ

Иванов В.Э., Гусев А.В., Кудинов С.И., Носков В.Я., Черных О.А.
Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
o.a.chernyh@urfu.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований транзисторного автодинного приемопередатчика (АПП) для перспективных систем радиозондирования атмосферы (СРЗА) в асинхронном режиме приема запросных сигналов, когда частота запросного сигнала находится за пределами полосы захвата СВЧ-генератора АПП. Дано описание схемы СВЧ-генератора и основных компонентов экспериментального стенда. Выполнены исследования особенностей формирования сигналов «биений» в АПП при различных соотношениях уровней мощности и частот запросного сигнала и СВЧ-генератора. Исследованы шумовые и энергетические параметры и характеристики. Выполнены расчеты динамических, шумовых, энергетических параметров и характеристик АПП, а также дальности действия системы радиозондирования как по каналу «Запросчик – ответчик», так и по обратному каналу «Ответчик – запросчик». Экспериментальные исследования АПП выполнены на примере серийного транзисторного СВЧ-модуля радиозонда МРЗ-3МК на частоту 1680 МГц. Дано описание структурной схемы АПП для аэрологического радиозонда. Показано, что чувствительность АПП к запросному сигналу определяется флуктуациями амплитуды СВЧ-модуля и полосой пропускания усилителя промежуточной частоты. Установлено, что чувствительность АПП составляет минус 110...120 дБ/Вт, для измерения наклонной дальности 250...300 км достаточно иметь передатчик РЛС с импульсной мощностью 50...100 Вт, при этом средняя мощность его соответствует 0,05...0,1 Вт.
Ключевые слова. Радиозондирование атмосферы, системы радиолокационного зондирования, радиозонд, автодинный приемо-передатчик, автодин.

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A TRANSISTOR AUTODYNE TRANSCEIVER FOR AN ATMOSPHERIC RADIOSOUNDING SYSTEM IN THE ASYNCHRONOUS MODE OF RECEIVING INTERROGATION SIGNALS

Ivanov V.E., Gusev A.V., Kudinov S.I., Noskov V.Ya., Chernykh O.A.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Abstract. The paper presents the results of experimental studies of a transistor autodyne transceiver (ADT) for advanced atmospheric radiosounding systems (ARS) operating in the asynchronous mode of receiving interrogation signals, where the interrogation signal frequency lies outside the locking range of the ADT microwave oscillator. A description of the microwave oscillator circuit and the main components of the experimental setup is given. The features of beat signal formation in the ADT are investigated for various power levels and frequency ratios between the interrogation signal and the microwave oscillator. Noise and power parameters and characteristics are examined. Calculations of the dynamic, noise, and power parameters of the ADT, as well as the operating range of the radiosounding

system in both the “Interrogator–Responder” channel and the return “Responder–Interrogator” channel, are performed. The experimental studies are carried out using a production transistor microwave module of the MRZ-3MK radiosonde operating at 1680 MHz. A block diagram of the ADT for an aerological radiosonde is described. It is shown that the ADT sensitivity to the interrogation signal is determined by the amplitude fluctuations of the microwave oscillator and the bandwidth of the intermediate-frequency amplifier. It is established that the ADT sensitivity is –110 to –120 dB/W; to measure slant ranges of 250–300 km, it is sufficient to have a radar transmitter with a pulse power of 50–100 W, while its average power corresponds to 0.05–0.1 W.
Keywords. Atmospheric radiosounding, radar sounding systems, radiosonde, autodyne transceiver, autodyne.

Введение. В русле отечественной традиции принципа построения систем радиозондирования атмосферы (СРЗА) нами предложен один из возможных путей дальнейшего развития радиолокационного метода. Он основан на применении в аэрологических радиозондах (АРЗ) вместо сверхрегенеративных (СПП) [1] автодинных приёмопередатчиков (АПП) [2]. Такая замена обусловлена тем, что у СПП имеется принципиальный недостаток – широкий спектр излучения (4…6 МГц) вследствие его работы в некогерентном импульсном режиме. Этот недостаток создаёт проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств L-диапазона, в том числе приемной аппаратуре потребителей данных ГЛОНАСС/GPS. АПП также как и СПП, благодаря своей многофункциональности отличаются экономичностью, малыми габаритными размерами и низкой стоимостью. Особенно привлекательным достоинством АПП является узкая полоса частот излучения, которая обеспечивает возможность их использования в условиях современных жёстких требований к ЭМС L-диапазона.

Результаты первичных исследований АПП дали положительный ответ на вопрос о принципиальной возможности замены СПП на АПП в перспективных СРЗА [3–5]. В этих системах АПП наряду с выполняемой функцией радиотелеметрического передатчика о состоянии атмосферы обладает достаточным быстродействием и чувствительностью при приёме запросных радиоимпульсов РЛС для обеспечения требуемых дальности действия и точности измерения расстояния до шара-зонда. Перспектива такой замены позволит не только улучшить ряд тактико-технических параметров и характеристик СРЗА, но и расширить их функциональные возможности [6].

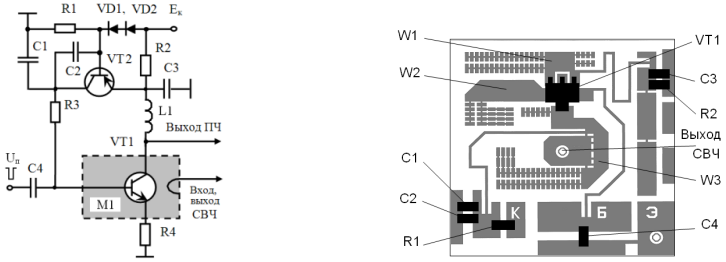
Цель настоящей статьи состоит в экспериментальной проверке выводов теоретического анализа транзисторного АПП в режиме асинхронного приема запросных сигналов, выполненного в наших работах [7, 8]. Для этого в статье рассмотрены особенности формирования сигналов «биений» в широком диапазоне, воздействующих на АПП запросных радиоимпульсов. Исследования выполнены для случая слабого отражённого сигнала, когда АРЗ находится на предельной дальности действия СРЗА, а также для представляющего практический интерес случая сильного сигнала, когда амплитуда принимаемого сигнала соизмерима с амплитудой собственных колебаний СВЧ-генератора. Последний случай соответствует моменту пуска шара-зонда в свободную атмосферу, когда дальность до него от антенны РЛС составляет всего несколько десятков метров.

Схема, топология и стенд для исследования транзисторных АПП. На рис. 1а. изображена функциональная схема АПП радиозонда. Основным элементом её является СВЧ-модуль М1, выполненный на транзисторе VT1 (колебательная система здесь условно не показана). Внешние по отношению к этому модулю элементы схемы

обеспечивают номинальный режим транзистора VT1 для генерации СВЧ колебаний. При этом важным узлом АПП является стабилизатор среднего значения тока модуля М1.

Работа этого стабилизатора осуществляется следующим образом. Стабилизатор среднего значения тока выполнен на транзисторе VT2, резисторах R1, R2, R3 и конденсаторах С1, С2, С3. Резистор R1 и диоды VD1, VD2 образуют цепочку смещения базы транзистора VT2. На резисторе R2 средний ток коллектора $I_{\text{к. ср}}$ транзистора VT1 создает падение напряжения, которое является запирающим для транзистора VT2. Величина тока $I_{\text{к. ср}}$ регулируется выбором величины резистора R2. При нарастании величины тока $I_{\text{к. ср}}$ под действием дестабилизирующих факторов транзистор VT2 будет запираться. При этом он будет уменьшать ток базы транзистора VT1, возвращая его к заданному значению величину тока $I_{\text{к. ср}}$. При уменьшении тока $I_{\text{к. ср}}$ процесс стабилизации идет в обратном направлении. Конденсаторы С1, С2 включены таким образом, что они обеспечивают эффективную фильтрацию напряжения в цепи базы транзистора VT2 и устойчивость схемы благодаря соответствующему сдвигу фазы возмущающего воздействия по цепи обратной связи, образованной транзистором VT1.

Следует подчеркнуть, что цепь смещения R1, R2 обеспечивает коррекцию тока $I_{\text{к. ср}}$ при изменении также напряжения питания цепи коллектора $E_{\text{к}}$, стабилизируя чувствительность АПП. Так при повышении напряжения питания $E_{\text{к}}$ обычно наблюдается повышение чувствительности и снижение стабильности работы СВЧ генератора АПП. Поскольку напряжение смещения базы транзистора VT2 также повышается, то происходит соответствующее увеличение тока коллектора $I_{\text{к. ср}}$ транзистора VT1. При этом чувствительность АПП стабилизируется. При понижении напряжения питания $E_{\text{к}}$ процесс регулирования тока идет в обратном направлении и также обеспечивает стабилизацию чувствительности АПП.



(а) (б)

Рисунок 1 – Функциональная схема (а) и топология (б) СВЧ-модуля АПП радиозонда

Необходимо отметить также, что введение описанного стабилизатора тока существенно облегчает настройку приемопередатчика в условиях производства, поскольку величина тока остается оптимальной при всех режимах итерационной регулировки устройства.

Воздействие сигнала запроса на СВЧ-генератор вызывает в нём автодинный эффект, который состоит в изменениях режима его колебаний. Эти изменения наблюдаются как в случае захвата частоты генератора сигналом запроса, так и в случае режима биений [2]. При постоянстве среднего значения тока транзистора VT1 эти

изменения проявляются как полезный выходной сигнал в соответствующих вариациях падения напряжения в цепи коллектора VT1.

Данный сигнал в этой цепи (см. «Выход ПЧ»), выделяется с помощью широкополосного фильтра, образованного выходной ёмкостью СВЧ-модуля М1 (коллектор VT1) и индуктивностью L1. Далее этот сигнал после его обработки и идентификации (эти узлы на рис. 1 не показаны) вызывает формирование импульса $U_{\text{п}}$ прерывания генерации, который подаётся на базу транзистора VT1. Таким образом, кратковременным выключением СВЧ-модуля на время порядка 1 мкс обеспечивается передача к запросному радиолокатору ответного сигнала АПП.

На рис. 1б изображена топология платы СВЧ-модуля АПП в сборе со стороны поверхностного монтажа, выполненной на основе материала ФАФ-4. Высокочастотные элементы электрической схемы, выполненные в виде отрезков полосковых линий (ПЛ) с различным волновым сопротивлением, обозначены на рис. 2 как W1, W2, W3. Обозначение остальных элементов соответствует схеме рис. 1а. Наибольшее влияние на работу АПП оказывают ПЛ, расположенные в цепи базы VT1, так как они в значительной степени определяют величину обратной связи в модуле СВЧ-генератора. Отрезки ПЛ в цепи коллектора влияют на смещение частоты приема относительно частоты излучения и величину связи генератора с нагрузкой (антенной). Общий проводник электрической схемы по постоянному и переменному токам конструктивно расположен на противоположной металлизированной стороне платы. Выводы питания и управления модулем имеют одноименные названия выводам транзистора: «К» – коллектор, «Б» – база, «Э» – эмиттер.

Электрическая схема макетного образца АПП, использовавшегося в качестве объекта экспериментальных исследований, представлена на рис. 3*a*, а на рис. 3*b* – его внешний вид. В основе макета лежит применение типового генераторного СВЧ-модуля аэрологического зонда типа МРЗ (рис. 1б), доработанного схемой детектирования автодинного сигнала. На этой схеме цепь стабилизации тока отсутствует, а для выбора режима смещения базы предусмотрен резистивный делитель R1, R2.

Автодинный сигнал снимается в цепи коллектора транзистора VT1 с последовательного соединения W4 и индуктивности L1. Далее этот сигнал проходит через полосовой фильтр, настроенный на частоту преобразованного сигнала 5 МГц, его амплитудно-частотная характеристика имеет ширину полосы пропускания 3 МГц по уровню минус 3 дБ. После фильтра преобразованный сигнал проходит через малошумящий усилитель DA1 и поступает на выходной разъем XW2. Выходной разъем XW1, предназначенный для подключения антенны, находится на обратной стороне платы. Собственная частота АПП при нормальных условиях составляет 1680 ± 1,0 МГц.

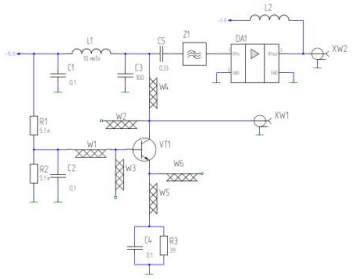


Рисунок 2 – Электрическая схема макетного образца АПП

В качестве активного элемента VT1 АПП используется биполярный транзистор BFG235, имеющий следующие основные характеристики:

- Максимальная рассеиваемая мощность: 2 Вт.
- Максимально допустимое напряжение коллектор-база: 20 В.
- Максимальный постоянный ток коллектора: 0,3 А.
- Граничная частота коэффициента передачи тока: 5900 МГц.
- Статический коэффициент передачи тока базы: 40.

Структурная схема стенда для проведения исследований АПП представлена на рис. 3. В его состав входят: источник питания ИП типа GPS-2303, генератор импульсов типа ГСС-93/1, векторный генератор сигналов типа NI PXI-5673, измеритель мощности типа NI USB-5680, направленный ответвитель, осциллограф АКТАКОМ ADS-2102M и анализатор спектра NI PXI-5663, подключаемый к выходу направленного ответвителя или к выходу автодинного сигнала АПП.

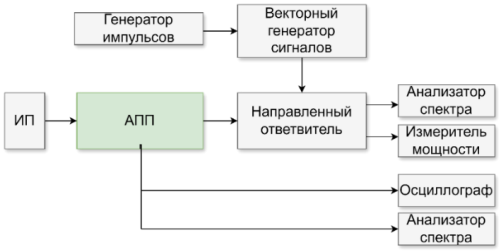


Рисунок 3 – Структурная схема стенда для выполнения экспериментальных исследований АПП

На АПП подается напряжение от регулируемого источника питания ИП. СВЧ-порт АПП подключен к входу направленного ответвителя. Генератор сигналов специальной формы ГССФ генерирует импульсы длительностью 2 мкс, которые подаются на вход импульсной модуляции векторного генератора сигналов для формирования запросных радиоимпульсов, которые через боковое плечо направленного ответвителя поступают на СВЧ-порт АПП. Выходные колебания АПП через направленный ответвитель подаются на измеритель мощности и на высокочастотный анализатор спектра. Автодинный (преобразованный) сигнал с выхода АПП подается на осциллограф и (при необходимости) на низкочастотный вход анализатора спектра. Фотография внешнего вида макета АПП, приготовленного для экспериментальных исследований представлена на рис. 4. На ней, слева направо: СВЧ-модуль в сборе, блок направленных ответвителей для подключения измерительных приборов и последовательно соединённые поглощающие нагрузки-аттенюаторы для подключения к выходу векторного генератора сигналов.

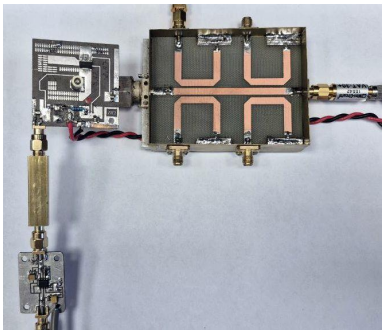
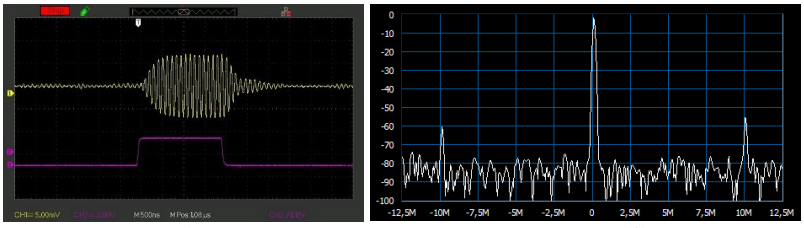


Рисунок 4 – Внешний вид СВЧ-сборки для исследований макетного образца АПП

Результаты экспериментов. Основной целью данных исследований является оценка величины автодинного отклика генератора в режиме преобразования частоты (биений) от уровня мощности запросного сигнала РЛС в контуре СВЧ-модуля и определение возможности использования этого отклика для формирования ответного сигнала радиозонда по дальности.

В эксперименте на вход вертикального отклонения осциллографа подавался выходной сигнал ПЧ, а на его вход синхронизации подавались импульсы запуска генератора запросного сигнала. Это обеспечивало наблюдение формы и уровня ответного сигнала АПП.

Результаты наблюдения основных процессов, происходящих в СВЧ-генераторе АПП, представлены на рис. 5. Верхний луч на осциллограмме рис. 5 *а* показывает автодинный сигнал АПП, который формируется в ответ на запросные радиоимпульсы РЛС. Верхний след на осциллограмме рис. 8*а* показывает преобразованный сигнал АПП, который формируется в ответ на импульс запуска (нижний след), длительность которого составляет около 2 мкс. Собственная частота излучения АПП $f_{изл}$ = 1680 МГц; частота запросного сигнала РЛС смещена относительно частоты $f_{изл}$ на 10,7 МГц. Длительность ответного сигнала АПП пропорциональна длительности запросного сигнала. Количество волн сигнала биений внутри ответного радиоимпульса определяется величиной взаимного смещения частот запроса $f_з$ и излучения $f_{изл}$, а также длительностью запросного сигнала.



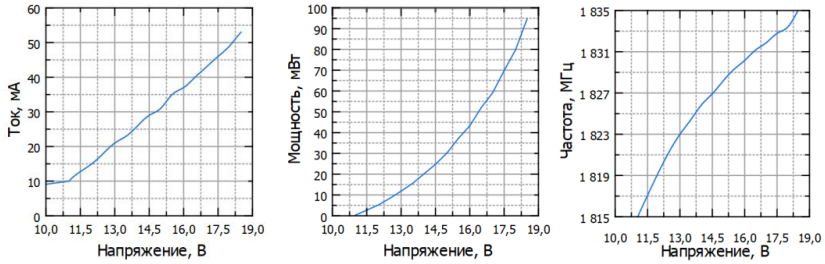
(*а*) (*b*)

Рисунок 5 – Осциллограммы (а) и спектрограммы (б) сигналов при исследовании СВЧ-модуля АПП

Исследование режима работы АПП. На АПП подается с источника питания напряжение 12 В. СВЧ выход АПП подключен к входу направленного ответвителя. Генератор сигналов специальной формы формирует импульсы длительностью 2 мкс, которые подаются на вход импульсной модуляции векторного генератора сигналов для формирования запросных радиоимпульсов на частоте отличной от частоты АПП, на величину «промежуточной» частоты. Выходной СВЧ сигнал АПП через направленный ответвитель подается на измеритель мощности и на анализатор спектра. Выходной сигнал детектора АПП подается на осциллограф через усилитель.

В ходе эксперимента был получен преобразованный сигнал АПП в режиме биений. На рис. 5 показана осциллограмма импульса запроса и сигнала автодинного детектирования. Из осциллограммы можем определить амплитуду автодинного отклика, которая составляет 30 мВ. Период сигнала биений определяется внутри ответного радиоимпульса определяется длительностью запросного импульса и разностью частот запросного сигнала, и собственной частотой АПП.

Выполнены измерения зависимости изменения параметров АПП от напряжения питания АПП. Графики зависимостей представлены на рис. 6 и 7.



(*а*) (*б*) (*в*)

Рисунок 6 – Графики зависимости тока (а), излучаемой мощности (б) и изменения частоты (в) АПП от напряжения питания

Оценки, сделанные по экспериментальным исследованиям, показали, что чувствительность АПП составляет минус 90 дБ/Вт при мощности передатчика 80…90мВт. Таких параметров достаточно для определения наклонной дальности до 250…300 км.

Зависимость мощности преобразованного (автодинного) сигнала от мощности запросного сигнала представлена на рисунке 7 при мощности сигнала излучения 23 dBm.

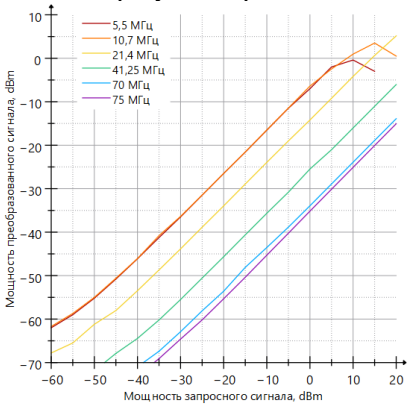


Рисунок 7 – Графики зависимости выходной мощности преобразованного сигнала от мощности входного сигнала, полученных при различных значениях промежуточной частоты

Результаты исследований зависимости режима работы АПП от изменений питающих напряжений, величины автодинного отклика, чувствительности СВЧ-модуля и других сводятся к следующим:

1. Выходная мощность СВЧ-модуля АПП может варьироваться в широких пределах от 100 мВт до 560 мВт при сохранении высокого значения к.п.д. в пределах 25…40%. Такой уровень мощности гарантированно обеспечивает необходимый потенциал радиоканала зондирования.

2. Изменения питающего напряжения АПП от 9 до 16 В вызывают монотонное и сравнительно небольшие изменения частоты излучения в пределах до 11 МГц. В действительности источник питания радиозонда в течение полета обеспечивает изменение напряжение питания в пределах 10% от первоначального. Поэтому реальное изменение частоты излучения АПП в течение полёта составит величину не более

1,0…1,50 МГц. Приемное устройство РЛС такое изменение частоты может легко отслеживать с помощью автоматической подстройки частоты (АПЧ).

3. Уровень ответного сигнала АПП пропорционален мощности запросного сигнала, что находится в полном соответствии с теорией работы классического преобразователя частоты. Чувствительность АПП к запросному сигналу определяется флуктуациями амплитуды СВЧ-модуля и полосой пропускания УСПЧ. Оценки сделанные по результатам экспериментальных исследований показывают, что чувствительность АПП находится в пределах минус 110…120 дВ/Вт. Поэтому для измерения дальности до 250…300 км импульсная мощность запросного сигнала передатчика РЛС должна быть не более 50…100 Вт. При этом средняя мощность передатчика составит всего 0,05…0,1 Вт.

Заключение. Таким образом, результаты экспериментальных исследований макета АПП на базе модуля радиозонда МРЗ-3МК подтвердили правильность выводов теоретического анализа. АПП, работающие практически в непрерывном режиме, обладают повышенными выходными характеристиками по потенциалу телеметрического канала и обеспечивают более высокую точность измерения наклонной дальности системы радиозондирования, чем СПП. Кроме того, установлено, что предлагаемая модернизация радиозондов МРЗ-3МК путём перевода его в автодинный режим вполне реальна как по техническим, так и стоимостным показателям.

Экспериментальная проверка выводов теоретического анализа выполнялась на примере серийного СВЧ модуля радиозонда МРЗ-3МК в автодинном режиме, работающего на частоте 1680 МГц, на стенде, описанном выше и в [2]. Сигналы, имитирующие запросные радиоимпульсы, подавались на макет устройства от измерительного СВЧ генератора через аттенюатор.

Оценки, сделанные по результатам экспериментальных исследований, показали, что чувствительность АПП находится в пределах минус 110…120 дВ/Вт при полосе 1 МГц тракта усиления, что согласуется с результатами выполненных ранее расчётов [2]. При этом предпочтительный параметр «мягкости» импедансной характеристики.

Полученные в работе результаты исследований, расчетные соотношения и графики различных зависимостей представляются полезными для инженерного расчета параметров и характеристик, а также нахождения оптимальных режимов работы автодинных СВЧ-генераторов.

Список литературы

1. Иванов В.Э. (ред.), Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы: Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: УрО РАН; 2004. 596 с.
2. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России / В.Э. Иванов, А.В. Гусев, К.А. Игнатков, С.И. Кудинов, И.В. Малыгин, В.Я. Носков, О.В. Плохих, В.В. Рысев, О.А. Черных // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49.
3. Noskov V.Ya., Ivanov V.A., Ignatkov K.A., Kudinov S.I. Theoretical grounds of Autodyne method of forming response signal of Radiosonde for distance measurement // Proceedings of 22-th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, September 10-14, 2012. – Sevastopol: Weber. – 2012. – Vol. 2. – P. 897–899.
4. Kudinov S.I., Ivanov V.A., Noskov V.Ya., Ignatkov K.A. Autodyne mode experimental research of the transceiver of radiosonde MRZ-3MK // Proceedings of 22-th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, September 10-14, 2012. – Sevastopol: Weber. – 2012. – Vol. 2. – P. 900–902).
5. Current status and prospects of atmosphere radiosonde systems / V.A. Ivanov, A.V. Gusev,

K.A. Ignatkov, S.I. Kudinov, V.Ya. Noskov, O.V. Plohih // Proceedings of 22-th International Crimean Conference “Microwave & Telecommunication Technology”, September 10-14, 2012. – Sevastopol: Weber. – 2012. – Vol. 1. – P. 3–12.
6. Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., Иванов В.Э., Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Черных О.А. Метод доплеровского определения параметров движения аэрологического зонда радиолокационной системы // Успехи современной радиоэлектроники. 2025. Т. 79. № 2. С. 39–51. DOI: https://doi.org/10.18127/j20700784-202502-05
7. Иванов, В. Э., Кудинов, С. И., Носков, В. Я., Черных, О. А. Особенности формирования сигналов автодинного приемопередатчика при асинхронном приеме запросных сигналов системы радиозондирования атмосферы. Ural Radio Engineering Journal, 9(1), 75-98. https://doi.org/10.15826/urej.2025.9.1.006
8. Иванов В.Э., Гусев А.В., Кудинов С.И., Носков В.Я., Черных О.А. Параметры и характеристики транзисторного автодинного приемопередатчика в режиме асинхронного приема запросных сигналов системы радиозондирования атмосферы. Ural Radio Engineering Journal. 2025;9(2):162-182. doi: 10.15826/urej.2025.9.2.004

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Головков-Енин А.Е.
АО «НПП «Радар ммс»
golovkov-enin@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается применение современных гидрометеорологических систем мониторинга для наблюдательных сетей, дорожной, авиационной, морской отрасли и арктического кластера.
Ключевые слова. Гидрометеорологический мониторинг, комплексное решение, удаленная диагностика, собственное программное обеспечение.

MODERN HYDROMETEOROLOGICAL MONITORING SYSTEMS

Golovkov-Enin A.E.
JSC RADAR MMS

Annotation. The paper discusses the application of modern hydrometeorological monitoring systems for observation networks, as well as for the road, aviation, and maritime industries and the Arctic cluster.
Keywords. Hydrometeorological monitoring, integrated solution, remote diagnostics, proprietary software.

Современные высокотехнологичные системы гидрометеообеспечения АО «НПП «Радар ммс» применяются на аэродромах, в наблюдательных сетях, ими оснащаются суда различных министерств и ведомств, системы управления движением судов морских и речных портов, а также находят применение в дорожном хозяйстве.

Предприятие предлагает комплексное решение в сфере гидрометеообеспечения (рисунок 1): метеорологические датчики, гидрологические приборы, промышленные метеостанции, автономные береговые гидрометеостанции, автоматизированные судовые гидрометеостанции, автоматизированные дорожные метеостанции. Все метеостанции поставляются с программным обеспечением «Метеосервер», что обеспечивает высокоточные измерения, обработку и передачу измеренных параметров погоды. Разработанная линейка программных модулей позволяет визуализировать, архивировать

и структурировать данные, а также интегрировать систему в программы верхнего уровня и формировать краткосрочный прогноз на следующие 2 часа.

Для оснащения морских и речных судов, применяется аппаратно-программный комплекс судовой метеорологический «АЗИМУТ» (КСМ «АЗИМУТ»). Комплекс обеспечивает измерение, вычисление, отображение, регистрацию и передачу метеорологических параметров в системы и комплексы судна. КСМ «АЗИМУТ» установлен в ООО «Газпромнефть Шиппинг» и ФГУП «Атомфлот» на ледоколах «Таймыр» и «Ямал» [1].

Для измерения метеорологических параметров, характеризующих состояние атмосферы в наблюдательных сетях и дорожной отрасли, а также обеспечение предварительной обработки и передачи информации об измеренных параметрах потребителям в центр сбора метеорологической информации используются автоматизированные метеостанции (АМС). На сегодняшний день совершено множество поставок АМС и проводятся опытные эксплуатации в Российском государственном гидрометеорологическом университете, АО «Западный скоростной диаметр» и «Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова» [2].

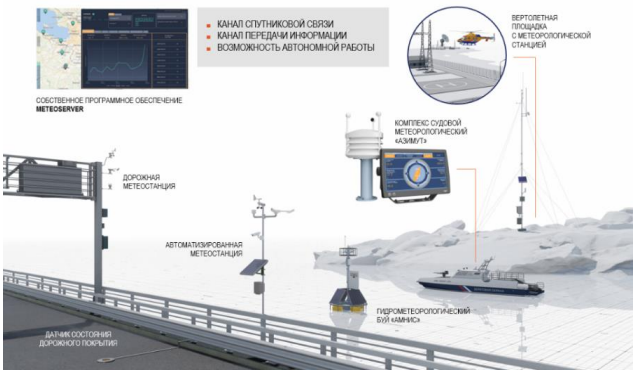


Рисунок 1 – Комплексные решения АО «НПП «Радар ммс» в сфере гидрометеообеспечения

С 2022 года метеорологические датчики устанавливаются на аэродромах совместно со специализированным программным обеспечением ООО «ИРАМ». С 2025 года автоматизированные метеостанции устанавливаются на вертолетных площадках компании
АО «Ютейр-Вертолетные услуги». В 2025 году были осуществлены крупные поставки датчиков метеорологических параметров для АО «Российские космические системы».

Для проведения гидрометеорологического и экологического мониторинга, научных исследований, а также проектных работ в прибрежной зоне и на континентальном шельфе используется гидрометеорологический буй «АМНИС» и измеритель гидрометеорологических параметров «ВЕКТОР-3». Среди гидрологических параметров измеряются скорость и направление течения, гидростатическое давление, температура воды и относительная диэлектрическая проводимость морской воды [3, 4].

Для освоения Арктического региона разработаны датчик скорости и направления ветра ДСНВ-А и датчик метеорологических параметров ДМП-А для сверхнизких температур [5, 6].

На 2026 год компания АО «НПП «Радар ммс» активно развивает экспортное направление. Датчики атмосферного давления ДАДС-1 «АТМОС» поставлялись в ОАО «Пеленг» в Беларусь [7]. Совершена поставка датчика температуры и влажности

воздуха ДТВВ-01 «АРИДА» в Турцию через ООО НПФ Раймет. В Казахстане после эксплуатации измерителя гидрологических параметров «ВЕКТОР-3» были получены крайне положительные отзывы от Sustainable Ecology Development «SED». На сегодняшний день ведется проработка опытной эксплуатации АМС на наблюдательной сети Индонезии в Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).

Системы гидрометеообеспечения разработаны предприятием в рамках программы импортозамещения. Они доказали свою эффективность при использовании в реальных условиях и получили высокую оценку в процессе эксплуатации. Разрабатываемые и производимые системы гидрометеообеспечения не уступают по характеристикам и эксплуатационным параметрам зарубежных аналогам.

Список литературы

1. Комплекс судовой метеорологический «АЗИМУТ». АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/kompleks-sudovoy-meteorologicheskiy-azimut/ (дата обращения 04.03.2026).
2. Автоматизированная метеостанция АМС. АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/avtomatizirovannaya-meteostantsiya/ (дата обращения 04.03.2026).
3. Гидрометеорологический буй «АМНИС». АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/gidrometeorologicheskiy-buy/ (дата обращения 04.03.2026).
4. Измеритель гидрологических параметров «Вектор-3». АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/izmeritel-gidrologicheskikh-parametrov-vektor-3/ (дата обращения 04.03.2026).
5. Датчик скорости и направления ветра ДСНВ-А. АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/datchik-skorosti-i-napravleniya-vetra-dsnv-a/ (дата обращения 04.03.2026).
6. Датчик метеорологических параметров ДМП-А. АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/datchik-meteorologicheskikh-parametrov-dmp-a/ (дата обращения 04.03.2026).
7. Датчик атмосферного давления ДАДС-1 «АТМОС». АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/sistemy-gidrometeoobespecheniya/datchik-atmosfernogo-davleniya-dads-1/ (дата обращения 04.03.2026).
8. Датчик влажности-температуры ДТВВ-01 «АРИДА». АО «НПП «Радар ммс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://radar-mms.com/product/datchiki-i-izmeritelnye-sistemy/datchiki-temperatury-i-vlazhnosti/datchik-temperatury-i-vlazhnosti-dtvv-01/ (дата обращения 04.03.2026).

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАССИВНОЙ СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СВЕРХКРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЙ

Матюков М.А.[1], Федосеева Е.В.[1], Ростокин И.Н.[1], Щукин Г.Г.[2]
[1] Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром
[2] АО «Государственный научно- исследовательский навигационно-гидрографический институт», Санкт-Петербург
maks.matyukov@mail.ru

Аннотация. В работе исследуется возможность использования данных пассивной микроволновой радиометрии для сверхкраткосрочного прогнозирования метеопараметров, критически важных для обнаружения опасных явлений. На основе многоканальных радиометрических измерений и наземных метеоданных выполнена оценка точности прогноза температуры и влажности с применением алгоритмов машинного обучения (Random Forest, Tree Ensemble, CatBoost) для горизонтов 5, 30 и 120 минут. Установлено, что ансамблевые методы обеспечивают высокую точность прогноза температуры (СКО ~1.6°C) на горизонте до 30 минут, что достаточно для надежного прогнозирования заморозков и волн холода. Показано, что прогноз влажности по нейросетевым моделям является более сложной задачей, а достигнутая точность соответствует требованиям к заблаговременности предсказания условий возникновения туманов в режиме nowcasting. Показано, что использованный радиометрический комплекс с выполнением нейросетевого прогнозирования может обеспечить выполнение требований ГОСТ Р 22.1.07-2023 по заблаговременности оперативного предупреждения о начале опасных явлений, обусловленных термодинамическим состоянием приземного слоя.
Ключевые слова. микроволновая радиометрия, прогнозирование погоды, опасные метеорологические явления, машинное обучение, приземный слой атмосферы, nowcasting

APPLICATION OF PASSIVE MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM DATA AND MACHINE LEARNING METHODS FOR ULTRA-SHORT-TERM FORECASTING OF DANGEROUS WEATHER EVENTS

Matyukov M.A.[1], Fedoseeva E.V.[1], Rostokin I.N.[1]
[1] Murom Institute of Vladimir State University, Murom

Annotation. The paper investigates the possibility of using passive microwave radiometry data for short-term forecasting of meteorological parameters critical for the detection of hazardous phenomena. Based on multi-channel radiometric measurements and ground-based meteorological data, the accuracy of temperature and humidity forecasts was assessed using machine learning algorithms (Random Forest, Tree Ensemble, CatBoost) for horizons of 5, 30 and 120 minutes. It was found that ensemble methods provide high accuracy of temperature forecast (RMSE ~1.6°C) for a horizon of up to 30 minutes, which is sufficient for reliable detection of frosts and cold waves. Humidity forecasting is a more challenging task, but the achieved accuracy makes it possible to effectively predict conditions for the occurrence of fogs in the nowcasting mode. It is shown that the used radiometric complex fully meets the requirements of GOST R 22.1.07-2023 in terms of operational warning of the onset of hazardous phenomena caused by the thermodynamic state of the surface layer.
Keywords. Microwave radiometry, weather forecasting, hazardous meteorological phenomena, machine learning, surface layer of the atmosphere, nowcasting.

Введение

Современные требования к системам обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях диктуют необходимость в высокоточных методах мониторинга атмосферы. Введенный в действие ГОСТ Р 22.1.07-2023 регламентирует необходимость прогнозирования опасных метеорологических явлений (ОМЯ) с различной заблаговременностью — от момента начала явления до 3 суток [1]. Особую сложность представляет прогноз быстроразвивающихся локальных процессов (туманы, ливни, шквалы, грозы), где традиционные синоптические методы зачастую малоэффективны из-за недостаточного временного разрешения.

Перспективным инструментом для решения задач сверхкраткосрочного прогноза (nowcasting) являются наземные пассивные микроволновые радиометры. Они обеспечивают непрерывное получение информации о термической и влажностной структуре атмосферы с высоким временным разрешением вне зависимости от времени суток [2]. Целью данной работы является оценка применимости результатов измерений многочастотного СВЧ радиометрического комплекса с выполнением нейросетевого прогнозирования значений температуры и влажности для предсказания опасных

явлений, возникновение и интенсивность которых в первую очередь определяется изменением температуры и влажности воздуха в приземном слое атмосферы. Современные обзоры подтверждают, что ансамблевые методы машинного обучения демонстрируют высокую эффективность в задачах прогнозирования температуры и влажности по данным дистанционного зондирования [3].

Характеристика измерительного комплекса и методика прогноза опасных метеорологических явлений

Исходные данные измерений мощности собственного радиотеплового излучения приземного слоя атмосферы были получены с помощью многоканальной СВЧ радиометрической системы, установленной в г. Муроме на крыше здания Муромского института Владимирского государственного университета. Система выполняет непрерывные измерения яркостной температуры атмосферы под углом 45° к горизонту на частотах 4, 10, 22 и 37 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. Радиометрическая чувствительность составляет 0.03–0.07 К при времени интегрирования 1 секунда [4]. Такой уровень чувствительности позволяет фиксировать малые изменения в радиационном балансе атмосферы, предшествующие развитию опасных явлений.

Для обучения и тестирования моделей прогноза машинными методами использовались синхронизированные ряды данных измерений СВЧ радиометрической системы и наземной метеостанции за период с августа 2023 по декабрь 2024 года (более 92 тысяч отсчетов). Целевыми параметрами являлись температура и относительная влажность воздуха. Прогнозирование выполнялось на три горизонта: 5 минут (сверхкраткосрочный), 30 минут (оперативный nowcasting) и 120 минут (краткосрочный). В качестве алгоритмов машинного обучения применялись ансамблевые методы (Random Forest, Tree Ensemble, CatBoost), показавшие ранее высокую эффективность в задачах восстановления и прогноза метеопараметров по радиометрическим данным [5]. Выбор данных методов обусловлен их устойчивостью к переобучению и способностью моделировать нелинейные зависимости в многомерных метеорологических данных [6].

Результаты анализа точности прогноза в контексте ОМЯ

Проведенные эксперименты позволили не только количественно оценить точность моделей, но и определить границы их применимости для прогноза определенных опасных явлений. Важно отметить, что в данной работе использовались методы машинного обучения, доступные в программах KNIME и Orange Data Mining [7, 8].

Горизонт прогноза 5 минут. На этом интервале ансамблевые методы (Tree Ensemble и Random Forest) продемонстрировали наилучшие результаты: среднеквадратическая ошибка (СКО) прогноза температуры составила около 1.6°C, влажности — порядка 6.5%. Высокий коэффициент корреляции (R >85% для температуры и > 70% для влажности) свидетельствует о том, что модель успешно улавливает тренды, предшествующие резким изменениям погоды. Прогноз температуры с ошибкой менее 2°C может быть достаточен для подтверждения условий возникновения заморозков или резкого понижения температуры (волны холода). Достигнутая точность согласуется с результатами независимых исследований, где нейросетевые модели обеспечивали СКО прогноза температуры в диапазоне 1.5–2.5°C для горизонтов до 30 минут [9].

Горизонт прогноза 30 минут. Увеличение горизонта прогноза закономерно привело к росту ошибок. Для температуры СКО возросла до ~3.5°C, для влажности — до ~9.5%. Несмотря на снижение, достигнутая точность остается приемлемой для ряда приложений. Коэффициент корреляции для температуры сохранился на высоком уровне

(около 86%), что позволяет с хорошей надежностью прогнозировать тренды изменения метеопараметров. Такой период прогнозирования может быть использован для оценки условий, предшествующих развитию градовых явлений.

Горизонт прогноза 2 часа. Данный интервал является предельным для использованного подхода с прогнозом по "мгновенным" радиометрическим данным. Ошибка прогноза температуры у лучшей модели (Tree Ensemble) составила 5.1°C, влажности — 15.7%. Появление значительной систематической ошибки (СОМ до -3.2°C) указывает на необходимость учета временной динамики. Тем не менее, даже на этом горизонте модель может быть полезна для оценки рисков возникновения явлений, связанных с адвекцией тепла или холода. Прогноз температуры с заблаговременностью 2 часа позволяет оценить вероятность сильных морозов в ночное время или, наоборот, экстремальной жары, что соответствует требованиям стандарта к предупреждению о начале таких явлений.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что пассивная многочастотная СВЧ радиометрическая система является эффективным инструментом для анализа и прогноза атмосферных процессов, лежащих в основе опасных метеорологических явлений, в пределах малых пространственно-временных масштабов. Установлено, что применение ансамблевых методов машинного обучения к результатам измерений СВЧ радиометрической системы позволяет с высокой точностью прогнозировать температуру и влажность приземного слоя на горизонтах до 30 минут.

Ключевым результатом работы является количественное обоснование применимости комплекса для выполнения требований ГОСТ Р 22.1.07-2023 в части оперативного предупреждения о начале таких явлений, как туман, заморозки, грозы и интенсивные осадки. Достигнутая точность прогноза (СКО температуры ~1.6–3.5°C, влажности ~6.5–9.5%) является достаточной для практического использования в системах обеспечения безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций локального уровня. Для увеличения горизонта прогноза до 2–3 суток, как того требует стандарт для некоторых типов явлений, необходима интеграция радиометрических данных в физические модели общей циркуляции атмосферы или использование специализированных рекуррентных нейросетевых архитектур, учитывающих временную динамику процессов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 22.1.07-2023. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных метеорологических явлений и процессов. Общие требования. — Введ. 2024-05-01. — М.: Стандартинформ, 2023.

2. *Матюков М.А., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н.* Нейронная сеть в задачах краткосрочного прогнозирования по результатам микроволнового радиометрического зондирования атмосферы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2025.

3. Zhang H., Liu Y., Zhang C., Li N. Machine Learning Methods for Weather Forecasting: A Survey [Электронный ресурс] // Atmosphere. 2025. Vol. 16, № 1. Art. 82. DOI: 10.3390/atmos16010082. URL: https://doi.org/10.3390/atmos16010082 (дата обращения: 03.03.2026). — Текст: электронный.

4. *Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.* и др. Многочастотные поляризационные микроволновые радиометрические исследования облачной атмосферы // Распространение радиоволн. Казань, 2025. С. 476–479.

5. *Щукин Г.Г., Булкин В.В., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н.* Радиометеорологические исследования в Муромском институте: СВЧ-радиометрический комплекс // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2022. №2. С. 5–19.

6. Predicting Rainfall Using Random Forest and CatBoost Models [Электронный ресурс] // ResearchGate. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/379670122 (дата обращения: 03.03.2026). — Текст: электронный.
7. Orange Data Mining: open source machine learning and data visualization [Электронный ресурс] / Biolab. — URL: https://orangedatamining.com/ (дата обращения: 03.03.2026). — Текст: электронный.
8. KNIME Analytics Platform: intuitive, open data science [Электронный ресурс] / KNIME AG. — URL: https://www.knime.com/ (дата обращения: 03.03.2026). — Текст: электронный.
9. A Review of Neural Networks for Air Temperature Forecasting [Электронный ресурс] // Water. 2022. Vol. 13, № 9. Art. 1294. DOI: 10.3390/w13091294. URL: https://doi.org/10.3390/w13091294 (дата обращения: 03.03.2026). — Текст: электронный.

СРАВНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОСТИ ВНУТРИМАССОВЫХ И ФРОНТАЛЬНЫХ ГРОЗ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Горбатенко В.П., Кижнер Л.И., Мордус Д.П.
Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
vpgor@mail.tsu.ru

Аннотация. Определены параметры внутримассовой кучево-дождевой облачности радиолокатором ДМРЛ-С Новосибирска. Выполнено сравнение основных радиолокационных параметров грозовой внутримассовой и фронтальной облачности.
Ключевые слова. Внутримассовая, фронтальная облачность, радиолокационные параметры грозовой облачности.

COMPARISON OF RADAR PARAMETERS OF CLOUD COVERAGE OF INTRA-MASS AND FRONTAL THUNDERSTORMS IN WESTERN SIBERIA

Gorbatenko V.P., Kizhner L.I., Mordus D.P.
National Research Tomsk State University, Tomsk

Annotation. Abstract. Parameters of intra-mass cumulonimbus clouds were determined using the DMRL-S radar in Novosibirsk. A comparison of the main radar parameters of thunderstorm intra-mass and frontal clouds was performed.
Keywords. Intra-mass clouds, frontal clouds, radar parameters of thunderstorm clouds.

При наличии статистически значимой тенденции потепления климата в Западной Сибири велика вероятность увеличения частоты образования шквалов, гроз и града, поэтому актуально повышение качества прогноза этих конвективных явлений [1]. Одной из наибольших проблем является совершенствование методов прогнозирования мезомасштабных конвективных явлений, поскольку увеличивается число не только фронтальных явлений, но и внутримассовых [2].

Ежегодный процент внутримассовых гроз и гроз с градом, зарегистрированных метеостанциями Западной Сибири, ранее составлял менее 10%, но в последнее десятилетние повторяемость их увеличилась до 15% [3, 4].

Как правило, внутримассовые местные грозы, формируются вне фронтальных зон, а вероятность образования и развития их зависит не только от состояния атмосферы, но и от свойства подстилающей поверхности [5]. Продолжительность внутримассовых гроз наблюдается, в основном, не более одного часа, поскольку местные грозы образуются чаще всего в одной конвективной ячейке.

Качественный прогноз формирования внутримассовых гроз и града сегодня невыполним ни с помощью анализа данных аэрологических измерений, ни с помощью

спутниковых данных. Однако есть надежда на возможность улучшения качества прогноза с помощью радиолокационных характеристик облачности.

На территории Западной Сибири внутримассовые конвективные облака, в которых образуются молнии и град, наблюдаются только в летние месяцы, в дни с увеличенным прогревом приземного слоя атмосферы и при наличии высокого уровня удельной влажности в этом слое. Кроме того, они образуются и при адвекции облачных систем из циклонов в антициклоны, и в циклонических ложбинах – полосах пониженного давления, вытянутых от центра циклона. Параметры конвективной облачности в таких системах зависят от степени неустойчивости и влажности воздуха, теплового прогрева подстилающей поверхности, наличия или отсутствия слоев инверсий температуры. В антициклонах, где в основном формируются нисходящие движения, наблюдается, как правило, ясная погода или тонкая подинверсионная облачность. Однако приносимые сюда из циклонов и циклонических ложбин фронтальные облака еще некоторое время могут сохранять структуру, способную формировать грозы, град и ливневые осадки.

Особое место для улучшения качества прогноза внутримассовых гроз занимают методы дистанционного зондирования, обеспечивающие оперативный контроль за конвективными явлениями на значительных площадях. Из-за относительной малочисленности и разреженности наблюдательной сети над Западной Сибирью улучшить этот прогноз невозможно, но приземные метеорологические данные могут быть использованы для контроля и валидации дистанционных наблюдений [6].

Осуществление своевременного прогноза таких гроз возможно только с помощью радиолокаторов при наличии определенных пороговых значений, созданных для их качественной идентификации. Радиолокационные наблюдения ДМРЛ-С, установленного вблизи Новосибирска, проводятся с использованием единого программного обеспечения вторичной (метеорологической) обработки «ГИМЕТ2010» [9].

Целью настоящих исследования является определение параметров внутримассовой кучево-дождевой облачности радиолокатором ДМРЛ-С во время регистрации таких гроз метеорологическими станциями.

Определение критериев идентификации внутримассовой грозовой и градовой облачности актуально уточнять для каждого региона отдельно. Например, при перемещении с севера на юг увеличиваются высоты верхней границы ($H_{ВГО}$) конвективной облачности и возрастают значения радиолокационной отражаемости (Z) при грозах [7].

Поскольку радиолокационные методы выявления гроз и града являются вероятностными, данные ДМРЛ-С необходимо сопоставлять по времени и месту их регистрации на метеорологических станциях, расположенных в зоне радиолокации.

Рассматривались случаи, когда грозы регистрировались метеорологическими станциями, находящимися на расстоянии до 200 км от места установки ДМРЛ-С. Проводилось сопоставление радиолокационных данных и метеорологической информации о времени регистрации гроз и града. При этом грозы, зафиксированные двумя методами, должны быть разнесены на расстояние не более 10 км [6].

В рамках настоящих исследований проанализировано 2038 случаев зарегистрированных грозовых ячеек за период 2021-2023 гг. Из них при анализе синоптических карт получено 1550 случаев фронтальной конвективной облачности с грозами и 115 – с грозами внутримассового образования.

Несовпадение места и времени регистрации составило 16%, что считается хорошим признаком выявления грозовых ячеек с помощью радиолокатора, данные которого используются для прогноза [6].

Для сравнения радиолокационных параметров внутримассовой грозовой облачности анализировались следующие ключевые радиолокационные характеристики:

Высота верхней границы облачности ($H_{вго}$, км) – характеризует мощность облака, позволяет судить о характере и вероятности развития конвективных явлений. Параметры $H_{вго}$ во внутримассовых грозовых ячейках могут быть не ниже, чем на атмосферных фронтах [8], но они могут отличаться, а уточнение их пороговых значений позволят увеличить процент оправдываемости гроз.

Высота нижней границы облачности ($H_{нго}$, км). В случае выпадения осадков значения нижней границы облачности должны быть равны нулю ($H_{нго}$=0 км). Однако при наличии осадков из мезомасштабной конвекции они могут не достигать анализируемой поверхности.

Максимальная радиолокационная отражаемость (Z_{max}, dBz) в слое выше 1 км, как правило, используется для прогноза развития мощной конвекции.

Значения радиолокационной отражаемости (Z, dBz) на уровнях с температурой 0ºС ($Z_{0ºC}$) С и -15º С ($Z_{-15ºC}$). Характеризует интенсивность отраженного сигнала и связана с размером и количеством капель.

Турбулентность (Турб, $см^2/с$), характеризующаяся скоростью диссипации турбулентной энергии, рассчитываемой на основе измерений радиолокационной отражаемости и ширины спектра анализируемой ячейки [9]. Поскольку данный вторичный радиолокационный продукт в настоящей работе проходит экспериментальную апробацию, предлагаемые исследования особенно актуальны с надеждой, что он может быть в будущем рекомендован к использованию в синоптической практике.

Интегральная водность конвективных облаков (VIL, $кг/м^2$), характеризует массу жидкой воды в столбе, приходящейся на единицу площади.

Определены статистические характеристики (медиана (Me), среднее арифметическое (X) и стандартное отклонение (σ)) параметров внутримассовой кучево-дождевой облачности, образовавшейся в разных синоптических ситуациях за период 2021-2023 гг. В табл. 1 представлено сравнение их с характеристиками фронтальной облачности.

Таблица 1 – Статистические характеристики радиолокационных параметров фронтальной и внутримассовой грозовой облачности

Статистические характеристики	$H_{вго}$ (км)	VIL ($кг/м^2$)	$Z_{0ºC}$ (dBZ)	$Z_{-15ºC}$ (dBZ)	Турб. ($см^2/с$)	Z_{max} (dBZ)
	Фронтальная облачность					
Me	11,0	8,5	43,0	36,0	12,0	43,0
X	11,0	7,0	43,0	35,0	10,0	43,0
σ	2,0	7,0	8,0	10,0	23,0	8,0
	Внутримассовая облачность					
Me	10,7	7,7	45,0	35,0	9,9	45,0
X	10,6	7,3	42,0	34,7	6,6	42,1
σ	1,6	5,9	7,8	8,4	4,4	7,7

Наибольшие различия замечены в параметрах турбулентности. В табл. 2 приведена вероятность (%) возникновения фронтальных и внутримассовых гроз при разном уровне развития турбулентности.

Таблица 2 – Вероятность (%) возникновения грозы в облачности с разным уровнем турбулентности

Происхождение/значение Турб., $см^2/с$	1	10	100
Внутримассовые	42	58	0
Фронтальные	45	48	7

Полученные выводы:

1. Статистические характеристики радиолокационных параметров фронтальной и внутримассовой грозовой облачности, формирующейся при разных синоптических условиях, различаются существенно:

• Значения радиолокационной отражаемости на всех уровнях различаются на 1–3 dBZ;

• Верхние границы облачности различаются на 1–2 км;

• Параметры турбулентности изменяются от 8 до 13 $см^2/с$;

• Интегральная водность изменяется меньше, но разница есть для облачности разного синоптического происхождения.

2. Наибольшая частота внутримассовых гроз над территорией Западной Сибири замечена в антициклональных погодных условиях. При этом радиолокационные характеристики этих грозовых облаков отличаются и от других внутримассовых и фронтальных (они минимальны).

3. Все циклоны (включая образовавшиеся над западной Сибирью) создают условия для формирования наиболее мощных внутримассовых конвективных процессов, проявляющихся в повышенных значениях радиолокационной отражаемости на разных уровнях, включая Z_{max}.

4. Нижние границы выпадавших осадков из грозовой внутримассовой облачности ($H_{нго}$), не достигали земной поверхности в 46 %. Это дает возможность предполагать, что внутримассовые сухие грозы могут влиять на количество лесных пожаров и усиливать их. Поэтому актуальным является прогноз и правильное определение места и времени формирования такой облачности.

5. Полученные результаты могут также найти применение при развитии наукастинга явления. Одна из основных задач наукастинга – передача результатов в автоматизированную систему управления воздушным движением (АС УВД), что особенно актуально для развития системы воздушного транспорта Западной Сибири.

Список литературы

1. *Спрыгин А.А., М.И. Прохареня.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3(369). – С. 6-22.

2. *Гришаев М.В., Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Нагорский П.М.* Радиолокационные характеристики мезомасштабных конвективных систем над Югом Западной Сибири и их связь с интенсивностью грозовой активности и осадков // XV Сибирское совещание и школа молодых ученых по климатоэкологическому мониторингу: материалы докладов всероссийской конференции с международным участием. Институт мониторинга

климатических и экологических систем Сибирского отделения РАН. Томск, 2023. – С. 33-36.
3. *Горбатенко В.П., Ананова Л.Г., Апостолиди Х.Т., Карпова А.А.* Аэросиноптические условия образования града над юго-востоком Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института. Новосибирск. 2023. – С. 17–28.
4. *Ананова Л.Г., Карпова А.А., Апостолиди Х.Т.* Синоптические условия образования гроз над юго-востоком Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института: Сборник статей. Новосибирск: Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, 2023. – С. 29-42.
5. *Горбатенко В.П., Дульзон А.А.* Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность // География и природные ресурсы. 1997. № 2. – С. 142-146.
6. *Павлюков, Ю. Б., Серебряник Н. И., Карпов Б. Н.* Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета // ТРУДЫ МФТИ. 2016. Т. 8. № 1(29). – С. 95-101.
7. *Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Веремей Н.Е., Стасенко В.Н., Аджиев А.Х., Павар С.Д., Гопалакришнан В.* Об особенностях развития суперячейкового конвективного облака в стадии максимальной грозовой активности (19 августа 2015 г., Северный Кавказ) // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. – С. 96–110.
8. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике / М.: Росгидромет. ФГБУ «ЦАО», 2014. – 110 с.
9. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М., 2017. – 121с.

РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ НА УРАЛЬСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Букрин И.В.[1], Плохих О.В.[1], Иванов В.Э.[1], Ширшов Н.В.[2]
[1]ИРИТ-РТФ, Уральский Федеральный Университет
[2]Филиал АО «ЦЭНКИ» — «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»
i.v.bukrin@urfu.ru

Аннотация. Краткий обзор развития средств аэрологического зондирования атмосферы, и в том числе разработанными в Уральском федеральном университете (бывший Уральский политехнический институт).
Ключевые слова. Радиозонд, аэрология, система радиозондирования, радиолокатор параметров ветра.

DEVELOPMENT OF ATMOSPHERIC RADIOSONNING TOOLS AT URAL ENTERPRISES

Bukrin I.V.[1], Plokhikh O.V.[1], Ivanov V.E.[1], Shirshov N.V.[2]
[1]IRIT-RTF, Ural Federal University
[2]Branch of JSC " COSGBI" - "Research Institute of Applied Mathematics named after Academician V.I. Kuznetsov"

Annotation. Brief overview of the development of upper-air atmospheric sounding tools, including those developed at the Ural Federal University (former Ural Polytechnic Institute).
Keywords. Radiosonde, aerology, radiosonde system, wind parameter radar.

Первый в мире успешный выпуск радиозонда был произведён профессором П.А. Молчановым 30 января 1930 г. в Павловской обсерватории под Ленинградом.

Работы по применению радиолокатора СОН-2 для сопровождения шаров с пассивными отражателями были проведены в 1943 г. в Центральной аэрологической обсерватории В.В. Костаревым и Г.И. Голышевым. Система радиозондирования А-22- "Малахит" (1957 г.) была первой системой, в которой объединены измерения температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра и одновременно повышена их точность.

В 1959 г. Была создана комплексная система зондирования атмосферы РКЗ - "Метеор" на основе станций орудийной наводки СОН-9, обеспечивающая точное измерение наклонной дальности с помощью радиолокационного сверхрегенеративного приемопередатчика-ответчика (СПП) аэрологического радиозонда (АРЗ).

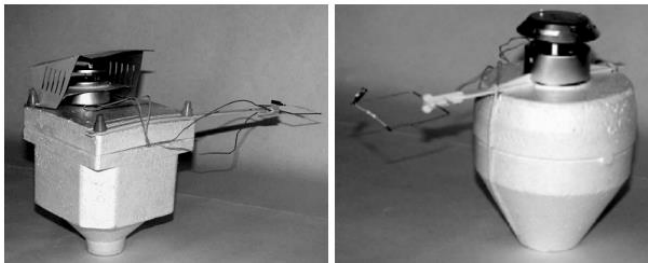
В период 1970-80г.г. была создана мобильная система радиозондирования 1Б44 (НПО «Вектор») с полупроводниковым радиозондом 1Б25 [1].

В период 1970-82 гг. была создана система радиозондирования АВК-МРЗ-3.

Разработки сотрудников Института радиоэлектроники и телекоммуникаций-ИРИТ-РТФ УрФУ (УПИ) в области радиозондирования атмосферы

1. Разработаны АРЗ 1Б25, для АРВК 1Б44, АО «УПП «Вектор», 1975-1979 гг.

2. Разработаны АРЗ МАРЗ-1, МАРЗ-2 для РЛС «Метеорит» и «Метеорит-2», АРЗ МРЗ-3 для РЛС АВК-1 для сети Росгидромета, АО «УПП «Вектор»,1980-1983 гг. (рисунок 1).



а б

Рисунок 1 – Аэрологический радиолокационный зонд (АРЗ) а - МАРЗ-2, б – МРЗ-3

3. По заказу АО «Метео» разработана опытная РЛС «Бриз», 1997-1999 гг., переданная на эксплуатацию Гидромету Республики Беларусь (рисунок 2).



Рисунок 2 – Радиолокационная станция «Бриз»

4. Разработан радиопеленгационный АРЗ 1Б74 для АРВК 1Б44, 1999-2002г.г.

5. Совместно на основе РЛС «Бриз» с АО «УПП «Вектор» разработан АРВК «Вектор-М», 2004-2007г.г., на сети Росгидромета РФ действует 61 комплекс (рисунок 3).



Рисунок 3 - АРВК «Вектор-М»

6. Совместно с АО «Радий» разработана радионавигационная СР «Полюс» и АРЗ МРЗ-3МК и МРЗ-Н1, 2010-2012г.г. Эксплуатируется на космодромах РФ и сети Росгидромета РФ 27 комплексов (рисунки 4-5).



а)



б)

Рисунок 4 - Аэрологический радиолокационный зонд (АРЗ) а - МРЗ-3МК, б - МРЗ-Н1





Рисунок 5 – Система радиозондирования «Полюс» с антенной с круговой диаграммой направленности

7. По заказу АО «УПП «Вектор» разработан приёмо-передающий комплекс для АРВК 1Б77 «Улыбка», 2016-2017 гг.

В связи с развитием радиоэлектроники и вычислительной техники появились новые возможности для измерения параметров ветра радиолокационным способом, без применения радиозондов [2].

8. По заказу ЦЭНКИ разработан макет, проведены натурные испытания радиолокатора параметров ветра (РПВ), работающего в диапазоне частот 450 МГц, и позволяющего проводить измерения параметров ветра до высот 16-20 км, разработан комплект РКД, 2018-2021г.г. (рисунок 6)

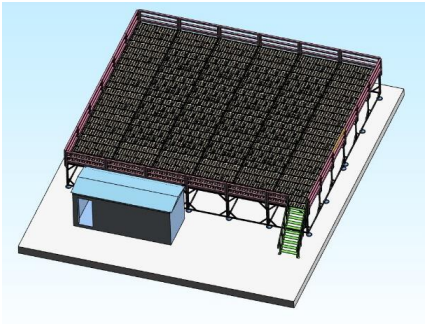


Рисунок 6 – Радиолокатор параметров ветра, работающий в диапазоне частот 450 МГц

9. Совместно с АО «Радий» разработан АРВК «Вихрь» с АРЗ МРЗ-3МК, на сети Росгидромета действует 21 РЛС, 2019-2022 гг. (рисунок 7).



Рисунок 7 - АРВК «Вихрь»

10. В инициативном порядке разработан и испытан макет РПВ на базе АРВК «Вихрь» в диапазоне частот 1680+\-10 МГц. Он позволяет измерять параметры ветра до высот 3-4 км (при абсолютно ясном небе) (рисунок 8).



Рисунок 8 - Макет РПВ на базе АРВК «Вихрь» диапазона частот 1680МГц

В процессе выполненных НИР и ОКР специалистами института ИРИТ-РтФ УрФУ получено десятки патентов Российской Федерации на изобретения в области создания средств аэрологического радиозондирования атмосферы.

Список литературы

1. Иванов В.Э. Радиозондирование атмосферы / В.Э. Иванов, М.Б. Фридзон, С.П. Ессяк. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 596 с. ISBN 5-7691-1513-0.
2. Букрин И.В., Гусев А.В., Кудинов С.И., Иванов В.Э., Плохих О.В., Шабунин С.Н. Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере. Ural Radio Engineering Journal. 2021;5(1) – С. 32–48.

ОСОБЕННОСТИ КАЛИБРОВКИ МНОГОДИАПАЗОННОЙ СВЧ - РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ФОНОВЫХ ПОМЕХ

Писный А.С., Федосеева Е.В., Ростокин И.Н.
Муромский институт Владимирского государственного университета, Муром
art.pisny2020@yandex.ru

Аннотация. Исследуется метод внешней калибровки многодиапазонной СВЧ-радиометрической системы с компенсацией фоновых помех с использованием твердотельного генератора шума. На основе моделирования характеристик облучателя антенны в CST и лабораторных измерений на частотах 4 и 10 ГГц проанализировано влияние типа калибровочного рупора на передачу сигнала в основные измерительные и дополнительный каналы. Получены значения приращений выходного напряжения ΔU радиометров при коммутации генератора шума. Сопоставлением с модельными значениями разности яркостных температур ΔT определены чувствительности каналов к измеряемым радиояркостным температурам, которые хорошо согласуются с расчетными значениями.
Ключевые слова. внешняя калибровка, генератор шума, многомодовый облучатель, компенсация фоновых помех, модовый состав, чувствительность.

FEATURES OF CALIBRATION OF A MULTI-BAND MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEM WITH BACKGROUND NOISE COMPENSATION

Pisnyi A.S., Fedoseeva E.V., Rostokin I.N.
Murom Institute of Vladimir State University, Murom

Abstract. A method of external calibration of a multi-band microwave radiometric system with background noise compensation using a solid-state noise generator is being investigated. Based on modeling the characteristics of the antenna irradiator in CST and laboratory measurements at frequencies of 4 and 10 GHz, the influence of the type of calibration horn on signal transmission to the main measuring and additional channels is analyzed. The values of the increments of the output voltage ΔU of the radiometers during switching of the noise generator are obtained. By comparing the model

values of the brightness temperature difference ΔT, the sensitivity of the channels to the measured radio brightness temperatures was determined, which are in good agreement with the calculated values.
Keywords. External calibration, noise generator, multimode irradiator, background noise compensation, mode composition, sensitivity.

Введение

СВЧ радиометрические системы обеспечивают непрерывное зондирование окружающего пространства [1-3], что позволяет отслеживать изменения состояния атмосферы и результаты их измерений используются при прогнозировании метеорологических явлений.

Оценка метеорологических параметров атмосферы по данным микроволновых радиометрических измерений выполняется по регрессионным соотношениям между радиояркостной температурой и целевыми метеорологическими величинами. Поэтому обязательной является калибровка микроволновой радиометрической аппаратуры для установления соответствия выходного сигнала системы радиояркостной температуре наблюдаемой области атмосферы [4 - 7].

Для полной калибровки микроволновой радиометрической системы внешний источник калиброванного радиошумового излучения в дальней зоне антенны при условии обеспечения углового размера, равного угловому размеру главного лепестка диаграммы направленности антенны при стабильном уровне шумового излучения. В данном исследовании рассматривается вариант применения для калибровки внешнего источника – генератора шума, расположенного в пределах основной антенны системы.

Характеристики и состав системы внешней калибровки многодиапазонной СВЧ радиометрической системы

СВЧ радиометрическая система содержит параболическую зеркальную антенну и многомодовый облучатель, обеспечивающий разделение сигналов по частотным каналам и поляризациям. Особенностью облучателя антенны является наличие дополнительных каналов приёма, предназначенных для компенсации фоновых помех, поступающих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

Для реализации внешней калибровки предлагается использовать интегрированный в основание зеркала узел, содержащий твердотельный генератор шума (ГШ), соединённый с широкополосным рупорным излучателем (рис. 1). Рупор располагается на фиксированном расстоянии от многомодового облучателя и формирует тестовый шумовой сигнал, который через облучатель поступает в приёмные каналы системы.

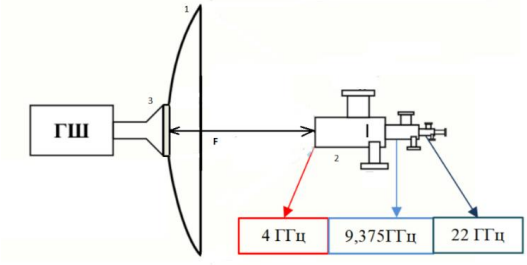


Рисунок 1 - Антенна многодиапазонной СВЧ РМС с устройством внешней калибровки
1- зеркало антенны; 2 – трехдиапазонный облучатель с разделением сигналов основного и дополнительного каналов в многомодовом режиме; 3- облучатель внешнего генератора шума (ГШ), расположенный на фокусном расстоянии F облучателя зеркала

Задачи калибровки СВЧ радиометрической системы

Система калибровки многодиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фонового шума должна обеспечивать эффективную передачу тестового сигнала во все приёмные каналы, включая дополнительный канал. Для калибровки основных измерительных каналов системы и канала формирования сигнала компенсации фоновых помех необходимо формирование требуемого модового состава сигнала калибровки в облучателе, что определяет вид рупора системы внешней калибровки с круглым раскрывом.

Многодиапазонность СВЧ радиометрической системы при одновременном приеме на общее зеркало всех частотных каналов требует широкополосности устройства калибровки. Так ее рабочий диапазон должен содержать диапазоны всех частотных каналов системы (в данном случае от 3 до 18 ГГц).

При выполнении калибровки необходимо определить численные значения параметров функции линейной взаимосвязи выходного радиометра и измеряемой радиояркостной температуры

$$\mathrm{T_я} = a \cdot U_{\text{вых}} + b, \quad (1)$$

где $U_{вых}$ — выходное напряжение радиометра (или цифровой код АЦП); a — коэффициент усиления (крутизна передаточной характеристики); b — аддитивная постоянная, соответствующая собственной шумовой температуре системы, приведённой ко входу.

Численные значения парметров a и b зависят от многих факторов - интенсивности внутренних шумов радиометров, потерь в антенной системе, внешних условий работы, температуры окружающей среды. Для определения парметров используется метод двух отсчётов («горячей» и «холодной» нагрузок). В качестве «горячей» нагрузки выступает сигнал от включённого генератора шума, радиояркостная температура которого должна быть известна и стабильна. В качестве «холодной» нагрузки может использоваться согласованная нагрузка (чёрное тело) при комнатной температуре либо излучение «холодного» участка неба в зените при ясной погоде.

В случае многодиапазонной СВЧ радиометрической системы с компенсацией фоновых помех задача калибровки усложняется необходимостью получения параметров калибровки для каждого частотного канала на двух поляризациях – вертикальной и горизонтальной, включая дополнительный канал, выходной сигнал которого определяется величиной поля высшей моды круглого волновода - E_{01}.

Экспериментальная реализация калибровки по внешнему генератору шума

Экспериментальная проверка способа калибровки СВЧ радиометрической системы по внешнему генератору шума проводилась при использовании лабораторного стенда, включающий макет многомодового облучателя, сменные рупоры (прямоугольный и круглый), ГШ и набор радиометров. Эксперимент проводился для двух частотных каналов с центральными частотами 4 и 10 ГГц. В качестве «холодной» нагрузки использовалось чёрное тело при комнатной температуре 24.4°C (297.6 К).

На рис. 2 представлены осциллограммы выходных сигналов основных измерительных каналов при приеме сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризации при циклическом включении и выключении ГШ. В осциллограмме (рис.2) зафиксированы «ступеньки» напряжения, соответствующие переключению между «холодным» и «горячим» состояниями.

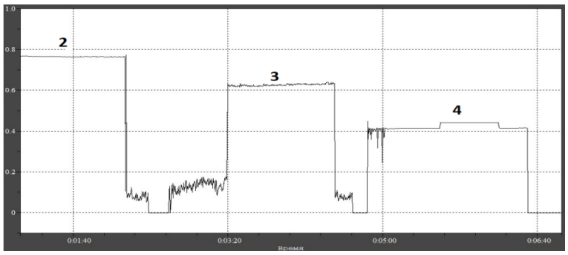


Рисунок 2 – Выходные сигналы СВЧ радиометрической системы при выполнении калибровки по внешнему генератору шума
Нумерация портов: 2 - основные каналы горизонтальная поляризация;
3 – основные каналы вертикальная поляризация; 4 - дополнительный канал

Для первого частотного канала (4 ГГц) с прямоугольным рупором и ГШ-1 получены следующие амплитуды «ступенек» - прирост выходного напряжения при переключении между «холодным» и «горячим» источника шума $\Delta U = U_{\text{гор}} - U_{\text{хол}}$:

- канал приема на горизонтальной поляризации $\Delta U2 = 0.78 - 0.10 = 0.68$ В;
- канал приема на вертикальной поляризации $\Delta U3 = 0.62 - 0.17 = 0.45$ В;
- дополнительный канал $\Delta U4 = 0.43 - 0.41 = 0.02$ В.

Для второго частотного канала с центральной частотой рабочего диапазона 10 ГГц ввиду недостаточного уровня мощности ГШ на высокой частоте применялся усилитель промежуточной частоты УПЧ с коэффициентом усиления 20 дБ и аттенюатор 3 дБ, что обеспечило суммарное усиление тракта 17 дБ. Получены следующие значения:

- канал приема на вертикальной поляризации $\Delta U5 = 0.69 - 0.25 = 0.44$ В;
- канал приема на горизонтальной поляризации $\Delta U6 = 0.89 - 0.38 = 0.51$ В;
- дополнительный канал $\Delta U7 = 0.88 - 0.26 = 0.62$ В.

Полученные экспериментальные данные позволили определить калибровочные коэффициенты a и b для каждого канала. Используя рассчитанные по модели значения разности яркостных температур ΔT между состояниями «ГШ ВКЛ» и «ГШ ВЫКЛ», чувствительность канала определяется как:

$$a = \Delta U / \Delta T. \quad (2)$$

Так для канала приема на вертикальной поляризации в диапазоне 4 ГГц величина поправочного коэффициента равна $a_3 = 0.27$ *мВ/К.* Для остальных каналов значения калибровочных коэффициентов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сводная таблица результатов

Канал	Порт	Мода / Поляризация	ΔU, В	ΔT, К (из CST)	a = ΔU/ΔT, мВ/К	Условия
1	2	H_{11} /горизонтальная	0.68	2093	0.325	без УПЧ
	3	H_{11} /вертикальная	0.45	1663	0.271	
	4	E_{01}	0.02	263	0.076	
2	5	H_{11} /горизонтальная	0.44	357	1.23	с УПЧ и Атт.17 дБ
	6	H_{11} /вертикальная	0.51	142	3.59	
	7	E_{01}	0.62	35.7	17.4	

Заключение

В работе сформулированы требования к системе внешней калибровки многодиапазонной СВЧ РМС с компенсацией фоновых помех. Показано, что ключевыми элементами являются широкополосный генератор шума с высоким ИОШТ и рупорный облучатель, обеспечивающий возбуждение необходимого модового состава в многомодовом разделителе. Экспериментально подтверждена возможность получения стабильных калибровочных уровней напряжения для двух частотных каналов.

Список литературы

1. Радиотеплолокация в метеорологии / *В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов*. - Л.: Гидрометеоиздат, 1987. - 283 с.
2. *Некос А.Н., Некос В.Е. Щукин Г.Г.* Дистанционные методы исследований природных объектов: моногр. – СПб.: РГГМУ, 2009 – 319 с.
3. *Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.* Вопросы метрологического обеспечения радиотеплолокационных измерений в условиях действия внешних шумовых помех: моногр. – Муром: ИПЦ Муромского института ВлГУ, 2012. – 103 с.
4. *Ульянов А.В., Ерохин Н.С.* Методы и средства калибровки микроволновых радиометров дистанционного зондирования атмосферы // Радиотехника. – 2020. – № 5. – С. 45–52.
5. *Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г.* Калибровка трёхдиапазонной СВЧ-системы с компенсацией фоновых помех // Измерительная техника. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 45–51.
6. *Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K.* (1981). Calibration of Microwave Radiometers Using Artificial Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(3), 1234-1245.
7. *Njoku, E. G., & Entekhabi, D.* (2008). Design and Performance of Calibration Targets for Microwave Radiometers. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1234-1245.

СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Снегуров А. В.
Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова
info@alwes.ru

Аннотация. Работа посвящена сравнению погрешности оценки расстояний, измеренных различными многопунктовыми системами местоопределения молниевых разрядов. Показано, что низкочастотные разностно-дальномерные системы с малыми базовыми расстояниями между пунктами характеризуются минимальными погрешностями местоопределения молниевых разрядов.
Ключевые слова. Системы грозопеленгации, погрешность местоопределения, корреляционные связи.

COMPARISON OF DATA FROM LIGHTNING DETECTION SYSTEMS

Snegurov A. V.
Voeikov Main Geophysical Observatory

Abstract. The paper is devoted to the comparison of the error in estimating distances measured by various multipoint systems for determining lightning discharges. It is shown that low-frequency difference-rangefinder systems with small basic distances between points are characterized by minimal errors in the location of lightning discharges.
Keywords. Lightning detection systems, location error, correlation relationships.

Опыт, накопленный при разработке и испытаниях различных однопунктовых и многопунктовых систем пеленгации гроз, лег в основу строительства аппаратно-программного комплекса грозопеленгационной системы (АПК ГПС) Росгидромета. В результате ГГО создан АПК ГПС$_{(alw)}$ версии «Алвес 9.07.14» [1]. Структурная схема АПК ГПС$_{(alw)}$ приведена на рис. 1.

Сервер сбора информации выполняет следующее:

• сбор с датчиков информации о параметрах молниевых разрядов, хранение первичных данных в файлахы, расчет координат молниевых разрядов и передачу данных на PostgreSQL сервер БД;

• управление датчиками (установку порогов, перезапуск и перепрограммирование);

• отображение состояния датчиков (наличие связи, статус, IP адрес, статус GPS/Глонасс приемника).

Сервер Базы Данных PostgreSQL:
накапливает, хранит и предоставляет информацию о времени, координатах и параметрах ЭМИ молниевых разрядов пользователям системы. Осуществляет прием данных от ДМРЛ и других ГПС.

На рис. 2 приводится карта размещения Индикаторов грозовой опасности версии «Alwes 7.04» [2] ГПС$_{(alw)}$ «ГГО», «ИКФИА» СО РАН Якутия, «ТОИ» ДО РАН Владивосток и датчиков ГПС$_{(lf)}$ и интерферометров ГПС$_{(hf)}$ в составе ГПС версии «Vaisala LS8000» ГПС$_{(lf)}$ «ВГИ», «НИЦ «Планета»», «НИЦ «Планета»» ДВ. Данные перечисленных ГПС интегрируются на единой карте и через Web Server публикуются на сайтах Росгидромета https://www.meteorf.gov.ru/product/info/, http://www.lightnings.ru. и «ГГО» http://voeikovmgo.ru/index.php/ grozopelengatsiya.

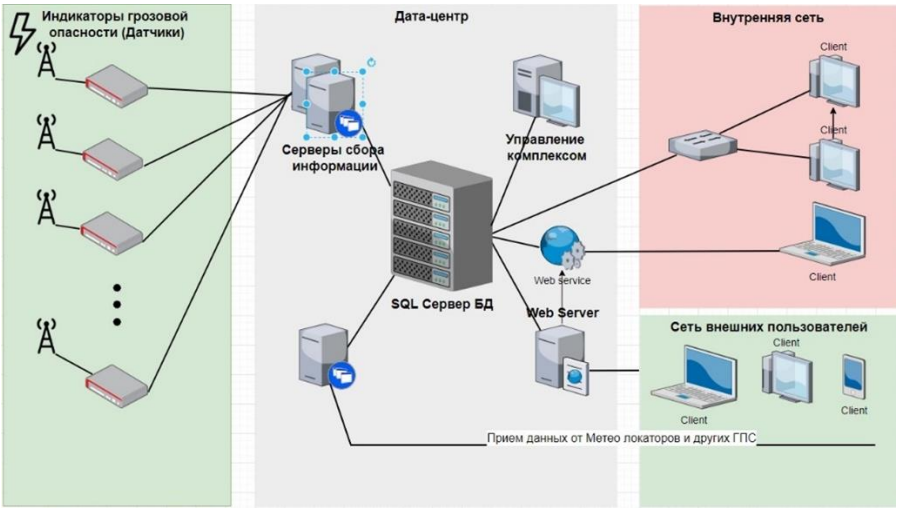


Рисунок 1 – Структурная схема АПК ГПС$_{(alw)}$

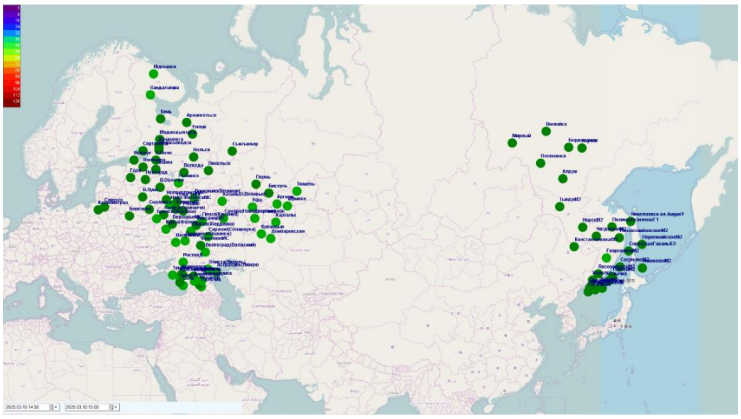


Рисунок 2 – Карта размещения индикаторов, датчиков и интерферометров

В перечисленных выше ГПС, вычисляемыми параметрами являются координаты (расстояние и пеленг), погрешность их вычислений б и величина тока в канале молниевого разряда (МР). Каждый датчик, интерферометр или индикатор измеряет время регистрации ЭМИ МР (положение характерной точки на форме атмосферика) амплитуду электрического и/или магнитного поля. Разности фаз или пеленг в интерферометрах вычисляется по сигналам ЭМИ МР на рабочих частотах.

Практический интерес представляет сравнение погрешности оценки координат МР б синхронно зарегистрированных различными ГПС [3]. Эксперимент по сравнению точностных характеристик различных грозопеленгационных систем начинался со сравнения данных синхронной регистрации МР низкочастотной $ГПС_{(lf)}$ и высокочастотной интерферометрами $ГПС_{(hf)}$, входящих в состав LS8000. Выбор этой пары ГПС объясняется тем, что датчики и интерферометры территориально совмещены. Это практически исключает дополнительные погрешности связанные с различием геометрии расположения пунктов регистрации ЭМИ МР и систем синхронизации по времени. Поскольку время сканирования пространства интерферометрами $ГПС_{(hf)}$ составляет 100 мкс и их радиус действия не превышает 200 км был выбран интервал синхронизации $\Delta\tau$ от 0,001 до 0,1 мс.

Повторяемости величины погрешности при регистрации МР различным числом низкочастотных датчиков $ГПС_{(lf)}$ $б_{(lf)}$ и высокочастотных интерферометров $ГПС_{(hf)}$ $б_{(hf)}$ в радиусе 200 км при интервале синхронизации 0,1 мс представлены на рис. 3. Из графиков следует, что три интерферометра регистрировали МР с погрешностью $б_{(hf)}$=1 км и менее в 0,3% случаев, а четыре интерферометра соответственно 0,5% и менее случаев. Таким образом, количество случаев, отмеченных низкочастотной $ГПС_{(lf)}$ разрядов значительно превышает число случаев, полученных высокочастотной $ГПС_{(hf)}$. Следовательно, не зависимо от числа датчиков низкочастотная система $ГПС_{(lf)}$ обладает более высокими точностными характеристиками, чем высокочастотная $ГПС_{(hf)}$.

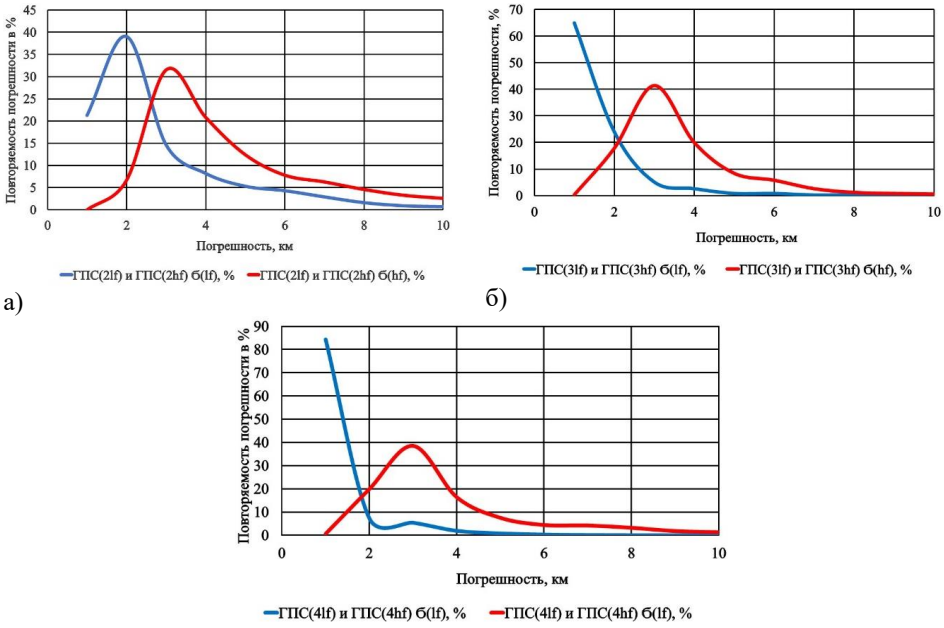


Рисунок 3 – Повторяемости величины погрешности для двух (а), трех (б) и четырех (в) датчиков

В отличие от низкочастотной ГПС$_{(lf)}$ в составе LS8000, в низкочастотной ГПС$_{(alw)}$ для оценки координат МР используется только разностно-дальномерный метод, в котором для исключения неоднозначности в определении координат МР необходима регистрация ЭМИ МР минимум четырьмя индикаторами. В этой связи представляет интерес сравнение данных двух, трех и четырех датчиков ГПС$_{(lf)}$ с данными четырех и более индикаторов ГПС$_{(alw)}$. Результаты такого сравнения приведены на рис. 4. Они показывают, что число случаев регистрации МР ГПС$_{(lf)}$ с погрешностью б$_{(lf)}$=1 км и менее двумя датчиками $N_{д(lf)}$ составляет 7,0%, тремя – 1,0 % и четырьмя – 5,0 % от общего числа МР в каждой паре. Повторяемость б$_{(alw)}$≤ 1 км по данным ГПС$_{(alw)}$ синхронно с парой, тройкой и четверкой датчиков $N_{д(lf)}$ в ГПС$_{(lf)}$ равна 71, 74 и 55 % соответственно.

Представляет интерес сравнение величины погрешности б$_{(alw)}$ и б$_{(toa)}$ оценки расстояния двумя низкочастотными разностно-дальномерными системами, отечественной ГПС$_{(alw)}$ и американской ГПС$_{(toa)}$. В первом варианте проводилось сравнение данных регистрации ЭМИ МР всеми индикаторами. Во втором – одной четверкой ГПС$_{(alw)}$ близко расположенной с датчиками ГПС$_{(toa)}$. График корреляционной связи между расстояниями R$_{(alw)}$, R$_{(toa)}$, измеренными синхронно двумя системами приводится на рис. 5а. Коэффициент корреляции между ними r(R$_{(alw)}$, R$_{(toa)}$) равен 0,99.

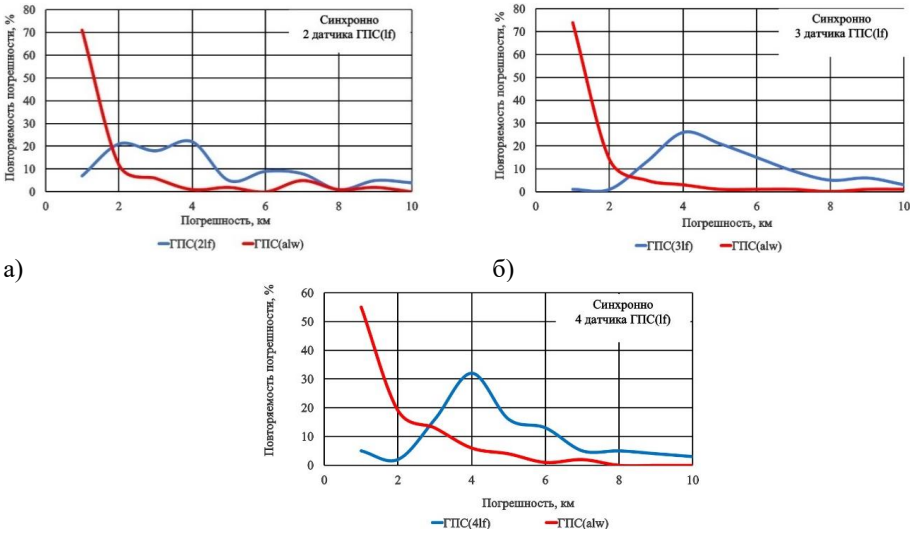


Рисунок 4 – Повторяемость величины погрешности $б_{(lf)}$ и $б_{(alw)}$ оценки расстояния до МР различным числом низкочастотных датчиков $ГПС_{(lf)}$ и $ГПС_{(alw)}$ (200 км)

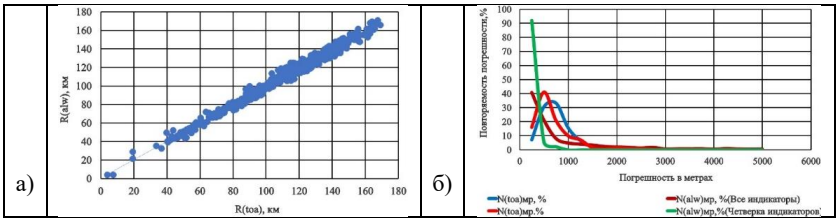


Рисунок 5 – Корреляционная связь между результатами измерений $R_{(alw)}$, $R_{(toa)}$ (а) и повторяемость числа МР $N_{(toa)мр}$ с погрешности $б_{(lf)}$ и числа МР $N_{(toa)мр}$ с погрешностью $б_{(alw)}$ при сравнении данных регистрации ЭМИ МР всеми и четверкой индикаторов $ГПС_{(alw)}$.

Анализ повторяемости значений погрешности $б_{(alw)}$ и $б_{(toa)}$ показал, что в варианте обработки данных всех индикаторов и датчиков погрешности $б_{(alw)}$ и $б_{(toa)}$ до 500 метров составляют 62 и 38 %, а до 1 км включительно 77 и 86 % соответственно (рис.5б). Вторая схема с использованием только одной четверки индикаторов приводит к резкому росту (до 92%) числа случаев регистрации МР $ГПС_{(alw)}$ с погрешностью до 500 метров.

Таким образом, низкочастотные разностно-дальномерные системы с малыми базовыми расстояниями между пунктами характеризуются минимальными погрешностями местоопределения молниевых разрядов

Список литературы

1. *Снегуров А. В.,Снегуров В. С.* (2016). Программное обеспечение «Программный комплекс грозопеленгационой системы (ПК ГПС) «Алвес 9.07.14». — Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2016612904 от 14 марта 2016 г.
2. *Снегуров А.В., Снегуров В.С.* (2023). Свидетельство №2023688710. Программный комплекс (ПК) Индикатор грозовой опасности «Alwes 7.04». ГР 25 декабря 2023.
3. *Снегуров А. В., Снегуров В. С.* (2024). Результаты сравнения систем пеленгации гроз. Труды ГГО. Вып. 615. С. 6–39.

ЗАВИСИМОСТЬ МАТРИЦЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА ОТ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Акимов И.М., Кучинская О.И., Брюханов И.Д., Пустовалов К.Н.
Национальный Исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
ima8908@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию распределений элементов матрицы обратного рассеяния света (МОРС) облаков верхнего яруса (ОВЯ). В рамках экспериментов, проведённых на лидаре Томского государственного университета с 2009 по 2016 годы, использовался последовательный метод измерений, предполагающий постоянство микрофизических характеристик частиц, отвечающих за поляризационные свойства рассеяния. В 2016 году была выполнена модернизация лидара, позволившая параллельно (одновременно) накапливать 16 массивов однофотонных импульсов, что обеспечило более точное и стабильное восстановление МОРС и снизило влияние движения облаков на результаты измерений.
В данной работе исследуются метеорологические параметры, характерные для моды распределения элементов главной диагонали МОРС, которая при проведении лидарного зондирования параллельным методом, не совпадает с основной модой, получаемой при использовании последовательного метода. Установлено, что значения из новой моды наиболее часто регистрируются при значениях температуры и давления, характерных для роста шестигранных-призм столбиков или более сложных агрегатов.
Ключевые слова. Лидарное зондирование, облака верхнего яруса (ОВЯ), матрица обратного рассеяния света (МОРС), ледяные кристаллы, модель Магоно-Ли, высотный матричный поляризационный лидар (ВМПЛ).

DEPENDENCE OF HIGH-LEVEL CLOUD BACKSCATTERING PHASE MATRIX ON METEOROLOGICAL PARAMETERS

Akimov I.M., Kuchinskaia O.I., Brykhanov I.D., Pustovalov K.N.
National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Annotation. This work is dedicated to the investigation of the distributions of backscattering phase matrix (BSPM) elements of high-level clouds (HLCs). During experiments conducted on the lidar developed at the Tomsk State University from 2009 to 2016, a sequential measurement method was used, assuming the constancy of microphysical properties of particles responsible for the polarized scattering. In 2016, the lidar upgrade was implemented, allowing the parallel (simultaneous) accumulation of 16 arrays of single-photon impulses, which ensured more accurate and stable reconstruction of the full BSPM and reduced the influence of cloud movement on the measurement results. This study examines the meteorological parameters characteristic of the mode in the distribution of the main diagonal elements of the BSPM, which, when performing lidar sounding with the parallel method, does not coincide with the primary mode obtained using the sequential method. It has been established that the values from this new mode are most frequently recorded at temperature and pressure conditions typical for the growth of hexagonal-prism columns or more complex aggregates.
Keywords. Lidar sensing, high-level clouds, backscattering phase matrix, ice crystals, microphysical cloud properties, Magono-Lee model, atmospheric radiation balance, high-altitude matrix polarization lidar.

Введение. На сегодняшний день остается актуальной проблема недостаточной изученности влияния облаков верхнего яруса (ОВЯ) на радиационный баланс и климатические процессы в условиях антропогенных изменений. Исправление этой ситуации требует разработки точных методов оперативного мониторинга и прогнозирования оптических и геометрических характеристик ОВЯ [1, 2]. В данный момент введутся исследования, направленные на решение этой фундаментальной задачи путем разработки метода реконструкции оптических и геометрических характеристик ОВЯ на основе данных наземного лидарного, спутникового,

аэрологического зондирования атмосферы и инструментов машинного обучения (МО) [3]. Отличительной особенностью является наличие массива параметров ОВЯ, полученных в экспериментах по зондированию атмосферы на высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) Томского государственного университета [4] и сопоставленных с метеорологической обстановкой над точкой стояния лидара. В ходе анализа экспериментальных данных было установлено наличие двумодальности в распределениях элементов главной диагонали матрицы обратного рассеяния света (МОРС), которая зависела от способа накопления лидарного сигнала [5].

Целью данной работы является исследование метеорологических предпосылок формирования двух различных мод экспериментального распределения.

Методики измерений. В лидарных экспериментах по лазерному зондированию ОВЯ каждый импульс формируется в ином физическом объёме вследствие ветрового переноса, а горизонтальная протяжённость облака, охватываемая серией измерений, может достигать километров. В процессе регистрации в зондировании участвуют разные частицы, и их число меняется от реализации к реализации. По этой причине в первые годы работы ВМПЛ НИ ТГУ (2009–2016 гг.), использовалось предположение о неизменности в генеральной совокупности микрофизических параметров частиц, определяющих поляризационные свойства рассеяния, при допустимых колебаниях их концентрации. На основе этого предположения лидарные измерения выполнялись с последовательной сменой комбинаций состояний поляризации зондирующего и принимаемого излучения с использованием накопления сигналов для каждой комбинации.

В 2016 г. была выполнена модернизация ВМПЛ и теперь приём сигналов осуществляется в режиме одновременного накопления 16-ти массивов однофотонных импульсов, что даёт возможность в одном и том же временном окне с одинаковой статистической точностью оценивать интенсивности всех сигналов, необходимых для восстановления полной матрицы обратного рассеяния. В ходе таких наблюдений в передающем и приёмном каналах лидара непрерывно, синхронизировано с частотой генерации лазера, сменяются поляризационные элементы. В результате перемещение исследуемых воздушных объёмов в поле зрения телескопа одинаково влияет на результаты измерений для каждой из используемых комбинаций поляризаций зондирующего и принимаемого излучения. Использование параллельной схемы измерений позволяет формировать массивы однофотонных сигналов для всех элементов МОРС и тем самым снижать погрешности, связанные со смещением облаков в процессе наблюдений. Кроме того, такой режим обеспечивает возможность непрерывного длительного эксперимента с последующим выбором интервалов, удовлетворяющих заданным условиям обработки.

Исследование распределений МОРС ОВЯ. Анализ экспериментальных данных по зондированию параметров атмосферы выявил наличие двух статистически значимых максимумов в распределениях диагональных элементов МОРС при использовании как последовательных, так и параллельных методов лидарных измерений [5]. Раннее эта ситуация наблюдалась для усредненных по высоте данных, однако эта наблюдается на данных, для которых не проводилось усреднение (см. рисунок 1).

Для метода последовательного измерения характерен один ярко выраженный пик, что объясняется сравнительно стабильными погодными условиями в процессе проведения данных измерений. В такой ситуации большинство облаков демонстрируют схожие значения элементов МОРС, а отклонения от среднего значения связаны с краткосрочными изменениями погоды. В случае же параллельного метода регистрации сигналов наблюдается два выраженных пика. При сравнении диаграмм

видно, что один из них совпадает с пиком последовательного метода, а другой занимает отдельную позицию на графике, причем для элемента m_{33} МОРС ОВЯ расстояние между пиками минимально.

Исследование зависимости распределений МОРС ОВЯ от метеорологических параметров. Для серий экспериментов, проведенных параллельным методом, наиболее ярко выражена двумодальность распределения элементов главной диагонали МОРС. При этом одна из мод совпадает с распределением, полученным последовательным способом. Это обуславливает необходимость раздельного анализа каждой моды. Поскольку точный вид распределений априори неизвестен, для выделения "нового" распределения (моды, характерной только для параллельного метода) была установлена условная граница. Она определялась как среднее арифметическое значений максимумов двух распределений. Таким образом, были получены следующие пороговые значения: 0.85 для m_{22}, -0.88 для m_{33} и -0.55 для m_{44}. Дальнейший анализ был сосредоточен на условиях формирования обеих мод. Зависимость обнаружения данных из "нового" и "старого" распределений от температуры и давления представлена на рисунке 2.

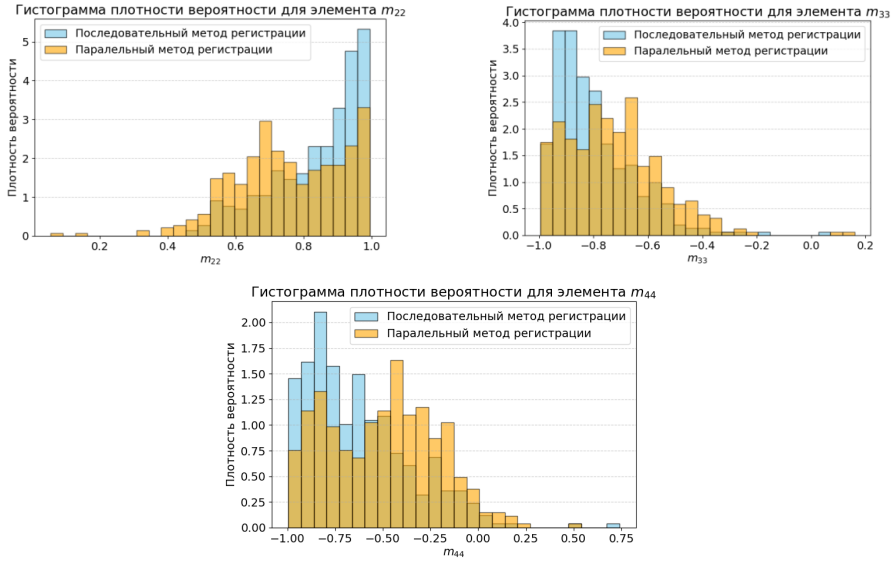


Рисунок 1 – Гистограммы распределений экспериментальных значений диагональных элементов МОРС для двух различных методик измерений

Из рисунка 2 очевидно, что метеорологические условия, соответствующие дополнительной моде распределения, группируются преимущественно в зонах с высокими значениями температуры и давления либо, напротив, характеризуются низкими показателями обоих параметров одновременно. Важно отметить отсутствие регистрации сигналов дополнительного пика в температурном диапазоне от −50°C до −40°C, что согласно модели Магоно-Ли [6] соответствует точке морфологического перехода – критической области, когда при температурах выше −35 и достаточной влажности скорость роста кристаллов вдоль главной оси симметрии резко возрастает, что ведет к формированию гексагональных призм-столбиков. Анализ диаграмм «температура–давление» выявил два основных морфологических кластера: первый — связанный со стабильным ростом гексагональных пластин в диапазоне от –55°C до –35°C при давлениях 250–400 гПа; второй — с интенсивным ростом столбчатых призм

в диапазоне до –10°C и давлениях 450–600 гПа. При этом в экстремальных холодных условиях ниже –58°C наблюдаются формирование мелких или сложных агрегатов кристаллов, что свидетельствует о существенных изменениях в морфологии и структурных свойствах ледяных частиц [7]. Отсутствие дополнительных пиков в диапазоне от –50°C до –40°C подтверждает наличие критической зоны морфологических переходов, когда рост кристаллов резко возрастает, что согласуется с теоретической моделью. Зона экстремального холода (ниже -58^0 C) соответствует вершинам очень холодных перистых облаков. При таких низких температурах влага вымораживается мгновенно, образуя либо очень мелкие кристаллы, либо сложные агрегаты.

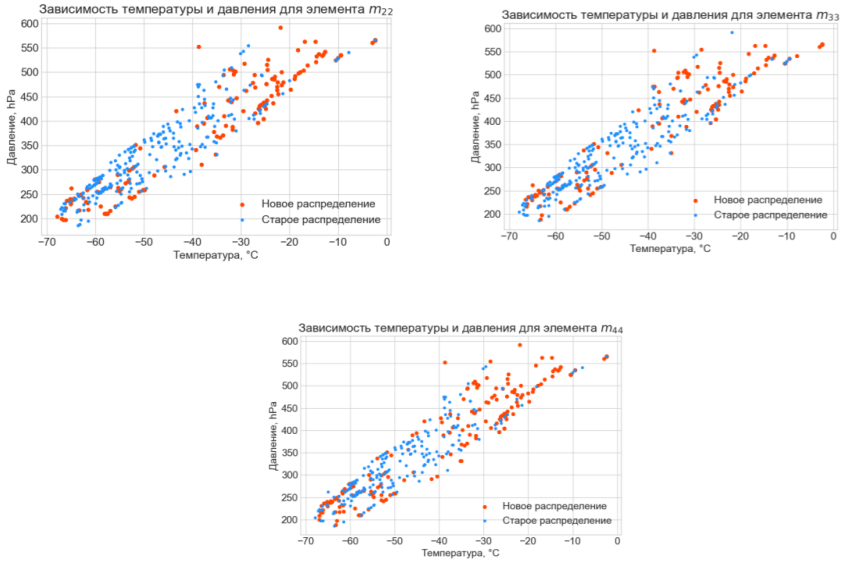


Рисунок 2 – Зависимость значений температуры и давления для различных мод экспериментального распределения элементов МОРС, зарегистрированного последовательным и параллельными методом

Вывод. В результате исследования установлено, что показатели дополнительного распределения элементов МОРС ОВЯ группируются в четко обособленной области «температура–давление», что соответствует теоретическим моделям кристаллизации, в частности модели Магоно-Ли. Однако физический механизм образования второй моды до конца не ясен, что является темой будущих исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант No 24-72-10127.

Список литературы

1. *Jones, R.N.; Ricketts, J.H.* Regime Change in Top of the Atmosphere Radiation Fluxes: Implications for Understanding Earth's Energy Imbalance. Climate 2025, 13, 107.
2. *Xu, K.-M., & Sun, M.* Impact and variability of cloud types on Earth's top-of-atmosphere energy balance in the tropics: A 19-year analysis of high-resolution CERES data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2026, 131.
3. *Olesia Kuchinskaia, Maxim Penzin, Iurii Bordulev, et al.* Artificial Neural Networks for

Determining the Empirical Relationship between Meteorological Parameters and High-Level Cloud Characteristics // Applied Sciences. – 2024, – Vol. 14(5). – 1782;
4. Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы и Томская ионосферная станция «ЛИДАР-ИОНОЗОНД». URL: https://ckp-rf.ru/usu/73573 (дата обращения: 21.01.2026 г.)
5. *M.S. Penzin, O.I. Kuchinskaia, I.M. Akimov, D.A. Romanov [et al].* Prediction of high-level cloud parameters based on polarization lidar observations using machine learning tools / Russian Physics Journal. 2024. Vol. 67, № 10. P. 1766–1772.
6. *Magono, Choji; Lee, Chung Woo*. Meteorological Classification of Natural Snow Crystals. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, 2(4), 321-335
7. *J. Um, G. M. McFarquhar, Y. P. Hong, S.-S. Lee, C. H. Jung, R. P. Lawson, and Q.* Mo5. Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // Atmos. Chem. Phys. Discuss., 14, 31111–31167, 2014

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ ТУМАНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Николаев Е.Н., Антонов С.В., Двоеглазов С.М., Петрунин А.М., Платонов Н.А., Частухин А.В., Щукин Г.Г.
АНО «Агентство АТТЕХ», Москва
attech@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается применение измерительного комплекса для мониторинга параметров переохлажденных туманов с использованием беспилотных авиационных систем (БАС). Представлена структура измерительного комплекса, размещаемого на борту беспилотной авиационной системы. Рассмотрены характеристики используемых датчиков и результаты испытаний измерительного оборудования. Показано, что применение беспилотных авиационных систем позволяет оперативно получать данные о температуре, влажности, давлении, параметрах ветра в районе проведения работ.
Ключевые слова. Беспилотные авиационные системы, переохлажденные туманы, зондирование атмосферы.

MEASURING COMPLEX FOR MONITORING THE PARAMETERS OF SUPER-COLD FOGS USING UNMANNED AVIATION SYSTEMS

Nikolaev E.N., Antonov S.V., Dvoeglazov S.M., Petrunin A.M., Platonov N.A., Chastukhin A.V., Shchukin G.G.
ANO «Agency ATTECH», Moscow

Annotation. The paper considers the application of a measuring complex for monitoring the parameters of subcooled fogs using unmanned aerial systems (UAS). The structure of the measuring complex placed on board an unmanned aerial system is presented. The characteristics of the used sensors and the results of testing the measuring equipment are considered. It is shown that the use of unmanned aerial systems allows for the prompt acquisition of data on temperature, humidity, pressure, and wind parameters in the area of work.
Keywords. Unmanned aerial systems, subcooled fogs, atmospheric sensing.

Введение. Эффективность мероприятий по рассеянию переохлажденных туманов во многом определяется наличием оперативной информации о состоянии атмосферной среды. К числу основных параметров, обеспечивающих обоснованность и точность принятия решений при проведении работ по воздействию на туман, относятся

температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление, скорость и направление ветра.

Традиционным методом получения вертикальных профилей метеорологических параметров является радиозондирование атмосферы. Однако ограниченное количество станций радиозондирования и невысокая периодичность запусков радиозондов затрудняют использование данного метода для оперативного мониторинга атмосферных условий.

Для оперативного получения вертикальных профилей температуры, направления и скорости ветра могут быть использованы современные отечественные средства дистанционного зондирования такие как Волна -3, Волна – 4, ЛАТАН-3, ПЛВ-300, ПЛВ-5000, ПЛВ-10000, МТП-5 и другие [0, 0, 0]. Однако стоимость таких комплексов достаточно высока, что практически исключает их применение в оперативных работах.

Одним из перспективных направлений решения данной задачи является применение беспилотных авиационных систем, оснащенных компактными измерительными комплексами, позволяющими получать оперативные данные непосредственно в зоне проведения работ, в том числе в условиях повышенной влажности, тумана и облачности.

Перпектива применения беспилотных авиационных систем в туманах и облаках позволит получать достоверную информацию о текущем состоянии атмосферы в пограничном слое в локальных точках, представляющих интерес с точки зрения необходимой оперативной информации для принятия решения о начале работ по активному воздействию на туманы.

Беспилотная авиация имеет огромный потенциал. Для реализации этого потенциала необходимо максимально использовать технические возможности беспилотных комплексов [6].

Измерительный комплекс параметров тумана. Измерительный комплекс состоит из бортового блока сбора и передачи параметров и наземного блока приема и обработки данных. Бортовой блок включает датчики температуры, влажности и давления, датчик количества взвешенных частиц в воздухе (PM - Particulate Matter) на единицу объёма, датчик рассеянного отражения, GPS-модуль, контроллер обработки данных и радиомодуль передачи информации.

Датчик количества взвешенных частиц применяется для оценки содержания аэрозольных частиц и микрокапель воды в исследуемой воздушной среде. Измерение концентрации взвешенных частиц позволяет определить верхнюю границу тумана.

Датчик рассеянного отражения также предназначен для определения верхней границы тумана. Принцип его работы основан на регистрации интенсивности излучения лазерного источника, рассеянного аэрозольными частицами и микрокаплями воды. При прохождении лазерного луча через объём воздуха происходит рассеяние излучения на каплях воды. Часть рассеянного излучения фиксируется фотоприёмником датчика, который преобразует оптический сигнал в электрический, что позволяет определить верхнюю границу тумана.

GPS модуль используется для определения пространственных координат беспилотной авиационной системы в процессе выполнения измерений. Получение точных географических координат (широты, долготы и высоты полёта) позволяет привязать измеряемые параметры атмосферы к конкретной точке в исследуемом объёме воздушной среды. Использование навигационных данных также позволяет синхронизировать измерения с траекторией полёта беспилотной авиационной системы и формировать вертикальные и горизонтальные профили параметров переохлаждённого тумана. Основные характеристики датчиков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики датчиков

Хаактеристика	Значение/диапазон
Диапазон измерения температуры	−40…+85 °C
Диапазон измерения влажности	0–100 %
Диапазон измерения давления	300–1100 мм.рт.ст.
Точность измерения температуры	±0,5 °C
Точность измерения влажности	±3 %
Точность измерения давления	±1 мм.рт.ст.
Точность GPS-позиционирования	1–3 см
Диапазон размеров взвешенных частиц	0,3–10 Мкм
Погрешность измерения концентрации взвешенных частиц	±10 %

В составе измерительного комплекса используется сбрасываемый зонд для получения вертикального профиля направления и скорости ветра, созданный в Агентстве ATTEX. Сбрасываемый зонд представляет собой плату с модулем GPS, радиомодулем с антенной, отсеком для батарей питания, прикрепленную к свободно раскрываемой парашютной системе. Прием данных от зонда осуществляется с помощью наземной станции, включающей компьютер для последующей обработки информации. [1, 2]

Дополнительно определение верхней границы тумана осуществляется по результатам анализа информации с находящейся на БАС видеокамеры.

Собранные данные передаются по радиоканалу на наземную станцию, где осуществляется их регистрация, обработка и анализ. На рисунках 2 - 4 показаны блок-схема и вид бортового блока сбора и передачи параметров по радиоканалу и наземного блока приема и обработки данных.

Испытания измерительного блока. Испытания измерительного блока проводились в лабораторных и натурных условиях.

В лабораторных условиях моделирование тумана осуществлялось при помощи парогенератора. Поток водяного пара подавался в область размещения измерительного блока в течение одной минуты, что позволяло формировать аэрозольную среду, близкую по характеристикам к туману. До начала генерации пара концентрация взвешенных частиц в воздухе соответствовала фоновому уровню. После включения парогенератора наблюдалось резкое увеличение концентрации частиц в диапазонах: PM1 (0,3–1 мкм), PM2.5 (1–2,5 мкм), PM10 (2,5–10 мкм) таблица 2-3. После прекращения подачи пара концентрация частиц постепенно снижалась и возвращалась к значениям, близким к исходному уровню. Это подтвердило корректность работы датчиков.



Рисунок 2 – Блок-схема измерительного комплекса параметров тумана

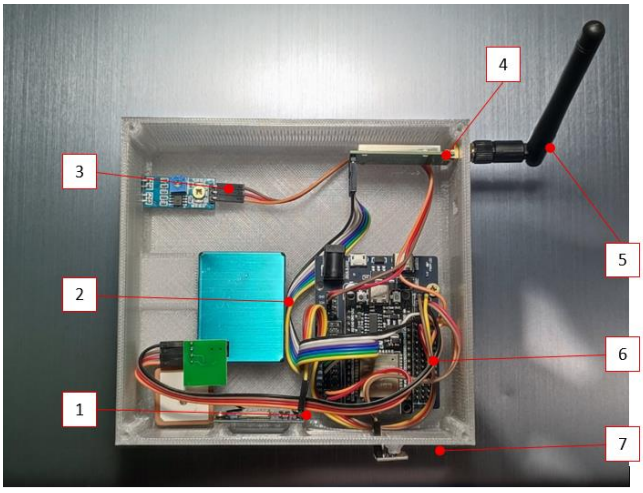


Рисунок 3 – Блок сбора и передачи параметров по радиоканалу:
1 - GPS модуль, 2 - датчик количества взвешенных частиц, 3 - датчик рассеянного отражения, 4 - радиомодуль, 5 - антенна, 6 - контроллер, 7 - датчик температуры, влажности, давления

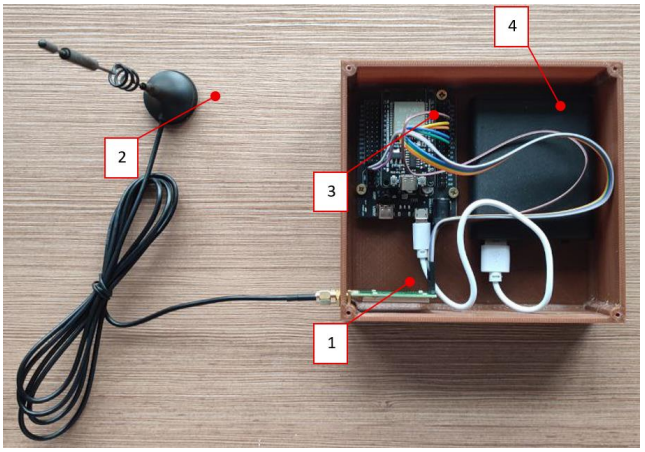


Рисунок 4 – Блок приема и обработки данных:
1 - радиомодуль, 2 - антенна, 3 - контроллер, 4 - источник питания

Таблица 2 – Показания датчиков до включения парогенератора

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
-19,4 °C	25,9 %	756,8 мм.рт.ст.	Нет	3 Мкм/м³	6 Мкм/м³	7 Мкм/м³

Таблица 3 – Показания датчиков после включения парогенератора

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
-12,6 °C	73,2 %	756,7 мм.рт.ст.	Есть	204 Мкм/м³	2654 Мкм/м³	4626 Мкм/м³

Наземные натурные испытания проводились 14 и 18 февраля 2026 года, район проведения испытаний - Московская область.

Испытания 14 февраля 2026 года. Погодные условия: температура воздуха: +1…+3 °C, относительная влажность: 92–100 %, атмосферное давление: 735 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 100–150 м.

В ходе измерений датчик рассеянного отражения зафиксировал наличие тумана, а датчик взвешенных частиц зарегистрировал увеличение концентрации аэрозольных частиц по сравнению с фоновыми значениями (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты натурных испытаний датчиков 14.02.2026

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
+ 5,6 °C	66,8 %	730,2 мм.рт.ст.	Есть	18 Мкм/м³	30 Мкм/м³	38 Мкм/м³

Испытания 18 февраля 2026 года. Погодные условия: температура воздуха: −19…−20 °C, относительная влажность: 72–75 %, атмосферное давление: 753 мм рт. ст., наличие тумана. Визуальная дальность видимости составляла приблизительно 50–100 м.

Результаты измерений показали аналогичную картину: датчик рассеянного отражения подтвердил наличие тумана, а концентрация взвешенных частиц в воздухе значительно превышала фоновый уровень (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты натурных испытаний датчиков 18.02.2026

Температура	Влажность	Давление	Туман	PM1.0	PM2.5	PM10
- 16,1 °C	49,4 %	748,8 мм.рт.ст.	Есть	99 Мкм/м³	169 Мкм/м³	230 Мкм/м³

Оценка дальности передачи данных выполнялась при наземном размещении передающего блока и при размещении его на борту самолета АН-2.

В наземных испытаниях блок передачи данных размещался на высоте 15 м. Блок приема данных находился в автомобиле, который удалялся от точки установки передатчика. Устойчивый прием телеметрии наблюдался на расстоянии до 14 км.

Летные испытания проводились на аэродроме Киржач. Блок передачи данных был установлен на борт самолета АН-2, а блок приема данных по радиоканалу размещался в мобильном пункте управления. Самолет АН-2 был поднят на высоту 200-250 метров. Полет проходил в зоне аэродрома в радиусе набора высоты вокруг аэродрома 5-7 км. Анализ передаваемых пакетов данных подтвердил отсутствие потерь информации.

Наземные и летные испытания радиоканала передачи данных показали устойчивый прием телеметрической информации.

Для оценки точности определения высоты измерительный блок размещался на различных высотах. Полученные результаты показали, что погрешность определения высоты по данным GPS составляет порядка 3–4 м, а по барометрическому датчику давления - около 1 м.

Заключение. Проведенные исследования подтвердили работоспособность разработанного измерительного комплекса. Используемые датчики обеспечивают измерение основных параметров атмосферной среды.

Применение беспилотных авиационных систем для мониторинга параметров тумана позволяет оперативно получать достоверную информацию о состоянии атмосферной среды и может быть использовано для обеспечения принятия обоснованных решений при проведении мероприятий по воздействию на переохлаждённые туманы и контроля результата.

Данное направление может стать основой для изучения процессов облакообразования и активного воздействия на них.

Список литературы

1. *Антонов С.В., Бычков А.А., Корнеев В.П., Щукин Г.Г.* Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в работах по искусственному регулированию осадков / Сборник материалов VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» – Спб. – 2020.

2. *Антонов С.В., Бычков А.А., Сергеев Б.Н., Частухин А.В., Щукин Г.Г.* Теоретическое обоснование применения беспилотных летательных аппаратов в работах по воздействию на переохлажденные туманы // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. Выпуск 662 «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». – Спб. – 2018. – С. 13-17.

3. *Борейшо А.С., Коняев М.А., Ким А.А.* Лидарные комплексы для исследования атмосферы, 224, изд-во «Лань». Санкт- Петербург, 243 с.

4. *Кадыгров Е.Н., Князев А.К., Вязанкин А.С.* Сравнительный анализ методов и приборов для измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром. -2023. – С. 417-426.

5. *Стерлядкин В.В., Горелик А.Г., Щукин Г.Г.* Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы» // III Всероссийские Армандовские чтения, МИ ВлГУ, 2013, С. 24 - 42.
6. *Страшко А.В. и др*. Применение беспилотных летательных аппаратов для определения термодинамического состояния пограничного слоя атмосферы / В сб.: Труды II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муромский институт (филиал) ФГБУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», 2018 С. 493 - 498.

ПРОГРАММА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С АМС И ИХ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

Добровольский А.В.
научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Восканян К.Л.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zlobik-dobrik123@mail.ru

Аннотация. В работе представлена программа для обработки данных с автоматической метеостанции на языке программирования Lua и программа для их визуализации на языке программирования Python.
Ключевые слова. Программа, автоматическая метеорологическая станция, первичный контроль данных, представление данных, визуализация данных.

PROGRAM FOR VISUALIZATION AUTOMATIC STATION DATA

Dobrovolsky A.V.
academic advisor Voskanyan K.L.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The paper presents a program for processing data from an automatic weather station in the Lua programming language and a program for their visualization in the Python programming language.
Keywords. Program, automatic weather station, primary data monitoring, data presentation, data visualization.

Получение метеорологических параметров является одним из важных элементов в прогнозе и мониторинге погоды. Для получение этих данных существуют различные метеостанции в том числе и автоматические (АМС) [1].

Для анализа информации требуется ее визуализация с помощью специального программного обеспечения (СПО). Такое программное обеспечение должно быть простым в использовании и доступным. Для получения простого и доступного инструмента, позволяющего наглядно анализировать информацию АМС было принято решение написать программу для обработки данных на языке Lua и программу для визуализации этих данных на языке Python, которая позволит в автоматическом режиме проводить первичный контроль данных, адаптировать их дискретность и проводить визуализацию метеопараметров.

Архив информации, полученный от автоматической метеостанции, формируется одним файлом в формате CSV за месяц и содержит информацию по: сроку измерения, атмосферному давлению, метеорологической дальности видимости (МДВ), направлению ветра, мнгновенной и максимальной скорости ветра, температуре, влажности и количеству осадков.

Что бы построить график по архиву данных нужно обработать информацию. Язык программирования Lua распознает данные CSV файла как текс, поэтому для начала программа разбивает этот текст на массивы данных каждый из которых отвечает за отдельную метеорологическую характеристику. Данные не имеющие значения в CSV файле не имеют обозначения, для того что бы учесть пропуски данных программа переводит их в значения NaN. Далее программа проводит осреднение значений за 10 минут если это требуется.

Далее программа автоматически записывает обработанные данные в формате CSV в файл «log.csv». Важно иметь в виду, что программа при повторном запуске будет перезаписывать данные в файле.

Язык Python воспринимает значения с входящей датой и временем как набор текста [2], и поэтому вводиться алгоритм перевода входящего параметра времени в формат понятный для языка программирования (рис. 1).

После чтения файла и обработки данных по времени программа запрашивает у пользователя по какой метеорологической характеристике необходимо визуализировать данные. На данный момент в программе на выбор предлагается 6 метеопараметров для вывода графика: температура, давление, скорость ветра, относительная влажность, метеорологическая дальность видимости и количество осадков.

```lua
function parseCSVLine(line)
    local result = {}
    local from = 1
    local sep = ";"
    local field
    while true do
        local start, finish = string.find(line, sep, from)
        if not start then
            table.insert(result, string.sub(line, from))
            break
        end
        field = string.sub(line, from, start - 1)
        table.insert(result, field)
        from = finish + 1
    end
    return result
end
```

Рисунок 1 – Часть программы Lua, отвечающая за чтение CSV файла

После запроса по заданному алгоритму происходит построение графика, в котором демонстрируется выбранный метеопараметр на оси y и время измерения на оси x (рис. 2). После построения график сохраняется в папке с программой в формате png.

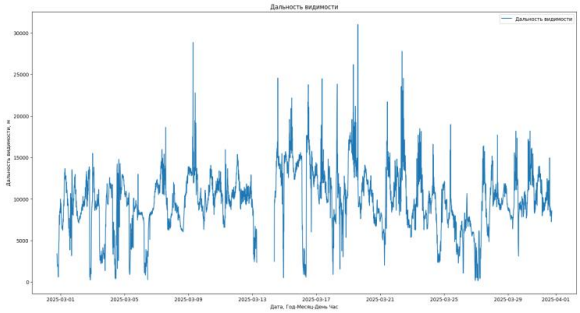


Рисунок 2 – Пример реализации графика метеорологической дальности видимости за один месяц

Предлагаемая программа доступна, проста в использовании, не требует от пользователя специальных навыков и может стать отличным инструментом для

визуализации данных АМС при отсутствии специального ПО или при удаленной работе с данными, в том числе в условиях дистанционного обучения.

Список литературы

1. *Восканян К.Л., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С.* Автоматические метеорологические станции: в 2 т. — Ч. 1. Тактико-технические характеристики: учебное пособие. — СПб.: РГГМУ, 2016. — 170 с.
2. *Васильев А.Н.* Программирование на Python в примерах и задачах, Эксмо, 2021. – 619 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Потапова В. Р.[1], Дьяченко Н. В.[2], Михтеева Е. Ю.[3], Потапова И. А.[4], Скобликова А. Л.[4], Яковлева Т. Ю.[5]

[1] Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

[2] Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербур

[3] Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург

[4] ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

[5] ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет Минздрава РФ, Санкт-Петербург

potapovaira@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается необходимость определения характеристик микроструктуры аэрозоля, включая коэффициент ослабления частиц. Это требует параметризации их оптико-микроструктурных свойств, что осложняется разнообразием оптических характеристик аэрозольных фракций. Моделирование рассеяния атмосферного аэрозоля помогает установить связь между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц. Рассматривается модель оптических свойств частиц, основанная на экспериментальных данных и распределении размеров, влияющих на коэффициент ослабления. Показано, что размеры частиц, измеренные оптическим счетчиком, меньше, чем те, что определены фильтровым устройством. Разработана модель неоднородной рассеивающей частицы с радиально изменяющимся показателем преломления оболочки. Полученные результаты позволяют адекватно интерпретировать экспериментальные данные и повышают точность измерений.
Ключевые слова. Моделирование, коэффициент ослабления, неоднородные частицы, аэрозоль, микроструктура, оптико-локационное уравнение, оптические методы, оптические свойства, трансмиссометрические измерения, фотоэлектрический счетчик частиц,

DETERMINATION OF AEROSOL MICROSTRUCTURE CHARACTERISTICS AND MODELING OF ITS OPTICAL PROPERTIES

Potapova V. R.[1], Dyachenko N.V.[2], Mikhteeva E. Yu.[3], Potapova I. A.[4], Skoblikova A. L.[4], Yakovleva T. Y.[5]

[1]Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, St. Petersburg
[2]Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia
[3]Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky of the Ministry of Defense of the Russian Federation, St. Petersburg

[4]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[5]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint Petersburg State Pediatric Medical University" of the Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg

Annotation. This article discusses the need to determine the characteristics of the aerosol microstructure, including the particle attenuation coefficient. This requires parameterization of their optical and microstructural properties, which is complicated by the variety of optical characteristics of aerosol fractions. Atmospheric aerosol scattering modeling helps establish the relationship between attenuation coefficient and particle concentration. A model of the optical properties of particles based on experimental data and the size distribution affecting the attenuation coefficient is considered. It is shown that the particle sizes measured by the optical counter are smaller than those determined by the filter device. A model of an inhomogeneous scattering particle with a radially varying refractive index of the shell has been developed. The results obtained make it possible to adequately interpret experimental data and increase the accuracy of measurements.
Keywords. Modeling, attenuation coefficient, inhomogeneous particles, aerosol, microstructure, optical-location equation, optical methods, optical properties, transmissometric measurements, photoelectric particle counter,

Разработка методов лидарного зондирования атмосферы, имеющих важное значение для экологического мониторинга как в арктических, так и в южных регионах, требует решения ряда научных задач, включая анализ данных, полученных с помощью лидара. Оптические методы зондирования позволяют оценить концентрацию и структуру атмосферных загрязнителей. В настоящее время в арктическом регионе наблюдается рост уровня загрязнения, вызванный множеством факторов, такими как лесные пожары, вулканические извержения и антропогенные воздействия крупных промышленных городов.

Для оценки влияния атмосферного загрязнения на климат необходимо идентифицировать различные типы загрязняющих веществ, включая парниковые газы и черный углерод. В этом контексте целесообразно использовать оптические методы зондирования [1-7]. Важно разработать подходы, позволяющие определить виды веществ на основе их оптических свойств с применением оптико-локационного уравнения. Однако неопределенность этого уравнения и математическая сложность обратной задачи затрудняют интерпретацию полученных данных и могут приводить к ошибкам в выводах [8-12].

Для повышения точности определения оптических параметров атмосферного аэрозоля применяются интегральные методы многопозиционного зондирования [13-22]. При выполнении лидарного зондирования в атмосфере с низким уровнем рассеяния на больших расстояниях от приемопередатчика увеличивается риск случайных и систематических ошибок, включая неточности, вызванные фоновым освещением [23].

Моделирование оптических свойств атмосферного аэрозоля и взаимосвязь с коэффициентом ослабления. Необходимость определения характеристик микроструктуры аэрозоля, включая коэффициент ослабления частиц, требует параметризации их оптико-микроструктурных свойств. Это осложняется разнообразием оптических характеристик аэрозольных фракций [24-28].

Среди прочих факторов, усложняющих задачу, можно выделить значительные изменения в рассеивающих свойствах частиц, которые не соответствуют теории рассеяния света однородной частицей. Моделирование рассеяния атмосферного аэрозоля на основе экспериментальных данных помогает установить связь между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц. В этом контексте проводится

моделирование оптических свойств аэрозоля с учетом полученных данных.

При одновременных лидарных, фотоэлектрических и трансмиссометрических измерениях выявлена связь между концентрацией частиц и коэффициентом ослабления. Важно отметить, что эта связь оказалась стабильной в ряде экспериментов и может быть использована для определения аэрозольного загрязнения в атмосфере.

Для объяснения полученных результатов рассматривается модель оптических свойств частиц, основанная на экспериментальных данных и распределении размеров частиц, влияющих на коэффициент ослабления аэрозоля. При этом учитываются результаты фильтровых измерений, полученные с помощью фильтрового устройства, проведенных одновременно с фотоэлектрическими измерениями. В атмосфере обнаруживаются частицы, состоящие из ядра и оболочки, обладающие различными оптическими свойствами, например, обводненные аэрозольные частицы. Также рассматривается зависимость между размерами частиц, определенными оптическим счетчиком *D*(ОС) и фильтровым устройством *D*(ФУ), и коэффициентом ослабления, как показано на рисунке 1.

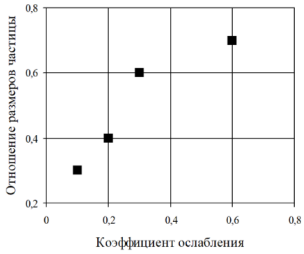


Рисунок 1 – Результаты сравнительного анализа размеров частиц, измеренных ОС, ФУ

Представленные данные показывают, что размеры частиц, измеренные с помощью оптического счетчика, меньше по сравнению с измерениями, полученными с фильтровым устройством. Это говорит о том, что индикатриса рассеяния при угле 90 градусов, пропорциональная квадрату размера частицы, оказывается меньшей для естественных частиц, чем для частиц, использованных при градуировке. Разница в размерах может быть значительной, особенно для крупных частиц, превышающих 1 мкм.

Анализ результатов моделирования свойств рассеяния излучения для частицы с переменным показателем преломления. Для более глубокого анализа данных полевых измерений используется модель неоднородной частицы, в которой радиально изменяется показатель преломления оболочки, в то время как ядро остается однородным. Далее представлены результаты расчетов для частицы с ядром из сажи, обладающей показателем преломления 1.82-0.64i, как показано на рисунке 2

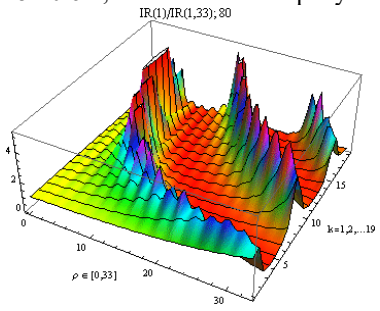


Рисунок 2 – Зависимость относительной индикатрисы рассеяния от структуры и размера частицы

Здесь IR(1)/I(1,33) – относительная индикатриса рассеяния. Вертикальный угол рассеяния применен для моделирования процесса рассеяния в фотоэлектрическом счетчике частиц., IR=$I(L)/I(0)$, $L=\rho_1-\rho_0$ – безразмерная толщина оболочки частицы,

$$\text{IR(1.33):} \quad m=(0.98-1.28i)/(1+d)+0.84+0.64i, \tag{1}$$

$$\text{IR(1):} \quad m=(1.64-1.28i)/(1+d)+0.18+0.64i, \tag{2}$$

где

$$d=(\rho-\rho_0)/(\rho_1-\rho_0),\ \rho=\rho_0\ (1+0{,}01k).$$

Величина (1+0,01k) отражает соотношение между размером частицы с покрытием и размером её ядра. Формула (1) описывает неоднородное покрытие из сажи с добавлением воды, в то время как формула (2) моделирует такое покрытие без воды. На рисунке 2 представлены зависимости между величинами IR(1)/IR(1,33) и ρ_0, k, где наблюдаются области минимумов для отношений IR(1)/IR(1,33). Рисунок 3 демонстрирует значение G величины k, соответствующее минимуму относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненной оболочки ядра.

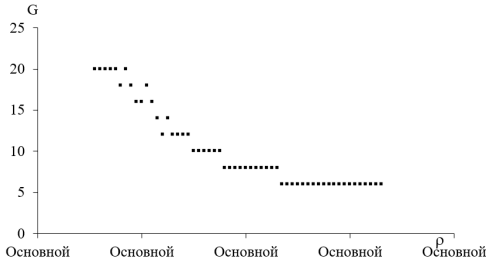


Рисунок 3 – Значение величины k, соответствующее минимуму индикатрисы

На рисунке 4 показано, что минимальное значение относительной индикатрисы рассеяния варьируется для частиц разных размеров, что негативно влияет на точность оптических измерений характеристик аэрозоля.

Полученные результаты подтверждают эксперименты, демонстрирующие значительное снижение индикатрисы рассеяния в результате структурирования частицы. Расчеты показывают, что эффект уменьшения индикатрисы рассеяния из-за структурированности менее выражен при углах рассеяния меньше 30 градусов.

Таким образом, была разработана модель неоднородной рассеивающей частицы, состоящей из однородного ядра и оболочки с переменным показателем преломления, что позволяет адекватно интерпретировать полученные в эксперименте данные.

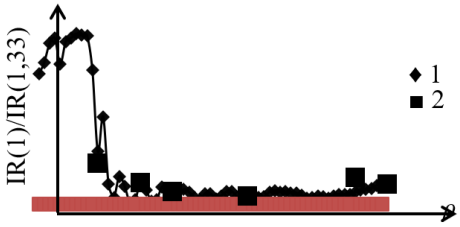


Рисунок 4 – Минимум относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненного покрытия. Результаты измерений (1) и расчетов (2)

Выводы. В результате проведенного исследования была создана модель неоднородной рассеивающей частицы, состоящей из однородного ядра и оболочки с переменным показателем преломления. Эта модель позволила точно интерпретировать экспериментальные данные и улучшить понимание оптических свойств аэрозолей в атмосфере. Установленная связь между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц предоставляет инструменты для более точного определения аэрозольного загрязнения.

Моделирование показало, что рассеяние света не всегда соответствует теории для однородных частиц, особенно при изменениях размеров и структурирования частиц. Полученные результаты подчеркивают важность учета различных оптических свойств при изучении атмосферных аэрозолей. Кроме того, наблюдающиеся различия в размерах частиц, измеренные различными методами, указывают на необходимость дальнейшего совершенствования измерительных технологий.

Таким образом, это исследование открывает новые возможности для более глубокого анализа и мониторинга атмосферного загрязнения, что имеет важное значение для экологического контроля и оценки воздействия аэрозолей на климат.

Список литературы

1. *Егоров А.Д., Егорова И.А.* Способ определения коэффициента ослабления в центре участка неоднородной атмосферы // Патент на изобретение RU 2041475 C1, 09.08.1995. Заявка № 5064269/10 от 08.10.1992.
2. *Егоров А.Д., Егорова И.А.* Способ определения концентраций газовых компонентов слоя атмосферы // Патент на изобретение RU 2017139 C1, 30.07.1994. Заявка № 4918909/25 от 27.03.1991.
3. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А.* Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 11. С. 71-78.
4. *Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Shchadin A.V.* Atmospheric aerosol measurements and reliability problem: new results // International Journal of Remote Sensing, 2014, 35, pp. 5750-5765.
5. *Егоров А.Д., Потапова И.А.* Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. № 553. 2004. С. 131-142.
6. *Егоров А.Д., Потапова И.А.* Способ определения прозрачности атмосферы // Патент на изобретение RU 2439626. 2012. C2, 10.01.2012. Заявка № 2009144060/28 от 27.11.2009.
7. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А.* Лидарное зондирование атмосферного аэрозоля // Метеорологический вестник. Т. 5. № 2. 2013. С. 42-51.
8. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В.* Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. № 555. 2006. С. 30-34.
9. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А.* Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы // Оптический журнал. Т. 80. № 3. 2013. С. 58-60.
10. *Потапова И.А.* Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 9. С. 86-91.
11. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б.* Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 17. С. 51-55.
12. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржоненицкая Ю.Б.* Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Депонированная рукопись № 1230-гм2005 16.12.2005.
13. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б.* Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 25-28.

14. *Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G.* Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // Journal of Optical Technology. 2001. Т. 68. № 11. С. 801-804.
15. *Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Саноцкая Н.А., Яковлева Т.Ю.* Итерпретация слабого радиационного излучения при лидарном зондировании атмосферы // Сборник тезисов международного симпозиума «АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА» (МСАРД-2019) СПб. 2019. С. 189-190.
16. *Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Косцов В.В., Калиничев Д.В., Куклин О.А., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю.* Алгоритм лидарного определения фоновой засветки и коэффициента ослабления слабо замутненной атмосферы без итерационного процесса // В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 58-60.
17. *Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Косцов В.В., Калиничев Д.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю.* Влияние фоновой засветки на точность определения прозрачности слабо замутненной атмосферы // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. № 4 (36). 2019. С. 49-52.
18. *Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Косцов В.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю.* Лидарная прозрачнометрия слабо замутненной атмосферы с учетом фоновой засветки // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. № S1. 2022. С. 47-50.
19. *Потапова И.А., Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А., Скобликова А.Л., Яковлева Т.Ю.* Модель процесса экстремального рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 5. С. 376-383.
20. *Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю.* Определение фоновой засветки слабо замутненной атмосферы и ее влияние на точность определения прозрачности // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». 2022. С. 372-376.
21. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Ошуркова А.А.* Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. № 18. 2011. С. 48-56.
22. *Potapova I.A., Bobrovsky A.P., Dyachenko N.V., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Mikhteeva E.Yu., Khlyabich P.P., Kostsov V.V.* Method for solving the inverse problem of lidar sounding of a weakly turbid atmosphere // Journal of Instrument Engineering. Т. 64. № 5. 2021. С. 384-391.
23. *Егоров А.Д., Ржонсницкая Ю.Б., Потапова И.А., Саноцкая Н.А.* Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений // Естественные и технические науки. 2010. № 1 (45). С. 215-222.
24. *Егорова И.А.* Лазерное многолучевое определение метеорологической дальности видимости в неоднородной атмосфере // Труды конференции молодых ученых национальных гидромедслужб стран СНГ. Москва. ВНИИГМИ. 1999. С. 51-52.
25. *Егоров А.Д., Егорова И.А., Оразцов С.П.* Inuniform particle sizing by optical counter // PARTEC 98 7th European Symposium Particle Characterization. Nürnberg: Nürnberg Messe CmbH. 1998. Pp. 863-866.
26. *Егоров А.Д., Егорова И.А.* Comparative analysis of multipositional remote sensing techniques // Image processing, and synthetic Aperture Radar for Remote sensing, proc. of SPIE. 1997. V.3217. Pp.398-403.
27. *Егоров А.Д., Егорова И.А.* Вопросы повышения эффективности интерпретации лидарной информации // В кн. “Альтернативные направления интерпретации лидарной информации”. ГГО. СПб. 1993. С. 69 – 79
28. *Егоров А.Д., Потапова И.А.* Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2003. № 552. С. 14-18.

ИМПУЛЬСНО-ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО АЭРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЗОНДА

Кудинов С.И., Иванов В.Э., Плохих О.В., Гусев А.В., Букрин И.В.
ИРИТ-РТФ, Уральский Федеральный Университет

Аннотация. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований импульсно-фазового метода измерения наклонной дальности до аэрологического радиозонда в российской системе радиозондирования атмосферы.
Ключевые слова. Аэрологический радиозонд, когерентный приемопередатчик, система радиозондирования, радиолокатор параметров ветра.

PULSE-PHASE METHOD OF MEASURING THE RANGE TO AN UPPER-AIR SONDE

Kudinov S.I., Ivanov V.E., Plokhikh O.V., Gusev A.V., Bukrin I.V.
IRIT-RTF, Ural Federal University

Abstract. The results of experimental studies of a pulse-phase method for measuring the slant range of an upper-air radiosonde in the Russian atmospheric radiosonde system are discussed.
Keywords. Upper-air radiosonde, coherent transceiver, radiosonde system, wind radar.

Отечественные системы радиозондирования атмосферы построены на радиолокационном принципе определения координат радиозондов, снабженных сверхрегенеративными приемопередатчиками (СПП) [1]. В работах [2, 3] рассмотрены некоторые теоретические вопросы реализации импульсно-фазового метода определения наклонной дальности и мгновенной скорости движения АРЗ снабженного СПП. Опыт разработки когерентного приемопередатчика для радиолокатора профиля ветра [4] позволил провести экспериментальные лабораторные исследования предложенного метода.

Аэрологические РЛС измеряют наклонную дальность до АРЗ по ответному сигналу СПП в виде «ответной паузе». В когерентном режиме работы приемопередатчика РЛС возможен режим фазовой синхронизации ответных радиоимпульсов СПП. Это дает возможность за счет цифровой обработки сигнала СПП измерять наклонную дальность до АРЗ, оценивать доплеровское смещение несущей частоты АРЗ и определять мгновенную скорость движения АРЗ импульсно-фазовым методом.

Теоретически, это процесс можно пояснить, анализируя характеристики радиоимпульсов СПП без запросного сигнала и под его воздействием. При включении СПП флуктуационные колебания в течение приемного интервала создают в его узкополосном линейном контуре стационарный нормальный случайный процесс. Запросный сигнал $s(t)$ практически можно представить в виде высокочастотного колебания с постоянной амплитудой и нулевой фазой

$$s(t) = U_0 \cos(\omega_0 t) \quad (1)$$

где U_0 – амплитуда радиоимпульсов запросного сигнала; ω_0 – несущая частота запросного сигнала.

При поступлении запросного сигнала в контур СПП в течение приемного интервала (рисунок 2) суммарный процесс смеси сигнала и шума также будет описываться случайной функцией, которую, в свою очередь, можно представить в виде

$$\eta(t) = E(t)\cos[\omega_0 t\text{-}\varphi(t)] \quad (2)$$

где $E(t)$, $\varphi(t)$ – огибающая и фаза случайного процесса суммы сигнала и шума.

Описание временной статистической реализации одиночного радиоимпульса СПП можно представить в следующем виде:

$$F(t) = A_{\Sigma} U(T, \Delta\tau_3) \exp\left[j(\omega_0 t + \varphi)\right], \quad (3)$$

где A_{Σ} – амплитуда флуктуаций; $U(t,\ \Delta\tau_3)$ – функция, описывающая огибающую радиоимпульса; $\Delta\tau_3$ – флуктуации времени задержки переднего фронта радиоимпульсов.

Спектр реализации радиоимпульсного процесса является случайной функцией, определяется с помощью преобразования Фурье, может быть представлен в следующем виде:

$$g(\omega, \varphi, \Delta\tau_3) = A_{\Sigma} \exp(j\varphi) \int_{-\infty}^{+\infty} U(t, \Delta\tau_3) \exp[-j(\omega - \omega_0)t]\, dt \quad (4)$$

Спектр реализации огибающей радиоимпульсов СПП имеет совершенно другую структуру, так как после амплитудного детектора информация о мгновенной фазе радиоимпульсов будет потеряна. Формулу для определения спектра огибающей радиоимпульсов СПП можно представить в виде

$$G(\Omega, \Delta\tau_3) = A_{\Sigma} \exp\left[-j\delta(\Delta\tau_{3\,ср} + \Delta\tau_3\right] \int_{-\infty}^{+\infty} U(t, \Delta\tau_3) \exp[-j\Omega t]\, dt \quad (5)$$

где $A_{\Sigma} = A_{ст} \exp\left[-j\delta(\tau_{з\,ср} + \Delta\tau_з)\right]$ - амплитуда флуктуационных колебаний; Ω – круговая частота анализа спектра огибающей радиоимпульсов СПП.

В общем случае, при воздействии внешнего гармонического сигнала, плотность непрерывной $W_н(\omega)$ и дискретной $W_д(\omega)$ частей спектра высокочастотного излучения приемо-передатчика можно получить с помощью усреднения спектра одиночной реализации. Выражения, описывающие плотность непрерывной и дискретной составляющих спектра радиоимпульсов целесообразно привести к виду [6]:

$$W_H(\omega) = 2\theta_c^{-1}\{K(\omega) - [H(\omega)]^2,$$
$$W_D(\omega) = 4\pi\theta_c^{-2}[H(\omega)]^2 \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \delta(\omega - 2\pi n F_c). \quad (6)$$

Здесь $K(\omega) = m\left[g(\omega,\ \varphi,\ \Delta\tau_з)^2\right]$ – математическое ожидание квадрата спектральных составляющих суммарного колебания в контуре СПП (средняя мощность суммарного колебания); $H(\omega)^2 = m\left[\ g(\omega,\ \varphi,\ \Delta\tau_з)\right]^2$ – квадрат математического ожидания дискретных составляющих колебания в контуре СПП (средняя мощность дискретных составляющих); θ_c – скважность радиоимпульсов; n – номер гармоники дискретной составляющей спектра СПП.

Анализ выражений (6) совместно с (4, 5) показывает их существенную зависимость от закона распределения фазы начальных колебаний. При равновероятном распределении фазы начальных колебаний ($s \to 0$) анализ выражений (5) показывает, что $H(\omega) = 0$, поэтому дискретная составляющая радиочастотного спектра полностью отсутствует $W_D(\omega) = 0$. Поскольку $K(\omega) > 0$, то флуктуационная составляющая спектра существует и обеспечивает излучение мощности СПП.

Можно показать с учетом приведенных зависимостей, что при любом законе распределения начальной фазы колебаний в момент запуска плотность распределения фазы автогенератора СПП в стационарном режиме стремится к определенному состоянию.

В СВЧ-автогенераторе переходной режим не является изохронным, поскольку происходит изменение частоты и фазы автоколебаний вследствие зависимости параметров активного элемента от амплитуды колебаний. Однако при многократном запуске СПП траектория переходного процесса существенно не изменяется, поэтому

плотность распределения фазы в стационарном режиме будет практически полностью связана с законом распределения фазы в приемном режиме. При отношении сигнал/шум $s > 3$ в приемном режиме СПП функция плотности распределения фазы ответных радиоимпульсов стремится к дельта-функции. В этом случае спектр радиоимпульсов СПП $G_{спп}$ содержит флуктуационную $U_ш$ и дискретные $U_д$ спектральные составляющие (рис. 1). Дискретные составляющие спектра СПП определяются частотой повторения радиоимпульсов (частотой суперизации) $F_с$ приемопередатчика радиозонда. Следует подчеркнуть, что они оказываются связанными со спектральными составляющими запросных радиоимпульсов РЛС. Радиальная скорость движения АРЗ определяется по частоте изменения уровня ответного сигнала.

Изложенные элементы теории фазовой синхронизации позволяют пояснить работу базовой РЛС в когерентном режиме измерения дальности до АРЗ. Под действием запросных радиоимпульсов $U_{зс}$ (см. рисунок 2, а) СПП АРЗ формирует ответный сигнал по дальности в виде приращения длительности (энергии) ответных радиоимпульсов СПП – «первичной реакции» ΔE_1 (см. рисунок 2, б), ΔE_2 – энергии вторичной реакции СПП, ΔE_3 - энергии третичной реакции СПП, что позволяет обеспечить сопровождение ответного сигнала и осуществить измерение наклонной дальности до АРЗ.

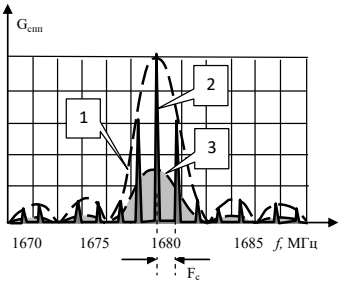


Рисунок 6 – Спектр радиоимпульсов СПП:1 – огибающая спектра излучения СПП; 2 – амплитуда дискретной спектральной составляющей $U_д$; 3 – уровень флуктуационной составляющей спектра $U_ш$.

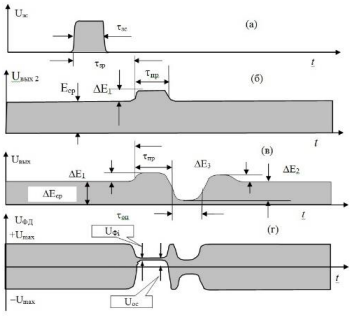


Рисунок 7 – Осциллограммы ответного сигнала СПП по дальности в разных режимах работы базовой СР: $U_{вых-2}$ – первичная реакция СПП. (б); $U_{вых}$ – вторичная реакция (ответная пауза) СПП (в); $U_{ФД}$ - импульсно-фазовый сигнал СПП (г).

В когерентном режиме работы передатчик РЛС генерирует когерентные запросные радиоимпульсы, фаза которых связана с фазой гетеродинов приемного устройства РЛС (см. рисунок 2, г). Радиоимпульсы СПП имеют случайную фазу, поэтому на выходе фазового детектора (ФД) приемного устройства РЛС уровень несинхронного

сигнала меняется от плюс U_{max} до минус U_{max}. При совпадении во времени запросных радиоимпульсов с радиоимпульсами СПП формируется ответный сигнал в виде $U_{Фi}$ и $U_{зс}$, (см. рисунок 2, г). Сигнал $U_{Фi}$ показывает фазовую синхронизацию импульсов СПП с фазой запросных радиоимпульсов $U_{зс}$. Уровень сигнала $U_{ос}$ изменятся в пределах от плюс U_{max} до минус U_{max} с частотой Доплера.

Ответный сигнал СПП на выходе фазового детектора (ФД) приемного устройства РЛС формируется в виде переменного уровня $U_{ос}$, позволяет кроме измерения наклонной дальности, дополнительно определить мгновенную скорость движение АРЗ за счет эффекта Доплера (см. рисунок 2, г). Это позволяет измерять мгновенную скорость профиля ветра. Автосопровождение ответного сигнала по дальности и измерение угловых координат АРЗ обеспечивает непрерывное определение его пространственных координат, построение профиля метеорологических параметров и его вывод потребителю.

На рисунке 3, а и 3, б приведены осциллограммы ответного импульсно- фазового сигнала СПП по дальности лабораторного макета когерентной РЛС при уровне запросного сигнал минус 110 дБ/Вт и длительности запросных когерентных радиоимпульсов τ = 1,2 мкс. На рисунках показаны импульс синхронизации (внизу), огибающая запросного радиоимпульса (вверху), в середине показан ответный сигнал на выходе фазового детектора макета РЛС. Изменение полярности фазы ответного сигнала связано с изменением фактической длины СВЧ кабеля на половину длины волны запросного сигнала в процессе эксперимента.

Необходимо подчеркнуть, что осуществление работы СПП в режиме фазовой синхронизации (ФС) дает следующие преимущества работы СР:

1. Фазовая чувствительность СПП на 15–20 дБ превосходит его чувствительность в классическом режиме вторичной реакции и составляет минус (110 – 115) дБ/Вт. Это позволяет соответственно снизить мощность запросного радиоимпульса передатчика РЛС.

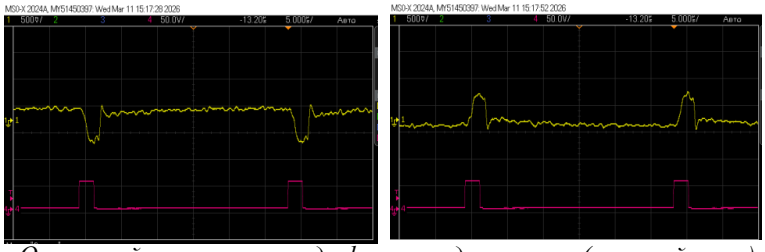


Рисунок 3 – Ответный сигнал на выходе фазового детектора (желтый цвет) при длительности запросного сигнала τ = 1,2 мкс (огибающая запросного сигнала – красный цвет) и уровнем входного сигнала минус 115 дБ/Вт.

2. Длительность радиоимпульсов СПП в режиме фазовой синхронизации может быть установлена в 2 – 3 раза больше, чем в режиме ответной паузы. Это соответственно уменьшает ширину спектра излучения СПП, повышает уровень сигнала на входе приемного устройства РЛС, повышает электромагнитное совместимость СР с другими радиосистемами.

3. Прием когерентных ответных радиоимпульсов СПП позволяет измерять наклонную дальность, частоту Доплера и определять мгновенную скорость движения радиозонда.

4. Оценки показывают, что в условиях серийного производства настройка и испытания СПП в режиме фазовой синхронизации требуют существенно меньших затрат.

Приведенные материалы, поясняющие импульсно-фазовый метод измерения дальности, обосновывают целесообразность применения метода в перспективной СР путем разработки специального ПО в системе цифровой обработки сигналов РЛС.

Список литературы

1. *В.Э. Иванов, М.Б. Фридзон, С.П. Ессяк*. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. / Под ред. В.Э. Иванова. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 596 с. ISBN 5-7691-1513-0.
2. *И.В. Букрин, А.В. Гусев, С.И. Кудинов, В.Э. Иванов, О.В. Плохих, С.Н. Шабунин*. Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере. / Уральский радиотехнический журнал, Екатеринбург: 2021 Т.5 №1, 215 с. С.32-48, ISSN 2588-0454.
3. *Богатырев Е.В., Галеев Р.Г., Иванов В.Э., Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Черных О.А.* Метод доплеровского определения параметров движения аэрологического зонда радиолокационной системы// Успехи современной радиоэлектроники. 2025. Т. 79. № 2. С. 39–51. DOI: 10.18127/j20700784-202502-05.
4. *Bukrin; Sergey I. Kudinov; Viacheslav E. Ivanov; Oleg V. Plokhikh* Main Characteristics of Clear Sky Wind Profiler/Ilya V. / 2025 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT) Yekaterinburg, Russian Federation, DOI:10.1109/USBEREIT65494.2025.11054102.

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПРИБРЕЖНОГО РЫБОЛОВСТВА КАК ИНСТРУМЕНТ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОРГАНОВ ВЛАСТИ

Владимирова Н.А.[1], Гершензон О.Н. [1], Никитская К.Е. [1], Куракина И.Н. [1], Алейников А.А. [1], Балагуров А.А.[2], Лисицын Д.В. [2], Савостин А.А. [2]
[1] ООО «Лоретт», Москва, Россия
[2] Некоммерческий проект «Прозрачный мир», Россия
nadiopt@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты совместной разработки ООО «Лоретт» и проекта «Прозрачный мир» — технологии спутникового мониторинга прибрежного рыболовства, применяемой для экологического обеспечения деятельности органов власти в период лососёвой путины на Сахалине.
Ключевые слова. Спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), ставные невода, экологический контроль, охрана водных биоресурсов, Сахалин.

SATELLITE MONITORING OF COASTAL FISHERIES AS A TOOL FOR ENVIRONMENTAL SUPPORT AND CONTROL FOR PUBLIC AUTHORITIES

Vladimirova N.A.[1], Gershenzon O.N.[1], Nikitskaya K.E.[1], Kurakina I.N.[1], Aleinikov A.A.[1]
Balagurov A.A.[2], Lisitsyn D.V.[2], Savostin A.A.[2]
[1] LLC "Lorett", Moscow, Russia
[2] Non-profit project "Transparent World", Russia

Abstract. The paper presents the results of a joint development by LLC "Lorett" and the "Transparent World" project — a technology for satellite monitoring of coastal fisheries applied for environmental support of public authorities' activities during the salmon fishing season on Sakhalin Island.
Keywords. Satellite monitoring, remote sensing of the Earth (RSE), set nets, environmental control, protection of aquatic biological resources, Sakhalin.

Введение. Тихоокеанские лососи (горбуша, кета) являются ключевым звеном экосистем Дальнего Востока, поскольку они связывают морские и речные биоценозы [1]. Их нерестовая миграция — критический период, от успешности которого зависит воспроизводство популяций и здоровье прибрежных территорий. Однако интенсивный промысел ставными неводами, особенно с нарушениями установленных правил, создаёт угрозу перелова и перекрытия путей миграции к нерестилищам.

Существующая система контроля со стороны органов власти (Росрыболовство, региональные комиссии) часто сталкивается с нехваткой оперативных и объективных данных о фактической расстановке орудий лова на акваториях протяжённостью в сотни километров. В связи с этим целью данной работы является демонстрация возможностей совместной технологической разработки ООО «Лоретт» и проекта «Прозрачный мир» для оперативного экологического обеспечения прикладных задач государственного контроля в период лососёвой путины. Проект объединяет более чем 35-летнюю экспертизу специалистов «Лоретт» в создании систем приёма и обработки спутниковых данных [2] и опыт «Прозрачного мира» в разработке алгоритмов тематической обработки для решения природоохранных задач.

Технологическая основа мониторинга

Ключевым элементом системы является геопортал, на который практически в реальном времени подгружаются космические снимки Landsat 8, 9, Sentinel-1 и Sentinel-2. Это обеспечивает технологическую независимость и оперативность получения информации, критически важную в период путины, когда задержки в несколько дней могут сделать контроль бесполезным. В 2025 году мониторинг осуществлялся на специализированном портале geo-class.ru (рисунок 1), разработанном при участии проекта «Прозрачный мир». Платформа интегрирует приём и автоматизированную предобработку оптических (Sentinel-2, Landsat-8/9) и радарных (Sentinel-1) данных, накладывает их на цифровые слои с границами рыболовных участков (РЛУ) и предоставляет инструментарий для точных измерений. Такой подход позволяет не только обнаруживать ставные невода (определяющиеся визуально на оптических снимках и благодаря модуляции шероховатости водной поверхности – на радарных), но и с высокой точностью оценивать их параметры.

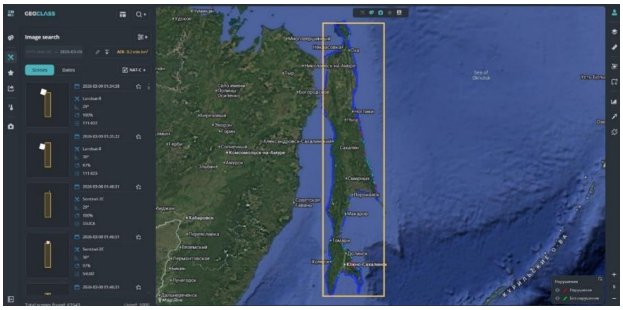


Рисунок 1 – Геопортал для мониторинга ставных неводов на Сахалине

Результаты мониторинга промысла 2025 года

В период с 1 июля по 15 октября 2025 года с помощью разработанной системы был проведён сплошной мониторинг побережья Сахалина в Восточно-Сахалинской подзоне и Северо-Западном промысловом районе. Всего было проанализировано более 100 объектов (ставных неводов) на 50+ РЛУ. Целью являлось выявление нарушений для последующего информирования Сахалино-Курильского территориального управления (ТУ) Росрыболовства.

Мониторинг проводился с 1 июля по 15 октября 2025 года — в периоды активного промысла горбуши и кеты. Для каждого выявленного невода фиксировались:

- дата и тип спутникового снимка,
- номер РЛУ и наименование пользователя,
- фактическая длина невода,
- расстояние до устья ближайшей нерестовой реки,
- наличие/отсутствие нарушений по категориям, указанным в решениях Комиссии по регулированию добычи (вылова) анадромных видов рыб в Сахалинской области.

Анализ проводился вручную операторами с последующей верификацией. Все данные заносились в сводную таблицу. По каждому случаю нарушения правил проводилось информирование заинтересованных органов федеральной и региональной власти.

В результате было выявлено 55 неводов с нарушениями (42% от общего числа), что подтверждает высокую эффективность космического контроля. Были выявлены следующие нарушения установленных требований:

1) превышение предельной разрешенной длины ставного невода;
2) выход ставного невода за границы РЛУ;
3) нарушение минимальных установленных расстояний между ставным неводом и устьем ближайшей нерестовой реки, между двумя ставными неводами;
4) установка ставных неводов в отсутствие решения Комиссии об утверждении места добычи и места постановки орудий добычи (точки постановки).

На рисунке 2 показано, как выглядит выход ставного невода за границы РЛУ на снимке Sentinel-2.

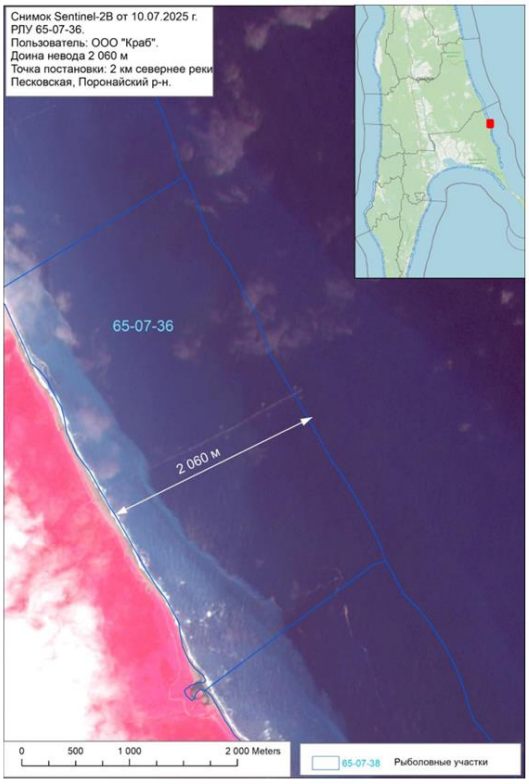


Рисунок 2 – выход ставного невода за пределы РЛУ на космическом снимке Sentinel-2

Наиболее частое нарушение — превышение длины в 1000 м на участках юго-восточного побережья Сахалина (от мыса Муловского до мыса Острый и от мыса Свободный до мыса Анива), где в 2025 году действовало специальное ограничение.

Заключение и перспективы

Проведённый мониторинг подтвердил, что совместная разработка ООО «Лоретт» и проекта «Прозрачный мир» является действенным инструментом экологического обеспечения прикладных задач органов власти. Она позволяет:

1. Обеспечить прозрачность: объективно фиксировать фактические нарушения или корректную работу рыбопромышленников.
2. Повысить оперативность: выявлять нарушения на ранней стадии и предоставлять верифицированные данные (включая координаты, дату снимка, промеры) для составления протоколов.
3. Создать доказательную базу: все нарушения документируются фрагментами спутниковых снимков, что исключает возможность их оспаривания.

Анализ сезона 2025 года показал, что для повышения эффективности необходимо к началу следующей путины интегрировать в систему мониторинга актуальные цифровые слои с утверждёнными точками постановки неводов, дифференцированными сроками промысла и пользователями РЛУ. Это позволит перейти от выборочного анализа к автоматизированной системе мониторинга соблюдения всех параметров промысла в режиме, близкому к реальному времени, обеспечивая тем самым надежную защиту пропуска лососей на нерест и сохранение экологического баланса региона.

Список литературы

1. *Шунтов, В.П.* Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Т. 1: [монография] / О.С. Темных; Тихоокеан. науч.-исслед. рыбохоз. центр (ТИНРО-центр); В.П. Шунтов. — Владивосток: ТИНРО-Центр, 2008. — 482 с.: ил. — Библиогр.: с. 453-480.— ISBN 978-5-89131-084-1. — URL: https://rucont.ru/efd/278347 (дата обращения: 09.03.2026)
2. *Гершензон В.Е., Дорофеева М.В*. Оперативный спутниковый мониторинг: Опыт организации всероссийского конкурса для школьников в сфере космических технологий / Владимир Гершензон, Мария Дорофеева. – М., Виртуальная галерея, 2024. – 152 с., ил. ISBN 978-5-98181-213-2

БАЗА – КАК МЕРА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОТОКОВ

Шейнов Р.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
sheynov.07@mail.ru

Аннотация. The possibility of using the concept of “base” as a method for determining vertical flows is being considered.
Ключевые слова. База, вертикальные потоки, ветер, спектр сигнала, шум.

THE BASE – AS A MEAUSURE OF IDENTIFICATION OF VERTICAL FLOWS

Sheynov R.A.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The possibility of using renewable resources to ensure the economic and social development of the Arctic region is being considered.
Keywords. Base, vertical motion, wind, signal spectrum, noise

Первые исследования за облачностью и различными типами осадков с помощью радиолокационных методов начались еще более 70-80 лет назад. Результаты данных

изысканий, полученных из экспериментов с сигналом сантиметрового диапазона, показали, что можно идентифицировать облака по разнообразным типам и выявлять различного рода осадки. В свою очередь большой объем метеорологической информации, полученный из первых метеорологических радиолокаторов, позволил распознавать опасные явления погоды. [1,2]

В текущих технологических реалиях радиолокационные комплексы – многогранные объекты/совокупность объектов, призванных в режиме квазиреального времени идентифицировать метеорологическую обстановку вокруг. Метеорологическая обстановка может быть представлена такими объектами как:

1. Облачность;
2. Осадки
3. Гроза и град;
4. Явления, связанные с ветром;
5. Специфические явления: пыльная буря; скопление насекомых; птицы и т.п. [3]

Их главная цель должна состоять в том, что необходимо своевременно предупреждать о явлениях, связанных с облачностью, что и определяло значения их параметров.

Изыскания в области неоднородного ветрового поля появились только после внедрения в эту область техники когерентности. До этого исследования окружающей обстановки проводились только с помощью мощности.

Шаги в этом направлении были сделаны различными авторами. Имеется в виду разработка метода распознавания и определения параметров сдвига ветра с помощью оценок ширины спектра принимаемого радиолокационного сигнала [4]. В приведенном исследовании рассматривали его особенность, связанную с его значительными размерами в горизонтальной плоскости в двух точках. Наблюдения показали, что на карте оценки ширины спектра появляются зоны повышенных и пониженных значений данного параметра, позволяющих определить сдвиг ветра.

Немало важно отметить, что с ветром связаны явления, распространяющиеся не только по одной координате, но порой являющиеся и еще более опасными, нежели чем сдвиг.

Яркие представители таких явлений:

1. смерч,
2. шквал,
3. микрошквал,
4. восходящие конвективные потоки.

Для идентификации подобных явлений рядом ученых (Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В.., Щукин Г.Г.) был предложен метод, основанный на оценках нового параметра сигнала – базы [5, 6].

База - произведение ширины энергетического спектра принимаемых отражений на интервал корреляции этого случайного процесса. При невозмущенной атмосфере спектр и корреляционная функция эхо-сигнала имеют Гауссову форму [7] и их вторые центральные моменты связаны обратной пропорциональной зависимостью, т.е. при перемножении дают единицу. Если же в элемент разрешения радиолокатора попадают две воздушные массы с разными характеристиками (что имеет место при наблюдении неоднородности ветрового поля), спектр сигнала оказывается состоящим из двух Гауссиан. Указанное соотношение нарушается и база приобретает значение, отличное от единицы. В отличие от ширины спектра, значение которой может определяться различными изменениями распределения ветра в наблюдаемом пространстве (в том числе и неопасными), база является индикатором попадания в луч радара резкой неоднородности, как правило, представляющей опасность для воздушных судов.

Зависимость величины базы сигнала от отношения шум/сигнал:

$$\xi = \frac{P_{\text{ш}}}{P_1 + P_2} \quad (1)$$

При различных значениях отношения ширины спектра сигнала, отраженного от зоны вертикального потока, к ширине спектра фонового сигнала

$$\varepsilon = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad (2)$$

До сих пор исследовалась информативность нового параметра при различных соотношениях значений ширины спектра и мощности отражений от двух одновременно наблюдаемых воздушных масс [8]. Теоретические расчеты показали положительные результаты.

На рисунке 1 приведены полученные графики величины базы сигнала (сплошные линии) и отношения ширины спектра суммарного сигнала к ширине спектра отражений от области фона (пунктирные линии) для случая $P_1 = P_2$иследующих величин ε:

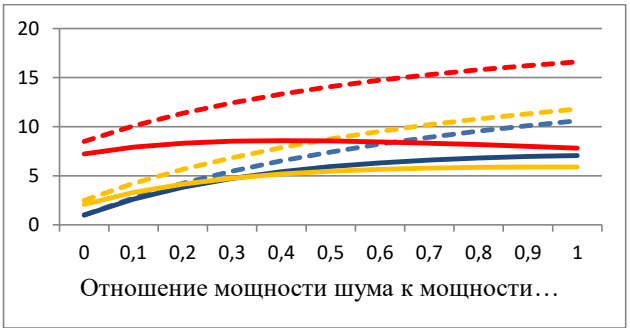


Рисунок 1 – Зависимость величины базы и ширины спектра суммарного сигнала от отношения шум/сигнал

Из него следует, что при отсутствии зоны неоднородности (когда $\sigma_{\omega 1} = \sigma_{\omega 2}$) оба рассматриваемых параметра увеличиваются с ростом уровня шума. При этом скорость увеличения базы примерно в 2 раза меньше, чем ширины спектра принимаемого сигнала. С появлением неоднородности рост базы замедляется и почти стабилизируется при ε=4, тогда как градиент ширины спектра остается неизменным.

Таким образом, исследование в области определения методов идентификации вертикальных потоков выявило, что вызванное шумом смещение оценок базы принимаемого сигнала значительно меньше, чем смещение оценок ширины спектра входного случайного процесса. Таким образом, база отражений от метеорологических объектов может являться отличным идентификатором вертикальных опасных явлений.

Список литературы

1. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В.., Щукин Г.Г.* Применение оценки ширины спектра радиолокационного сигнала для распознавания вертикальных воздушных потоков // Метеорология и гидрология. 2020. – № 12. – С. 110-116. – EDN KUOHHB.

2. *Денисенков Д. А. , Жуков В. Ю. , Щукин Г. Г.* Применение параметра «база сигнала» для радиолокационного распознавания опасных явлений //….2020

3. *Жуков В. Ю. , Щукин Г. Г.* Новый параметр радиолокационного сигнала для распознавания опасных явлений погоды, связанных с ветром

4. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Щукин Г.Г.* Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. – № 3(23). – С. 68-73. – EDN WVJDMH.
5. *Zhukov V.Y., Denisenkov D.A., Shchukin G.G.* The bandwidth-duration product of the received radar signal as a criterion for observing wind field inhomogeneity // Journal of Physics: Conference Series, Murom, 23–25 июня 2020 года. – Murom, 2020. – P. 012016. – DOI 10.1088/1742-6596/1632/1/012016.
6. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В.., Щукин Г.Г.* Радиолокационный метод распознавания неоднородностей векторного поля скорости ветра // Метеорология и гидрология. 2021. – № 5. – С. 113-120. – DOI 10.52002/0130-2906-2021-5-113-120.
7. *Довиак Р., Зрнич Д.* Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения // Л.: Гидрометеоиздат, 1988.
8. *Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Новый параметр радиолокационного сигнала для распознавания опасных погодных явлений, связанных с ветром // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 616-624. – DOI 10.52452/00213462-2021-64-08-616.

СЕКЦИЯ 5

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ В ИНТЕРЕСАХ ФОИВ

РАССЕИВАНИЕ ТУМАНА НЕОДНОРОДНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ: РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Алексеева А.В.[1], Давыдов В. Е.[1], Зинкина М.Д.[1], Палей А.А.[1], Писанко Ю.В.[1,2]
1. ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова», г. Москва, 2. ФГАОУВО «Московский физико-технический институт», г. Долгопрудный
aleks.seva@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния неоднородного электрического поля на рассеивание тумана на специально разработанной и изготовленной в ФГБУ «ИПГ» лабораторной установке.
Ключевые слова. Тёплый туман, неоднородное электрическое поле, лабораторные эксперименты.

FOG DISPERSION BY NONUNIFORM ELECRIC FIELD: RESULTS OF THE EXPERIMENTS.

Alekseeva, A.V. [1], Davydov, V.E. [1], Zinkina, V.D. [1], Paley, A.A. [1], Pisanko, Yu.V. [1,2]
1. Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow
2. Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

Annotation. Presented are the results of laboratory experiments to disperse the warm fog by applying spatially inhomogeneous electric field. We use the specially designed laboratory installation in the experiments.
Keywords. Warm fog, non-uniform electric field, laboratory experiments.

Туманы остаются существенным ограничивающим фактором для транспорта и технологических процессов, формируя риски и экономические потери [1]. Физические основы метода рассеивания тумана неоднородным электрическим полем описал Л.Г. Качурин [2]. В пространственно неоднородном электрическом поле капли воды поляризуются, и на них начинает действовать сила, обусловленная градиентом квадрата напряженности электрического поля. Принципиально важно, что воздействие осуществляется непосредственно на капли, через их дипольный момент, без промежуточной стадии ионизации воздуха и зарядки капель. Это отличает данный метод от коронно-разрядных технологий. Следовательно, энергия электрического поля используется напрямую для удаления капель тумана из контролируемого пространства. Благодаря этому снижаются энергетические потери и упрощается компоновка системы.

С прикладной точки зрения это важно поскольку позволяет рассматривать технологию как потенциально более экономичную и удобную для интеграции в существующую инфраструктуру.

На лабораторной установке, разработанной и изготовленной в ФГБУ «ИПГ», проведены эксперименты по воздействию неоднородного электрического поля на процесс рассеивания тумана. Подробная схема и описание принципа работы лабораторной установки (рис.1, а), внутри которой проводились экспериментальные исследования, представлены в [3].

В установке использовались туманная камера размером 2 × 0,8 × 1,3 м; система подачи влаги на основе ультразвукового увлажнителя; охлаждаемое и заземленное днище, обеспечивающее устойчивое существование тумана; высоковольтный электрод в виде полипропиленовой трубы с алюминиевой оболочкой диаметром 40 мм; источник высокого напряжения. Туман, сформированный в камере, при естественном рассеивании сохранялся более 20–30 минут. После подачи высокого напряжения на электрод наблюдалось быстрое изменение прозрачности среды. Туман становился заметно более прозрачным уже через 10 секунд после начала воздействия неоднородного электрического поля. Полное рассеивание фиксировалось примерно через 50 секунд (рис. 1, б).



(а) *(б)*

Рисунок 1 – Общий вид лабораторной установки (а) и процесс рассеивания тумана (б)

Лабораторные эксперименты показали, что пространственно неоднородное электрическое поле действительно может эффективно воздействовать на тёплый туман и обеспечивать его быстрое рассеивание в замкнутом объёме.

Список литературы

1. *Keller V, Lala G., Beard K*. Development Testing of Large Volume Water Sprays for Warm Fog Dispersal. - NASA Technical Paper 2607, 1986, 106 p.
2. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. - Л., Гидрометеоиздат, 1973, 366 с.
3. *Алексеева А.В., Давыдов В.Е., Зинкина М.Д., Палей А.А., Писанко Ю.В.* Лабораторный эксперимент по исследованию воздействия ионного ветра коронного разряда на тёплый туман в замкнутом объеме. // Алексеева А.В. [и др.]/ DOI: 10.52002/0130-2906-2022-8-120-124. Метеорология и гидрометеорология- 2022. -№ 8. (С 120-124).

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ ДИАГНОЗА И ПРОГНОЗА ПРИРОДНЫХ И ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Акселевич В.И.[1,2], Мазуров Г.И.[2]
[1]Санкт-Петербургский университет технологий управления и экономики
[2]Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
vaksster@gmail.com, nanmaz@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается современное состояние проблем обнаружения, отображения, учета, статистики и прогноза природных и лесных пожаров. Приводятся таблицы количества природных и лесных пожаров, сумм ежедневных расстояний, пройденных огнем за 2014-2025 годы по территории Российской Федерации. Описываются варианты численной оценки гидрометеорологических процессов в интересах разработки прогнозов пожароопасного состояния природы.
Ключевые слова. Природные и лесные пожары, мониторинг, термодинамические аномалии, горячие точки, статистические оценки

CURRENT STATE OF THE PROBLEMS OF DIAGNOSIS AND PROGNOSIS OF NATURAL AND FOREST FIRES

Akselevich V.I.[1,2], Mazurov G.I.[2]
[1]Saint-Petersburg university of management technologies and economics
[2]Voeikov Main Geophysical Observatory

Annotation. The current state of the problems of detection, display, accounting, statistics and forecasting of natural and forest fires is considered. Tables of the number of natural and forest fires and the sum of the daily distances traveled by fire in 2014-2025 on the territory of the Russian Federation are given. The variants of numerical assessment of hydrometeorological processes in the interests of developing forecasts of the fire-hazardous state of nature are described.
Keywords. Natural and forest fires, monitoring, thermodynamic anomalies, hot spots, statistical estimates

Природный пожар (ПП) – это неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в окружающей природной среде. Среди них различают лесные пожары (ЛП), пожары степных и хлебных массивов, торфяные и подземные пожары горючих ископаемых.

ПП с одной стороны являются стихийным или антропогенным бедствием, а с другой стороны необходимы для обновления природы и утилизации наиболее слабых и больных организмов и растений. Благодаря ПП происходит очистка нижнего яруса леса, уменьшение за счет этого интенсивности будущих пожаров, обогащение почвы калием и фосфором, стимуляция роста хвойных организмов, поддержание биоразнообразия, особенно пирофильных организмов [1].

Кроме того, в [2] отмечается, что повышение температуры пожара в некоторых случаях, в принципе, приводит к улучшению качества воздуха. По данным американских ученых [3] уголь после ЛП может стимулировать рост нитратов и более питательную почву для растений.

Наибольшее применение в организации мониторинга ПП из экономических соображений находят беспилотные летательные аппараты (БПЛА), так как 1 моточас их работы в 5 и более раз меньше, чем у выполняющих такие же задачи самолетов и вертолетов [4].

На развитие пожара в первую очередь оказывают влияние время свободного развития пожара, время с момента детекции возгорания до прибытия пожарных команд

к месту пожара, время ликвидации и локализации пожара, а также время окарауливания. Окарауливание пожара – это непрерывный или периодический осмотр пройденной огнем площади после локализации пожара для предотвращения повторных возгораний.

Тем не менее главными составляющими мониторинга пожаров являются наземная сеть наблюдений и спутниковые системы мониторинга.

В качестве достоверных источников информации о пожарах можно использовать данные Авиалесохраны, МЧС России, Министерства природных ресурсов и экологии РФ. Организована специализированная Информационная система дистанционного мониторинга Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ). Кроме того, в 2013 году был создан информационный сервис анализа спутниковых наблюдений ВЕГА-PRO при поддержке фонда Сколково.

Возникновение ПП и их быстрое распространение во многом зависят от температурно-влажностного и ветрового режимов, а также частоты засух. ПП влияют на углеродный баланс и запас углерода в лесных экосистемах Основную долю выбросов при сгорании биомассы составляют углеродсодержащие газы, прежде всего CO_2, CO, CH_4, а также мелкодисперсные аэрозоли PM2.5 [5].

В этой работе показано, что в период 2006-2023 площадь лесов, погибших от пожаров, имеет 2 ярко выраженных пика в 2012 (4.37 млн га) и 2021 (5.01 млн га) годах. При этом минимум в 0:27 млн га отмечен в 2007 году.

Согласно [6] примерно 97% лесных пожаров (ЛП) происходит по вине человека.

Всего в РФ в 2025 году произошло 317385 пожаров. На пожарах погибло 6564 человек, 7972 человека получили травмы. В Санкт-Петербурге было зарегистрировано 7437 пожаров, на них погибло 110 человек, травмировалось 211 человек,

Для работы с большими массивами данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в основном применяют 2 направления развития подходов: виртуальный хостинг обработки спутниковой информации с использованием сверхбольших архивов ДЗЗ и веб-интерфейсы работы с данными.

Система Вега позволяет решать различные исследовательские, мониторинговые и прогностические задачи, включая получение сведений о наличии пожаров, их годовом, квартальном, месячном, декадном и недельном ходе, пройденной огнём площади [7].

Из табл. 1 следует, что максимум природных пожаров за последнюю дюжину лет (2014-2025 годы) пришелся на 2020 год, лесных пожаров (т.е. пожаров на землях лесного фонда) - на 2019 год, а наибольшая площадь леса, пройденная огнем, наблюдалась в 2021 году. Наименьшие показатели характерны для 2015 года. Разница между наибольшим и наименьшим количеством природных пожаров за год составила 72 %, лесных - 68 %, а разница между наибольшей и наименьшей площадью леса, пройденной огнем – 79 %. В 2018 году все показатели резко увеличились, после достижения максимумов пошли на спад, но пока не достигли минимальных значений.

Таблица 1 - Количество природных и лесных пожаров в РФ и площадь леса, пройденная огнем в 2014-2025 годах (с апреля по ноябрь), по данным системы Вега

	Природные пожары	Лесные пожары	Площадь, пройденная огнем, тыс.га
2025	75035	34581	4915,7
2024	118241	54477	8575,9
2023	107781	47819	5039,3
2022	104373	41994	4374,2
2021	126284	58157	13522,9
2020	142218	61181	10310,9
2019	140481	63116	9560,4
2018	141025	56517	9916,4
2017	83268	34682	2983,8

2016	53670	29806	5796,7
2015	40287	20284	2820,2
2014	60453	22340	5107,6

Таблица 2 - Количество природных пожаров в РФ в 2014-2025 годах (по месяцам с апреля по ноябрь) по данным системы Вега

	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
2025	25315	10337	6826	8713	9472	7259	6613	2490
2024	21411	14211	12920	22966	16557	15996	11323	2857
2023	28953	16447	8904	14062	15967	10983	9941	2524
2022	28944	20318	9261	14275	13533	7221	8256	2565
2021	36258	18581	11160	18632	16461	8397	13459	3336
2020	44718	12150	13189	18961	17854	17148	14662	3536
2019	52645	20997	11248	20820	17954	11540	11991	5480
2018	35256	24849	13904	17567	17733	13335	13268	5047
2017	16747	8006	4939	7354	20526	12921	10499	2276
2016	10679	8427	4419	9504	7402	8010	3994	1235
2015	9778	6874	2271	6484	6193	5251	2694	812
2014	18780	9393	2827	7086	5905	4728	4250	398

Как видно из данных табл.2 наибольшее количество природных пожаров возникало в апреле за исключением 2017 и 2024 годов. В 2017 максимум природных пожаров наблюдался в августе, а в 2024 – в июле. Наименьшее число пожаров регистрировалось в ноябре, что можно, в частности, объяснить увеличением количества осадков и понижением температуры осенью. Если взять вторые по числу пожаров месяцы, то это в 7 случаях будет май, в 3 – июль и в 2 - апрель. Если рассматривать кривые количественного распределения пожаров по годам, то в 2025 году отмечались локальный минимум в июне и локальный максимум в августе, в 2024 после локального максимума в апреле наблюдались локальный минимум в июне, всплеск с абсолютным максимумом в июле, в 2023 после локального минимума в июне - локальный максимум в августе, в 2022 - локальный минимум в июне и сентябре, локальные максимумы – в июле и октябре, в 2021 – локальные минимумы в июне и сентябре, локальные максимумы – в июле и октябре, в 2020 – локальный минимум в мае, максимум – в июле, в 2019 – локальные минимумы в июне и сентябре, максимумы – в июле и октябре, в 2018 – локальный минимум в июне, максимум - в августе, в 2017 – локальный минимум в июне, а абсолютный максимум – в августе, в 2016 – локальные минимумы в июне и августе, максимум – в июле, в 2015 – локальный минимум в июле, максимум – в июле, в 2014 также локальный минимум в июне, а максимум в июле.

Рассмотрим теперь некоторые статистические данные о ПП и ЛП. Конечно, ряд из 12 лет наблюдений слишком мал для корректного вычисления статистических характеристик и их оценок, но тем не менее его изучение приближает нас к разработке гипотез о вероятности возникновения ПП на территории РФ.

Абсолютный годовой максимум ПП был зафиксирован в апреле 2019 года и равен 52645 пожаров. Абсолютный годовой минимум ПП был отмечен в ноябре 2014 года и составил 398 пожаров. В системе Вега представлена информация о пожарах в апреле-ноябре. Соответственно II квартал – это апрель-июнь, III – июль-сентябрь, IV – октябрь. Во втором квартале максимальное количество пожаров 83990 в 2019 году, в третьем 54539 в 2024 году, в четвертом 18915 в 2018 году. Если брать декады, то наибольшее число пожаров зафиксировано во второй декаде апреля 2019 года – 19203 ПП.

Согласно [5] их наибольшие площади, охваченные ПП в период времени с 2000 по 2024 год (апрель-октябрь), были зафиксированы в 2002, 2003 и в 2008 годах, а за

последнее десятилетие их максимальное значение было зафиксировано в 2021 году и составляло 117.0 тыс. км^2. В то же время система Вега дает суммарную площадь, пройденную огнем 135,2 тыс км^2.

Авторами [5] выявлен тренд на снижение общих ежегодных значений площадей, пройденных огнем при пожарах, при постепенном росте среднегодовой радиационной мощности всех типов пожаров (FRP), происходивших на территории Российской Федерации за исследуемый 23-летний период времени. Сделано предположение, что это вызвано совершенствованием методов раннего выявления очагов пожаров и способов пожаротушения, которые привели к сокращению сельскохозяйственных палов и лугово-степных пожаров, прежде всего, в Европейской части России.

Множество исследований посвящается поискам корреляционных связей между масштабами и количеством пожаров и количеством осадков, и гидрологическим режимом рек обследуемой территории, например, [8]. Однако осуществленный корреляционный анализ не выявил их однозначной детерминированности.

Исследования по определению площади, пройденной огнем также не дают однозначных результатов.

Проведенные нами многочисленные исследования [7, 9-11] по выявлению влияния количества осадков, их интенсивности, температурного и ветрового режима и проверке ряда рабочих гипотез также не принесли положительных результатов.

Таким образом, четкая корреляция между среднегодовой температурой и годовым количеством осадков с пожарами однозначно отсутствует, но, в целом, глобальное потепление климата способствует увеличению числа пожаров и увеличению количества осадков [11].

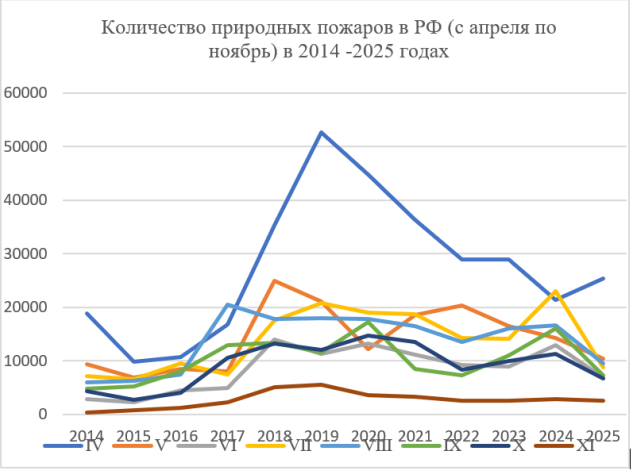


Рисунок 1 – Кривые количественного распределения пожаров по годам

В общем следует сказать следующее. Пожары являются стихийным бедствием, возникают неожиданно и, как правило, в труднодоступных местах.

Как показало исследование, пожары неоднозначно зависят от многих факторов и получить количественные зависимости не удалось. Часто факторы влияют противоположно и интенсивность пожара зависит от предыдущего состояния объекта. Пожары приводят к гибели людей, их травмированию и уничтожению материальных и духовных ценностей, а также жилых и промышленных зданий. На возникновение пожаров и их интенсивность влияют следующие факторы: термическое и влажностное

состояние объекта, его ветровой режим и продолжительность сухой погоды, а также наличие и количество снежного покрова.

Например, повышение температуры и уменьшение влажности объекта, которые наблюдаются весной, приводят к увеличению вероятности возникновения пожаров и интенсивности горения. И наоборот, осенью и в начале зимы понижение температуры объекта и его влажности способствует уменьшению интенсивности горения.

Ветровой режим оказывает двойное действие – сильный ветер может привести к затуханию слабого пожара и увеличению по интенсивности и площади сильного пожара. Отсутствие осадков и развитие засух однозначно способствуют увеличению вероятности пожара и его интенсивности.

Тушение пожара трудоемкий процесс, требующий большого количества специальной техники и специалистов по тушению. К сожалению, большую роль в возникновении пожаров играет человеческий фактор (до 97%) и количество пожаров будет увеличиваться в связи с диагностируемым общим потеплением климата и увеличением засушливости.

Наличие снежного покрова и его толщины уменьшает вероятность и интенсивность пожара, поэтому ПП имеют четко выраженные годовой и суточный ход, который выражается в том, что максимум пожаров отмечается летом и днем, а минимум – зимой и ночью. Однако, торфяные пожары этой закономерности не подчиняются и могут наблюдаться круглый год и сохраняться в течение нескольких лет. При этом, при горении, из под снега могут выделяться дым и водяной пар.

Список литературы

1. *Гонгальский К.Б.* Лесные пожары и почвенная фауна. – М., Товарищество научных изданий КПК, 2014. – 169 с.
2. *Qihan Ma et al.* Fire Heat Affects the Impacts of Wildfires on Air Pollution in the United States. Science 389, 1137 (2025) DOI: 10.1126/science.ads1957
3. *P. N. Ball, M. D. MacKenzie, T. H. DeLuca, W. E. Holben* Montana Wildfire and Charcoal Enhance Nitrification and Ammonium-Oxidizing Bacterial Abundance in Dry Montane Forest Soils/ *Journal of Environmental Quality*, July 2010 doi.org/10.2134/jeq2009.0082Digital Object Identifier (DOI)
4. *Баканов М.О., Анкудинов М.В.* Применение беспилотных летательных аппаратов при проведении разведки лесных пожаров. 2016
5. *Феоктистова Н.В., Зима А.Л.* Оценка эмиссий климатически активных газов и аэрозолей от различных типов природных пожаров в России с 2001 по 2024 год по спутниковым данным// Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» М., ИКИ РАН, 2024, С.300. DOI 10.21046/22DZZconf-2024в
6. *Данилов-Данильян В.И., Катцов В.М.: Порфирьев Б.Н.* Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Ситуация в России. Вестник Российской Академии наук, 2023, т.93, №11, С.1032-1046
7. *Akselevich V.I., Ioshpa A.R.* Climate Change and Causes of Natural Fires //Problems of Coastal Area Management to Ensure Environmental Safety and Rational Environmental Management. Proceedings of International Conference on EECS, 9-13 September 2024, Novorossiysk, Russia Conference proceedings © 2025 pp. 48–56, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90873-6_6
8. *Остроухов А.В.* Применение долговременных рядов данных ДЗЗ для оценки масштабов ландшафтных пожаров в пределах Среднеамурской низменности/ Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. - С. 164–175

9. *Мазуров Г.И., Акселевич В.И., Коршун Н.А.* Создание искусственных облачных образований для уменьшения вероятности возникновения лесных пожаров // Материалы международной научно-технической юбилейной конференции «Лесные экосистемы в условиях меняющегося климата: проблемы и перспективы» 21-22 мая 2015. Воронеж, ВГЛТУ, 2015. – С.81-84
10. *Мазуров Г.И., Акселевич В.И.* Анализ причин возникновения пожаров в Красноярском крае и их связи с метеорологическими параметрами // Труды ГГО, №587, СПб. 2017. – С.153-172
11. *Акселевич В.И., Иошпа А.Р.* Изменения климата и причины возникновения природных пожаров // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. – Выпуск 9: Проблемы управления прибрежными территориями для обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН, 2024. – 300 с. ISSN 2500-395X С.12-18 DOI: 10.23885/2500-395X EDN AUMGYS

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОТРАСЛИ В НОВОМ ФОРМАТЕ: ОТ СТАТИСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА К ПРОГРАММИРОВАНИЮ УРОЖАЕВ

Тарасова Л.Л.
ФГБУ Гидрометцентр России», Москва
agro-hmc@mecom.ru

Аннотация. Интенсификация сельскохозяйственной отрасли и её всевозрастающая роль в экономическом благополучии России ставят новые задачи перед агрометеорологами. Вопросы мониторинга условий для роста и развития посевов в настоящее время тесно увязываются с прогнозами условий проведения полевых работ на средние, долгие и сверхдолгие сроки. Опыт 2025 г. был высоко оценен руководством Министерства сельского хозяйства страны. Современный уровень агрометеорологического обеспечения отрасли выдвигают новые требования к подготовке специалистов-агрометеорологов.
Ключевые слова. Агрометеорология, мониторинг, прогноз, опасные явления

AGROMETEOROLOGICAL SERVICES FOR THE AGRICULTURAL SECTOR OF THE ECONOMY IN A NEW FORMAT: FROM STATISTICAL FORECASTING TO CROP PROGRAMMING

Tarasova L.L.
Hydrometeorological Center of Russia, Moscow

Annotation. The intensification of the agricultural sector and its increasing role in Russia's economic well-being pose new challenges for agrometeorologists. Currently, the issues of monitoring conditions for crop growth and development are closely linked to forecasts of field work conditions for medium, long and ultra-long periods. The experience of 2025 was highly appreciated by the leadership of the Ministry of Agriculture of the country. The modern level of agrometeorological support for the industry puts forward new requirements for the training of agrometeorological specialists.
Keywords. Agrometeorology, monitoring, forecast, dangerous phenomena

Развитию сельского хозяйства в настоящее время уделяется огромное внимание как с позиции продовольственного суверенитета страны, так и как важнейшей статье экспортного потенциала. За последние десятилетия существенно увеличилась продуктивность основных сельскохозяйственных культур, возросли посевные площади, и, как следствие, возросли урожаи. По данным Росстата, средняя по России урожайность зерновых и зернобобовых культур в 2005–2010 гг. составляла менее 20 ц/га, а в период

2020–2025 гг. она возросла почти до 30 ц/га. Растёт и цена растениеводческой продукции, по данным Росстата за последние 10 лет аграрное производство в денежном эквиваленте выросло в 2,4 раза [1]. Всё это накладывает новые задачи и требования к обслуживанию отрасли как на федеральном, так и региональном уровне.

В течение долгого времени основной задачей агрометеорологии был мониторинг условий произрастания и прогноз урожайности и валовых сборов основных сельскохозяйственных культур по областям, краям и республикам. Безусловно, использование прогностической продукции позволяет своевременно организовать превентивные мероприятия по минимизации ущерба в неблагоприятные по погодным условиям годы, а в благоприятные годы с большей точностью заблаговременно наметить (планировать) необходимые объемы зерна для самообеспечения страны, а также возможные объемы экспорта зерна и рынки сбыта. Однако, прогнозы эти составлялись в отдельные сроки, по каждой культуре 2 раза в год (основной и уточнение), т.е. оперативность сведений была на низком уровне.

Методология составления таких прогнозов базируется на статистическом подходе, даже в динамических моделях они применяются для постпроцессинга прогностических полей в величины урожайности. Статистические методы, как правило, обладают высокой надежностью на периоде построения регрессионных зависимостей, однако уже через несколько лет эта связь ослабевает. Особенно быстро статистические модели устаревают в условиях интенсификации агротехнологий, т.к. учёт изменений может быть выполнен только методом построения новой регрессионной модели.

Таким образом, получается, что «неповоротливая» статистика не успевает за ростом производства, а самое главное не может обеспечить информационного сопровождения для принятия быстрых оперативных управленческих решений Минсельхозом, поэтому долгое время в практике руководства отраслью метеорологические вводные не использовались.

В начале 2025 г. был подписан Регламент информационного взаимодействия между Минсельхозом и Росгидрометом. Этот документ положил начало принципиально иному образу агрометеорологического обслуживания отрасли.

В настоящее время ведутся научно-исследовательские работы по разработке методологии и в экспериментальном порядке уже выпускаются долгосрочные и сверхдолгосрочные прогнозы сроков начала и условий проведения весенних полевых работ в разрезе административных районов. Прогнозы составляются, что важно, по графику и форме, разработанным совместно специалистами Департамента растениеводства Минсельхоза России и отдела агрометеорологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». Учёт этого прогноза позволяет оценивать готовность отрасли к проведению посевной, проводить необходимые мероприятия и, главное, оценивать сроки их выполнения. По итогам 2025 г. эти прогнозы были оценены руководством Минсельхоза весьма высоко и признана их экономическая выгода.

Для составления этого вида прогнозов используются долгосрочные и сезонные прогнозы температуры и осадков по моделям Гидрометцентра России (ПЛАВ), ГГО, ИНМ, а также мульти-модельный прогноз ВМО в вероятностной форме.

Также в период полевых работ, а, по сути, с марта по ноябрь, т.к. на юге страны уборочная начинается в период, когда в Сибири ещё не завершена посевная, еженедельно выпускается среднесрочный прогноз наиболее вероятных агрометеорологических условий для проведения полевых работ, возможного формирования опасных для сельскохозяйственных культур явлений в разрезе субъектов Российской Федерации. Форма и содержание прогноза также были разработаны в рамках совместных консультаций. Этот вид продукции также был высоко оценен министерством. По итогам 2025 г. оправдываемость прогнозов условий проведения

полевых работ составила 96% (всего было выпущено 30 прогнозов). Столь высокая оправдываемость связана как с осреднением по площади (прогноз составлялся для области, а не отдельного пункта), так и с большим количеством высококачественной прогностической продукции и фактической информации. В основе прогноза лежат данные системы РЭП (расчёт элементов погоды – система среднесрочного прогнозирования в Гидрометцентре), поля температуры, осадков (их количества и вида), ветра по модели COSMO-RU6ENA, ICON-RU и ICON, а также ежедневный и декадный мониторинг условий погоды и состояния сельскохозяйственных культур по данным сети станций Росгидромет и спутниковой информации, получаемой из НИЦ «Планета».

Всё это предъявляет высоки требования к прогнозисту-агрометеорологу. Нужно уметь пользоваться современными АРМ для проведения агрометеорологического мониторинга, уметь работать с информацией в цифровом и расчерченном виде, понимать причины формирования опасных явлений и разрабатывать методы статистической интерпретации выходной продукции гидродинамических моделей, т.е. быть ещё немного и синоптиком, и разработчиком-программистом.

Список литературы

1. *Федеральная служба государственной статистики* (Росстат) Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство https://rosstat.gov.ru/enterprise_economy (дата обращения 05.03.2026)

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ ПРИРОДНЫМИ РИСКАМИ ДЛЯ СУДОХОДСТВА В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ

Простакевич К.С. [1], Абрамова А.Л. [1], Юрин И.В. [1], Абрамов В.М.[2],
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург
val.abramov@mail.ru

Аннотация. Исследуются методические аспекты геоинформационной поддержки управления природными рисками для судоходства в условиях арктического усиления. Веб-инструмент *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/* применен для инфокоммуникации. *Фондирование исследований* осуществлено за счет проекта FSZU-2023-0002.

Ключевые слова. Изменение климата, арктическое усиление, геоинформационная поддержка, управление природными рисками, судоходство.

GEOINFORMATION SUPPORT TO NATURAL RISKS MANAGEMENT FOR NAVIGATION WHILE ARCTIC AMPLIFICATION

Prostakevich K.S.[1], Abramova A.L.[1], Yurin I.V.[1], Abramov V.M.[2],
[1] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
[2]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS), Saint Petersburg

Annotation. Investigated methodological aspects of geoinformation support for the management of natural risks for navigation while arctic amplification. For infocommunication was used web tool *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2*. The research was funded by FSZU-2023-0002 project.

Keywords. Climate change, Arctic amplification, geographic information support, natural risk management, shipping.

Важной региональной особенностью изменения климата (ИК) считается арктическое усиление (АУ) [1], которое может рассматриваться в качестве отдельного фактора климатических рисков [2], оказывающего значительное влияние на различные аспекты хозяйственной деятельности, в том числе и на судоходство. В настоящее время различные методические аспекты (МА) управления природными рисками (УПР) для судоходства [3-14] оказываются недостаточно освещенными, в том числе из-за не учета влияния АУ. Целью данного исследования является разработка МА обоснования концептуальных подходов (КП) к созданию геоинформационной поддержки (ГИП) в ходе УПР для судоходства с учетом АУ. В статье излагаются результаты разработки таких подходов.

В ходе исследований использованы:

-теория принятия решений в условиях неопределенности,

-Форсайт-технологии,

- методы построения баз данных,

- веб-технологии,

-технологии больших данных.

Также использовались инструменты и базы данных открытых и условно-открытых геоинформационных цифровых онлайн-платформ (ГИЦОП).

Перейдем к рассмотрению основных результатов исследований. В последнее время судоходство испытывают значительные трудности из-за фрагментации мировой экономики. Необходимо объединить ресурсы и усилия заинтересованных игроков для решения проблем УПР в области судоходства с учетом АУ в сжатые сроки. Следует исходить из базового утверждения, что УПР в области судоходства с учетом АУ на современном этапе должно осуществляться в парадигме устойчивого развития в виде взаимосвязанного комплекса крупных природно-индустриальных проектов (КПИП) в рамках единого пространства и периода времени. На рисунке 1 представлена модель структуры инвестиций в КПИП, которая объединяет инвестиционные цели таких КПИП (блоки 1-5) с затратами на адекватное УПР в области судоходства с учетом АУ (блоки 6-8), включая цели и задачи УПР в области судоходства с учетом АУ в ходе планирования и реализации КПИП (блок 7). Выполненный в ходе исследований анализ показывает, что наибольшую часть затрат на информационную поддержку УПР в области судоходства с учетом АУ в ходе КПИП составляет экологический мониторинг (блок 8), суть которого определяется содержанием блока 7. Значительная часть затрат в блоке 8 приходится на аппаратное и программное обеспечение, стоимость которого существенно варьируется. На основе вышеупомянутой модели предлагается разработать геоинформационную систему поддержки принятия решений (ГИС ППР) для УПР в области судоходства с учетом АУ, обладающую комбинированной структурой для доступа, хранения и анализа информации из открытых источников геопространственных данных, включая архивы и веб-инструменты оперативного режима.

В качестве основных технологических решений при создании ГИС ППР предлагается использовать открытые и условно открытые геоинформационные цифровые онлайн-платформы (ГИЦОП). Например, предлагается использовать условно-открытую ГИЦОП EOS eos.com, обладающую эффективными инструментами для поиска, обработки и анализа больших объемов спутниковых данных со спутниковых систем Landsat-8 и Sentinel-2. Также предлагается использовать открытую ГИЦОП Earth https://earth.nullschool.net/ru/, которая предоставляет доступ к значительным объемам различных геоданных.

Рассмотрим примеры. На рисунке 2 приведен космический снимок морского ледяного поля как фактора природного риска в области судоходства с учетом АУ вблизи

российского порта Сабетта и завода по производству сжиженного природного газа (СПГ), визуализированный с помощью ГИЦОП EOS.

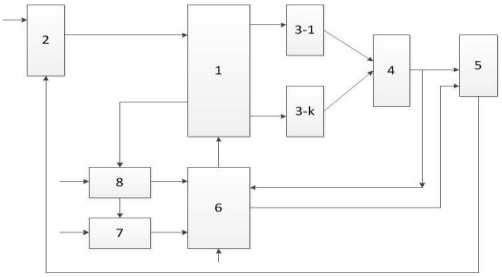


Рисунок 1 - Модель структуры инвестиций в КПИП в области судоходства: 1 – блок распределения ресурсов; 2 – блок формирования ресурсов; 3 - блок формирования частного дохода; 4 - блок формирования общего дохода; 5 – блок формирования инвестиционной доли ресурсов; 6 - блок формирования сравнение с допустимым уровнем риска; 7-блок изменяющегося во времени набора УПР с учетом АУ в ходе КПИП в области судоходства; 8 – блок экологического мониторинга для УПР с учетом АУ в ходе КПИП в области судоходства



Рисунок 2 – Морской лед 06.07.2019 у порта Сабетта и завода по производству сжиженного природного как природный фактор риска в области судоходства с учетом АУ (визуализация с помощью Agriculture Application в составе ГИЦОП EOS, продукт LandViewer, масштаб 5 км)

На рисунке 3 изображены поля ветра и температуры воздуха у порта Сабетта как факторы природных рисков в области судоходства с учетом АУ на 07.06.2022, визуализированные с помощью ГИЦОП Earth.

Подводя итоги, отметим новизну результатов исследований, которые целесообразно использовать в различных направлениях, в том числе и в цифровых образовательных технологиях в сфере геоинформационного менеджмента [15].

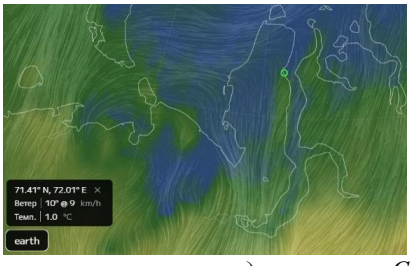


Рисунок 3 – Поля ветра и температуры воздуха у порта Сабетта на 07.06.2019, визуализированные с помощью ГИЦОП Earth

Работа выполнена в рамках проекта № FSZU-2026-0003 государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Российскому государственному гидрометеорологическому университету. Для инфокоммуникации задействован онлайн инструмент *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/*.

Список литературы

1. *Latonin M. M.* The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms / M. M. Latonin, I. L. Bashmaclmikov, L. P. Bobylev // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 3-19. – DOI 10.7868/S2073667320030016. – EDN ZIPPIB.
2 Управление природными рисками / А. Н. Чусов, М. Б. Шилин, В. М. Абрамов, В. А. Жигульский. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 403 с. – ISBN 978-5-7422-8423-9. – EDN TVIKEP.
3. *Абрамов В. М.* Обеспечение информационной безопасности сетевых технологий численного моделирования влияния газового состава атмосферы на климат Арктики / В. М. Абрамов, С. П. Смышляев, К. С. Простакевич // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова" Сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября – 20 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2025. – С. 16-19. – EDN SWTPBN.
4. Decision aid expert system for Russian Arctic sustainable development under climate change / V. M. Abramov, K. S. Prostakevich, A. Abramova [et al.] // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 April 2023. Vol. 389. – Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. – P. 02025. – DOI 10.1051/e3sconf/202338902025. – EDN NRJWEI.
5. К вопросу о стратегии создания национальной системы контроля черного углерода в российской Арктике / Л. Н. Карлин, [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 36. – С. 67-73. – EDN TQUBAN.
6. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov, E. P. Istomin, N. N. Popov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 ноября 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 10132-10141. – EDN ARNAIR.
7. *Abramov V. M.* Decadal variability of particulate matter in Moscow megacity air / V. M. Abramov, N. Popov, R. I. Bachiev // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June – 06 July 2016. Vol. 2. – Albena, Bulgaria. – P. 323-330. – DOI 10.5593/SGEM2016/B42/S19.042. – EDN IHXCLN.
8. Northern Sea Route Development Under Climate Change and Covid-19 / V. L. Mikheev, V. M. Abramov, V. G. Burlov [et al.] // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference Innovation Management and information Technology impact on Global Economy in the Era of Pandemic, Cordoba, 30–31 мая 2021 года. – Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. – P. 5147-5153. – EDN MWVXNB.
9. Geo-information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic / V. M. Abramov, A. G. Sokolov, E. A. Baikov [et al.] // Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid,

Spain, 13–14 ноября 2019 года. – Madrid, Spain: International Business Information Management Association, 2019. – P. 10763-10771. – EDN KPIFIP.
10. *Сикарев И. А.* Сложные сигналы в адаптивных функционально устойчивых автоматизированных идентификационных системах на речном транспорте / И. А. Сикарев; И. А. Сикарев; Федеральное агентство морского и речного трансп., Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций". – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 84 с. – ISBN 978-5-7422-2515-7. – EDN OWWUZA.
11. *Ныркова А. П.* Безопасность информационных каналов автоматизированных систем на водном транспорте / А. П. Ныркова, И. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009. – № 2. – С. 165-169. – EDN MSZXKV.
12. Information Technologies Development for Natural Risks Management within Environmental Economics / A. G. Sokolov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 November 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 9878-9885. – EDN LJYNAW.
13. Digital transformation of risk management for natural-industrial systems while climate change / A. G. Sokolov, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, 21–22 November 2019 года. – St. Petersburg, 2020. – P. 012003. – DOI 10.1088/1757-899X/940/1/012003. – EDN DTHAKI.
14. The concept and methodology of integrated assessment of coastal systems and coastal infrastructure sustainability / G. Gogoberidze, [et al.] // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 June – 05 July 2017 года. Vol. 17. – Sophia: STEF92 Technology, 2017. – P. 951-958. – DOI 10.5593/sgem2017/52/S20.121. – EDN NLVMDK.
15. Digital learning technologies within geo-information management / S. Lukyanov, N. Popov, I. Sikarev [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – P. 01004. – DOI 10.1051/e3sconf/202125801004. – EDN GWVYAN.

РЕАРХИВАЦИЯ ДАННЫХ О ТЕМПЕРАТУРЕ И ХИМИЧЕСКОМ СОСТАВЕ АРКТИЧЕСКОЙ ТРОПОСФЕРЫ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕНОМЕНА АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ

Юрин И.В. [1], Абрамова Е.Н.[1], Простакевич К.С. [1], Абрамова А.Л. [1], Смышляев С.П.[1], Абрамов В.М.[2]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург
val.abramov@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются концептуальные вопросы реархивации о температуре и химическом составе арктической тропосферы в задачах исследования феномена арктического усиления. Онлайн платформа *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/* использована в ходе исследований для инфокоммуникации. Фондирование исследований осуществлено за счет проекта FSZU-2023-0002.
Ключевые слова. Архивация данных, изменение климата, арктическое усиление, химический состав воздуха, тропосфера.

RE-ARCHIVING OF DATA ON TEMPERATURE AND CHEMICAL COMPOSITION OF ARCTIC TROPOSPHERE FOR STUDY OF ARCTIC AMPLIFICATION PHENOMENON

Yurin I.V.[1], Abramova E.N.[1], Prostakevich K.S.[1], Abramova A.L.[1], Smyshlyaev S.P.[1], Abramov V.M.[2]
[1] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
[2]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS), Saint Petersburg

Annotation. Considered data re-archiving conceptual issues of temperature and chemical composition of the Arctic troposphere within study phenomenon of Arctic amplification. Online platform https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2 / was used in course of research for infocommunication.
Keywords. Climate change, Arctic amplification, geographic information support, natural risk management, shipping.

В настоящее время арктическое усиление (АУ) [1], являющееся заметной региональной особенностью изменения климата (ИК, оказывается в центре внимания современной климатологии [2]. Численное моделирование широко используется в задачах исследования феномена АУ, что требует квалифицированного использования архивированных данных о температуре и химическом составе арктической тропосферы (ДТиХСАТ). Вместе с тем, существующие архивные данные зачастую хранятся в неудобных форматах и не всегда доступны заинтересованным исследователям, что ставит задачу их реархивации. Концептуальные вопросы (КВ) подобной реархивации в настоящее время рассмотрены в недостаточной степени и освещены фрагментарно [3-14]. Целью данного исследования является разработка КВ реархивирования ДТиХСАТ.

При проведении исследований использованы:

-технологии больших данных

- методы построения баз данных,

- веб-технологии,

-теория принятия решений в условиях неопределенности,

-Форсайт-технологии.

В ходе исследований также использовались инструменты и базы данных открытых и условно-открытых геоинформационных цифровых онлайн-платформ (ГИЦОП).

Рассмотрим основные результаты исследований. Выполненный анализ основных баз данных, содержащих ДТиХСАТ, показал, что они архивированы в виде значительных массивов, которые было бы целесообразно визуализировать и реархивировать. При этом на основе анализа визуализированных отображений ДТиХСАТ следует выделять области для реархивирования с целью сокращения объемов архивирования и выбора удобных форматов для хранения отобранных ДТиХСАТ. В результате выполненных исследований, установлено, что требуемую для реархивирования визуализацию предоставляет открытая ГИЦОП Earth https://earth.nullschool.net/ru/, через которую имеется доступ к значительным объемам различных геоданных, в том числе из категории ДТиХСАТ.

Рассмотрим примеры. На рисунке 1 представлена интерактивная визуализация поля ветра и температуры воздуха в Северном полушарии на 03.03.2026.

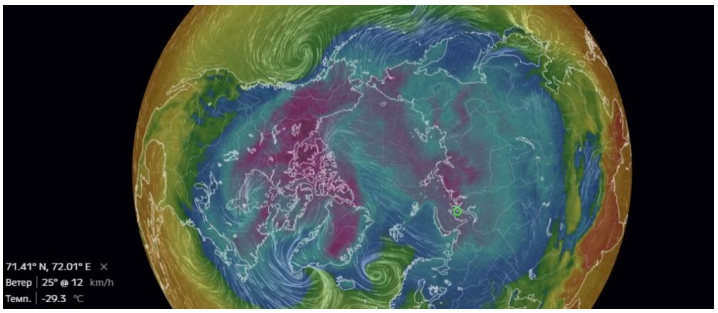


Рисунок 1 - Поля ветра и температуры воздуха у поверхности в Северном полушарии (выделена точка у порта Сабетта) на 03.03.2026, визуализированные с помощью ГИЦОП Earth

На рисунке 2 приведена интерактивная визуализация поля ветра и содержания твердых частиц PM10 в Северном полушарии на 03.03.2026.

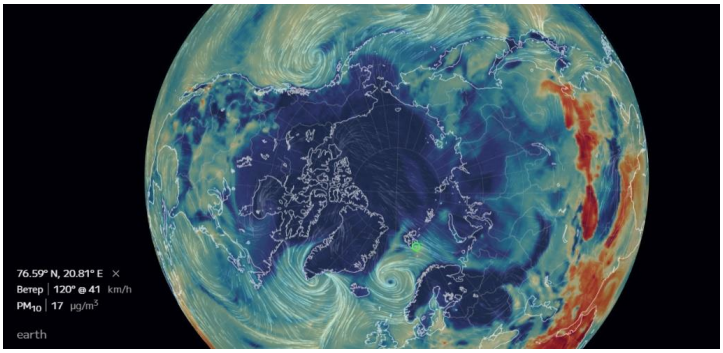


Рисунок 2 – Поля ветра и PM10 у поверхности в Северном полушарии (выделена точка у Шпицбергена) на 03.03.2026, визуализированные с помощью ГИЦОП Earth

На рисунке 3 приведена интерактивная визуализация поля ветра и содержания углекислого газа CO_2 у поверхности в Северном полушарии на 03.03.2026.

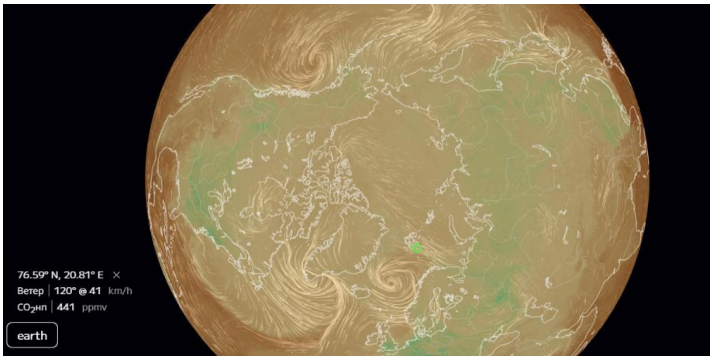


Рисунок 3 – Поля ветра и CO_2 у поверхности в Северном полушарии (выделена точка у Шпицбергена) на 03.03.2026, визуализированные с помощью ГИЦОП Earth

Отметим, что с помощью *ГИЦОП Earth* решаются задачи реархивации ДТиХСАТ для выбранных областей как в ручном, так и в автоматическом режимах с помощью специализированного программного обеспечения, рассмотрение которого не входит в задачи настоящей работы.

Подводя итоги, отметим новизну результатов исследований, которые целесообразно использовать в различных направлениях, в том числе и в цифровых образовательных технологиях в сфере геоинформационного менеджмента [15].

Работа выполнена в рамках проекта № FSZU-2026-0003 государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Российскому государственному гидрометеорологическому университету. Для инфокоммуникации задействован онлайн инструмент *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/*.

Список литературы

1. *Latonin M. M. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms / M. M. Latonin, I. L. Bashmaclmikov, L. P. Bobylev* // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 3-19. – DOI 10.7868/S2073667320030016. – EDN ZIPPIB.

2 *Абрамов В. М*. Обеспечение информационной безопасности сетевых технологий численного моделирования влияния газового состава атмосферы на климат Арктики / В. М. Абрамов С. П. Смышляев К. С. Простакевич // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова" Сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября – 20 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2025. – С. 16-19. – EDN SWTPBN.

3. *Abramov V. M.* Decadal variability of particulate matter in Moscow megacity air / V. M. Abramov, N. Popov, R. I. Bachiev // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June – 06 July 2016. Vol. 2. – Albena, Bulgaria. – P. 323-330. – DOI 10.5593/SGEM2016/B42/S19.042. – EDN IHXCLN.

4. Decision aid expert system for Russian Arctic sustainable development under climate change / V. M. Abramov, K. S. Prostakevich, A. Abramova [et al.] // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 April 2023. Vol. 389. – Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. – P. 02025. – DOI 10.1051/e3sconf/202338902025. – EDN NRJWEI.

5. К вопросу о стратегии создания национальной системы контроля черного углерода в российской Арктике / Л. Н. Карлин, [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 36. – С. 67-73. – EDN TQUBAN.

6. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov, E. P. Istomin, N. N. Popov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 ноября 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 10132-10141. – EDN ARNAIR.

7. Northern Sea Route Development Under Climate Change and Covid-19 / V. L. Mikheev, V. M. Abramov, V. G. Burlov [et al.] // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference Innovation Management and information Technology impact on Global Economy in the Era of Pandemic, Cordoba, 30–31 мая 2021 года. – Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. – P. 5147-5153. – EDN MWVXNB.

8. Geo-information Tools Develop for Integrated Coastal Zone Management in Arctic and Subarctic / V. M. Abramov, A. G. Sokolov, E. A. Baikov [et al.] // Proceedings of the 34th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Madrid, Spain, 13–14 ноября 2019 года. – Madrid, Spain: International Business Information Management Association, 2019. – P. 10763-10771. – EDN KPIFIP.
9. Information Technologies Development for Natural Risks Management within Environmental Economics / A. G. Sokolov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 November 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 9878-9885. – EDN LJYNAW.
10. Digital transformation of risk management for natural-industrial systems while climate change / A. G. Sokolov, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, 21–22 November 2019 года. – St. Petersburg, 2020. – P. 012003. – DOI 10.1088/1757-899X/940/1/012003. – EDN DTHAKI.
11. The concept and methodology of integrated assessment of coastal systems and coastal infrastructure sustainability / G. Gogoberidze, [et al.] // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 June – 05 July 2017 года. Vol. 17. – Sophia: STEF92 Technology, 2017. – P. 951-958. – DOI 10.5593/sgem2017/52/S20.121. – EDN NLVMDK.
12. *Сикарев И. А.* Сложные сигналы в адаптивных функционально устойчивых автоматизированных идентификационных системах на речном транспорте / И. А. Сикарев; И. А. Сикарев; Федеральное агентство морского и речного трансп., Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций". – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 84 с. – ISBN 978-5-7422-2515-7. – EDN OWWUZA.
13. *Ныркова А. П.* Безопасность информационных каналов автоматизированных систем на водном транспорте / А. П. Ныркова, И. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009. – № 2. – С. 165-169. – EDN MSZXKV.
14. Управление природными рисками / А. Н. Чусов, М. Б. Шилин, В. М. Абрамов, В. А. Жигульский. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 403 с. – ISBN 978-5-7422-8423-9. – EDN TVIKEP.
15. Digital learning technologies within geo-information management / S. Lukyanov, N. Popov, I. Sikarev [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – P. 01004. – DOI 10.1051/e3sconf/202125801004. – EDN GWVYAN.

ВЗАИМОСВЯЗЬ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ И РОСТА ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИКЕ И СУБАРКТИКЕ

Абрамова А.Л. [1], Простакевич К.С.[1], Абрамова Е.Н.[1], Юрин И.В. [1], Козлов Ю.В. [1], Абрамов В.М.[2]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург
val.abramov@mail.ru

Аннотация. Исследуются глобальные аспекты взаимных связей между феноменом арктического усиления и мировым ростом хозяйственной деятельности в Арктике и Субарктике. Онлайн платформа *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/* использована в ходе исследований_для инфокоммуникации. *Фондирование исследований* осуществлено за счет проекта FSZU-2026-0003 (РГГМУ).

Ключевые слова. Изменение климата, арктическое усиление, мировая экономика, природные риски, взаимная связь.

RELATIONSHIP BETWEEN ARCTIC AMPLIFICATION AND ECONOMIC ACTIVITY GROWTH IN ARCTIC AND SUBARCTIC

Abramova A.L.[1], Prostakevich K.S.[1] Abramova E.N.[1], Yurin I.V.[1], Kozlov Yu.V.[1], Abramov V.M.[2]
[1] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
[2]Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (SUMIS), Saint Petersburg

Annotation. Global aspects of the mutual links between Arctic amplification phenomenon and world economic activity growth in Arctic and Subarctic are being investigated. For infocommunication, online platform *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2* was used in course of research.
Keywords. Climate change, Arctic amplification global economy, natural risks, mutual connection.

Явление так называемого арктического усиления (АУ) [1], которое современная климатология считает региональной особенностью изменения климата [2], способно оказать значительное влияние на глобальный рост экономической деятельности (ГРЭД) в Арктике и Субарктике. В свою очередь, ГРЭД в Арктике и Субарктике способен вызвать ускорение самого АУ. В настоящее время глобальные аспекты взаимной связи (ГАВС) между феноменом АУ и ГРЭД в Арктике и Субарктике рассмотрены в недостаточной степени и освещены фрагментарно [3-14]. Целью данного исследования является рассмотрение ГАВС между АУ и ГРЭД в Арктике и Субарктике.

При проведении исследований использованы:

-Форсайт-технологии,

-теория принятия решений в условиях неопределенности,

- OSINT-технологии (Open Source Intelligence Technologies),

-технологии больших данных,

- методы построения баз данных.

- инструменты и базы данных открытых и условно-открытых геоинформационных цифровых онлайн-платформ (ГИЦОП).

Перейдем к основным результатам исследований. В ходе выполненного анализа установлено, что в условиях изменения климата и с учетом АУ в мировой экономике широкое распространение получили планы значительного роста добычи углеводородов в Арктике и Субарктике, в первую очередь, природного газа. Планируется строительство новых крупных производств сжиженного природного газа (СПГ) в арктическом и субарктическом регионах с последующей транспортировкой СПГ специальными большегрузными танкерами в мировые центры потребления СПГ с использованием Северного морского пути (СМП) и трансполярного морского пути (ТМП). Подобные планы развития экономики могут привести к образованию обратной взаимной связи с АУ и вызвать ускоренное развитие АУ за счет поступления в арктическую тропосферу дополнительных объемов так называемого черного углерода (ЧУ) за счет сжигания дополнительных объемов углеводородов непосредственно в Арктике и Субарктике. Отметим, что ЧУ является важным фактором развития АУ [3].

Подводя итоги, следует отметить новизну результатов исследований, которые целесообразно использовать в различных направлениях, в том числе и в цифровых образовательных технологиях [15].

Работа выполнена в рамках проекта № FSZU-2026-0003 государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ Российскому государственному гидрометеорологическому университету. Для инфокоммуникации задействован онлайн инструмент *https://www.researchgate.net/profile/Valery_Abramov2/*.

Список литературы

1. *Latonin M. M.* The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms / M. M. Latonin, I. L. Bashmaclmikov, L. P. Bobylev // Fundamental and Applied Hydrophysics. – 2020. – Vol. 13, No. 3. – P. 3-19. – DOI 10.7868/S2073667320030016. – EDN ZIPPIB.
2 *Абрамов В. М.* Обеспечение информационной безопасности сетевых технологий численного моделирования влияния газового состава атмосферы на климат Арктики / В. М. Абрамов, С. П. Смышляев, К. С. Простакевич // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО "ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова" Сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября – 20 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, 2025. – С. 16-19. – EDN SWTPBN.
3. К вопросу о стратегии создания национальной системы контроля черного углерода в российской Арктике / Л. Н. Карлин, [и др.] // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 36. – С. 67-73. – EDN TQUBAN.
4. *Abramov V. M.* Decadal variability of particulate matter in Moscow megacity air / V. M. Abramov, N. Popov, R. I. Bachiev // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Conference Proceedings, Albena, Bulgaria, 30 June – 06 July 2016. Vol. 2. – Albena, Bulgaria. – P. 323-330. – DOI 10.5593/SGEM2016/B42/S19.042. – EDN IHXCLN.
5. Decision aid expert system for Russian Arctic sustainable development under climate change / V. M. Abramov, K. S. Prostakevich, A. Abramova [et al.] // E3S Web of Conferences: Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2023), Chelyabinsk, 25–28 April 2023. Vol. 389. – Chelyabinsk: EDP Sciences, 2023. – P. 02025. – DOI 10.1051/e3sconf/202338902025. – EDN NRJWEI.
6. Innovative Digital Technologies Development for Projects Management within Northern Sea Route Area / V. M. Abramov, E. P. Istomin, N. N. Popov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 ноября 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 10132-10141. – EDN ARNAIR.
7. Northern Sea Route Development Under Climate Change and Covid-19 / V. L. Mikheev, V. M. Abramov, V. G. Burlov [et al.] // Proceedings of the 37th International Business Information Management Association Conference Innovation Management and information Technology impact on Global Economy in the Era of Pandemic, Cordoba, 30–31 мая 2021 года. – Cordoba: IBIMA Publishing, 2021. – P. 5147-5153. – EDN MWVXNB.
8. Digitalization Wildfire Management while Climate Change and Covid-19 / V. M. Abramov, T. M. Tatarnikova, I. A. Sikarev [et al.] // 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA): Proceedings of the 36th International Business Information Management Association Conference (IBIMA), Granada, Spain, 04–05 ноября 2020 года. – Granada, Spain: International Business Information Management Association (IBIMA), 2020. – P. 8570-8578. – EDN QBWKVT.
9. Information Technologies Development for Natural Risks Management within Environmental Economics / A. G. Sokolov [et al.] // Vision 2025: Education Excellence and Management of Innovations through Sustainable Economic Competitive Advantage: Proceedings of the 34rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019, Madrid, 13–14 November 2019 года. – Madrid: International Business Information Management Association, 2019. – P. 9878-9885. – EDN LJYNAW.

10. Digital transformation of risk management for natural-industrial systems while climate change / A. G. Sokolov, [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, St. Petersburg, 21–22 November 2019 года. – St. Petersburg, 2020. – P. 012003. – DOI 10.1088/1757-899X/940/1/012003. – EDN DTHAKI.
11. The concept and methodology of integrated assessment of coastal systems and coastal infrastructure sustainability / G. Gogoberidze, [et al.] // 17th international multidisciplinary scientific geoconference SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 June – 05 July 2017 года. Vol. 17. – Sophia: STEF92 Technology, 2017. – P. 951-958. – DOI 10.5593/sgem2017/52/S20.121. – EDN NLVMDK.
12. *Сикарев, И. А.* Сложные сигналы в адаптивных функционально устойчивых автоматизированных идентификационных системах на речном транспорте / И. А. Сикарев; И. А. Сикарев; Федеральное агентство морского и речного трансп., Федеральное гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций". – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. – 84 с. – ISBN 978-5-7422-2515-7. – EDN OWWUZA.
13. *Ныркова А. П.* Безопасность информационных каналов автоматизированных систем на водном транспорте / А. П. Ныркова, И. А. Сикарев // Журнал университета водных коммуникаций. – 2009. – № 2. – С. 165-169. – EDN MSZXKV.
14. Управление природными рисками / А. Н. Чусов, М. Б. Шилин, В. М. Абрамов, В. А. Жигульский. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. – 403 с. – ISBN 978-5-7422-8423-9. – EDN TVIKEP.
15. Digital learning technologies within geo-information management / S. Lukyanov, N. Popov, I. Sikarev [et al.] // E3S Web of Conferences, Chelyabinsk, 17–19 февраля 2021 года. – Chelyabinsk, 2021. – P. 01004. – DOI 10.1051/e3sconf/202125801004. – EDN GWVYAN.

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ПИЛОТИРУЕМОЙ АВИАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Дорофеев В.В., Степанов А.В., Голунов А.С., Подгузов М.Ю.
Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж
meteo_box@mail.ru

Аннотация. В работе предлагается методика оценивания метеорологических условий для пилотируемой авиации над неосвещённой в метеорологическом отношении территорией с использованием беспилотных воздушных судов, оснащённых цифровыми видеокамерами. Основой является модель расчёта метеорологической дальности видимости у земли, высоты нижней границы облачности и распределения горизонтальной видимости с высотой под низкими облаками по данным оптико-электронной видимости, получаемым с борта беспилотных воздушных судов на нескольких высотах полёта. Разработан алгоритм проведения измерений, включающий обнаружение объекта, вербальную оценку оператором яркостного контраста, выбор расстояния «затуманивания» объекта, фиксацию высоты и угла визирования цифровой видеокамеры, последующий расчёт горизонтальной видимости и переход от оптико-электронной к психофизической видимости с введением переходного коэффициента, учитывающего оптические характеристики цифровой видеокамеры и глаза наблюдателя. Показано влияние разрешающей способности и динамического диапазона различных типов цифровой видеокамеры, устанавливаемых на квадрокоптеры, на получаемые значения оптико-электронной видимости и, следовательно, на оценку метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облачности. По результатам сопоставления оценок метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облачности, полученных по данным беспилотных воздушных судов, с измерениями штатных средств метеорологической службы приведены критерии успешности (коэффициенты корреляции, среднеквадратические и

средние абсолютные ошибки), подтверждающие работоспособность предложенной модели в диапазоне высоты нижней границы облачности 100–400 м.
Ключевые слова. Метеорологическая дальность видимости; высота нижней границы облачности; беспилотные воздушные суда; оптико-электронная видимость; цифровая видеокамера; пилотируемая авиация.

METHODOLOGY FOR ASSESSING METEOROLOGICAL CONDITIONS FOR MANNED AVIATION USING UNMANNED AIRCRAFT

Dorofeev V.V., Stepanov A.V., Golunov A.S., Podguzov M.Yu.
Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh

Annotation. The paper proposes a methodology for assessing meteorological conditions for manned aircraft over a meteorologically unlit area using unmanned aircraft equipped with digital video cameras. The basis is a model for calculating the meteorological range of visibility near the ground, the height of the lower cloud boundary, and the distribution of horizontal visibility with altitude under low clouds based on optoelectronic visibility data obtained from unmanned aircraft at several flight altitudes. An algorithm for measuring has been developed, including object detection, verbal assessment by the operator of brightness contrast, selection of the distance of "blurring" of the object, fixing the height and angle of sight of the digital video camera, subsequent calculation of horizontal visibility and the transition from optoelectronic to psychophysical visibility with the introduction of a transition coefficient that takes into account the optical characteristics of the digital video camera and the observer's eye. The influence of the resolution and dynamic range of various types of digital video cameras mounted on quadrocopters on the obtained values of optoelectronic visibility and, consequently, on the assessment of the meteorological range of visibility and the height of the lower cloud boundary is shown. Based on the results of comparing estimates of the meteorological visibility range and the height of the lower cloud boundary obtained from unmanned aircraft data with measurements of standard meteorological service facilities, success criteria (correlation coefficients, RMS and average absolute errors) are presented, confirming the operability of the proposed model in the range of the height of the lower cloud boundary of 100-400 m.
Keywords. Meteorological range of visibility; height of the lower cloud cover; unmanned aerial vehicles; optoelectronic visibility; digital video camera; manned aircraft.

Модель оценивания значений ВНГО, горизонтальной видимости у поверхности земли и распределения горизонтальной видимости с высотой под низкими облаками строится по формуле 1:

$$M = Sys(S_{mh_i}(A,B,S_0,ВНГО)), \text{ при } S_{mh_i} \le S_{mh_{i+1}} \wedge i \ge 3. \quad (1)$$

Методика оценивания реализуется системой уравнений: (формула 2):

$$\left\{\begin{array}{l} S_{mh_1} = A \cdot h_1^2 + B \cdot h_1 + S_0 \\ S_{mh2} = A \cdot h_2^2 + B \cdot h_2 + S_0 \\ S_{mh3} = A \cdot h_3^2 + B \cdot h_3 + S_0 \end{array}\right\} \quad (2)$$

где:
$S_{mh_1}, S_{mh2}, S_{mh3}$ – горизонтальная видимость на высоте проведения измерения, м;
S_0 – метеорологическая дальность видимости у земли, м;
A, B – коэффициенты, определяющие ТРГВ под низкими облаками;
h– высота полета БПЛА, м;
$\Theta_{цвк}$ – угол визирования ЦВК БПЛА на объект, °;

C – переходной коэффициент, зависящий от оптических характеристик ЦВК и глаза [1].

Особенностью этой методики является то, что она позволяет на основе данных о полетной видимости на высоте полета БПЛА оценить МДВ и определить значения коэффициентов, определяющих ТРГВ под низкими облаками.

Для реализации этой методики необходимо разработать алгоритм определения горизонтальной видимости на высоте полета с применение ЦВК БПЛА (рисунок 1).

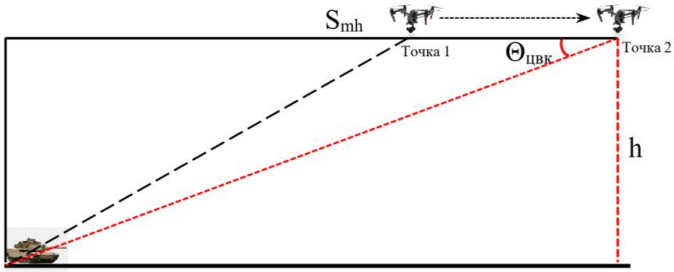


Рисунок 1 – Алгоритм определения высоты зависания БПЛА (h) и угла визирования ЦВК на объект ($Θ_{цвк}$)

Методика реализуется по следующему алгоритму:

На первом этапе производится обнаружение объекта через ЦВК БПЛА (точка 1).

На втором этапе производится вербальная оценка оператором БПЛА яркостного контраста объекта (*K*) (необходимого для расчета коэффициента ослабления атмосферы и коэффициента относительной видимости реального объекта).

На третьем этапе осуществляется отлет БПЛА от объекта на расстояние, когда объект начнет «туманиться» (яркостный контраст объекта *K*=0,1) (точка 2).

На четвертом этапе осуществляется зависание БПЛА на месте ($w_{бпла}$ = 0 км/ч).

На пятом этапе определяется угол визирования ЦВК БПЛА на объект ($Θ_{цвк}$), высота зависания БПЛА (h).

На шестом этапе производится расчет значения горизонтальной видимости на высоте проведения измерения (S_{mh}) (формула 3):

$$S_{mh} = -C\frac{3h}{\sin\Theta_{цвк}\cdot\ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right)} \quad (3)$$

где:

K_1 – яркостный контраст объекта при обнаружении;

K_2 – яркостный контраст объекта при «затуманивании» (*K*=0,1);

h – высота полета БПЛА, м;

$Θ_{цвк}$ – угол визирования ЦВК БПЛА на объект, ˚.

Вербальную оценку оператором БПЛА яркостного контраста объекта (*K*) можно перевести в числовое значение, необходимое для расчетов по шкале Харрингтона. Так как вербальная оценка является субъективным фактором, то предлагается использовать таблицу (таблица 1).

При расчете горизонтальной видимости на высоте необходимо учесть переход от оптико-электронной видимости к психофизической видимости (видимости человеческим глазом). Для этого введем переходной коэффициент (*C*), учитывающий оптические характеристики ЦВК и глаза (формула 4) [1-2]:

Таблица 1 – Числовые значения вербальной оценки яркостного контраста объекта (К), определенного оператором БПЛА на фоне местности

Фон местности	**Объект**					
	черный	**серый**	**коричневый**	**желтый**	**зеленый**	**белый**
черный	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,6**	**0,6**	**0,9**
серый	**0,3**	**0,2**	**0,3**	**0,5**	**0,5**	**0,8**
коричневый	**0,4**	**0,3**	**0,2**	**0,5**	**0,5**	**0,8**
желтый	**0,6**	**0,5**	**0,5**	**0,2**	**0,3**	**0,6**
зеленый	**0,6**	**0,5**	**0,5**	**0,3**	**0,2**	**0,7**
белый	**0,9**	**0,8**	**0,8**	**0,6**	**0,7**	**0,2**

$$C = \frac{R_{цвк}}{R_{гл}} \cdot \frac{E_{цвк}}{E_{гл}} \quad (4)$$

где:

$R_{цвк}$ – разрешающая способность ЦВК, определяемая по таблице 2;

$R_{гл}$ – разрешающая способность глаза, (0,0000625);

$E_{цвк}$ – динамический диапазон ЦВК, определяемый по таблице 2;

$E_{гл}$– динамический диапазон глаза, определяемый по таблице 3.

В таблице 2 приведены оптические характеристики ЦВК, применяемых на основных типах БПЛА квадрокоптерного типа.

Таблица 2 – Оптические характеристики ЦВК, применяемых на основных типах БПЛА квадрокоптерного типа

Тип БПЛА	Применяемая ЦВК	Динамический диапазон ЦВК ($E_{цвк}$)	Разрешающая способность ЦВК ($R_{цвк}$)
малые	DJI Mini 2 DJI Mavic Pro DJI Mavic Air	14	0,000055
Autel Evo II	Evo II Pro 6K	12,5	0,000059
Mavic 3 Enterprise	Mavic 3E	14	0,000094
	Hasselblad	14	0,000068
DJI Air 2S	X7	13	0,000094
	Zenmuse P1	14	0,000124

В таблице 3 представлены значения динамического диапазона глаза в зависимости от явления погоды.

Таблица 3 – Значения динамического диапазона глаза в различных от явления погоды

Явление погоды	Динамический диапазон глаза
отсутствует	18
дымка	18,5
дождь	19
снег	20
морось	22

Используя разработанный алгоритм определяем значения горизонтальной видимости на трех высотах полета (рисунок 2), на основе которых, решаем предложенную систему уравнений (формула 2).

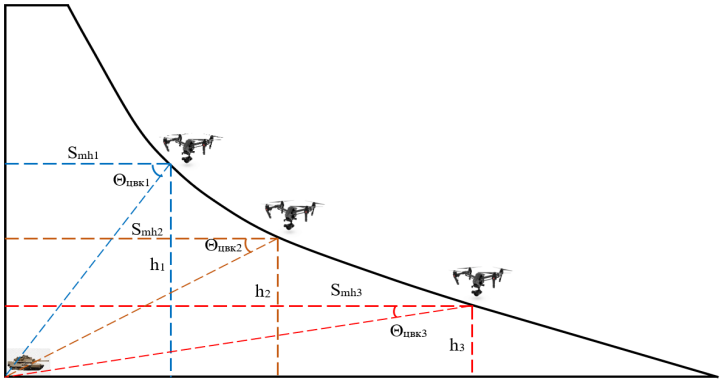


Рисунок 2 – Проведение измерений высот полета БПЛА и углов визирования ЦВК на них

В качестве примера на рисунке 3 представлена зависимость ОЭВ от разрешающей способности различных ЦВК при ВНГО=600 м и $w_{бпла}$=0 км/ч.

Анализ показывает, что при равных значениях МДВ у земли и одинаковых значения фокусного расстояния значения ОЭВ для всех ЦВК будут разными, так как зависят от разрешающей способности и динамического диапазона ЦВК. При этом значения ОЭВ будут больше у ЦВК с большей разрешающей способностью.

Если ЦВК имею равные значения фокусных расстояний и разрешающих способностей (ЦВК 2 и 3), то значения ОЭВ будут больше у ЦВК с большим динамическим диапазоном (ЦВК 2).

Таким образом, построенная модель оценивания МДВ на основе данных ОЭВ ЦВК БПЛА по предложенной методике, позволяет оценить МДВ над неосвещенной в метеорологическом отношении территорией с учетом оптических характеристик ЦВК и глаза.

Коэффициенты *A, B* и S_0, позволяют рассчитать *ВНГО*, приняв, что на нижней границе облачности $S_{ВНГО}$ = 80 м, по формуле (формула 4) [3]:

$$ВНГО = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4A \cdot (S_0 - 80)}}{2A} \wedge ВНГО > 0 \quad (5)$$

и восстановить профиль распределения горизонтальной видимости до ВНГО.

Оценка достоверности проведена по сравнению значений МДВ и ВНГО, оцененным по значениям ОЭВ, полученным по данным цифрового изображения с ЦВК БПЛА, со значениями МДВ и ВНГО, определенным с применением штатных технических средств метеорологической службы (таблица 4)

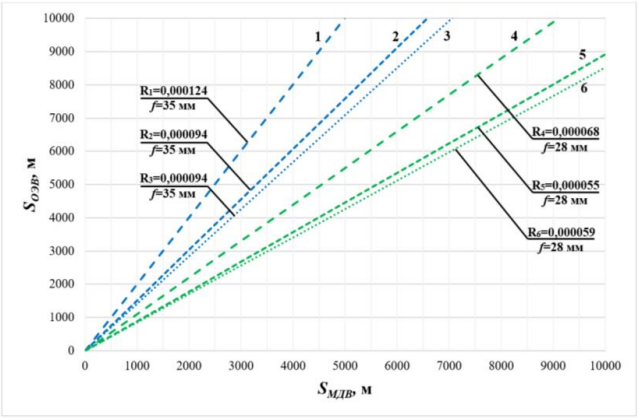


Рисунок 3 – Зависимость ОЭВ от оптических характеристик различных ЦВК (с f=35: 1-Zenmuse P1, 2-Mavic 3E, 3-X7; с f=28: 4-Hasselblad, 5-DJI Mavic Pro, 6-Evo II Pro 6K) при ВНГО = 600 м и $w_{бпла}$ = 0 км/ч

Таблица 4 – Значения критериев успешности (r – коэффициент корреляции между измеренным и расчетным значением, σ – средняя квадратическая ошибка, η – средняя абсолютная ошибка) моделей оценивания МДВ и ВНГО

Модель оценивания	Критерии успешности											
	ВНГО 100 м			ВНГО 200 м			ВНГО 300 м			ВНГО 400 м		
	r	σ	η	r	σ	η	r	σ	η	r	σ	**η**
МДВ	0,92	98,3	78,5	0,89	123,6	99,1	0,83	236,2	187,8	0,78	389,4	310,8
ВНГО	0,91	2,2	1,8	0,87	4,8	3,7	0,81	6,1	4,9	0,74	12,4	9,9

Список литературы

1. *Тудоровский А.И.* Теория оптических приборов. 2 издание. М.: 1948 – 661 с.
2. *Ландсберг Г.С.* Оптика. Учебное пособие для вузов. 7 издание. М.: Физматлит, 2021. – 852 с.
3. Камера и человеческий глаз: [Электронный ресурс] URL: http://cambridgeincolor.com (дата обращения: 20.02.2026).
4. *Степанов А.В.* Методика расчета видимости у поверхности земли над равнинной местностью с учетом физико-географических условий//Журнал «Известия Иркутского государственного университета» серия «Науки о Земле». 2025 г. Т. 51. С 80-90.

АГРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЕКЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ЦЕЛЯХ ПОДДЕРЖАНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Авдеев С.М., Кочешкова А.А., Крупин П.Ю., Свистунова Н.Ю., Канунникова В.Ю., Ромашкина С.И., Карлов Г.И., Дивашук М.Г.
ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, Москва, Россия
avdeevbio@yandex.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки методологических подходов, позволяющих более точно и быстро анализировать и дифференцировать линии сои по их чувствительности к фотопериоду. Современные методы селекции и генетического улучшения требуют интеграции новых технологий и подходов, которые обеспечивают более глубокое понимание физиологических и генетических механизмов, влияющих на фотопериодическую реакцию растений. Соя является чрезвычайно важной культурой для всего современного мира из-за ее широкого использования для потребления, в промышленных целях и в качестве кормовой добавки.
Ключевые слова. Агрометеорологические факторы, соя, фотопериодизм, анализирующий фон, климатические камеры

AGROMETEOROLOGICAL FACTORS FOR ENSURING THE BREEDING PROCESS IN ORDER TO MAINTAIN FOOD SECURITY

Avdeev S.M., Kocheshkova A.A., Kroupin P.U., Svistunova N.Yu., Kanunnikova V.Yu., Romashkina S.I., Karlov G.I., Divashuk M.G.
All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russia

Abstract: The relevance of the study is due to the need to develop methodological approaches that allow for more accurate and rapid analysis and differentiation of soybean lines based on their sensitivity to photoperiod. Modern methods of breeding and genetic improvement require the integration of new technologies and approaches that provide a deeper understanding of the physiological and genetic mechanisms that affect the photoperiodic response of plants. Soy is an extremely important crop for the entire modern world due to its widespread use for consumption, industrial purposes and as a feed additive.
Keywords. Agrometeorological factors, soybeans, photoperiodism, analyzing background, climate chambers

Селекция сои претерпевает значительные изменения благодаря внедрению методов ускоренного выращивания, таких как speed breeding. Этот метод включает использование контролируемых условий роста, в частности, увеличение продолжительности светового дня до 16-22 часов, что позволяет существенно ускорить жизненный цикл растений [1].

Методы работы включали вегетационный опыт, фенологические наблюдения, структурный анализ элементов урожайности, статистическая обработка данных. Использование климатических камер позволяет точно регулировать параметры среды (температуру, влажность, освещение), что критично для изучения реакции растений на различные фотопериоды. Преимущества данного метода заключаются в возможности: контролировать все параметры среды, минимизируя влияние внешних факторов; получать семена за короткий срок; детального изучения фенологических признаков в условиях, близких к оптимальным. Спидбридинг включает в себя регулировку ежедневного фотопериода - воздействия светового и темнового периода, влияющих на рост растений, цветение и закладку семян. При этом регулируется интенсивность света и спектральный состав света, что влияет на такие физиологические процессы, как фотосинтез и скорость транспирации. Изменения в качестве и интенсивности света также влияют на фотосинтез и накопление биомассы, как и у других бобовых культур [2, 3, 4].

В исследовании показано, что фотопериодические условия не только ускоряют или тормозят переход растений к генеративной фазе в лабораторных условиях. Короткодневный фотопериод ускоряет наступление цветения сои по сравнению с длиннодневным, при этом разница достигает 25 дней в зависимости от сорта. Из 50 изученных генотипов у половины начало цветения наступало в одни и те же сроки на

разных фотопериодах, остальные генотипы на коротком дне начинали зацветать на 6-15 дней раньше по сравнению с длинным.

Полученные данные свидетельствуют о том, что короткий день стимулирует более быстрое наступление репродуктивной фазы у растений сои в контролируемых условиях, что может быть связано с влиянием света на регуляцию генов, ответственных за цветение. В то время как короткий день способствует удлинению вегетационного периода, замедляя переход к цветению. Выявлены сорта с различной степенью чувствительности к фотопериоду. Исследование подтвердило, что короткий день ускоряет цветение, тогда как длинный день приводит к более позднему переходу к генеративной фазе и увеличению высоты растений. Сорта с высокой чувствительностью к длине светового дня могут обеспечить более раннее цветение и высокий урожай в условиях оптимального освещения, в то время как сорта с низкой чувствительностью могут быть полезны в ситуациях, где стабильность важнее скорости роста.

Понимание влияния фотопериода на рост и развитие сои может способствовать оптимизации стратегий выращивания и повышению эффективности производства сои в условиях искусственного климата. Таким образом, фотопериод играет ключевую роль в регуляции роста и продуктивности сои. Детерминантные и индетерминантные сорта демонстрируют различную чувствительность к длине дня, что необходимо учитывать при селекции и подборе сортов для конкретных агроклиматических условий.

Ранжирование сортов по фоточувствительности показало широкое разнообразие адаптационных стратегий, что открывает перспективы для селекции. Использование маркер-ориентированной селекции позволит создавать сорта с оптимальным временем цветения и продуктивностью, адаптированные к конкретным климатическим условиям. Также выявлено, что фоточувствительность напрямую связана с изменениями в массе 1000 семян — важном показателе качества и урожайности. Сорта, демонстрирующие значительное снижение массы семян при длинном дне, требуют особенно внимательной селекционной работы для улучшения качества продукции.

Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (№ государственного задания FGUM-2025-0011).

Список литературы

1. Архитектура E-генного кластера как фактор, определяющий фотопериодическую реакцию у сои / А. А. Кочешкова, Н. Ю. Свистунова, А. В. Архипов [и др.] // Молекулярная генетика, микробиология и вирусология. – 2025. – Т. 43, № 4-2. – С. 171-176. – DOI 10.17116/molgen202543042171. – EDN WVJATN.

2. *Лазарев, Н. Н.* Накопление валовой энергии бобово-злаковыми агрофитоценозами / Н. Н. Лазарев, С. М. Авдеев, Л. Ю. Демина // Доклады ТСХА. Том Выпуск 279, Часть 1. – Москва: Российский государственный аграрный университет, 2007. – С. 374-377. – EDN KHRDIO.

3. *Лазарев, Н. Н.* Продуктивность сортов клевера лугового и люцерны изменчивой нового поколения в травосмесях со злаковыми травами / Н. Н. Лазарев, С. М. Авдеев // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 2. – С. 40-48. – EDN HTSULT.

4. *Лазарев, Н. Н.* Формирование урожаев многолетними бобовыми и злаковыми травами в засушливых условиях / Н. Н. Лазарев, А. В. Кольцов, С. М. Авдеев // Доклады ТСХА. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2003. – С. 196-199. – EDN NYKQVD.

МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ТИПА «МОНОКЛЬ»

Кузнецов И.Е., Слащёв С.В.
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
sergslashyov@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются различные подходы к оцениванию и прогнозированию трёх составляющих скорости ветра по высотам, по данным радиолокационных измерений метеорологических объектов. Представлены результаты расчётов ветровых характеристик, позволяющих на основе наблюдений за состоянием облаков и осадков, предсказывать зоны сдвига ветра и турбулентности различной интенсивности. Проведена оценка полученных результатов в сравнении с данными, предоставляемыми МРК БЗ «Монокль».
Ключевые слова. Турбулентность, методика, доплеровский локатор, безопасность полётов.

MODEL FOR MONITORING ATMOSPHERIC TURBULENCE USING MONOCOLE-TYPE METEOROLOGICAL RADAR SYSTEMS

Kuznetsov I.E., Slashchev S.V.
Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy"

Annotation. This article discusses various approaches to estimating and predicting the three components of wind speed at different altitudes based on radar measurements of meteorological objects. The article presents the results of calculations of wind characteristics that allow for the prediction of wind shear zones and turbulence of varying intensity based on observations of cloud and precipitation conditions. The obtained results are evaluated in comparison with data provided by the Monocle radar system.
Keywords. Turbulence, methodology, Doppler radar, flight safety.

Безопасность и эффективность полётов государственной авиации напрямую зависят от качества метеорологического обеспечения, которое непосредственным образом связана с точностью и достоверностью предоставляемой метеорологической информации. Как показал анализ авиационных инцидентов и происшествий большая доля аварийных ситуаций возникает при попадании в зоны интенсивной турбулентности и сдвигов ветра [1-5].

Традиционные методы оценки районов и времени возникновения этих явлений (такие как сообщения пилотов, расчёты по данным радиозондирования) имеют существенные ограничения по оперативности, пространственно-временному разрешению и объективности. Внедрение современных доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ) открывает новые возможности для детального мониторинга атмосферных процессов [2, 6]. В России активно разворачивается сеть современных ДМРЛ, включая метеорологические радиолокационные комплексы ближней зоны (МРК БЗ) «Монокль», способные с высокой дискретностью в пространстве и времени оценивать поля отражаемости, радиальной скорости и ширины доплеровского спектра. Эти данные несут в себе ценную информацию о ветровом режиме, включая наличие опасных сдвигов ветра и зон турбулентности.

Международная организация гражданской авиации (ИКАО) утвердила стандартный показатель для оценки интенсивности турбулентности, а именно, скорость вихревой диссипации (EDR), значение которого не зависит от типа воздушного судна [3, 4]. Вместе с этим методики для его расчёта по данным ДМРЛ требуют совершенствования. Отдельной проблемой является расчёт горизонтального и вертикального сдвигов ветра по данным современных локаторов, таких как «Монокль». Существующие подходы зачастую разработаны для других типов локаторов или не в полной мере используют возможности современных МРК и требуют адаптации и уточнения. Кроме того, комплексное использование данных ДМРЛ и традиционных аэросиноптических данных позволяет не только проводить детальную диагностику текущей обстановки, но и осуществлять сверхкраткосрочное прогнозирование опасных ветровых явлений [1-6].

Поэтому задача исследования заключается в необходимости разработки методики предназначенной для оперативного оценивания и краткосрочного прогнозирования характеристик ветра, а именно, его сдвига и турбулентности с использованием данных штатного МРК БЗ «Монокль» и аэросиноптической информации для повышения уровня метеорологического обеспечения и безопасности полётов государственной авиации.

Целью работы является повышение качества информации о ветровых характеристиках на основе применения методики оценивания и краткосрочного прогнозирования характеристик сдвига ветра и турбулентности по данным МРК БХ «Монокль» и аэросиноптическим данным для использования в системе метеорологического обеспечения государственной авиации.

Перейдём к решению поставленной задачи.

Восстановление трёхмерного поля среднего ветра является первым шагом, который необходимо выполнить. Рассчитать все три компоненты скорости ветра (*u*-зональная, *v*меридиональная, *w* вертикальная) по данным одного доплеровского радиолокатора задача нетривиальная, так как ДРЛС напрямую измеряет только одну компоненту радиальную скорость (V_r). Поэтому в существующих алгоритмах используют три измерения и по зависимость (1), определяют составляющие ветра:

$$V_r = u \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) + v \cdot \cos(\theta) + w \cdot \sin(\theta), \quad (1)$$

где ϕ азимут луча радара; θ угол места луча радара;

В настоящее время измерения радиальной скорости проводят на различных азимутах при одинаковом угле места и решают систему из трёх уравнений, делая допущения об однородности горизонтального ветра в районе зондирования. Это позволяет получить данные при отсутствии сильных атмосферных возмущений и выпадающих осадков. Но в нашем случае как раз сильные сдвиги ветра и турбулентность вызывает опасность. Вместе с тем, такой подход обладает сложностью в расчётах, поскольку близкие по координатам измерения приводят к получению «вырожденной» матрицы и, как следствие, к неправильным вычислениям. Также не учитываются скорости падения капель при расчётах вертикальных потоков воздуха.

Поэтому в работе представляется следующий алгоритм. Для его реализации РСЛ излучает электромагнитный импульс. Этот импульс отражается от облачных частиц (капель воды, кристаллов льда, града и т.д.). если частицы движутся к РЛС или от РЛС, частота отражённого сигнала изменяется (эффект Доплера). По величине этого сдвига частоты РЛС определяет радиальную скорость (V_r) проекцию полной скорости частиц на направление луча РЛС. Положительная V_r обычно означает движение от РЛС, отрицательная к РЛС. Если облачные частицы (особенно мелкие) достаточно хорошо увлекаются воздушным потоком, то их скорость близка к скорости ветра. Однако для крупных частиц (град, крупные капли дождя) необходимо учитывать их собственную скорость падения (V_t). Этот эффект в современных локаторах не учитывается.

$$W = W_a - V_t. \quad (2)$$

где W_a вертикальная скорость воздуха (положительная вверх); V_t скорость падения гидрометеоров (положительная величина, направленная вниз).

Радиолокатор напрямую измеряет радиальную составляющую скорости – то есть проекцию полного вектора скорости на направление «радар – цель», а также ширину доплеровского спектра отражённого сигнала. На основании этих данных и использованием методов вариационного анализа можно восстановить среднее значение вектора скорости ветра, а по значениям скорости диссипации турбулентной энергии сделать вывод о наличии зон с повышенной турбулентностью.

Суть метода заключается в минимизации функционала, который отражает степень согласованности между вектором состояния системы (например, атмосферой) и имеющимися радиолокационными данными. Метод представлен на рисунке 1.

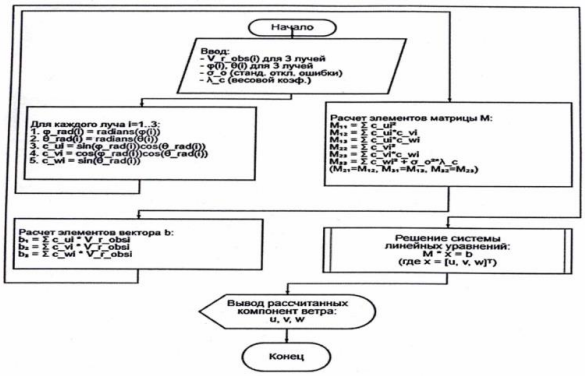


Рисунок 1 – Алгоритм расчёта составляющих ветра по радиальной скорости

Для оценки качества данного алгоритма был проведен численный эксперимент, когда задавались значения составляющих ветра, данные зашумлялись исходя из значения изменчивости ветра. Затем применялся данный алгоритм и рассчитанные значения сравнивались с заданными пользователем. Полученные результаты показали, что ошибка расчёта не превысила 5 процентов по всем составляющим ветра. После получения трёхмерного поля среднего ветра производится анализ на наличие опасных для авиации явлений по следующему алгоритму. В каждой точке (i,j,k) регулярной декартовой сетки с шагами $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ вычисляются частные производные компонент ветра с использованием конечно-разностных аппроксимаций:

Вертикальный сдвиг зональной компоненты:

$$\partial u/\partial z \approx (u(i,j,k+1) - u(i,j,k-1))/(2\Delta z). \quad (3)$$

Вертикальный сдвиг меридиональной компоненты:

$$\partial v/\partial z \approx (v(i,j,k+1) - v(i,j,k-1))/(2\Delta z). \quad (4)$$

Аналогично проводится расчёт для горизонтальных сдвигов:

$$\partial u/\partial y \approx (u(i,j,k+1) - u(i,j,k-1))/(2\Delta y). \quad (5)$$

Проводится расчёт модуля вертикального сдвига ветра:

$$(VWS): VWS(i,j,k) = \sqrt{((\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2)}. \quad (6)$$

Значения VWS и HWS сравниваются с пороговыми значениями, рекомендованными ИКАО для классификации интенсивности сдвига ветра (рисунок 2).

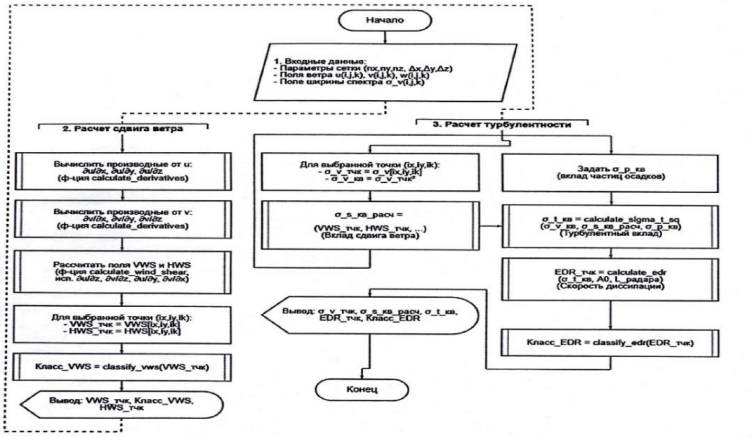


Рисунок 2 – Алгоритм расчёта сдвига ветра и турбулентности

Критериальные значения для вертикального сдвига ветра на малых высотах (LLWS), выраженные в (м/с) / 30м пересчитываются в $с^{-1}$:

умеренный: 0.026 0.051 $с^{-1}$;

сильный: 0.052 0.077 $с^{-1}$;

очень сильный (экстремальный): >0.077 $с^{-1}$.

Определение турбулентности предлагается осуществлять по следующему алгоритму:

Измеряем ширину доплеровского спектра $\sigma_v(x,y,z)$ по радиолокационным данным, вычитаем вклад, который вносит сдвиг ветра, по формуле определяем скорость диссипации турбулентной энергии, проводим сравнение с критериальными значениями для авиации:

лёгкая:0.10 0.20 $с^{-1}$;

умеренная: 0.21 0.39 $с^{-1}$;

сильная: 0.40 0.69 $с^{-1}$;

экстремальная: >0.70 $с^{-1}$.

Делаем вывод о степени турбулентности.

После идентификации и оценки текущих явлений следующим шагом является их прогнозирование на ближайшее будущее. Прогноз на ближайшие 1-3 часа строится методом экстраполяции:

Выделение зон с опасными значениями ГВС, ВСВ, EDR на последовательных радиолокационных картах;

Расчёт вектора перемещения этих зон (например, методом корреляционного анализа или слежения за центрами);

Экстраполяция положения зон на требуемый срок упреждения;

Оценка тенденции изменения интенсивности и площади зон;

Корректировка прогноза с учётом ожидаемого развития синоптической ситуации (например, замедление зон перед фронтом окклюзии, усиление при входе в зону струйного течения).

Проводится исходя из знаний текущих координат и координат района, для которого составляется прогноз. Для прогноза интенсивности может использоваться линейная экстраполяция ее недавнего изменения.

Численный эксперимент по оценке качества разработанной методики:

Предположим, «истинный» ветер в интересующей нас точке:

u_{true}= 10 м/с (зональная компонента, на восток);
v_{true}= 5 м/с (меридиональная компонента, на север);
w_{true}= 1 м/с (вертикальная компонента, вверх).

Радар находится в (0,0,0). Мы хотим восстановить u, v, w. пусть у нас есть три измерения V_{r_obs} со следующими параметрами лучей:
Луч$_1$:φ = 40^o, θ = 10^o;
Луч$_2$:φ = 50^o, θ = 12^o;
Луч$_3$:φ = 45^o, θ = 8^o;

Все лучи направлены примерно на северо-восток с небольшими углами места.

В результате расчётов получены следующие данные: $u \approx 9{,}98$ м/с, $v \approx 4{,}59$ м/с, $w \approx 1{,}02$ м/с.

Несмотря на близкие азимуты и углы места, которые делают задачу разделения u,v,w более сложной (матрицы M без члена $\sigma_o^2 \cdot \lambda_c$ была бы хуже обусловлена), вариационный анализ с добавлением даже простого ограничения на w (J_{c_simple}) позволил получить достаточно хорошие оценки всех трёх компонент.

Компонента u восстановлена очень точно. Компонента v имеет небольшую ошибку, но близка к истинному значению. Компонента w также восстановлена хорошо, во многом благодаря члену J_{c_simple} , который стабилизирует решение для w. Если бы λ_c было равно нулю, то есть J_c отсутствовал, решение для w (и, как следствие, для u и v) было бы гораздо менее устойчивым и более чувствительным к малейшим изменениям в V_{r_obs} или ошибкам округления, так как коэффициенты cwi малы.

Определение турбулентности предлагается осуществлять по следующему алгоритму: измеряем ширину доплеровского спектра $\sigma_v(x,y,z)$ по радиолокационным данным.

Проводим расчёт вклада сдвига ветра в измеренную дисперсию скоростей ($\sigma_s_calc^2$): этот шаг критичен для точной оценки турбулентности. Используются восстановленные поля среднего ветра (u, v, w) и их градиенты.

Оценка скорости диссипации турбулентной энергии (ε) и EDR ($\varepsilon^{(1/3)}$): аналогичные, адаптированные для радиолокационных измерений:

Сравнение с критериальными значениями EDR для авиации:
лёгкая:0.10 0.20 c^{-1};
умеренная: 0.21 0.39 c^{-1};
сильная: 0.40 0.69 c^{-1};
экстремальная: >0.70 c^{-1}.

Пример прогнозирования. Выявленная зона сильного вертикального сдвига ветра (VWS= 0.06 c^{-1}) в 10 км к западу от ВПП движется на восток со скоростью 40 км/ч. Прогноз: через 15 минут она достигнет ВПП (40км/ч*0.25 ч = 10км). Интенсивность прогнозируется как сохраняющаяся или слегка ослабевающая на основе предыдущей тенденции.

Как показывают расчёты, точность определения характеристик ветра значительно возрастает особенно в зонах возникновения кучево-дождевых облаков и составляет 15-20 процентов по сравнению с существующими подходами, а вероятность правильного прогноза увеличивается на 30 процентов.

Таким образом, предложенные алгоритмы позволяют существенно повысить качество прогнозирования опасных явлений погоды, связанные с ветровыми характеристиками: точность определения характеристик ветра, особенно в зонах с кучево-дождевой облачностью, увеличивается на 15-20 процентов по сравнению с существующими подходами. Вероятность правильного прогноза опасных ветровых явлений – на 30 процентов.

Методика способствует повышению качества метеорологического обеспечения и безопасности полётов государственной авиации.

Список литературы

Дорофеев В.В., Кузнецов И.Е., Степанов А.В., Черепанов Д.В. Метеорология специального назначения. Часть 2. Гидрометеорологическое обеспечение повседневной деятельности войск (сил). Учебное пособие. Воронеж. «Цифровая полиграфия», 2021. 248с.
Руководство по предотвращению авиационных происшествий с государственными воздушными судами Российской Федерации (РПАП – 2002). М.: Воениздат, 2002. 113 с.
Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. Научно – методическое пособие. М.: Росгидромет, 2016. 252с.
Богаткин О.Г. Основы авиационной метеорологии. СПб: Гидрометеоиздат, 2009. 339 с.
Федеральные авиационные правила полётов в воздушном пространстве Российской Федерации. М.: Воениздат, 2002. 57 с.
Билетов М.В., Тищенко А.И., Кузнецов И.Е. Радиолокационная метеорология. Часть 1. Воениздат, 2008. 328 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЗОНЕ АТМОСФЕРНЫХ ФРОНТОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТАЛЬНЫХ ИНВЕРСИЙ

Расторгуев И.П., Денега И.З., Покусаев И.Н.
Военно-воздушная академия, Воронеж
iprastor@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика анализа и краткосрочного прогнозирования продолжительности и максимальной интенсивности осадков в зоне атмосферных фронтов по данным радиозондирования атмосферы.
Ключевые слова. Метеорологические условия, атмосферный фронт, инверсия температуры, прогноз погоды, атмосферные осадки.

INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS IN THE AREA OF ATMOSPHERIC FRONTS ON THE PARAMETERS OF FRONTAL INVERSIONS

Rastorguev I.P., Denega I.Z., Pokusaev I.N.
Military Air Academy, Voronezh

Annotation. A methodology for analyzing and short-term forecasting of meteorological flight conditions in the atmospheric front zone based on atmospheric radiosonde data is presented.
Keywords. Meteorological conditions, atmospheric front, temperature inversion, weather forecast, atmospheric precipitation.

Температурные инверсии имеют значительную повторяемость на разных высотах в пределах тропосферы и распространены по всему Земному шару. Поскольку инверсии играют существенную роль в формировании уровня загрязнения и метеорологических условий, их образованию, динамике, повторяемости и параметрам посвящено значительное количество исследований. В большей части работ рассматривается влияние задерживающих слоёв на пространственно-временное распределение атмосферных примесей. Начальным этапом исследования метеорологических аспектов является анализ статистических характеристик инверсионных слоёв, сопутствующих

значений метеорологических величин и характеристик явлений погоды, применительно к местным физико-географическим условиям [1-7 и др.]. Результаты исследования вопросов анализа и прогноза отдельных явлений погоды и метеорологических условий полетов изложены в работах [8-11 и др.].

Изучению подвержены, как правило инверсии в нижнем 1000-метровом слое. В то же время практический интерес представляют и фронтальные инверсии на высотах от нескольких сотен метров до 5-6 километров. Такие инверсии имеют наибольшую продолжительность существования, не разрушаются с дневным прогревом, имеют значительный диапазон вертикальной протяжённости (от 200-300 м до одного километра и более) и интенсивности (от десятых градуса, до 10 градусов и более).

С целью исследования зависимости характеристик метеорологических условий в зоне атмосферных фронтов от параметров фронтальных инверсий были отобраны соответствующие случаи за период с 2018 по 2025 год, наблюдавшиеся в тёплый и переходные периоды (апрель – октябрь) в различных физико-географических условиях: северо-запад и Беларусь, центр и юг европейской территории Российской Федерации.

На данном этапе рассматривались две характеристики метеорологических условий в зоне атмосферных фронтов: продолжительность осадков и их максимальная интенсивность.

Рассматривались случаи с тёплыми и холодными фронтами первого и второго рода, перемещающимися с юго-западного, западного и северо-западного направления. Всего в выборку было включено более 1400 случаев по девяти пунктам.

Пример рассматриваемой синоптической ситуации приведён на рисунке 1.

Методика формирования исходных данных заключалась в следующем.

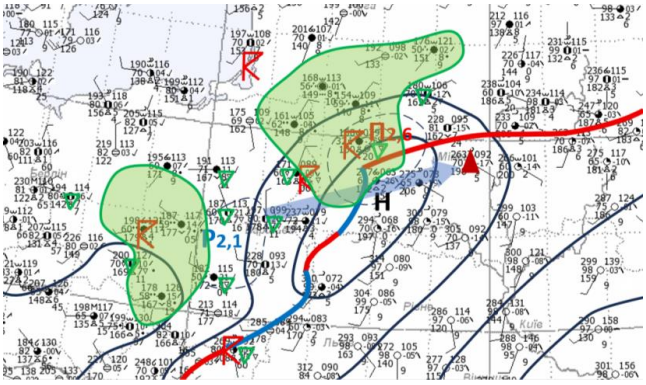


Рисунок 1 – Пример рассматриваемой синоптической ситуации на приземной карте

1. Методом обратных траекторий определялся участок фронта, прохождение которого ожидается через рассматриваемый пункт.

2. Определялся ближайший к расчётному участку фронта пункт радиозондирования. При прогнозе на день брались данные радиозондирования за 3 часа московского времени, при прогнозе на ночь – за 15 часов. При прохождении тёплого фронта использовались данные с пунктов, расположенных на удалении от 50 до 600 км перед приземной линией фронта, высота инверсии при этом составляла от 250-300 м до 2,5-3,0 км. При холодном фронте пункты зондирования брались за линией фронта на удалении 30-550 км при $H_{инв}$= 4,0-4,5 км.

Пример используемых исходных данных показан на рисунке 2.

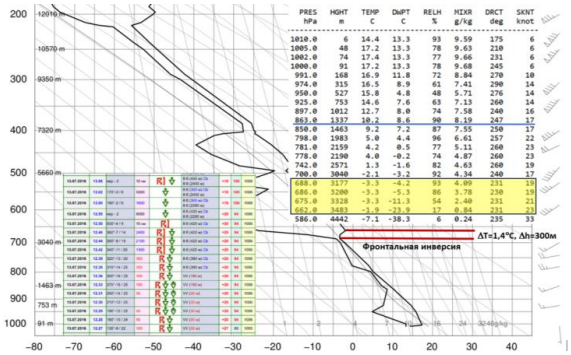


Рисунок 2 – Пример используемых исходных данных

Максимальная интенсивность оценивалась по минимальному значению видимости.

Далее были рассчитаны коэффициенты корреляции между значениями параметров инверсии со значениями продолжительности и максимальной интенсивности осадков.

Данные по корреляционному анализу приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции между значениями параметров инверсии со значениями продолжительности и максимальной интенсивности осадков

Х-ка осадков	Район/Х-ка инверсии	$\Delta t_{ин}$	$\Delta h_{ин}$	$h_{ин}$	γ	Э	Y	$L_{АФ}$
Продолжительность	Северо-запад	0,33	**0,64**	0,31	0,43	0,35	0,54	0,24
	Центр	0,28	**0,72**	0,25	0,44	0,40	0,55	0,18
	Юг	0,41	**0,68**	0,37	0,37	0,35	0,51	0,27
Интенсивность	Северо-запад	**0,77**	-0,08	0,34	**0,71**	0,34	0,42	0,19
	Центр	**0,75**	0,18	0,25	**0,75**	0,35	0,45	0,14
	Юг	**0,67**	0,07	0,27	**0,70**	0,46	0,50	0,17

Подвергались анализу следующие характеристики:

$h_{ин}$ – высоты нижней границы фронтальной инверсии;

$\Delta h_{ин}$ – вертикальная мощность фронтальной инверсии;

$\Delta t_{ин}$ – интенсивность фронтальной инверсии;

γ – вертикальный температурный градиент в слое фронтальной инверсии;

Э – коэффициент эффективности фронтальной инверсии [12].

Y - модернизированный показатель «запирания» воздуха в подынверсионном слое [8];

$L_{АФ}$ – удаление пункта зондирования от участка атмосферного фронта.

Интенсивность осадков в наибольшей степени связана с интенсивностью инверсии и вертикальным температурным градиентом, продолжительность осадков – с вертикальной протяжённостью слоя инверсии. В отличии от влияния приземных инверсий на характеристики сложности метеорологических условий, значения коэффициента эффективности фронтальной инверсии и модернизированный показатель «запирания» воздуха в подынверсионном слое в значительно меньшей степени влияют на степень выраженности фронта и характеристики осадков в их области.

Значения показателей тесноты связи характеристик осадков и параметров инверсии существенно отличаются по месяцам рассматриваемого периода и скоростям

перемещения атмосферных фронтов, а также зависят от величины меридиональной составляющей направления перемещения фронта. В то же время зависимость коэффициентов корреляции мало изменяется по рассматриваемым регионам. Эта зависимость просматривается только на границах переходных периодом с холодным периодом года.

На основе проведённого корреляционного анализа методом пошаговой линейной регрессии дифференцированно по пунктам и типам атмосферных фронтов были получены уравнения для определения максимальной интенсивности и продолжительности осадков в зоне атмосферных фронтов по данным радиозондирования (по значениям параметров фронтальных инверсий). Уравнения имеют размерность от 2 до 4, определённую по критерию Мэллоя.

Качество разработанных прогностических правил оценивалось на независимом материале по средним абсолютным ошибкам и коэффициентам детерминации.

Поскольку нормативными документами не определены требования к точности прогноза количества осадков и их продолжительности, а продолжительность осадков и их интенсивность изменялись в широких пределах, то для более наглядного представления о точности прогнозов, результаты приведены в виде процентов ошибок прогнозов относительно фактически наблюдавшихся значений прогнозируемых величин.

Значения критериев успешности разработанных прогностических правил приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения средней абсолютной ошибки и коэффициента детерминации, (%)

Х-ка осадков	Район/Критерий	$\delta_{ТФ}$	$R^2_{ТФ}$	$\delta_{ХФ}$	$R^2_{ТФ}$
Продолжительность	Северо-запад	26-33	60,3	29-35	54,3
	Центр	17-27	70,0	20-30	61,2
	Юг	21-28	63,1	28-33	57,9
Интенсивность	Северо-запад	16-37	55,5	24-42	49,7
	Центр	19-30	65,6	18-33	55,2
	Юг	21-28	64,1	23-31	57,8

Анализируя полученные результаты, можно сформулировать следующие выводы.

1. Точность прогнозов изменяется в широких пределах в зависимости от региона, типа атмосферного фронта и прогнозируемой величины.

2. Большая точности и при прогнозе максимальной интенсивности, и при прогнозе продолжительности осадков достигнута для центрального района. Это обусловлено относительно однородной равнинной подстилающей поверхностью, удалённостью от обширных водных объектов и горных массивов, а также большей плотностью пунктов радиозондирования.

3. Интенсивность осадков прогнозируется с большими значениями невязок, особенно в зонах холодных фронтов, что обусловлено локальностью конвективных процессов, характерных для тёплого периода года.

4. Доля дисперсии, учтенная моделями, не превышает 70 процентов, в отдельных случаях опускается до 50-55%. Из этого следует, что для повышения качества прогностических правил требуется привлечение дополнительных исходных данных: характеристик влагосодержания в слое и над слоем инверсии (в тёплой воздушной массе, где происходит основной процесс облакообразования), распределения параметров ветра по высотам (как характеристики кинетической энергии) и характеристик осадков в зоне фронта в момент производства расчётов.

Таким образом, в ходе проведённого исследования показана возможность и целесообразность использования характеристик фронтальных инверсий для прогноза атмосферных осадков в зонах атмосферных фронтов. Так же определены направления повышения качества прогностических правил в рассматриваемых синоптических ситуациях.

Список литературы

1. *Волобуева О.В., Фисенко А.О.* Исследование инверсий в арктической зоне РФ. В сборнике: Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. Материалы VII Всероссийской научной конференции. Под общей редакцией Ю. В. Кулешова. Санкт-Петербург, 2022. С. 15-20.
2. *Камардин А П., Невзорова И В., Одинцов С Л.* Экстремальные инверсии температуры в пограничном слое атмосферы. В сборнике: Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. XXVIII Международный симпозиум. Томск. 2022. С. 113-116.
3. *Камардин А.П., Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы над г. Томском. Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 9 (416). С. 742-753.
4. *Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.* Температурный режим пограничного слоя атмосферы Сибири. В сборнике: Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. XXVIII Международный симпозиум. Томск, 2022. С. 12-15.
5. *Симакина Т.Е., Крюкова С.В.* Инверсии пограничного слоя в Санкт-Петербурге. В сборнике Авиационная и спутниковая метеорология. Материалы III Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: РГГМУ. 2025. С. 101-102.
6. *Фисенко А.О., Волобуева О.В.* Исследование инверсии температуры в арктической зоне Российской Федерации. В сборнике Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии. Материалы международной научно-практической конференции. Минск: БГУ. 2023. С. 254-259.
7. *Алексеев В.В.* Полёты в опасных метеорологических условиях. Проблемы безопасности полетов. 2017. № 1. С. 30-46.
8. *Расторгуев И. П., Сыпченко Н.Д.* Методика прогнозирования метеорологических условий полётов на основе использования параметров задерживающих слоев нижней тропосферы. Сб. статей X Межвузовской научно-практической конференции «Молодёжные чтения, посвященные памяти Ю.А. Гагарина». 18-20 мая 2023. г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2023. С. 87-94.
9. *Расторгуев И. П., Сыпченко Н.А., Бойко Н.Д.* Физико-статистический анализ и прогноз метеорологических условий на основе использования характеристик задерживающих слоёв. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Авиационная и спутниковая метеорология». 9 октября 2023. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2023. С. 201-205.
10. *Смородин Б.Л., Калинин Н.А., Давыдов Д.В.* Моделирование процесса изменения температуры капель при выпадении замерзающих осадков. Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 34-40.
11. *Фисенко А.О.* Исследование условий образования сдвига ветра аэропорту города Мурманск. В сборнике Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития. Материалы II Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 448-453.
12. *Назаренко А. В.* Инверсии в атмосфере. Воронеж: ВВВАИУ. 1993. 98 с.

ПЕРСПЕКТИВЫ ТУРБОКОНДЕНСАТНЫХ СТАНЦИЙ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ НА БАЗЕ ПРИМОРСКИХ АЭС И ТЭС

Рогожкин В.В.[1], Горынин В.И.[2], Воронов Н.В.[3], Горба Р.И.[1], Ильинский К.М.[1], Тхор И.А.[1]
[1]АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург
[2]ОАО «Научно-производственное объединение «Центральный Котлотурбинный Институт» (НПО ЦКТИ), Санкт-Петербург
[3]Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), Санкт-Петербург
vigorynin@gmail.com

Аннотация. Предложены возможности природно-техногенного климатического и пресноводного регулирования для жарких стран регионов Юго-Западной Азии, таких как КСА и ОАЭ, в зоне пустынь с дефицитом питьевой пресной воды. Рассматривается возможность размещения турбоконденсатных станций на базе приморских АЭС и ТЭЦ для питьевого водоснабжения населения прибрежных городов стран Саудовской Аравии, ОАЭ, Исламской Республики Иран.
Ключевые слова. Конденсатная система, питьевая вода, испарения южных морей, турбокомпрессорная система «CONDENSOR», адиабатическое расширение сжатого воздуха.

PROSPECTS FOR TURBO-CONDENSATE DRINKING WATER SUPPLY STATIONS BASED ON COASTAL NUCLEAR AND THERMAL POWER PLANTS

Rogozhkin V.V.[1], Gorynin V.I.[2], Voronov N.V.[3], Gorba R.I.[1,] Ilinskiy K.M.[1], Tkhor I.A.[1]
[1]JSC «Atomenentgoproekt», St. Petersburg
[2]JSC «Scientific and Production Association «Central Boiler Turbine Institute» (NPO CKTI), St. Petersburg
[3]Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. Potential for natural and man-made climate and freshwater regulation is proposed for hot countries in Southwest Asia, such as the Kingdom of Saudi Arabia and the United Arab Emirates, in desert zones with a shortage of fresh drinking water. Potable water supply for coastal cities in Saudi Arabia, UAE, Iran and other countries is explored.
Keywords. Condensate system, drinking water, evaporation of the southern seas, turbocompressor system «CONDENSOR», turbo-condensate of compressed air.

Перспективы на оснащение атомных и тепловых электростанций конденсатными системами «CONDENSOR» является очень полезной и даже необходимой опцией для стран с аридным климатом, малым количеством осадков и нехваткой пресной воды, например, для Королевства Саудовская Аравия, Объединенных Арабских Эмиратов, государств Африки, Азии и Австралии. Системы «CONDENSOR» обеспечивает производство природной пресной воды дождевого качества, в больших объемах, без солевых и промышленных отходов. Эта технология позволяет турбокомпрессорами перехватывать на высоте более 50 метров и сжимать (до 2,5 атм.) большие объемы испарений южных морей и конденсировать их посредством охлаждения при адиабатическом расширении сжатого воздуха [1]. Получается аналог дождевой воды, дополнительно минерализуемый солями по государственным стандартам и не имеющий изотопных и химических отклонений обессоленной морской воды. Этот процесс не зависит от суточных и сезонных колебаний температуры воздуха, позволяет также снизить температуру сбросной воды АЭС, исключить ее негативное воздействие на экологию морей. Одна турбоконденсатная установка «CONDENSOR» (далее - ТС) производит за сутки до 4 тыс. тонн технической пресной или природной питьевой воды с качеством, соответствующим государственным стандартам (рисунок 1).



Рисунок 1 – Станция «CONDENSOR» для турбоконденсации атмосферной влаги морей

АЭС и ТЭЦ, способные обеспечить «CONDENSOR» электроэнергией 200МВт, могут вырабатывать до 50 тыс. тонн питьевой воды в сутки. Цена атмосферного конденсата «дождевого качества», вырабатываемого турбокомпрессорной системой «CONDENSOR», например, в Египте, в 3–5 раз ниже цены привозной питьевой воды.

Население стран Аравийского полуострова, Африки и Азии (более 4 млрд. чел.) сейчас остро нуждаются в природной питьевой воде.

Места перспективного размещения ТС «CONDENSOR» в районах крупных приморских населенных пунктов Саудовской Аравии, оснащенных ТЭЦ, показаны на рисунке 2.



Рисунок 2 – Места перспективного размещения ТС «CONDENSOR»

Со стороны Персидского залива можно рассчитывать на размещение ТС «CONDENSOR» в районе действующей АЭС «Busher» и в районе строящейся АЭС «Hormoz» (Ормузский пролив) (рисунок 3).

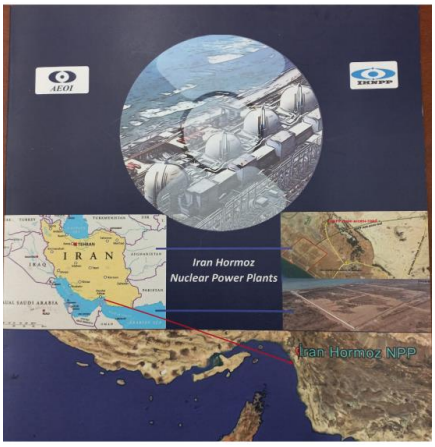


Рисунок 3 – Место строящейся АЭС «Hormoz»

Мировое сообщество (27 государств) запатентовали разработку специалистов АО «Атомэнергопроект» PCT/RU2017/001008 «Конденсатная система рекуперации энергосброса АС», (далее «CONDENSOR»). На рисунке 4 представлены некоторые из этих патентов.



Рисунок 4 – Патенты на установку ТС «CONDENSOR»

Заключение

1. Установка ТС «CONDENSOR» использует практически безграничную и экологически чистую природную атмосферную влагу акватории Красного моря и Персидского залива, турбокомпрессорную систему охлаждения воздуха при его адиабатическом расширении с образованием пресноводного конденсата, где источником получения технологического холода служит электроэнергия из различных источников Ирана и Саудовской Аравии.
2. Расположенная на побережье Красного моря и Персидского залива промышленная конденсационная установка ТС «CONDENSOR» производительностью более 4000 куб.м/сутки при ее неограниченном тиражировании обеспечит принципиальное снижение дефицита природных пресноводных ресурсов всех прибрежных городов Ирана и Королевства Саудовской Аравии.
3. Зелёная безотходная экологически безопасная турбоконденсатная технология ТС «CONDENSOR» обеспечит природной пресной воды дождевого и питьевого качества все прибрежные города Юго-Западной Азии и город будущего Неом в Королевстве Саудовской Аравии.

Список литературы

1. *Горынин В.И., Рогожкин В.В., Михайлов В.Е., Сухоруков Ю.Г., Ланин А.А., Хоменок Л.А., Есин С.Б.* Природная пресная вода для Саудовской Аравии // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. – С. 118–128. DOI: https://doi.org/10.18721/JEST.29106.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ВНУТРИМАССОВОЙ ОБЛАЧНОСТИ НА ПЕРИФЕРИИ АНТИЦИКЛОНА

Черепанов Д.В.[1], Черепанова М.А.[2],
[1] Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Воронеж
[2] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
cherepanov.77@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается методика прогноза высоты нижней границы внутримассовой облачности ниже 300 м на периферии антициклона в южных районах Приморского края. Показано, что существующие способы прогноза нижней границы облачности, разработанные преимущественно для условий Европейской территории России,

обеспечивают оправдываемость не более 75% и не дают удовлетворительного качества прогнозов для рассматриваемого региона. На основе статистической обработки данных синоптических ситуаций с различными типами облачности реализована дискриминантная функция, включающая дефицит влажности у поверхности, дефицит и температуру точки росы на уровне 925 гПа, а также параметр Ричардсона, характеризующий турбулентный режим в нижнем слое атмосферы. Далее применяется регрессионное уравнение для уточнения высоты нижней границы облаков. Оценка качества методики по обучающей и контрольной выборкам удовлетворяет требованиям метеорологического обеспечения полётов.
Ключевые слова. Высота нижней границы облаков; внутримассовая облачность; периферия антициклона; параметр Ричардсона; прогноз низкой облачности; Приморский край.

METHODOLOGY FOR PREDICTING THE HEIGHT OF THE LOWER BOUNDARY OF THE INTRAMASSIC CLOUDS ON THE PERIPHERY OF THE ANTICYCLONE

Cherepanov D.V.[1], Cherepanova M.A.[2]
[1] Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy, Voronezh
[2] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The paper considers a methodology for predicting the height of the lower boundary of the intramassic clouds below 300 m on the periphery of the anticyclone in the southern regions of Primorsky Krai. It is shown that the existing methods of forecasting the lower cloud cover, developed mainly for the conditions of the European territory of Russia, provide a justifiability of no more than 75% and do not provide satisfactory forecasts for the region under consideration. Based on statistical processing of data from synoptic situations with various types of clouds, a discriminant function has been implemented, including a deficiency of humidity at the surface, a deficiency and a dew point temperature at the level of 925 gPa, as well as the Richardson parameter characterizing the turbulent regime in the lower layer of the atmosphere. Next, a regression equation is applied to specify the height of the lower cloud boundary. The assessment of the quality of the methodology based on training and control samples meets the requirements of meteorological flight support.
Keywords. Height of the lower cloud boundary; intramuscular clouds; anticyclone periphery; Richardson parameter; low cloud forecast; Primorsky Krai.

Высота нижней границы облаков (ВНГО) является одним из главных факторов, определяющий сложность метеорологического обеспечения безопасности полетов. Для определения степени сложности метеорологических условий устанавливаются предельные условия (минимумы) по полетной видимости и ВНГО. Высота нижней границы облаков учитывается – при полетах под облаками, при взлете и посадке, а также при определении минимумов аэродрома, воздушного судна (ВС) и командира экипажа.

Появление низкой облачности обуславливает:

1. Высокое влагосодержание воздуха в приземном слое, когда влажность больше 85 процентов.
2. Активный турбулентный обмен, который присутствует в антициклоне практически всегда, а в малоподвижных наблюдается при вертикальном градиенте температуры в нижнем слое атмосферы 0,5°С/100м.
3. Наличие инверсии оседания, расположенной выше уровня конденсации.

Наличие нисходящих потоков движений и радиационных понижений температуры способствует образованию приподнятой инверсии. В силу этого слой воздуха, расположенный под слоем инверсии будет изолирован от влияния вышележащих слоев. Активный турбулентный обмен будет наблюдаться только в слое от земли до нижней границы инверсии ($Ri < 1$). Накопление влаги под слоем инверсии

способствует достижению в некотором слое воздуха состояния насыщения т.е. образуется облачность [2].

Подходящие для применения в настоящее время способы прогноза ВНГО были разработаны большей частью для физико-географических условий ЕТР, а их оправдываемость не превышает 75%.

После использования существующих способов прогноза низкой облачности для Приморского края, показатели успешности прогнозов не дают необходимых нам показателей, следовательно, рассматриваемый метеорологический параметр необходимо прогнозировать иными способами [3].

Целью данной работы состоит в улучшении качества прогнозов ВНГО внутримассовой облачности ниже 300 метров на периферии антициклона. Разработанная методика должна быть применима в южных районах Приморского края.

Таблица 1 –Количество случаев со значением ВНГО

№ п/п	тип синоптической ситуации	количество случаев со значением ВНГО	
		менее 300м	более 300 м
1	Теплый сектор Zn	91	55
2	Западная периферия Az	39	47
3	Передняя часть Zn	78	64

Для получения промежуточных результатов было использовано уравнение дискриминантной функции на основе метода наименьших квадратов [1].

$$L = 0,42 - 0,04D - 0,02D_{925} - 0,01Td_{925} + 0,27Ri, \quad (1)$$

где L – значение функции принадлежности, D – дефицит у поверхности земли, D_{925} – дефицит на поверхности 925гПа, Td_{925} – температура точки росы на поверхности 925гПа, Ri – параметр Ричардсона.

Из анализа рисунка 1 видно, что число оправдавшихся прогнозов составляет 78%, а число неоправдавшихся прогнозов составляет 22%, из которых ошибки ложной тревоги 12%, а ошибки пропуска 10%.

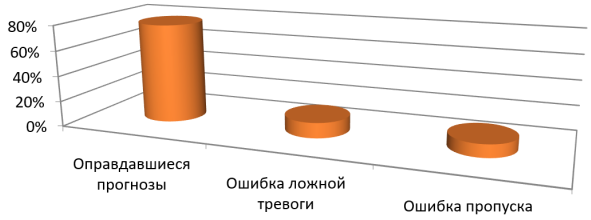


Рисунок 1 – Результаты прогнозирования высоты нижней границы облаков

В таблице 2 представлены расчетные значения критериев успешности прогноза.

Таблица 2 – Критерии успешности прогнозов

Тип выборки	Общая оправдываемость	Критерий Багрова	Критерий Обухова
Обучающая	0,82	0,65	0,68
Контрольная	0,76	0,62	0,65

После получения первичных результатов, применяем уравнение регрессии для уточнения высоты нижней границы облаков.

$$H_{+12} = 170 + 114,7D - 16,1D_{925} + 5,3Td_{925} - 29,7Ri, \quad (2)$$

где D – дефицит у поверхности земли, D_{925} – дефицит на поверхности 925гПа, Td_{925} – температура точки росы на поверхности 925гПа, Ri – параметр Ричардсона.

На рисунке 2 представлены результаты сравнения фактических и прогностических значений высоты нижней границы облаков на периферии антициклона.

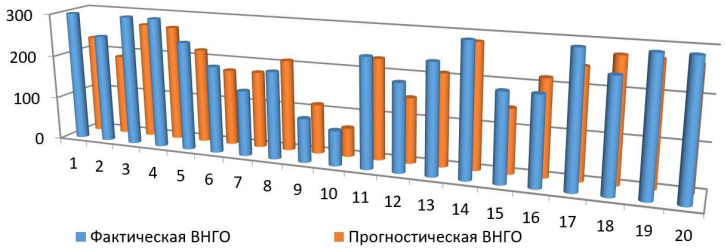


Рисунок 2 – Результаты фактической и прогностической высоты нижней границы облаков за 2018-2019 г.

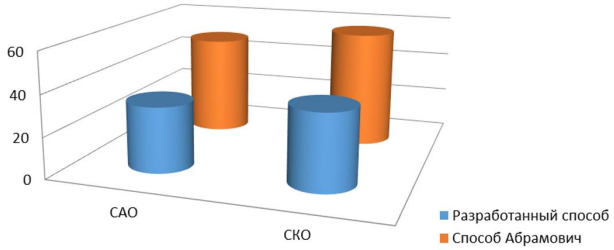


Рисунок 3 – Значения среднеабсолютных и среднеквадратических ошибок прогнозов

Из анализа рисунка 3 видно, что среднеабсолютная ошибка и среднеквадратическая ошибка разработанного способа составляют 31 и 35 метров, а способа, разработанного Абрамович 49 и 56 метров соответственно. Данные результаты отражают качество разработанного способа и удовлетворяют требованиям поставленной задачи.

В предоставленной работе в качестве предиктора был применен параметр Ричардсона. Этот предиктор охарактеризовывает наличие турбулентности в атмосфере, которая в свою очередь активно воздействует на образование низкой слоистообразной облачности. Ни один из использованных в практической деятельности способов прогноза не предусматривает в качестве предиктора турбулентность атмосферы.

Разработанный способ прогноза низкой внутримассовой облачности на периферии антициклона на территории Приморского края прост и не требует длительного времени на расчеты.

Список литературы

1. *Ульшин И.И.* Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебное пособие. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 187 с.
2. *Швер У.А.* Климат Владивостока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 250 с.
3. *Черепанов Д.В. Логвиненко И.С. Карамышев А.А.* Методика прогноза высоты нижней границы внутримассовой облачности в передней части циклона.

СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ОСАДКОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА РАЗЛИЧНЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ ПРОДУКТАМИ В БАССЕЙНЕ Р. ЛЕНЫ

Андреева Д.О.[1], Лебедева Л.С.[1,2]
[1]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург
[2]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск
andasha02@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена оценке точности отображения различными климатическими сеточными продуктами температур воздуха и сумм осадков за год и различные сезоны на территории бассейна р. Лены в сравнении с данными наземных наблюдений. Анализ проводился для 7 источников данных о температуре воздуха и 13 – об осадках, для валидации использовались данные наблюдений 43 метеостанций. Выявлено, что в случае среднегодовых и среднесезонных температур воздуха средний по станциям коэффициент корреляции с данными наземных наблюдений составил для всех продуктов от 0,75 до 0,98, а у осадков – от 0,44 до 1,00 (для периода 1980-2024 гг.). Полученные значения среднеквадратической ошибки (RMSE) изменялись в пределах 0,6-1,1 °С и 0,6-18 мм для температур и осадков за год. Среди продуктов, воспроизводящих температуры воздуха, наибольшее соответствие данным метеостанций за 1980-2024 гг. показали реанализы JRA-3Q и ERA5-Land и набор данных GHCN CAMS. Большее соответствие данным метеостанций об осадках за этот же период наблюдается у продуктов GPCC Full Data, GPCC Monitoring Product и CPC-Global.
Ключевые слова. Климатический реанализ, валидация, бассейн р. Лены, температура воздуха, атмосферные осадки

ASSESSMENT OF THE QUALITY OF REPRODUCTION OF PRECIPITATION AND AIR TEMPERATURE BY GRIDDED CLIMATE PRODUCTS IN THE LENA RIVER BASIN

Andreeva D.O.[1], Lebedeva L.S.[2]
[1]St. Petersburg State University, St. Petersburg
[2]Melnikov Permafrost Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk

Annotation. The paper is devoted to assessing the accuracy of various climate grid products in representing air temperatures and precipitation amounts for an annual period and for different seasons in the Lena River basin in comparison with ground-based observation data. The analysis was conducted for 7 air temperature and 13 precipitation data sources; observation data from 43 meteorological stations were used for validation. It was found that for average annual and seasonal air temperatures, the average correlation coefficient with ground-based observation data ranged from 0.75 to 0.98 for all products, and for precipitation it ranged from 0.44 to 1.00 (for the period 1980–2024). The obtained root mean square error (RMSE) values varied within the range of 0.6–1.1 °C and 0.6–18 mm for annual temperatures and precipitation. Among the products reproducing air temperatures, the JRA-3Q and ERA5-Land reanalyses and the GHCN CAMS dataset showed the greatest agreement with the weather station data for 1980–2024. In case of precipitation data the GPCC Full Data, GPCC Monitoring Product, and CPC-Global products showed better agreement with ground-based observations for the same period.
Keywords. Climate reanalysis, validation, Lena River basin, air temperature, precipitation

Введение. Информация о температуре воздуха и осадках на водосборе, часто необходимая для моделирования и прогнозирования стока, не всегда может быть получена по данным наземных наблюдений в связи с неравномерностью сети метеостанций, недостаточной её плотностью в северных районах и на Азиатской территории России (АТР), неоднородностью рядов и наличием пропусков в них. В связи с этим актуальным становится вопрос подбора источника непрерывных в пространстве и времени климатических данных, наиболее точно отражающих режим температуры воздуха и осадков на той или иной территории. Целью данной работы стал анализ сходимости температур воздуха и сумм осадков за год и различные сезоны по различным сеточным климатическим продуктам и данным метеорологических станций на территории одного из крупнейших речных бассейнов РФ – реки Лены.

Материалы и методы. В исследовании рассмотрены 7 источников данных о температуре воздуха и 13 – об осадках (табл. 1) [1-13]. При верификации данных вышеперечисленных климатических продуктов были использованы ряды среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков на 43 метеостанциях, расположенных в пределах бассейна р. Лены либо близких к его границам, которые были получены из базы данных ВНИИГМИ-МЦД (рис. 1) [14, 15]. Для точек расположения метеостанций были получены ряды средних температур воздуха и сумм осадков за год и различные сезоны по данным наземных наблюдений и по данным рассматриваемых климатических продуктов.

При сравнении точности различных продуктов был использован ряд критериев [16-18]:

1) коэффициент корреляции Пирсона (CC), определяющий силу и направление линейной связи между двумя переменными,

$$CC = \frac{\sum_{t=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{t=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}},$$

где x_i – оценочное значение в ячейке сетки i, y_i – фактическое значение, полученное в результате наблюдения, $\bar{x}$, $\bar{y}$ – выборочные средние, n – количество наблюдений;

2) среднеквадратичная ошибка (RMSE) – мера отклонения между данными наблюдений и оценочными данными:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(x_i - y_i)^2};$$

3) Модифицированный критерий Клинга-Гупты (KGE’), при оценке уравновешивающий вклад корреляции, смещения и изменчивости (диапазон от -∞ до 1, где 1 указывает на идеальное соответствие):

4)

$$KGE' = 1 - \sqrt{(CC-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2},$$
$$\beta = \frac{\bar{x}}{\bar{y}},$$
$$\gamma = \frac{CV_x}{CV_y}.$$

где CV_x и CV_y – коэффициенты вариации метеорологических величин, полученных по данным реанализа и данным наблюдений метеостанций.

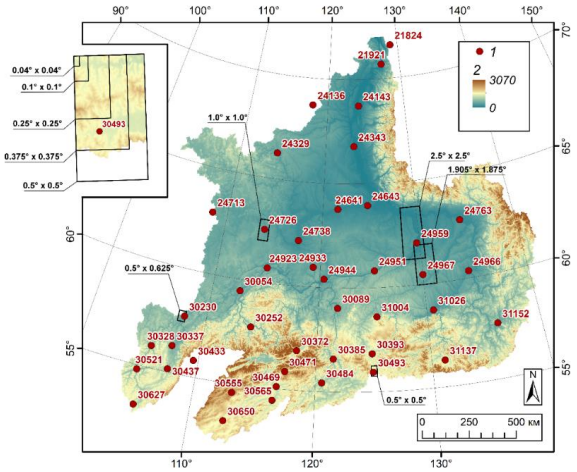


Рисунок 1 – Метеостанции, данные наблюдений которых использовались при верификации данных различных климатических продуктов
Обозначения: 1 – метеостанции и их синоптические индексы; 2 – высота, м над уровнем моря. Также на рисунке показано пространственное разрешение различных продуктов.

Результаты и обсуждение. Средний коэффициент корреляции между рядами, рассчитанной по данным наблюдений на метеостанциях и определённой по данным различных климатических продуктов температурой воздуха за период 1980-2024 гг., составил более 0,90 для года и четырех сезонов в случае всех продуктов, кроме NCEP-NCAR, NCEP/DOE (табл. 2). Наиболее высокие значения данного критерия получили продукты JRA-3Q, GHCN CAMS и ERA5-Land (средний по используемым метеостанциям CC от 0,95 до 0,98 во все сезоны). Наименьшая среднеквадратическая ошибка в зимний, осенний сезон и в целом за год выявлена для данных GHCN CAMS (1,2, 0,7 и 0,6 °C соответственно), в весенний и летний – для данных ERA5-Land (0,6-0,8 °C). Наибольший KGE' для годовых температур отмечается в случае данных GHCN CAMS (0,84), для зимних и летних – реанализа JRA-3Q (0,90), весенних – ERA5-Land (0,82), осенних – GHCN CAMS и JRA-3Q (0,86). Согласно критерию Клинга-Гупты, весенние температуры воздуха всеми продуктами воспроизводятся хуже температур за другие сезоны.

Таблица 1 – Климатические массивы данных, рассмотренные в работе

Температура воздуха		Осадки	
Название продукта	Пространственное разрешение	Название продукта	Пространственное разрешение
ERA5-Land	0.1° x 0.1°	CRU TS4.09/WorldClim 2.1	0.04° x 0.04°
		ERA5-Land GPCC Monitoring Product	0.1° x 0.1°
JRA-3Q	0.375° x 0.375°	GPCC Full Data Monthly Product	0.25° x 0.25°
		JRA-3Q	0.375° x 0.375°
CRU TS4.09 GHCN CAMS	0.5° x 0.5°	CRU TS4.09 PREC/L CPC-Global	0.5° x 0.5°
MERRA-2	0.5 ° x 0.625 °	MERRA-2	0.5 ° x 0.625 °
NCEP-NCAR Reanalysis 1 NCEP/DOE Reanalysis II	1.9 ° x 1.875°	NCEP-NCAR Reanalysis 1 NCEP/DOE Reanalysis II	1.9 ° x 1.875°
		GPCP CMAP	2.5° x 2.5°

Таблица 2 – Медианные значения критериев соответствия для различных продуктов, описывающих температуру воздуха для 1980-2024 гг. (CC / RMSE, °C / KGE')

Климатический продукт	Зима	Весна	Лето	Осень	Год
CRU TS	0.92 / 1.7 / 0.80	0.95 / 1.0 / 0.64	0.93 / 0.8 / 0.82	0.95 / 1.0 / 0.73	0.95 / 0.9 / 0.79
ERA5-Land	0.95 / 2.2 / 0.87	0.97 / 0.8 / 0.82	0.96 / 0.6 / 0.84	0.96 / 0.9 / 0.84	0.97 / 0.9 / 0.81
GHCN CAMS	0.96 / 1.2 / 0.85	0.98 / 1.0 / 0.74	0.95 / 1.0 / 0.88	0.97 / 0.7 / 0.86	0.97 / 0.6 / 0.84
JRA-3Q	0.95 / 1.4 / 0.90	0.98 / 0.9 / 0.79	0.97 / 0.7 / 0.90	0.97 / 0.9 / 0.86	0.97 / 0.8 / 0.83
Merra-2	0.91 / 1.9 / 0.84	0.95 / 1.7 / 0.42	0.94 / 1.0 / 0.80	0.92 / 1.5 / 0.73	0.91 / 0.9 / 0.73
NCEP-NCAR Reanalysis 1	0.86 / 4.1 / 0.77	0.86 / 2.9 / 0.10	0.77 / 1.6 / 0.62	0.88 / 1.6 / 0.68	0.82 / 1.1 / 0.63
NCEP/DOE Reanalysis II	0.89 / 5.1 / 0.75	0.88 / 2.3 / 0.47	0.75 / 1.4 / 0.63	0.90 / 1.1 / 0.78	0.87 / 1.1 / 0.72

Коэффициент корреляции с данными наземных наблюдений за осадками за год или различные сезоны в 1980-2024 гг. почти для всех продуктов составил более 0,70, исключением стали реанализы NCEP-NCAR Reanalysis 1 и NCEP/DOE Reanalysis II (CC до 0,62). Лучшие же результаты по этому критерию для годовых осадков показывают продукты GPCC Full Data Monthly Product (далее – GPCC FD) (1,00), GPCC Monitoring Product (далее – GPCC MP) (0,87), CPC-Global (0,85) и GPCP (0,84). Большая среднеквадратическая ошибка характерна для продуктов, являющихся модельными реанализами: NCEP-NCAR Reanalysis 1, NCEP/DOE Reanalysis II, Merra-2, JRA-3Q, ERA5-Land. В их случае среднее по метеостанциям RMSE годовых осадков составило более 9 мм, в то время как у остальных продуктов – 5,7 мм и менее. Наиболее низкие отклонения выявлены в случае обоих продуктов GPCC (0,6 мм у GPCC FD, 3,7 мм у GPCC MP), а также продукта CRU TS4.09/WorldClim (3,9 мм) (Рис. 2).

У значительной части продуктов средний по рассматриваемым метеостанциям KGE' для осадков за год превышает 0,60, меньшие значения характерны для модельных реанализов (рис. 2). Наиболее высоки значения критерия у данных GPCC FD (0,97), GPCC MP (0,82), CPC-Global (0,78). В зимний сезон KGE' более 0,65 наблюдается в случае продуктов GPCC FD (0,97), PREC/L (0,68), GPCC MP (0,67). В остальные сезоны, помимо обоих наборов данных GPCC, высокий относительно остальных продуктов KGE' характерен для данных CPC-Global (0,81, 0,80 и 0,74 весной, летом и осенью соответственно). Хуже всего воспроизводятся зимние и весенние осадки реанализом NCEP-NCAR Reanalysis 1, а также весенние реанализом Merra-2 (KGE' от -0,25 до 0,01).

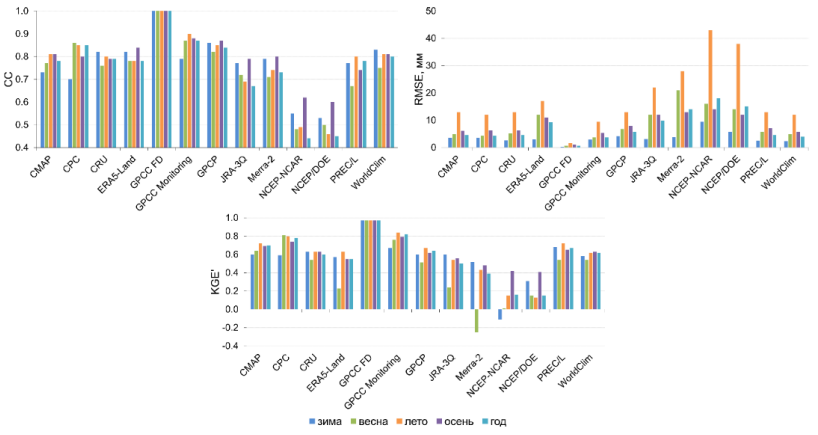


Рисунок 2 – Гистограмма медианных значений CC, RMSE и KGE' для различных продуктов, описывающих осадки (для периода 1980-2024 гг.)

Заключение. В результате проведенного исследования показано, что температуру воздуха за 1980-2024 гг. точнее всего воспроизводят продукты JRA-3Q, ERA5-Land, GHCN CAMS. В их случае CC равен 0,97 для среднегодовых температур, RMSE лежит в пределах 0,6-0,9 °C, KGE' – от 0,81 до 0,84. Среди продуктов, описывающих осадки, согласно используемым критериям, наибольшую точность имеют данные GPCC Full Data (KGE' оказался равным 0,97). Однако данный продукт основан на интерполяции данных наземных наблюдений, и, несмотря на высокое соответствие им в точках метеостанций, нельзя утверждать, что в областях между пунктами наблюдений осадки воспроизводятся с такой же точностью. Помимо данного продукта, наиболее удовлетворительные значения по различным критериям имеют такие наборы данных об осадках, как GPCC Monitoring Product, CPC-Global. В их случае KGE' составил от 0,78 до 0,82 для годовых сумм осадков.

Список литературы

1. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data.* 2021;13:4349–4383.
2. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data.* 2020; 7:109.
3. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1996;77(3):437–472.
4. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., et al. NCEP–DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society.* 2002; 83:1631–1644.
5. Fan Y., Van den Dool H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere.* 2008; 113: D01103.
6. Gelaro R., McCarty W., Suárez M., et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 2017;30(14):5419–5454.
7. Kosaka Y., Kobayashi S., Harada Y., et al. The JRA-3Q Reanalysis. *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2024; Ser. II, 102(1):49-109.
8. Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., et al. A description of the global land-surface precipitation data products of the Global Precipitation Climatology Centre with sample applications including centennial (trend) analysis from 1901–present. *Earth System Science Data.* 2013; 5:71–99.
9. Chen M., Xie P., Janowiak J.E., Arkin P.A. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations. *Journal of Hydrometeorology*. 2002; 3:249–266.
10. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology.* 2017;37(12):4302-4315.
11. Chen M., Shi W., Xie P., et al. Assessing objective techniques for gaugebased analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysics*. 2008; 113: D04110.
12. Adler R.F., Huffman G.J., Chang A., et al. The version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). *Journal of Hydrometeorology*. 2003; 4:1147–1167.
13. Xie P., Arkin P.A. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1997;78(11):2539–2558.
14. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Коршунова Н.Н., Швец Н.В. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 от 27 февраля 2015 г. // Электронный ресурс http://meteo.ru/data/total-precipitation/
15. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о

государственной регистрации базы данных Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 от 23 октября 2014 г. // Электронный ресурс http://meteo.ru/data/temperature/
16. Ebert E.E. Methods for verifying satellite precipitation estimates. In: V. Levizzani, P. Bauer, F.J. Turk (eds.). *Measuring Precipitation From Space*. Springer, Dordrecht; 2007. P. 345–356.
17. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*. 2009; 377: 80–91.
18. Kling H., Fuchs M., Paulin M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*. 2012; 424–425: 264–277.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ЗАТЯЖНОГО АДВЕКТИВНОГО ТУМАНА В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ 11 НОЯБРЯ 2025 ГОДА

Набойкина Г.А., Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
naboykinag@mail.ru

Аннотация. В статье представлен анализ метеорологических условий формирования адвективных туманов в Нижнем Новгороде и разобран конкретный случай 11 ноября 2025 года. Рассматриваются ключевые факторы (видимость, температура воздуха), а также синоптическая обстановка затяжного адвективного тумана и последствия.
Ключевые слова. Адвективные туманы, видимость, температура воздуха, теплый фронт, малоградиентное поле, Нижний Новгород.

FEATURES OF FORMATION AND DEVELOPMENT OF A PROLONGED ADVECTION FOG IN NIZHNY NOVGOROD ON NOVEMBER 11, 2025

Naboykina G.A., Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. The article presents an analysis of meteorological conditions for the formation of advective fogs in Nizhny Novgorod and examines a specific case on November 11, 2025. The key factors considered include visibility and air temperature, as well as the synoptic situation associated with a prolonged advection fog event and its consequences.
Keywords. Advection fog, visibility, temperature, warm front, weak pressure gradient field, Nizhny Novgorod.

Туманом называется помутнение приземного слоя воздуха из-за наличия в нем взвешенных капель воды, ледяных кристаллов или их смеси, при котором горизонтальная дальность видимости становится менее 1000 м хотя бы в одном направлении [1]. По генетической классификации выделяют туманы охлаждения, туманы испарения и туманы смешения. К туманам охлаждения относят: адвективные, радиационные, адвективно-радиационные и орографические. Адвективные туманы образуются вследствие охлаждения тёплого влажного воздуха при его движении над более холодной поверхностью суши или воды. Их интенсивность зависит от разности температур между воздухом и подстилающей поверхностью и от влагосодержания воздуха. Эти туманы могут развиваться как над морем, так и над сушей и охватывать огромные пространства, а также они являются более устойчивыми, чем радиационные и часто не рассеиваются днём [2].

Возникновение адвективного тумана возможно при достаточно интенсивном охлаждении приземного слоя воздуха от подстилающей поверхности, с тем чтобы оно было в состоянии компенсировать турбулентный перенос продуктов конденсации вверх. В противном случае они будут скапливаться не у поверхности Земли, а на некоторой высоте, образуя низкую слоистую облачность. Адвективный туман возникает при скорости ветра не более 12 м/с, разности температур в начале и конце траектории 1 - 3°С, а дефицит точки росы в начале траектории чаще всего не превышает 2°С при положительных температурах и 3°С при отрицательных. Адвективные туманы могут наблюдаться в любое время суток, хотя чаще всего они уплотняются ночью в связи с добавочным радиационным охлаждением приземного слоя воздуха [1].

Затяжной характер адвективных туманов обусловлен устойчивой синоптической обстановкой. При сохранении притока влажной воздушной массы, слабом барическом градиенте и отсутствии интенсивного прогрева подстилающей поверхности туман может сохраняться в течении суток и более. Инверсионный слой ограничивает вертикальное перемешивание, способствуя накоплению влаги в приземном слое и сохранении туманообразования, а значительная облачность уменьшает дневной радиационный прогрев и препятствует разрушению инверсии.

Рассмотрим случай затяжного адвективного тумана 11 ноября 2025 года в Нижнем Новгороде и проведем анализ синоптических и метеорологических условий, сопутствующих его образованию [3].

Адвективный туман был зафиксирован с 16:11 ВСВ 11.11.25 до 9:00 ВСВ 12.11.25 (по местному времени с 19:11 11.11.25 до 12:00 12.11.25) общей продолжительностью 16 часов 49 минут. В данном случае четко прослеживается 3 фазы: формирование, поддержание и рассеивание. Рассмотрим первую фазу – формирование. Образование переохлажденного тумана наблюдалось вследствие охлаждения теплого влажного воздуха, который начал поступать на территорию Нижегородской области за счет смещения воздушных масс теплого фронта, движущегося с запада. Согласно приземной карте, представленной на рисунке 1, Нижний Новгород находился в малоградиентном гребне антициклона, но также сильное влияние оказывал приближающийся теплый фронт [4]. При возникновении и формировании переохлажденного тумана наблюдалась отрицательная температура -2,1…-1,0 °С, а дефицит составлял 1 °С. Также наблюдалось слабое повышение давления на 1,0 гПа/3 часа, неустойчивый ветер преимущественно юго-восточного – южного направления 1-2 м/с, разбросанная облачность 2-3 октанта. С начала возникновения тумана наблюдалось резкое ухудшение метеорологической дальности видимости до 550 м, далее видимость время от времени увеличивалась или уменьшалась (рисунок 2), что может быть вызвано усилением ветра.



Рисунок 1 – Приземная карта за 12.11.25 00 ч ВСВ

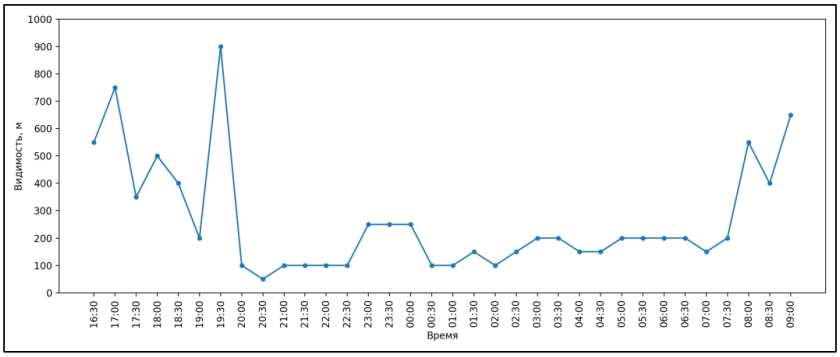


Рисунок 2 – График изменения видимости с 16:11 ВСВ 11.11.25 до 9:00 ВСВ 12.11.25 в Нижнем Новгороде

Вторая фаза – поддержание. Эта фаза четко прослеживалась с 20:00 ВСВ 11.11.25 до 7:00 ВСВ 12.11.25 (по местному времени с 23:00 11.11.25 до 10:00 12.11.25). В данный период наблюдалась минимальная метеорологическая дальность видимости в данном случае, которая составляла 100-200 м (рисунок 2). Нижний Новгород все также находился под действием малоградиентного гребня, давление продолжало расти, но уже на более слабые значения, около 0,6 гПа каждые 3 часа. Продолжали натекать теплые, влажные воздушные массы на более холодную подстилающую поверхность, но стоит отметить, что приземный слой немного начинал прогреваться, что можно заметить на представленном графике (рисунок 3). В 20:30 ВСВ был переход через 0,0 °С из отрицательной температуры в положительную. Далее на протяжении всей фазы, наблюдалась положительная температура 0,2…1,8 °С, а также дефицит составил 0 °С, то есть 100% относительная влажность. Облачность увеличилась до 8 октантов, ветер наблюдался переменного направлении со скоростью 1-4 м/с. В рассматриваемый промежуток времени над территорией Нижегородской области начинал образовываться верхний теплый фронт, который подпитывал влагой имеющийся туман.

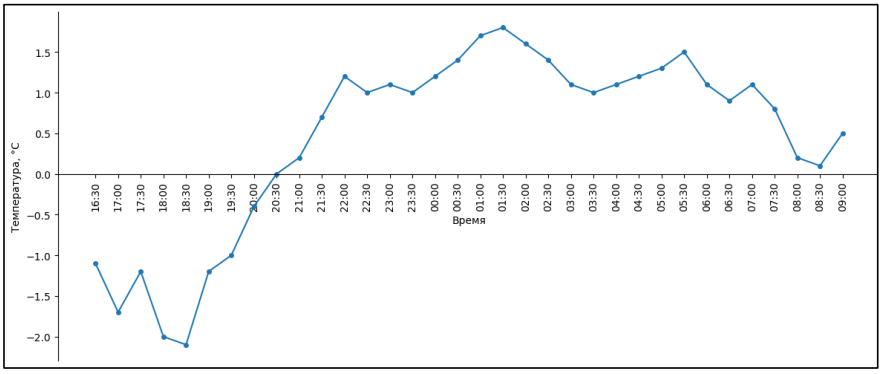


Рисунок 3 – График изменения температуры воздуха с 16:11 ВСВ 11.11.25 до 9:00 ВСВ 12.11.25 в Нижнем Новгороде

Рассмотрим заключительную фазу – рассеивание. Начиная с 7:30 ВСВ 12.11.25, адвективный туман начал ослабевать и рассеиваться, о чем нам говорит значительное увеличение метеорологической дальности видимости. С 200 м за 1,5 часа она возрастает до 650 м, а в следующий срок превышает 1 км. В этот промежуток на уровне земли

преобладало малоградиентное поле повышенного давления и наблюдалось прохождение верхнего теплого фронта. Температура находилась в значениях около 0,4…0,8 °С, наблюдалась 100% относительная влажность, облачность сплошная – 8 октантов, ветер преимущественно юго-восточного направления со скоростью 1-2 м/с.

После рассеивания адвективного тумана в Нижнем Новгороде наблюдалась дымка в течение нескольких часов. Ее поддержанию в дневные часы также способствовал верхний теплый фронт и адвекция теплой, влажной воздушной массы. К позднему вечеру 12.11.25 на Нижний Новгород пришел фронт окклюзии циклона, который двигался с юго-запада. Фронт окклюзии принес осадки в виде дождя, который полностью рассеял дымку.

Заключение

Затяжной адвективный туман возникает в результате взаимодействия адвективного переноса влажной воздушной массы с локальными термодинамическими и динамическими условиями приземного слоя атмосферы. Его формирование определяется охлаждением теплого влажного воздуха над более холодной подстилающей поверхностью до состояния насыщения, а устойчивость - сохранением инверсионной стратификации, слабой турбулентности и стабильной синоптической обстановки.

Формирование и развитие адвективных туманов в районе Нижнего Новгорода имеют региональную специфику, связанную с физико-географическими условиями. Расположение города в месте слияния двух крупных рек (Оки и Волги) и в пределах выраженного речного рельефа способствует повышенной влажности приземного слоя и формированию локальных циркуляций. Рельеф, контраст тепловых свойств водной поверхности и суши создают условия для накопления охлаждённого воздуха и поддержания инверсионных процессов.

Список литературы

1. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология / В.И. Воробьев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 616 с.
2. Гидрометцентр России. Метеословарь. Туман [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://meteoinfo.ru/glossary/
3. Архив фактической погоды АМЦ Нижний Новгород (журнал АВ-6)
4. Архив карт приземного анализа и карт барической топографии [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://meteoinfo.ru/mapsynop

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЦИКЛОНОВ И АНТИЦИКЛОНОВ НАД СЕВЕРО-ЗАПАДОМ РОССИИ В 2020–2024 ГГ.

Колотова Т.В., Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Tamarikz@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты анализа циклонической и антициклонической деятельности над территорией северо-запада России (60–70° с.ш., 30–50° в.д.) за период 2020–2024 гг. На основе ручного трекинга 7308 приземных синоптических карт выявлены основные траектории перемещения барических образований, их повторяемость, сезонная изменчивость давления в центрах и продолжительность влияния на регион. Установлено преобладание циклонической циркуляции, определены западные и юго-западные направления как основные пути выхода барических систем. Выявлены существенные сезонные различия в интенсивности и продолжительности циклонов и антициклонов.

Ключевые слова. Циклоны, антициклоны, атмосферная циркуляция, северо-запад России, ручной трекинг, изменчивость.

SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF CYCLONES AND ANTICYCLONES OVER THE NORTH-WEST OF RUSSIA IN 2020–2024

Kolotova T.V., Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. The paper presents the results of the analysis of cyclonic and anticyclonic activity over the territory of northwestern Russia (60–70° N, 30–50° E) for the period 2020–2024. Based on the manual tracking of 7308 surface synoptic maps, the main trajectories of the movement of baric formations, their repeatability, seasonal variability of pressure in the centers, and the duration of influence on the region were identified. The prevalence of cyclonic circulation has been established, and the western and southwestern directions have been identified as the main exit routes for baric systems. Significant seasonal differences in the intensity and duration of cyclones and anticyclones have been identified.
Keywords. Cyclones, anticyclones, atmospheric circulation, northwestern Russia, manual tracking, variability.

Циклоны и антициклоны выполняют важнейшую функцию в климатической системе, осуществляя межширотный обмен теплом, влагой и импульсом. На ежедневных приземных картах погоды в Северном полушарии одновременно можно наблюдать до 15-20 циклонов и 7-10 антициклонов. Поскольку поперечные размеры этих барических образований достигают 1-2 тыс. км и более, во внетропических широтах практически вся нижняя тропосфера оказывается заполненной чередующимися циклонами и антициклонами [1]. Цель данной работы - выявление пространственно-временных закономерностей циклонической и антициклонической деятельности над северо-западом России в период 2020-2024 гг.

Поле атмосферного давления визуализируется с помощью приземных карт погоды. Депрессия (циклон) — это зона с пониженным давлением, ограниченная замкнутыми изобарами. Её центр соответствует точке с минимальными значениями давления. В умеренных широтах давление в центре циклона на уровне моря чаще всего колеблется в интервале 950–1010 гПа. Барический максимум (антициклон) представляет собой область с повышенным давлением, также очерченную замкнутыми изобарами. Центр максимума соответствует точке с наибольшим давлением. Давление в центре антициклона на уровне моря обычно находится в диапазоне 1000-1035 гПа.

Рассматриваемая территория охватывает центральные и северные области Северо-Запада России, включая Ленинградскую область, Республику Карелию, южную часть Мурманской области, а также акватории восточной части Финского залива, Ладожского и Онежского озёр (рисунок 1). С физико-географической точки зрения регион представляет собой равнину, преобразованную четвертичным оледенением. Рельеф варьируется от плоских заболоченных низменностей на юго-западе до холмисто-грядовых ландшафтов Карельского перешейка и возвышенных плато.

Климат региона является умеренным, переходным от морского к континентальному. Его формирование происходит под определяющим влиянием переноса воздушных масс с Атлантики и интенсивной циклонической деятельности в течение всего года. Регион находится в зоне частого прохождения атмосферных фронтов, что является ключевым фактором для синоптических процессов.

Температурный режим характеризуется умеренно холодной зимой и прохладным летом. Средняя температура января понижается с -6...-7 °С на побережье Финского залива до -9...-11 °С в восточных районах Карелии. Летние температуры относительно

однородны: средняя температура июля составляет +15...+17 °С. Годовая сумма осадков составляет 600–750 мм, увеличиваясь на наветренных склонах возвышенностей до 800 мм. Распределение осадков в году относительно равномерно с максимумом в конце лета и осенний период, что связано с усилением циклонической активности, которая является доминирующим климатообразующим фактором. Регион находится на пути частого смещения атлантических циклонов, что определяет высокую изменчивость погоды во все сезоны. Преобладающими являются западные и юго-западные переносы.

Для анализа крупномасштабной атмосферной циркуляции за рассматриваемый период использовались приземные синоптические карты за основные метеорологические сроки (00, 06, 12 и 18 часов ВСВ) [2]. На выбранной для исследования территории (60–70° с.ш.; 30–50° в.д.) прослеживались траектории перемещения центров барических образований, оценивалось давление в их центрах и продолжительность влияния на исследуемый регион. Под циклоном (антициклоном) понималась область пониженного (повышенного) давления, ограниченная хотя бы одной замкнутой изобарой с шагом 5 гПа. Основным методом исследования выбран ручной (мануальный) трекинг барических образований. В процессе выполнения работы было обработано 7308 приземных синоптических карт и составлен архив данных с основными характеристиками барических образований [3].

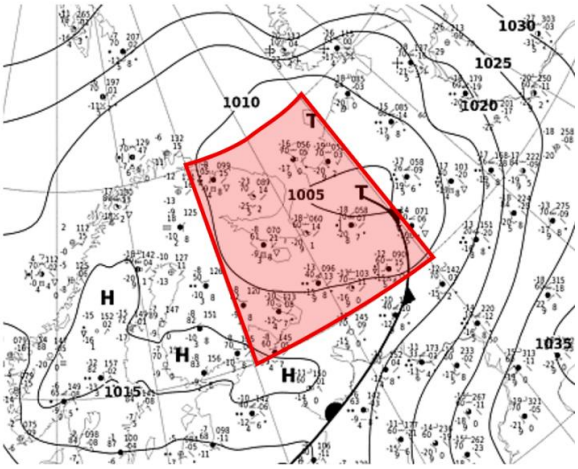


Рисунок 1 - Исследуемая территория (60–70° с.ш.; 30–50° в.д.) с центром циклона (Т)

За период 2020-2024 гг. на территории северо-запада России отмечено 941 барическое образование, из них 594 циклона и 347 антициклонов; среднегодовое число циклонов составляет 118, антициклонов - 69. В сезонном распределении барических образований наибольшее число циклонов (161) отмечается весной с максимумом в марте (63 циклона за 5 лет), а антициклонов (96) – весной и летом с максимумом в мае и июне (36-37 антициклонов). Наименьшее число циклонов (141) наблюдается осенью с минимумом в сентябре (42), а антициклонов (75) - зимой с минимумом в декабре (21) (табл. 1, 2). Среднегодовая повторяемость циклонов значительно превышает повторяемость антициклонов, что свидетельствует о преобладании циклонического типа циркуляции в регионе [4].

Таблица 1 - Суммарное число (n), среднее давление в центрах (Рц) и средняя продолжительность (t) циклонов (Zn) и антициклонов (Az) в разные сезоны года над территорией северо-запада России за 2020-2024 гг.

Сезон	n		Рц		t	
	Zn	Az	Zn	Az	Zn	Az
Зима	148	**75**	992,5	1026,8	**2,6**	3,2
Весна	**161**	**96**	996,1	1025,8	2,2	**2,6**
Лето	144	**96**	**1002,0**	**1020,4**	**2,2**	3,3
Осень	**141**	80	**991,3**	**1027,2**	2,5	**3,6**
Среднее	118,8	69,4	995,5	1025,0	2,4	3,2

Изучение динамики атмосферного давления в центрах барических образований показало, что среднее значение давления в центрах циклонов в 2020-2024 гг. составляет 995,5 гПа, а у антициклонов 1025,0 гПа. Наиболее глубокие циклоны отмечались осенью (991,3 гПа), а наименее глубокие - летом (1002,0 гПа). Наиболее интенсивные антициклоны отмечались осенью (1027,2 гПа), а наименее - летом (1020,4 гПа). Сезонная изменчивость давления в центрах барических образований обусловлена изменением термобарических градиентов: осенью максимальные контрасты между холодным материком и теплой морской поверхностью создают условия для углубления циклонов и способствуют росту давления в антициклонах [5].

Анализ данных продолжительности воздействия барических образований на исследуемую территорию за 5 лет показал, что средняя продолжительность у циклонов составляет 2,4 суток, у антициклонов – 3,2 суток. Наибольшую продолжительность циклоны имеют зимой (2,6 суток), наименьшую - летом (2,2 суток). Наибольшая продолжительность у антициклонов осенью (3,6 суток), а наименьшая - весной (2,6 суток) (табл. 1).

Изучение динамики числа барических образований по траекториям показало, что максимальное число циклонов приходит на исследуемую территорию по западным траекториям (184 циклона), а минимальное - по восточным (11); максимальное число антициклонов приходит по юго-западным траекториям (94), а минимальное - по восточным (14) (табл. 3, 4).

Анализ среднего атмосферного давления в центрах барических образований показал, что наиболее глубокими являютс циклоны, двигающиеся по западным траекториям (992,8 гПа), а наименее глубокими – северо-восточные (1001,3 гПа). Наиболее интенсивные антициклоны с северо-восточными траекториями (1030,0 гПа), а наименее интенсивные – с южными (1020,5 гПа).

Таблица 2 – Распределение количества циклонов (Zn) и антициклонов (Az) по месяцам над территорией северо-запада России за 2020-2024 гг.

год	2020		2021		2022		2023		2024		2020-2024	
месяц	Zn	Az	Zn	Az	Zn	Az	Zn	Az	Zn	Az	Zn	Az
дек	10	5	9	5	8	4	6	5	12	2	45	21
янв	14	7	8	8	12	9	8	3	12	2	54	29
фев	11	5	13	6	8	6	10	3	9	5	51	25
март	14	8	10	6	11	4	16	8	12	6	63	32
апрель	8	5	9	2	10	6	9	8	13	8	49	29
май	12	9	11	8	10	5	9	7	8	7	50	36
июнь	10	10	11	7	11	7	6	7	11	6	49	37
июль	14	5	7	5	12	7	11	3	8	6	52	26
авг	10	10	10	5	10	4	5	8	9	4	44	31
сен	10	7	7	5	8	4	11	6	6	4	42	26
окт	11	7	10	4	6	6	11	6	12	6	50	29
ноя	8	4	11	7	7	5	9	7	12	3	47	26

Анализ продолжительности воздействия показал, что наиболее продолжительные – циклоны западных и юго-западных траекторий (2,0 суток), наименее продолжительные восточные (1,1 суток). Наиболее продолжительные антициклоны – восточные (4,1 суток), наименее – юго-восточные (1,3 суток).

Таблица 3 - Характеристики циклонов, пришедших на территорию северо-запада России по различным траекториям движения в 2020-2024 гг.

Характе-ристики	Циклоны								
	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ	Местные
n	59	130	**184**	87	66	28	**11**	24	4
Рц	998,6	994,0	**992,8**	996,5	998,6	1000,7	997,5	**1001,3**	1002,5
Т	1,6	1,9	**2,0**	**2,0**	1,9	1,6	**1,1**	1,9	2,0

Таблица 4 - Характеристики антициклонов, пришедших на территорию северо-запада России по различным траекториям движения в 2020-2024 гг.

Характе-ристики	Антициклоны								
	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ	Местные
n	32	60	56	**94**	38	34	**14**	19	1
Рц	1027,0	1023,3	1023,0	1026,4	**1020,5**	1021,9	1029,4	**1030,0**	1005,0
t	2,4	2,2	2,3	2,2	1,7	**1,3**	**4,1**	3,3	2,0

Наиболее редкими для исследуемой территории являются местные барические образования. За 5 лет было отмечено всего 4 циклона и 1 антициклон. Среднее значение давления в центрах этих циклонов составляет 1002,5 гПа. Все они имели лишь одну замкнутую изобару и существовали 1-2 суток. Большая часть (3 циклона) сформировалась в летний сезон. Единственный местный антициклон сформировался зимой при давлении 1005 гПа, существовал двое суток, затем слился с гребнем более крупного антициклона [6].

В ходе выполнения работы были сделаны следующие выводы:

1. За исследуемый пятилетний период над территорией было зафиксировано 941 барическое образование: 594 циклона и 347 антициклонов. Среднегодовая повторяемость циклонов (118) превышает повторяемость антициклонов (69), что свидетельствует о преобладании циклонического типа циркуляции.
2. Установлен сезонный ход в распределении числа барических образований. Наибольшее количество циклонов отмечается весной (161), с максимумом в марте (63). Для антициклонов максимум приходится на весну и лето (по 96), с пиками в мае-июне (36-37).
3. Среднее давление в центрах циклонов составило 995,5 гПа, антициклонов - 1025,0 гПа. Наиболее глубокие циклоны характерны для осени (991,3 гПа), наиболее слабые - для лета (1002,0 гПа). Антициклоны достигают максимальной интенсивности осенью (1027,2 гПа), минимальной - летом (1020,4 гПа).
4. Средняя продолжительность влияния циклонов составляет 2,4 суток, антициклонов - 3,2 суток. Циклоны наиболее продолжительны зимой (2,6), наименее - летом (2,2). Антициклоны наиболее продолжительны осенью (3,6), наименее - весной (2,6).
5. Преобладающим направлением выхода циклонов является западное (184 случая, 31%), антициклонов - юго-западное (94 случая, 27%). Наиболее интенсивные циклоны связаны с западными траекториями (992,8 гПа), наиболее мощные антициклоны - с северо-восточными (1030,0 гПа).
6. Зафиксирована низкая повторяемость местных барических образований: 4 циклона и 1 антициклон за 5 лет.

Список литературы

1. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Ленинград. Гидрометеоиздат; 1991 г. 616 с.
2. Архив синоптических карт. [Электронный ресурс]: https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html
3. *Поднебесных Н.В.* Долговременные сезонные изменения атмосферной циркуляции над Сибирью в конце XX – начале XXI в. - Оптика атмосферы и океана. 2021, выпуск №2 (34), с. 143-147.
4. *Поднебесных Н.В., Ипполитов И.И.* Крупномасштабная атмосферная циркуляция над Сибирью в конце XX – начале XXI веков: сравнение данных, полученных на основе приземных синоптических карт и реанализа - Фундаментальная и прикладная климатология. 2019, выпуск №2 (2), с. 43-44.
5. *Поднебесных Н.В.* Долговременные изменения атмосферной циркуляции над Сибирью - Оптика атмосферы и океана. 2020, выпуск №2 (33), с. 142-145.
6. *Иванова И. А.* Практические работы в учебном бюро прогнозов: Учебное пособие для высших учебных заведений / И. А. Иванова, О. Н. Топтунова, А. В. Соколов. – Санкт-Петербург, 2024. – 140 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ

Калиниченко А.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
kalinichenko.antonina2020@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается изменение общего количества циклонов в год и осредненное за период с 1979 по 2008 гг. пространственное распределение плотности циклонов в каждой ячейки сетки размером $5^0 \times 5^0$ по 11 методам идентификации и отслеживания циклонов на территории Атлантического штормтрека с целью выявления наилучших алгоритмов для последующей верификации при создании собственного алгоритма идентификации и отслеживания циклонов.
Ключевые слова. Алгоритмы идентификации и отслеживания циклонов, общее количество циклонов, пространственное распределение плотности циклонов, Атлантический штормтрек.

INVESTIGATION OF THE TRAJECTORIES OF EXTRATROPICAL CYCLONES

Kalinichenko A.A.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. The change in the total number of cyclones per year and the average spatial distribution of cyclone density in each $5^0 \times 5^0$ grid cell from 1979 to 2008 is considered for 11 methods of identifying and tracking cyclones in the Atlantic storm track in order to identify the best algorithms for subsequent verification when creating an algorithm for identifying and tracking cyclones.
Keywords. Algorithms for identifying and tracking cyclones, total number of cyclones, spatial distribution of cyclone density, Atlantic storm track.

Циклоны и антициклоны являются крупномасштабными атмосферными вихрями, определяющими погоду на огромных территориях. Смещение характерных путей циклонов может приводить к перераспределению осадков и температур на различных территориях, вызывать экстремальные явления погоды редкой повторяемости и влиять на изменение климата в конкретных регионах [1]. Поэтому прогнозирование и анализ траектории прохождения циклонов играют огромную роль как для составления оперативных прогнозов погоды, так и для анализа долгопериодных климатических изменений. Однако обнаружение и отслеживание внетропических циклонов является очень сложной задачей. Это обусловлено тем, что циклоны умеренных широт достаточно сильно отличаются по размеру (диаметр от 100 до более 1000 км), глубина циклонов (от 930 гПа до 1000 гПа) и скорости их перемещения также заметно варьируют (от стационирующих циклонов до циклонов, развивающих скорости порядка 100 км/ч). Идентификация одного и того же циклона в разные моменты времени (т.е. отслеживание) также осложняется тем, что циклон может разделиться на два независимых барических образования, или, наоборот, два циклона могут слиться в один. В связи с этим трудностями сегодня не существует единого алгоритма идентификации и отслеживания циклонов, который давал бы одинаково хорошие результаты для любого циклона в любой точке земного шара [2]. На данный момент используется около 20 различных алгоритмов обнаружения и отслеживания циклонов. Все они преимущественно базируются либо на обнаружении минимума давления, приведенного к уровню моря, либо на поиске максимальной завихренности. В каких-то аспектах эти алгоритмы дают схожие результаты, а в каких-то абсолютно разные – вплоть до разных тенденций в изменении климата [2].

Целью нашей работы является выявление наилучших методов для территории Атлантики, которые возможно использовать для верификации при создании собственного алгоритма идентификации и отслеживания циклонов. Выбор методов будет

производиться на основе наибольшей согласованности в определении различных параметров циклонов в зоне Атлантического штормтрека как одной из главных циклогенетических зон на планете.

Основными циклоническими параметрами считаются: общее количество циклонов, частота образования (плотность циклонических центров), количество глубоких циклонов (обычно глубокими считаются циклоны с давлением в центре ≤ 980 гПа), интенсивность (минимальное давление в центре), скорость движения центра циклона, время жизни [2]. Также для оценки изменений климата очень важно анализировать тренды межгодовой изменчивости данных параметров. В нашей работе анализировалось изменение общего количества циклонов в год. По данному анализу выявлялись методы идентификации и отслеживания, являющиеся наиболее согласованными для Атлантического штормтрека. Далее строилось осредненное за весь период наблюдений распределение плотности циклонов в каждой ячейки сетки размером $5^0 \times 5^0$.

В качестве исходных данных использовались выходные данные 11 алгоритмов, примененных к данным реанализа ERA-Interim с пространственным разрешением $1.5^0 \times 1.5^0$ и временным разрешением 6 часов (за исключением M06 имеющим временное разрешение 12 часов), участвующих в проекте IMILAST и охватывающие период наблюдения с 1979 по 2008 гг. Данные были взяты с сайта проекта IMILAST [3]. Использовавшиеся алгоритмы приведены в таблице 1. Для расчёта изучаемых параметров был создан программный комплекс на языке программирования Fortran, полученные результаты были визуализированы с использованием Python и Grapher.

Таблица 1 – Алгоритмы идентификации и отслеживания циклонов, использовавшиеся в исследовании

Код*	Основные ссылки на описание метода	Используемая переменная	Фильтрация по рельефу
M02	Murray and Simmonds (1991), Pinto et al. (2005)	MSLP (min), VORT	>1500 м
M06	Hewson et al. (1997), Hewson and Titley (2010)	MSLP (min), VORT, ветер, фронты	Подстраивающийся под рельеф
M08	Trigo (2006)	MSLP (min, grad.)	нет
M09	Serreze (1995), Wang et al. (2006)	MSLP (min, grad.), VORT	нет
M10	Murray and Simmonds (1991), Simmonds et al. (2008)	MSLP (min), VORT	>1000 м
M14	Kew et al. (2010)	Z850 (min, contour)	нет
M15	Blender et al. (1997), Raible et al. (2008)	MSLP (min)	>1000 м
M16	Lionello et al. (2002)	MSLP (min)	нет
M18	Sinclair (1994, 1997)	Z850 VORT	>1000 м
M21	Inatsu (2009)	Z850 VORT	нет
M22	Bardin and Polonsky (2005), Akperov et al. (2007)	MSLP (min, contour)	нет

Полученные графики изменения общего количества циклонов в год представлены на рисунке 1:



Рисунок 1 – График межгодовой изменчивости количества циклонов в соответствие с каждым методом

Из полученного графика видно, что наиболее согласованные осредненные значения межгодовой изменчивости общего количества циклонов демонстрируют методы M10, M15 и M16 – 480-600 циклонов в год. Методы M02, M06, M09 и M18 завышают общее количество циклонов – 570-960 циклонов в год, а методы M08, M14, M21, M22 занижают общее количество циклонов 300-470 циклонов в год. Завышенные значения, получаемые по методу M06 можно объяснить тем, что данный метод использует временное разрешение 12 часов, в то время как все остальные изучаемые методы – 6 часов [2]. Метод M18, первоначально разработанный для района Средиземного моря и ориентирующийся на максимум завихренности на уровне 850 гПа, выявляет не только глубокие долгоживущие циклоны, но и короткоживущие максимумы завихренности, поэтому данный метод завышает общее количество циклонов над Атлантикой [4]. Метод M09 был специально разработан для Арктического региона, вопрос с чем связаны завышенные значения общего количества циклонов над Атлантическим штормтреком требует дальнейших исследований [5]. Метод M02 был разработан учеными из Мельбурна и очень хорошо себя зарекомендовал для циклонов южного полушария [6]. В последствии данный алгоритм был модифицирован для северного полушария, в данных проекта IMILAST он был обозначен как M10 [2]. Как видно из рисунка 1, метод Мюррея и Симмондса, модифицированный под северное полушарие (M10) дает хорошую согласованность в осредненных значения межгодовой изменчивости общего количества циклонов с методами M15 и M16. Метод M15 был разработан для изучения режимов траекторий циклонов в Северной Атлантике, однако также успешно применялся и для анализа средиземноморских циклонов. Он исключает из анализа циклоны, живущие менее 24 часов, также в нем стоят фильтры для значений минимального градиента давления и скорости углубления, что дает ему возможность исключать из рассмотрения подвижные центры завихренности, не связанные с циклонами [7]. Метод M16 является региональным методом для идентификации и отслеживания циклонов в районе Средиземноморского бассейна, где часто традиционные методы дают плохие результаты из-за сложной орографии и небольших размеров циклонов [8]. Для того чтобы выяснить, с чем связана такая хорошая согласованность регионального метода M16 в осредненных значения межгодовой изменчивости общего количества циклонов с глобальными методами в зоне Атлантики и является ли эта согласованность значимой, будут проводиться дальнейшие исследования. Методы M08 M14 и M22 были первоначально разработаны для Европейско-Атлантический сектора северного полушария. Данные методы дают заниженные результаты так как лучше приспособлены к идентификации мощных глубоких зимних

циклонов, при этом в летние месяцы алгоритмы могут пропускать слабые или вторичные циклоны [9,10,11]. В методе M21 исходные данные предварительно сглаживаются, поэтому он также занижает общее количество циклонов [2].

Далее было построено осредненное пространственное распределение плотности циклонов в каждой ячейки сетки размером $5^0 \times 5^0$. Для методов, показавших наиболее согласованные осредненные значения межгодовой изменчивости общего количества циклонов (M10, M15 и M16) пространственное распределение представлено на рисунке 2.

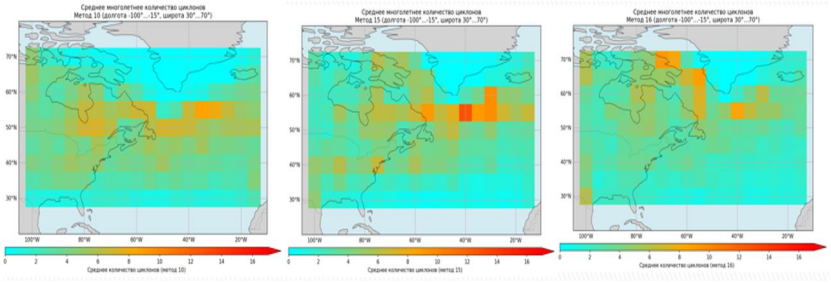


Рисунок 2 – Осредненное пространственное распределение плотности циклонов в каждой ячейки сетки размером $5^0 \times 5^0$ для методов M10, M15 и M16

Как видно из полученного распределения, по всем трем методам достаточно хорошо прослеживается Атлантический штормтрек с максимумом циклонов в районе Исландского минимума. По методу M16 Атлантический штормтрек прослеживается несколько хуже, хотя также заметно увеличения числа циклонов в Исландском минимуме. Метод M16 также дает значительное увеличение числа циклонов в районе Баффинова залива, возможно, указывая на механизм бифуркации циклонов Атлантического штормтрека при столкновении с южной оконечностью Гренландии [12]. В целом согласованность данных пространственного распределения плотности циклонов по между методами M10 и M15 лучше, чем согласованность данных между этими методами (M10 и M15) и методом M16.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что на основе анализа изменения общего количества циклонов в год и осредненного за период с 1979 по 2008 гг. пространственного распределение плотности циклонов в каждой ячейки сетки размером $5^0 \times 5^0$ наибольшая согласованность была достигнута между методами M10 и M15.Данная работа является начальным этапом исследований согласованности в определении параметров циклонов в зоне Атлантического штормтрека различными алгоритмами с целью выбора ряда алгоритмов, на которые можно будет ориентироваться при дальнейшей разработке своего собственного алгоритма идентификации и отслеживания циклонов. В последующих исследованиях планируется оценить согласованность алгоритмов в таких параметрах как количество глубоких циклонов, интенсивность, скорость движения центра циклонов, а также время жизни.

Список литературы

1. *Акперов М. Г., Мохов И. И.* Сравнительный анализ методов идентификации внетропических циклонов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 46, № 5. – С. 620–637.

2. *Neu U., Akperov M. G., Bellenbaum N., Benestad R., Blender R., Caballero R., Cocozza A., Dacre H. F., Feng Y., Fraedrich K., Grieger J., Gulev S., Hanley J., Hewson T., Inatsu M., Keay K., Kew S. F., Kindem I., Leckebusch G. C., Liberato M. L. R., Lionello P., Mokhov I. I., Pinto J. G., Raible C. C., Reale M., Rudeva I., Schuster M., Simmonds I., Sinclair M., Sprenger M., Tilinina N. D., Trigo I. F., Ulbrich S., Ulbrich U., Wang X. L., Wernli H. IMILAST – a community*

effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2013. – Vol. 94, No. 4.–P.529–547.
3. Выходные данные проекта IMILAST [Электронный ресурс]. – Режим доступа: *https://proclim.scnat.ch/en/activities/project_imilast/data_download (дата обращения:* 19.01.2026).
4. *Sinclair M. R.* An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere // Monthly Weather Review. –1994. – Vol.122, No. 10. –P.
5. *Serreze M. C.* Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic // Atmosphere–Ocean. – 1995. – Vol. 33, No. 1. – P. 1–23.
6. *Murray R. J., Simmonds I.* A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data // Australian Meteorological Magazine. – 1991. – Vol. 39. – P. 155–166.
7. *Blender R., Schubert M.* Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions // Monthly Weather Review. – 2000. – Vol. 128, No. 2. – P. 377–384.
8. *Lionello P., Dalan F., Elvini E.* Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO_2 climate scenarios // Climate Research. – 2002. – Vol. 22. – P. 147–159.
9. *Trigo I. F.* Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses // Climate Dynamics. – 2006. – Vol. 26, No. 2–3. – P. 127–143.
10. *Kew S. F., Sprenger M., Davies H. C.* Potential vorticity anomalies of the lowermost stratosphere: a 10-yr winter climatology // Monthly Weather Review. – 2010. – Vol. 138, No. 4. – P. 1234–1249.
11. *Бардин М. Ю., Полонский А. Б.* Североатлантическое колебание и синоптическая изменчивость в Европейско-Атлантическом регионе в зимний период // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 127–136.
12. *Jung T., Rhines P. B.* Greenland's Pressure Drag and the Atlantic Storm Track // Journal of the Atmospheric Sciences. – 2007. – Vol. 64, No. 11. – P. 3986–4005.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АРКТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ К ПРОСТРАНСТВЕННОМУ РАЗРЕШЕНИЮ КЛИМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ»

Швец П.А. Смышляев С.П.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Polinashvets0302@gmail.com

Аннотация. Исследована чувствительность арктического усиления к пространственному разрешению климатической модели ИВМ РАН — РГГМУ. Сравнение конфигураций грубого (4°×5°) и повышенного (1,5°×2°) разрешения с данными реанализа ERA5 и массивом HadISST показало, что модель повышенного разрешения точнее воспроизводит интенсивность и сезонную структуру арктического усиления, которое достигает максимума в осенне-зимний период в связи с динамикой морского льда. Полученные результаты подтверждают значимость пространственного разрешения для корректного моделирования полярного климата.
Ключевые слова. Арктическое усиление, климатическое моделирование, реанализ ERA5, HadISST.

SENSITIVITY OF ARCTIC AMPLIFICATION TO THE SPATIAL RESOLUTION OF A CLIMATE MODEL

Shvets P.A., Smyshlyaev S.P.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg
Abstract. The sensitivity of Arctic amplification to the spatial resolution of the IOM RAS — RSHU climate model is investigated. Comparison of course-resolution (4°×5°) and high-resolution (1.5°×2°) model configurations against ERA5 reanalysis data and the HadISST dataset shows that the high-resolution configuration more accurately reproduces the intensity and seasonal structure of Arctic

amplification, which peaks in autumn and winter in association with sea ice dynamics. The results confirm that spatial resolution is a critical parameter for adequate simulation of polar climate.
Keywords. Arctic amplification, climate modeling, ERA5 reanalysis, HadISST

Прогнозирование изменений климата является одной из ключевых задач современной науки. Для её решения в 1988 году по инициативе Всемирной метеорологической организации и в рамках Программы ООН по окружающей среде была учреждена Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК/IPCC), объединяющая ведущих специалистов научных и политических организаций со всего мира [1, 2].

Однако изучение климатических процессов сопряжено с принципиальными методологическими трудностями. Климатическая система как физический объект не допускает прямого лабораторного эксперимента, а наблюдательная база ограничена: относительно полные инструментальные измерения охватывают лишь последние 150 лет, причём глобальное спутниковое покрытие доступно лишь начиная с 1979 года [2-4]. Это существенно сужает возможности традиционных подходов к исследованию климата.

В этих условиях математическое моделирование с применением глобальных климатических моделей становится основным инструментом изучения климатической системы [3]. Сама система является глобальной и многомасштабной: пространственные неоднородности в ней охватывают диапазон от планетарных масштабов (порядка 10^4 км по горизонтали) до мельчайших турбулентных структур в атмосфере и океане.

С математической точки зрения климат определяется как статистический ансамбль состояний системы на достаточно большом временном интервале. При таком подходе внутренняя изменчивость системы сглаживается, и изменения климата рассматриваются как отклик на внешние воздействия. На практике под климатом нередко понимают статистические характеристики отдельного временного отрезка траектории системы.

Несмотря на значительный прогресс в развитии моделей общей циркуляции атмосферы и океана, систематическая количественная оценка качества воспроизведения климатических характеристик и долгосрочных трендов в численных экспериментах по-прежнему остаётся недостаточной.

Одним из наиболее показательных проявлений современного изменения климата является арктическое усиление — более высокая скорость изменения приземной температуры воздуха в Арктическом регионе по сравнению с Северным полушарием или глобальным средним [7]. Это явление устойчиво воспроизводится как в инструментальных наблюдениях, так и в модельных расчётах при увеличении концентрации парниковых газов [8; 9]. По современным оценкам, начиная с 1979 года Арктика потеплела примерно вчетверо быстрее, чем планета в целом [9].

Основными механизмами, определяющими арктическое усиление, являются различные климатические обратные связи — прежде всего обратная связь вертикального градиента температуры, обратная связь Планка и альбедо поверхности, — а также меридиональный перенос тепла атмосферной и океанической циркуляцией [5]. Наряду с этим, недавние исследования показали, что важную роль играет и более низкая эффективная теплоёмкость арктической климатической системы по сравнению с тропиками, обусловленная присутствием морского льда: именно она определяет быстрое развитие арктического усиления в ответ на радиационное воздействие CO_2 [8].

Арктическое усиление имеет выраженную сезонную зависимость: наибольшей интенсивности оно достигает в осенне-зимний период и существенно ослабевает летом, что также связано с сезонными изменениями теплоёмкости системы при таянии и нарастании морского льда [5, 8]. Корректное воспроизведение этой особенности

представляет значительную трудность для современных климатических моделей, которые демонстрируют существенные погрешности в полярных регионах и не способны адекватно описать подсеточные процессы, в том числе динамику морского льда [5, 10]. Ведущую роль в формировании этих погрешностей играет недостаточное пространственное разрешение моделей, не позволяющее явно разрешить мелкомасштабные процессы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда [11]. Признавая актуальность данной проблемы, научное сообщество в рамках проекта CMIP6 инициировало специальную программу сравнения климатических моделей — Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP), — направленную на изучение причин и следствий полярного усиления в моделях различной конфигурации [12].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в изучении арктического усиления, вопрос о том, насколько адекватно современные климатические модели воспроизводят это явление в зависимости от своего пространственного разрешения, остаётся открытым. В связи с этим целью настоящей работы является оценка чувствительности арктического усиления к пространственному разрешению климатической модели ИВМ РАН — РГГМУ путём сравнения модельных расчётов различного разрешения с данными реанализа ERA5 и наблюдательным массивом HadISST.

В настоящей работе выдвигаются следующие рабочие гипотезы. Во-первых, предполагается, что арктическое усиление наиболее отчётливо проявляется в холодный период года — осенью и зимой, — что обусловлено сезонными изменениями площади морского льда и связанными с ними обратными связями альбедо и теплообмена на границе океан–атмосфера [5, 8]. Во-вторых, предполагается, что модели более высокого пространственного разрешения точнее воспроизводят интенсивность и пространственную структуру арктического усиления по сравнению с моделями низкого разрешения, поскольку лучше описывают мелкомасштабные процессы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда [10, 11].

В ходе исследования проведено сравнение расчётов модели ИВМ РАН — РГГМУ двух конфигураций пространственного разрешения — грубого (4°×5°) и повышенного (1,5°×2°) — с данными реанализа ERA5 и наблюдательным массивом HadISST.

1. Арктическое усиление устойчиво воспроизводится в обеих конфигурациях модели, однако его интенсивность и пространственная структура существенно зависят от пространственного разрешения. Версия модели с повышенным разрешением (1,5°×2°) демонстрирует более высокое отношение трендов температуры в Арктике к глобальному среднему и лучшее согласие с данными ERA5.

2. Подтверждена первая гипотеза о сезонной зависимости арктического усиления: наибольшей интенсивности явление достигает в осенне-зимний период, что обусловлено сезонной динамикой морского льда и связанными с ней обратными связями альбедо и теплообмена на границе океан–атмосфера. Модель низкого разрешения (4°×5°) систематически занижает амплитуду сезонного сигнала по сравнению с массивом HadISST, тогда как конфигурация 1,5°×2° демонстрирует существенно меньшее смещение.

3. Подтверждена вторая гипотеза: увеличение пространственного разрешения позволяет более адекватно описывать мелкомасштабные процессы взаимодействия атмосферы, океана и морского льда, определяющие формирование и сезонную изменчивость арктического усиления.

Таким образом, пространственное разрешение является значимым параметром при моделировании полярного климата, и его учёт необходим для корректной оценки интенсивности арктического усиления в климатических проекциях.

Список литературы

1. Annual Report of the World Meteorological Organization 1975. Geneva: WMO, 1976. 208 p. (WMO-No. 439). ISBN 978-92-63-10439-7.
2. *Volodin E.M.* Representation of Heat, Moisture, and Momentum Fluxes in Climate Models. Surface Fluxes // Fundamental'naya i Prikladnaya Klimatologiya (Фундаментальная и прикладная климатология). 2016. № 1.
3. *Volodin E.M., Diansky N.A., Gusev A.V.* Simulation of Present-Day Climate with a Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Model INMCM 4.0 // Izvestiya RAN. Fizika Atmosfery i Okeana. 2010. Vol. 46. No. 4. P. 448–466.
4. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
5. *Hoffmann L., Günther G., Li D. et al.* From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. Vol. 19. P. 3097–3124.
6. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108. No. D14. 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670.
7. *Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P*. The Arctic Amplification Phenomenon and Its Driving Mechanisms // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. 2020. Vol. 13. No. 3. P. 3–19. DOI: 10.7868/S2073667320030016.
8. *Previdi M., Polvani L.M.* The role of effective heat capacity in Arctic amplification // Geophysical Research Letters. 2025. Vol. 52. No. 3. e2024GL112847. DOI: 10.1029/2024GL112847.
9. *Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A. et al.* The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth & Environment. 2022. Vol. 3. No. 1. P. 168. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
10. *Flato G., Marotzke J., Abiodun B. et al.* Evaluation of Climate Models // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. P. 741–866.
11. *Pithan F., Mauritsen T.* Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models // Nature Geoscience. 2014. Vol. 7. No. 3. P. 181–184.
12. *Smith D.M., Screen J.A., Deser C. et al.* The Polar Amplification Model Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and consequences of polar amplification // Geoscientific Model Development. 2019. Vol. 12. No. 3. P. 1139–1164. DOI: 10.5194/gmd-12-1139-2019.

ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Гриц С.Ю., Попова Е.А., Смагина А.Е.
научные руководители: Восканян К.Л., Капустин А.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
alekseevna.ekaterina2005@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию ветроэнергетического потенциала Ленинградской области и оценке перспектив развития ветроэнергетики в регионе. Проведена оценка местного ветрового режима и его динамики. Даны рекомендации по использованию ветроэнергетических установок регионе.
Ключевые слова. Ветроэнергетические установки, ветрогенератор, альтернативные источники энергии, ветроэнергетический потенциал, ветровой режим, Ленинградская область.

WIND ENERGY POTENTIAL OF THE LENINGRAD REGION AND PROSPECTS FOR THE USE OF WIND ENERGY INSTALLATIONS

Grits S.Yu., Popova E.A., Smagina A.E.
academic advisor Voskanyan K.L., Kapustin A.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. The article is devoted to the study of the wind energy potential of the Leningrad Region and the assessment of prospects for the development of wind energy in the region. An assessment of the local wind regime and its dynamics has been carried out. Recommendations are given for the use of wind energy installations in the region.
Keywords. Wind power plants, wind turbine, alternative energy sources, wind energy potential, wind regime, Leningrad Region.

Использование альтернативных источников энергии является важной задачей для повышения энергетического потенциала страны. Согласно данным Российской ассоциации ветроиндустрии (РАВИ), к 2022 году выработка электроэнергии ветровыми электростанциями в России возросла в полтора раза, а мощность составила более 1% в Единой энергосистеме (рисунок 1). Однако введение экономических санкций привело к заморозке ряда проектов, что стимулировало развитие отечественного производства компонентов для ВЭУ [1].

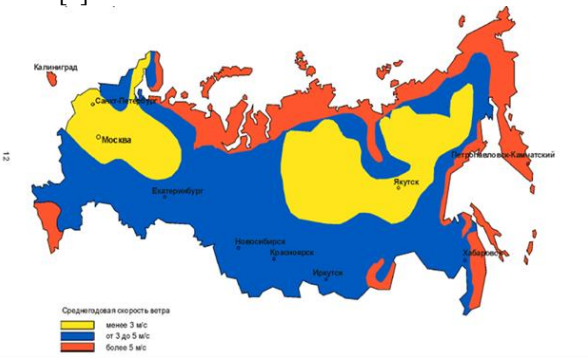


Рисунок 1 – Ветровые энергоресурсы России

Ленинградская область, обладая протяженной береговой линией Финского залива и Ладожского озера, рассматривается как перспективный регион для развития ветроэнергетики. Климат региона переходный от морского к континентальному, с частым переносом воздушных масс с Атлантики. Целью данной работы является оценка ветрового потенциала территории Ленинградской области на основе анализа режима ветра и определения возможных направлений применения ветроэнергетических установок (ВЭУ).

В современной ветроэнергетике применяются два основных типа установок, различающихся ориентацией оси вращения ветроколеса.

Первый тип – ВЭУ с горизонтальной осью вращения является наиболее распространенным. Ветроколесо с лопастями, использующими подъемную силу, преобразует энергию ветра во вращение ротора, которое через мультиплексор передается на генератор. Такие установки требуют системы ориентации на ветер, что является их недостатком, особенно при резких сменах направления потока (рисунок 2). Преимуществом является высокий коэффициент использования энергии ветра (до 0,48 у лучших образцов).

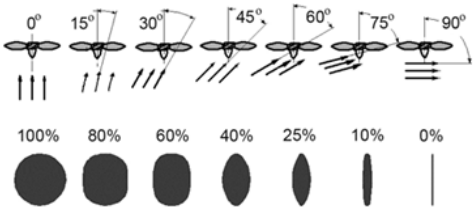


Рисунок 2 – Зависимость мощности ВЭУ с горизонтальной осью от угла направления ветра

Второй тип – ВЭУ с вертикальной осью вращения. Её главным преимуществом является их независимость от направления ветра, что исключает необходимость в сложных системах ориентации. К числу таких конструкций относятся ротор Савониуса и ротор Дарье (включая его Н-образную модификацию). Ротор Савониуса (рисунок 3) прост, надежен, хорошо работает при малых скоростях ветра (3-5 м/с), но имеет низкий коэффициент использования энергии.

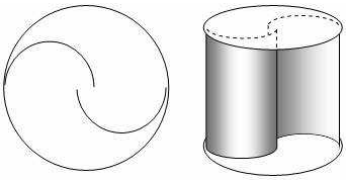


Рисунок 3 – Ротор Савониуса

Ротор Дарье (рисунок 4) является быстроходным, имеет более высокий КПД (до 0,38-0,45), но характеризуется плохим самозапуском и требует предварительного разгона. Вертикально-осевые ВЭУ также создают меньше шума и вибраций, что является их дополнительным преимуществом [1].



Рисунок 4 – Ротор Дарье

Наиболее технологичным является Н-образный ротор Дарье (рисунок 5), который состоит из одной или более лопастей аэродинамического профиля. Установка такого типа является быстроходной (КПД достигает 0,38), отличается пониженным уровнем шума и полным отсутствием инфразвука. ВЭУ этого типа имеет простую конструкцию и характеризуется высокой степенью надежности.

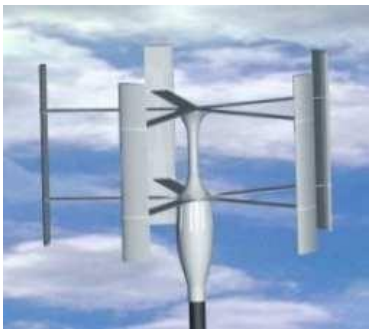


Рисунок 5 – Ротор Н-Дарье

Вертикально-осевые ветроэнергетические установки конструктивно являются более простыми и обладают рядом преимуществ перед горизонтально-осевыми. Однако коэффициент использования мощности ветра и КПД у них пока еще несколько ниже, что приводит к увеличению габаритов, а в некоторых случаях и к увеличению материалоемкости. Вместе с тем при использовании вертикально-осевых ветроустановок в автономном режиме или в качестве резервных источников электроэнергии этот недостаток нивелируется. Это объясняется тем, что в автономном или резервном вариантах ветроэнергетические станции работают на нагрузку через аккумулятор, который работает в буферном режиме. Кроме того, в случае буферного аккумулирования электроэнергии, можно снизить требования к качеству выходного напряжения и применить упрощенные конструктивные решения задач преобразования ветрового потока в механическую энергию вращения вала (например, нерегулируемые лопасти и т.п.). При этом требуемое качество электроэнергии в канале электроснабжения может быть обеспечено стандартными устройствами преобразования электрической энергии (например, источниками бесперебойного питания типа UPS) с аккумуляторной батареей соответствующей емкости [1].

Теперь поговорим о ветре, о ключевом параметре в ветроэнергетике. Как известно, ветер — это перемещение воздуха, вызванное неравномерным распределением атмосферного давления [5]. Энергия ветра является производной от солнечной энергии. Основными характеристиками ветра являются его скорость и направление.

Скорость ветра имеет хорошо выраженный суточный и годовой ход и зависит от высоты над поверхностью земли и рельефа местности. Среднегодовая скорость ветра является ключевым показателем для оценки ветроэнергетического потенциала, так как мощность ветрового потока пропорциональна кубу скорости ветра. Увеличение скорости ветра в два раза потенциально увеличивает выработку электроэнергии почти в 8 раз.

Второй важной характеристикой является преобладающее направление (роза ветров), которое определяется особенностями циркуляции атмосферы и местными физико-географическими условиями. Для экономически эффективной работы мощных мегаваттных ВЭУ среднегодовая скорость ветра в районе установки должна быть не менее 5,5 м/с. Для установок малой мощности этот порог может быть ниже — от 4,0 м/с [2, 3].

Для анализа ветрового режима региона были использованы данные за 2020–2024 гг. на четырех метеорологических станциях, расположенных в различных частях Ленинградской области: Выборг (север), Сланцы (запад), Лодейное Поле (восток) и Луга (юг) [4].

В Выборге среднегодовая скорость ветра за рассматриваемый период составла около 3,4 м/с, с максимумом в зимние месяцы. Преобладающим направлением является юго-западное (22%). Число дней с сильным ветром (>10 м/с) максимально в декабре-январе (таблица 1).

Таблица 1 – Число дней с сильным ветром в Ленинградской области по данным метерстанций

	месяц / скорость	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Выборг	>10м/с	13	10	7	5	7	5	7	4	6	12	8	19
	>15м/с	0	2	2	1	0	1	1	0	1	3	2	5
	>20м/с	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Сланцы	>10м/с	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	6	6
	>15м/с	3	3	2	3	4	4	2	2	4	4	6	6
	>20м/с	1	1	0,8	2	2	2	1	1	2	1	1	1
Лодейное Поле	>10м/с	4	4	3	4	5	5	3	3	5	5	6	6
	>15м/с	3	3	2	3	4	4	2	2	4	4	6	6
	>20м/с	1	1	0,8	2	2	2	1	1	2	1	1	1
Луга	>10м/с	5	3	2	2	2	2	2	2	1	2	3	3
	>15м/с	4	2	2	1	1	1	1	1	0	1	1	2
	>20м/с	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Среднегодовая скорость ветра в Сланцах наименьшая среди рассмотренных станций — 2,3 м/с. Преобладают ветры южного и юго-восточного направлений. Количество дней с сильным ветром также невелико.

В Лодейном поле среднегодовая скорость ветра составляет около 3,1 м/с. Преобладают ветры юго-восточного и западного направлений. Количество дней с сильным ветром (>10 м/с) несколько ниже, чем в Выборге

На юге области (Луга) среднегодовая скорость ветра составляет около 2,9 м/с. Здесь отмечено наименьшее количество дней с ветром более 10 м/с (Таблица 4).

Обобщение данных по всем станциям показывает, что среднегодовая скорость ветра на территории Ленинградской области варьируется от 2,3 до 3,5 м/с. Во всех районах максимум скорости приходится на холодный период года (ноябрь-март), что связано с активизацией циклонической деятельности. Преобладающими направлениями ветра на большей части территории являются юго-западное, южное и юго-восточное. Наибольшая повторяемость сильных ветров (более 10 м/с) также характерна для зимних месяцев.

Соответственно, в Ленинградской области, где средняя годовая скорость ветра не превышает 3,5м/с, применение мощных мегаваттных ветроэнергетических станций экономически нецелесообразно, а вот на малые и средние ВЭУ стоит обратить пристальное внимание, особенно на то оборудование, которое начинают производить в нашей стране. Средняя скорость ветра 3-4 м/с достаточна для эффективной эксплуатации малых и средних ВЭУ, особенно тех конструкций, которые способны работать при низких скоростях ветра (например, ротор Савониуса). Такие ВЭУ могут работать для обеспечения питанием целого загородного дома, например, если мощность установки 10 кВт и более.

Анализ данных метеорологических наблюдений за 2020–2024 гг. показал, что наиболее перспективными районами для размещения таких установок являются прибрежные зоны крупных водоемов (Финский залив, Ладожское озеро), где локальные бризовые циркуляции могут увеличивать повторяемость ветра.

В заключении отметим, что в сложившихся экономических условиях и с учетом ветровых характеристик региона, наиболее перспективным направлением является использование малых и средних ветроэнергетических установок (мощностью до 10-50 кВт) в составе автономных комбинированных систем энергоснабжения. Для целей автономного энергоснабжения (частные дома, удаленные объекты) предпочтительными являются вертикально-осевые ВЭУ ввиду их нечувствительности к направлению ветра, низкого уровня шума и простоты эксплуатации.

Для обеспечения непрерывного энергоснабжения ВЭУ следует использовать с другими источниками автономной энергии – солнечные батареи, аккумуляторные батареи или дизельный генератор – которые будут использоваться в безветренную погоду.

Список литературы

1. Шелехов. И.Ю., Рупосов В.Л. Альтернативные и нетрадиционные источники энергии: учебное пособие. - Иркутск: ИРНИИТУ, 2020 – 160с.
2. Власов В.К. Ветроэнергетические установки. – Москва: Инфра-Инженерия, 2022. - 316 с.
3. Марьяндышев, П. А. Ветроэнергетические установки и перспективы их использования в Арктической зоне РФ: учебное пособие / П. А. Марьяндышев. — Архангельск: САФУ, 2018. — 68 с.
4. Расписание погоды rp5 Электронный ресурс. Режим доступа: https://rp5.ru/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
5. Матвеев Л.Т. Курс общнй метеорологии. Физика атмосферы. - Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984 – 876с.

ОЦЕНКА БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ В ПЕРИОД 1991-2022 ГОДЫ

Кочнева В.А., Мирсаева Н.А.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
VaAKochneva@kpfu.ru

Аннотация. Рассматриваются пространственно-временные изменения и взаимосвязи основных биоклиматических параметров (атмосферная циркуляция, ветровой режим, термический режим, режим влажности и осадков) на территории Курганской области в период 1991-2022 гг. Дана оценка биоклиматическим ресурсам по степени благоприятности их воздействия на организм человека.
Ключевые слова. Биоклимат, атмосферная циркуляция, ветровой режим, термический режим, влажностный режим.

ASSESSMENT OF BIOCLIMATIC RESOURCES OF THE KURGAN REGION IN THE PERIOD 1991-2022

Kochneva V.A., Mirsaeva N.A.
Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Annotation. The spatial and temporal changes and interrelationships of the main bioclimatic parameters (atmospheric circulation, wind regime, thermal regime, humidity, and precipitation) in the Kurgan

region from 1966 to 2025. The bioclimatic resources have been evaluated according to their impact on the human body.
Keywords. Bioclimate, atmospheric circulation, wind regime, thermal regime, humidity regime.

Погода и климат играют ключевую роль в формировании окружающей среды, существенно влияя на комфорт проживания, а также на образ жизни и деятельность человека на протяжении всей его жизни. Их воздействие на здоровье особенно значительно: по некоторым оценкам, до 20% состояния здоровья человека определяется погодно-климатическими особенностями. При этом вредное влияние на организм оказывают не только отдельные метеорологические и геофизические факторы, но и их комбинации. Поэтому в медицинской метеорологии активно используются комплексные показатели погоды и климата, такие как эффективная температура воздуха и биоклиматические параметры.

В данном исследовании рассматриваются пространственно-временные изменения и взаимосвязи основных биоклиматических параметров (атмосферная циркуляция, ветровой режим, термический режим, влажностный режим) на территории Курганской области в период 1991-2022 гг. Дается оценка биоклиматических параметров по степени благоприятности их воздействия на организм человека.

С этой целью использовались 8-срочные данные ВНИИГМИ-МЦД [1] по основным метеорологическим параметрам по пяти станциям Курганской области. В дальнейшем многолетние данные подвергались статистической обработке.

Повсеместно на территории Курганской области преобладают дни со средними суточными перепадами как температуры воздуха, так и атмосферного давления. Доля дней со средним перепадом температуры составляет 89-90% от общего количества на всех станциях, а дней с сильными перепадами (выше порога чувствительности) – лишь 10-11%. Наибольшее количество дней со средним перепадом (328 дней) отмечено на ст. Куртамыш, наименьшее (324 дня) – на ст. Далматово. Режим атмосферного давления демонстрирует большую изменчивость. Несмотря на то, что и здесь преобладают дни со средними перепадами, их доля меньше, варьируется от 63% (ст. Памятное, Петухово, Курган) до 72% (ст. Куртамыш). Дней с сильными перепадами давления – 28-37%. Частота дней с резкими колебаниями давления выше на севере, в центральной части и на востоке области (до 37% на ст. Памятное, ст. Курган и ст. Петухово), чем в её южной части (28% на ст. Куртамыш). Наиболее устойчивыми по обоим параметрам можно считать условия в центральной части области (ст. Куртамыш), где зафиксирована максимальная доля дней со средними перепадами температуры (90%) и давления (72%).

Наибольшая повторяемость слабых ветров характерна для северо-западной (ст. Далматово 83%) и южной (ст. Куртамыш 77%) частей области. Здесь слабый ветер оказывает щадящее воздействие. Наименьшая повторяемость отмечена в центральной части (ст. Курган 47%), где наблюдаются различные режимы воздействия ветра от раздражающего до щадящего типа. Несмотря на это в последние годы на ст. Курган и на ст. Петухово установился щадящий режим. Промежуточная повторяемость слабых ветров наблюдается на северо-востоке (ст. Памятное 53%) и юго-востоке (ст. Петухово 50%). На этих станциях наблюдается тренирующий и щадящий режимы. В 2016 г. на территории Курганской области наблюдалось максимальное количество дней со слабым ветром (ст. Далматово, ст. Памятное и ст. Курган), а в начале 1990-х годов (1991-1993 гг.) зафиксировано минимальное количество дней со слабым ветров.

Для Курганской области характерна низкая повторяемость комфортных условий в теплый период, составляющая в среднем от 6,1% до 9,5%. Большинство дней (89-94%) характеризуется температурой ниже 17°С, что указывает на преобладание холодной

погоды. Дни с температурой выше 22°С отмечаются редко (0,2-1,1%). Наиболее благоприятные условия формируются в южной части области (ст. Куртамыш), где наблюдается максимальное среднее количество комфортных дней за теплый период (20 дней) и наибольшая их повторяемость (9,5%). Наименее благоприятные условия на северо-востоке (ст. Памятное), где отмечаются минимум комфортных дней (13 дней) с повторяемостью (6,1%). Преобладающим типом погодных условий за весь период наблюдений является «раздражающее» воздействие (от 20 до 31 случая на станциях), что подтверждает неблагоприятный характер теплого периода в Курганской области.

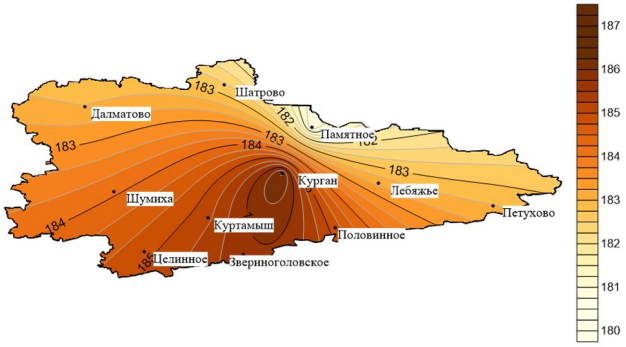


Рисунок 1 – Средняя продолжительность (дни) безморозного периода на территории Курганской области за 1991-2022 гг.

Средняя продолжительность безморозного периода (рис. 1) в течение весенне-осеннего сезона по территории Курганской области варьируется от 181 до 186 дней, что демонстрирует однородность термического режима. Наибольшее среднее значение зафиксировано в центральной части (ст. Курган – 186 дней), наименьшее – на северо-востоке (ст. Памятное – 181 день). Абсолютный максимум (214 дней) отмечался в 1997 году на большинстве станций и в 2007 году на ст. Далматово. Абсолютный минимум (153-155 дней) повсеместно пришёлся на 1993, 1996 год. На севере области (ст. Далматово и Памятное) за весь период лет с «тренирующим» воздействием было больше (17-18 лет), чем с «щадящим» (14-15 лет). Примечательно, что с 2017 года на этих станциях наблюдается непрерывное «тренирующее» воздействие, что может указывать на тенденцию к увеличению контрастности термического режима в этих районах. На станциях Курган, Куртамыш и Петухово, наоборот, преобладают годы с «щадящим» воздействием (19-20 лет из 32). Это свидетельствует о более мягком температурном режиме на большей части территории области за рассматриваемый 32-летний период.

Для территории Курганской области характерно преобладание дней с повышенной влажностью воздуха. Их повторяемость составляет от 80% на южных и центральных станциях до 88% на северо-востоке (ст. Памятное). В среднем это составляет от 292 до 321 дня в году. Дни с оптимальной для человека влажностью наблюдаются редко. Их доля варьируется от 12% (ст. Памятное) до 20% (центральные и южные районы), что в среднем соответствует 44-73 дням в году. Наибольшее количество комфортных дней отмечено в 2010 году на большинстве станций. Периоды сухих дней являются крайне редким. На большинстве станций в среднем отмечается не более 1-2 сухих дней в году, а на ст. Памятное они практически отсутствуют. Наиболее влажный климат наблюдается на северо-востоке области (ст. Памятное), здесь наибольшая повторяемость повышенной влажности (88%) и наименьшая – комфортной (12%). Сухие дни на ст. Памятное отсутствуют. Наименее влажные условия наблюдаются в

центральной и южной частях (ст. Курган, Куртамыш, Петухово), повторяемость комфортных дней достигает 20%, а повторяемость повышенной влажности – 80%.

К числу основных выводов можно отнести следующие:

1. Климатические условия Курганской области характеризуются значительной устойчивостью суточного хода температуры воздуха и большей изменчивостью атмосферного давления.

2. Территория Курганской области неоднородна по ветровому режиму. Щадящее воздействие слабого ветра формируется на северо-западе и юге территории. Для центральной и восточной частей области характерны типы воздействия от раздражающего до щадящего, при чем последний тип воздействия имеет тенденцию роста.

3. Теплый период в Курганской области характеризуется дефицитом комфортных температурных условий и преобладанием прохладной погоды. Комфортные условия улучшаются в направлении с севера на юг региона.

4. Безморозный период на территории Курганской области характеризуется относительно высокой средней продолжительностью (~183-186 дней). Наблюдается закономерность в преобладании типа воздействия (тренирующее на севере, щадящее в центре и на юге), а также тенденция к учащению лет с тренирующим воздействием в северных районах.

5. Влажностный режим Курганской области характерен избыточной увлажненностью воздуха. Практически на всей территории в течение более 80% дней в году наблюдалась повышенная влажность, оказывающая раздражающее воздействие на организм человека. Благоприятные по влажности дни составляют небольшую часть года, а сухих дней – аномально мало.

Согласно оценке биоклиматических параметров Курганской области, можно порекомендовать туристам посетить южную часть исследуемой территории – ст. Куртамыш. Здесь зафиксирована максимальная доля дней со средними перепадами температуры (90%) и атмосферного давления (72%) – стабильная погода, а также наибольшая повторяемость слабых ветров (77%). К тому же наблюдаются наименее влажные условия и наименьшее количество дней с сильными осадками (>3 мм). Для туристического отдыха также подойдет центральная часть Курганской области – ст. Курган. Здесь наблюдается наибольшее среднее значение безморозного периода (186 дней). Аналогично ст. Куртамыш – наименее влажные условия. И в последние годы (с 2015 г.) установился щадящий ветровой режим. Наименее благоприятные условия для туристов отмечаются на северо-западе (ст. Далматово) и востоке (ст. Памятное и ст. Петухово) территории Курганской области.

Список литературы

1. ВНИИГМИ-МЦД. Режим доступа: http://www.meteo.ru/ (дата обращения: 24.02.2026)

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ВУЛКАНА КРАШЕНИННИКОВА ДЛЯ ПОЛЕТОВ АВИАЦИИ

Плюшко В.С., Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
plyushkovlada@gmail.com

Аннотация. В работе представлена оценка потенциальной опасности первого исторического извержения вулкана Крашенинникова (2–5 августа 2025 г.) для авиации. Анализ выполнен по данным VAAC Tokyo и спутникового мониторинга. Установлено увеличение высоты пеплового облака от FL140 (≈4,2 км) до FL300 (≈9,1 км) в первые часы извержения с последующей

стабилизацией на уровне FL180–FL200. Доминирующее юго-восточное направление переноса создавало риск пересечения международных авиационных маршрутов. Результаты подтверждают авиационно значимый характер события и необходимость постоянного мониторинга даже редко активных вулканов Камчатки.
Ключевые слова. Вулкан Крашенинникова, вулканический пепел, VAAC Tokyo, авиационная безопасность, эшелон, Камчатка.

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL HAZARD OF KRASHENINNIKOV VOLCANO FOR AVIATION FLIGHTS

Pliushko V.S., Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. This study assesses the potential aviation hazard of the first historical eruption of Krasheninnikov Volcano (2–5 August 2025). The analysis is based on VAAC Tokyo advisories and satellite monitoring data. The ash cloud height increased from FL140 to a maximum of FL300 (~9.1 km) during the initial hours, followed by stabilization at FL180–FL200. Predominant southeastward transport created a potential risk for international trans-Pacific air routes. The results confirm the aviation significance of the event and highlight the need for continuous monitoring of rarely active volcanoes in Kamchatka.
Keywords. Krasheninnikov Volcano, volcanic ash, VAAC Tokyo, aviation safety, flight level, Kamchatka.

Вулканическая опасность для авиации в первую очередь связана с выбросами вулканического пепла, которые в условиях современной интенсивной эксплуатации воздушного пространства рассматриваются как один из наиболее значимых факторов риска.

Вулканический пепел состоит в основном из твердых стекловидных частиц с острыми краями и распыленной горной породы. Он обладает крайне высокой абразивностью и за счет наличия в его составе главным образом кремнистых материалов имеет температуру плавления ниже рабочей температуры современных реактивных двигателей при крейсерском режиме тяги. Облако вулканического пепла может содержать газообразные растворы двуокиси серы, хлор и другие химические элементы, которые оказывают коррозионное воздействие. С учетом этих фактов представляется совершенно очевидным, что вулканический пепел в атмосфере может создавать серьезную опасность для воздушного судна в полете [1].

Камчатка относится к числу наиболее вулканически активных регионов мира и расположена вблизи международных маршрутов северной части Тихого океана. Извержения вулканов могут затрагивать как местные авиаперелеты, так и международные.

Вулкан Крашенинникова (1856 м) относится к Восточному вулканическому поясу и находится примерно в 13 км к югу от оз. Кроноцкое, в 200 км от г. Петропавловск-Камчатский [2].

Особую актуальность приобретает оценка потенциальной опасности извержения вулкана Крашенинникова для региональной и международной авиации в период 2–5 августа 2025 г., поскольку, по данным тефрохронологии, последнее эксплозивное извержение вулкана было предположительно 1100 лет назад, а излияние лавовых потоков – 400–600 лет назад [3].

Рассмотрим подробно первое исторического извержения вулкана Крашенинникова. Активное эксплозивное извержение вулкана началось в 16:38 UTC 2 августа 2025 года, что отчетливо можно увидеть на спутниковом снимке (Рисунок 1), а закончилось 5 августа 2025 года.

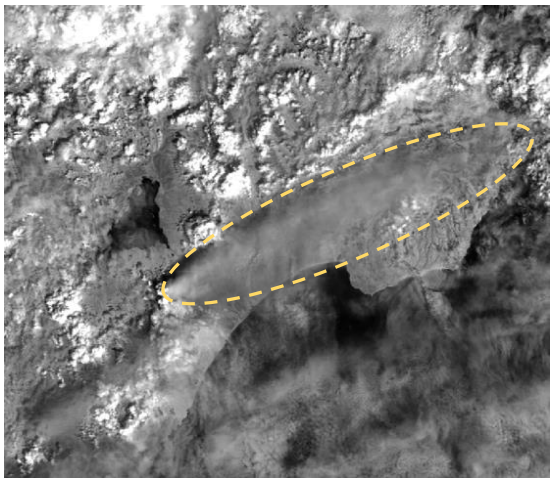


Рисунок 1 - Спутниковое изображение пеплового облака вулкана Крашенинникова (MODIS/Terra, 02.08.2025, 16:38 UTC) [4].

Начальная высота пеплового облака 2 августа 2025 г. достигла FL140 (≈4,3 км). В течение первых 10–12 часов произошло последовательное увеличение до FL200 (≈6,1 км), затем до FL280 (≈8,5 км). Максимум выброса достиг FL300 (≈9,1 км), что означает прирост высоты примерно на 4,8 км за первые часы извержения (Рисунок 2).

В дальнейшем высота снизилась и стабилизировалась преимущественно в диапазоне FL180–FL200 (≈5,5–6,1 км). Значительных превышений отметки FL200 в последующие сутки не отмечено. Таким образом, извержение имело выраженную импульсную фазу с последующим переходом к устойчивому уровню выбросов.

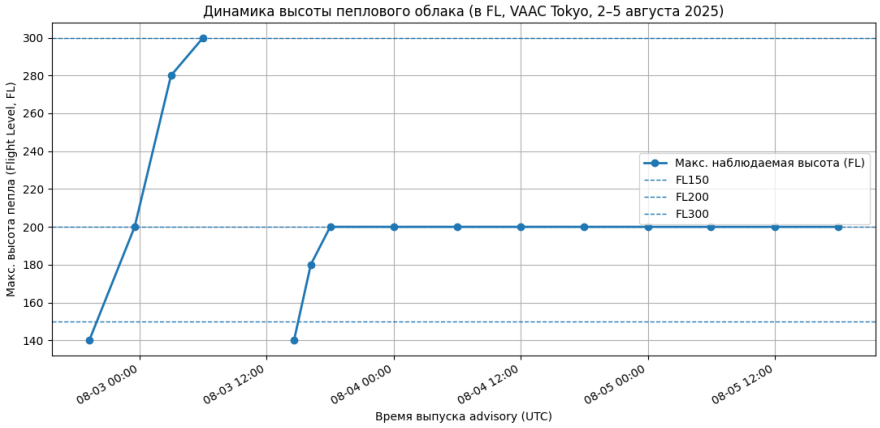


Рисунок 2 - Динамика максимальной высоты пеплового облака вулкана Крашенинникова (в эшелонах - FL) по данным VAAC Tokyo, 2–5 августа 2025 г.

Распределение консультативных сообщений по времени было неравномерным (Рисунок 3). Пик публикаций пришёлся на 3 августа, что соответствует фазе максимального роста пеплового шлейфа и достижению высот до эшелона FL300 [5].

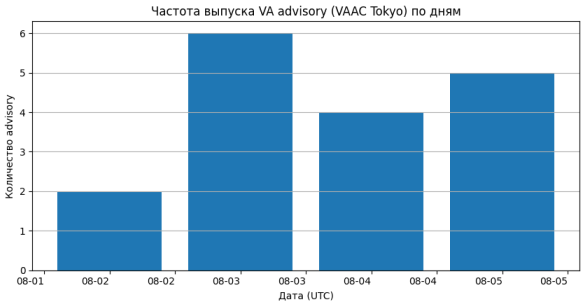


Рисунок 3 - Частота публикации консультативных сообщений VAAC Tokyo за период 2–5 августа 2025 г.

В последующие дни (4–5 августа) число сообщений уменьшилось, что отражает стабилизацию параметров извержения. Частота консультативных сообщений может рассматриваться как косвенный показатель интенсивности процесса и уровня авиационной опасности.

Анализ показал доминирование юго-восточного направления переноса (Рисунок 5). Пепловые массы распространялись в сторону северной части Тихого океана, где проходят международные авиационные маршруты. При высотах до FL300 (≈9 км) создавалась потенциальная угроза для дальнемагистральных рейсов, а при устойчивых выбросах на уровне FL200 (≈6,1 км) сохранялся риск для региональной авиации.

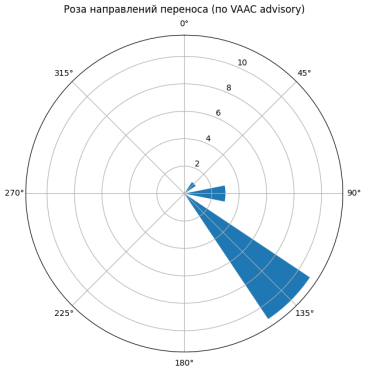


Рисунок 4 - Роза направлений переноса пеплового облака вулкана Крашенинникова по данным VAAC Tokyo, 2–5 августа 2025 г.

Заключение.

Максимальная высота пеплового облака соответствовала крейсерским эшелонам дальнемагистральной авиации, тогда как устойчивые выбросы на уровне FL180–FL200 затрагивали среднемагистральные и региональные рейсы, что свидетельствует об авиационно значимом характере извержения. Доминирующий юго-восточный перенос повышал вероятность воздействия на транстихоокеанские маршруты и потенциального пересечения воздушных трасс. Сообщения о частичном закрытии пеплового облака облачностью указывают на риск недообнаружения и необходимость консервативной оценки опасности. Несмотря на длительный период покоя, вулкан продемонстрировал способность формировать выбросы до значимых для авиации высот, что подтверждает необходимость постоянного мониторинга даже малоактивных вулканов Камчатки.

Список литературы

1. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Безопасность полетов и вулканический пепел. Управление риском при производстве полетов в условиях известного или прогнозируемого загрязнения вулканическим пеплом. Doc 9974 AN/487. — 1-е изд. — Монреаль: ИКАО, 2012. — 40 с.
2. Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT). Вулкан Крашенинникова [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://kvert.febras.net/volc?name=Krasheninnikov
3. Гирина О.А., Мельников Д.В., Романова И.М., Маневич А.Г., Крашенинникова Ю.С., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Марченков В.В. Первое историческое извержение вулкана Крашенинникова (Камчатка) в 2025 г. по данным спутникового мониторинга в информационной системе VolSatView // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 397–404. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-397-404.
4. NASA Goddard Space Flight Center. LAADS DAAC — Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System. MODIS satellite data [Электронный ресурс].
5. Japan Meteorological Agency (JMA). Volcanic Ash Advisory Center (VAAC) Tokyo. Archive of Volcanic Ash Advisories for 2025 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.data.jma.go.jp/vaac/data/Archives/2025_vaac_list.html

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ СМЕРЧЕЙ В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ: СЛУЧАЙ 3 АВГУСТА 2025 ГОДА

Зоммер В.П., Волобуева О.В., Дробжева Я.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zommer.lerik@gmail.com

Аннотация. В статье проведен анализ метеорологических условий формирования смерчей на Черноморском побережье Кавказа с акцентом на Краснодарский край и конкретный случай в Туапсинском районе 3 августа 2025 года. Рассматриваются ключевые факторы (конвекция, температурные контрасты), сезонность явления, синоптическая обстановка при возникновении Туапсинского смерча и последствия.
Ключевые слова. Смерч; конвекция; циклоны; водяные смерчи; грозы; ливни.

ANALYSIS OF THE CAUSES OF DEATHS IN THE KRASNODAR REGION: CASE OF AUGUST 3, 2025

Zommer V.P., Volobueva O.V., Drobzheva Ya.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. This article analyzes the meteorological conditions for tornado formation along the Black Sea coast of the Caucasus, with a focus on Krasnodar Krai and a specific case that occurred in the Tuapse District on August 3, 2025. The paper examines key factors (convection, temperature contrasts), the seasonality of the phenomenon, synoptic conditions during the Tuapse tornado event, and its consequences.
Keywords. Tornado; convection; cyclones; waterspouts; thunderstorms; heavy rains.

Черноморское побережье Кавказа, в частности Краснодарский край, представляет собой зону повышенного риска смерчей из-за теплой поверхности моря и сложного рельефа. Атмосферные условия здесь способствуют термической неустойчивости воздуха, когда нагретый нижний слой сталкивается с холодными воздушными массами на высоте 1,5–2 км, провоцируя мощные вихри.

Ключевыми факторами формирования смерчей являются:

- Теплая поверхность Черного моря служит главным источником энергии, нагревая воздух и вызывая интенсивную конвекцию в кучево-дождевых облаках.
- Контраст температур между горячим влажным воздухом с моря и холодным с гор или в тропосфере приводит к неустойчивой стратификации атмосферы и возникновению вихрей.
- Сильные восходящие потоки приводят к образованию конвективных (кучево-дождевых) облаков, где скорость ветра в столбе может достигать 100 м/с, особенно во время летних циклонов [1].

Краснодарский край подвержен риску из-за горных рек и частых атлантических циклонов, втягивающих теплую влажную массу воздуха [2]. Летом формируются грозы с порывами ветра до 20–25 м/с, градом и ливнями, поднимающими уровень рек на 5 метров за час.

Смерчи на побережье чаще всего фиксируются с августа по ноябрь, когда температурный градиент между морем и атмосферой максимален; в пик сезона может происходить до 10–20 случаев [3]. Обычно это водяные смерчи над морем, но случаются и выходы на сушу из-за сильного температурного контраста: вторжение холодного воздуха на более прогретую подстилающую поверхность (сушу), тем самым усиливая конвекцию и скорость вращения в кучево-дождевых облаках, особенно при прохождении фронта.

Рассмотрим случай смерча 3 августа 2025 года в Туапсинском районе. В 12:00 UTC 3 августа 2025 года по данным радиозондирования атмосферы на станции Туапсе были зафиксированы метеорологические параметры, свидетельствующие о высокой неустойчивости атмосферы и благоприятных условиях для развития конвективных процессов:

1) Температурный режим. Температура воздуха у поверхности составляла 28–33°C, что:

- Значительно превышало климатическую норму для данного периода (средняя многолетняя температура для начала августа в регионе составляет 24–26°C);
- Создавало мощный прогрев приземного слоя атмосферы;
- Сформировало резкий температурный контраст с вышележащими слоями атмосферы, где на высоте 1,5–2 км наблюдались температуры порядка -5...-10°C.

Такой вертикальный градиент температур (более 30°C на 2 км) создавал крайне неустойчивую стратификацию атмосферы.

2) Влажностные характеристики. Относительная влажность приземного воздуха достигала 90%, что:

- Свидетельствовало о насыщении воздуха водяным паром;
- Создавало мощный источник скрытой теплоты парообразования (порядка 2500 кДж/кг);
- При конденсации влаги в восходящих потоках высвобождалась значительная энергия, дополнительно усиливающая конвекцию;

Высокая влажность в сочетании с теплой поверхностью Черного моря (температура воды в этот период составляла 26–28°C) обеспечивала непрерывный приток теплого влажного воздуха в конвективные ячейки.

3) Барические условия (Рисунок 2). Атмосферное давление составляло около 755 мм рт. ст. (примерно 1006 гПа), что:

- Характерно для тыловой части циклона или периферии барического образования;
- Указывало на наличие градиентов давления, способствующих усилению ветра;

- Создавало условия для конвергенции воздушных потоков в приземном слое.

4) Индексы неустойчивости. Согласно данным аэрологического зондирования (Рисунок 1), расчетные индексы подтверждали высокую конвективную активность:

- CAPE (Convective Available Potential Energy) — доступная потенциальная энергия конвекции — указывал на наличие значительного запаса энергии для развития мощных восходящих потоков (CAPE = 2610,5, при CAPE=400 уже отмечаются неустойчивость атмосферы и слабые осадки);
- Индекс TT (Total Totals) — превышал пороговые значения, свидетельствуя о высокой вероятности развития гроз (TT = 45,3, при TT=44 отмечаются отдельные очаги гроз);
- Индекс Вайтинга — указывал на возможность формирования смерчевой активности (K=34,8, при 20 <K <25 отмечаются отдельно изолированные грозы).

Наличие теплой поверхности моря, высокой влажности приземного слоя и резкого температурного контраста с вышележащей атмосферой создавало классические условия для формирования водяных смерчей с последующим выходом на сушу, что и реализовалось в рассматриваемом случае [4].

Смерч и ливни привели к режиму ЧС: подтоплено 34 дома, обрушены мосты в Лермонтово и под Горячим Ключом, эвакуированы жители.

Заключение

Смерч в селе Агой вышел с моря на сушу ночью, подняв катамараны и повредив пляж — классический пример неустойчивой атмосферы в циклональной зоне.

В качестве превентивных мер проводить постоянный мониторинг рек, очистку русел и ранние предупреждения для минимизации ущерба.

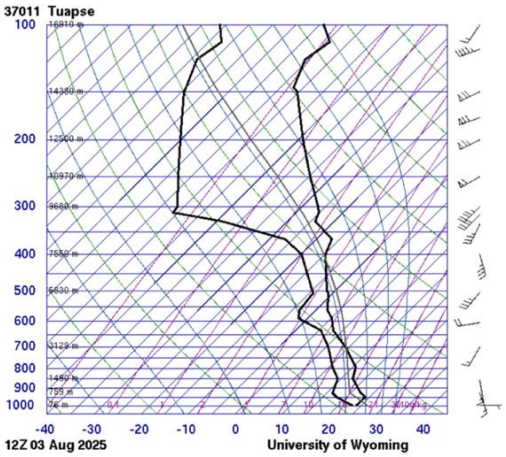


Рисунок 1 – данные радиозондирования атмосферы на станции Туапсе 3 августа 2025г в 12.00 UTC



Рисунок 2 – приземная карта от 3 августа 2025г. 12.00 UTC

Список литературы

1. Анализ условий возникновения вспышки смерчей над Черным морем [Электронный ресурс]: Метеорф.ru
2. *Чернокульский А*. Это база торнадо! Климатолог о росте числа смерчей [Электронный ресурс]: Stena.ee. /2022
3. Данные Краснодарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС). https://kuban.bfm.ru, https://kubnews.ru
4. Сайт RP5 [Электронный ресурс]: https://rp5.ru

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ СЕЛЕЙ В ЭЛЬБРУССКОМ РАЙОНЕ НА ПРИМЕРЕ СХОДА ГРЯЗЕВЫХ ПОТОКОВ ЛЕТОМ 2025 Г.

Сунгурова Т.Г., Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
tatanasungurova@yandex.ru

Аннотация. В статье рассмотрены метеорологические факторы, влияющие на селевую активность, такие как: осадки, температура, влажность, скорость и направление ветра. Проведен анализ их изменения по данным метеостанций (Терскол, Чегет, Тырныауз, ледник Гарабаши), которые привели к сходу селевых потоков в Эльбрусском районе летом 2025 года. Были изучены изменения температуры в июле за период 2018-2025 года и выявлен комплекс факторов, определяющих селевую активность, показывающую необходимость подробного изучения каждого из случаев.
Ключевые слова. Сель, селевые потоки, Эльбрусский район, метеорологические условия, озеро Азау.

METEOROLOGICAL CONDITIONS FOR THE FORMATION OF SELE IN THE ELBRUS REGION, AS EXAMPLIFIED BY THE MUD FLOWS IN THE SUMMER OF 2025

Sungurova T.G., Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

Abstract. The article discusses meteorological factors such as precipitation, temperature, humidity, wind speed and direction. The analysis of their changes based on data from weather stations (Terskol, Cheget, Tyrnyauz, Garabashi glacier), which led to the outflow of mudflows in the Elbrus region in the summer

of 2025, was carried out. Temperature changes in July for the period 2018-2025 were studied and a complex of factors determining mudflow activity was revealed, showing the need for a detailed study of each of the cases.
Keywords. Mudslides, mudflows, Elbrus district, meteorological conditions, Lake Azau.

Селевой поток – временный горный русловой поток, характеризующийся высоким содержанием твердого материала и резким подъемом уровня. Он состоит из воды и продуктов разрушения горных пород, возникает внезапно и проходит быстро [1]. Факторами, приводящими к сходу селей, являются:

- Интенсивные и продолжительные осадки;
- Таяние ледников и снежного покрова;
- Прорывы горных озер;
- Наличие рыхлообломочного материала;
- Значительные уклоны местности;
- Землетрясения, извержения вулканов и другие.

Сходы грязевых потоков часто наблюдаются на склонах Кавказских гор. Самой высокой в Европе является гора Эльбрус. На территории России она расположена на границе Карачаево-Черкесской и Кабардино-Балкарской Республик (Рисунок 1). Для анализа был выбран Эльбрусский район, расположенный в Кабардино-Балкарии. Он является наиболее значимым для туристической инфраструктуры региона. На территории района в этом году были зафиксированы несколько сходов селей, которые оказали сильное влияние на инфраструктуру.

Кабардино-Балкарская Республика расположена в центральной части Предкавказья и северного склона Большого Кавказа. Она характеризуется сложным рельефом с общим подъемом территории с северо-востока на юго-запад от 150 м в долине реки Терек к горе Эльбрус. В равнинной части климат континентальный, в предгорьях умеренно континентальный, с неустойчивым увлажнением; в горах проявляется высотная климатическая зональность, осложненная местными орографическими условиями. Наибольшую роль в формировании местного климата играют горно-долинные, ледниковые ветры и фёны [2]. Для региона характерны умеренная средняя температура воздуха с возможными аномальными отклонениями, большое количество осадков, особенно в летний период, сильные ветра.

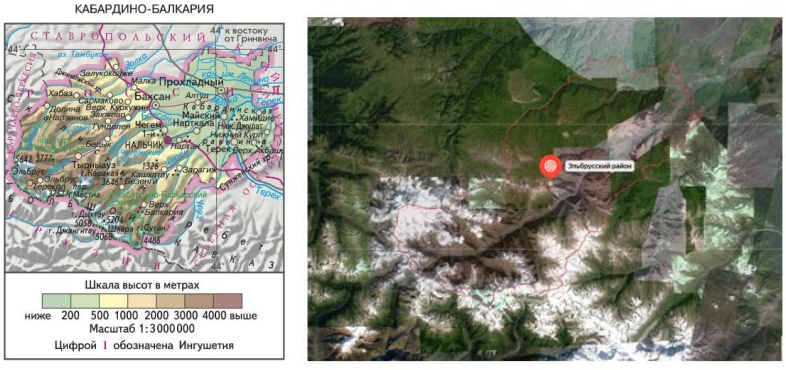


Рисунок 8 – Физическая карта Кабардино-Балкарской Республики [2] и спутниковый снимок Эльбрусского района [3]

Летом 2025 года было зафиксировано 3 схода селевых потоков в Эльбрусском районе. По данным МЧС в это время в регионе наблюдался пик селевой опасности из-за повышенной температуры, высокой влажности и осадков.

Первый сход произошел 21 июля 2025 г. в долине реки Герхожан-Суу. Там же 31 июля 2025 года наблюдался второй сход, а 1-3 августа угроза новых селей сохранялась. Они привели к выносу массы из селепропускного лотка в городе Тырныауз, из-за чего пострадала инфраструктуры города, часть осталась без электричества, газа и воды на два дня, была повреждена опора моста на трассе «Прохладный — Баксан — Эльбрус», ведущая в Приэльбрусье, более 300 человек эвакуированы. Причинами были названы интенсивные дожди и резкое таяние ледников, а также накопление рыхлого материала в верховьях бассейна Герхожан-Суу.

6 августа 2025 г. на южном склоне горы Эльбрус произошел прорыв высокогорного озера Азау на высоте 3270 м. Причинами являются аномально высокие температуры воздуха, которые привели к интенсивному таянию ледников. Потоки воды направились вниз, что вызвало еще один сель, однако он не затронул туристическую зону. На горе Эльбрус развито мощное оледенение: в пределах Кабардино-Балкарии расположено 20 ледников, самый крупный – Большой Азау. Ледники находятся в стадии отступания [2].

Для оценки влияния метеорологических факторов, которые привели к сходу селевых потоков рассматривается архивные данных с сайта rp5.ru за период с 1 июля по 15 августа 2025 г. [4]. Были проанализированы изменения давления, температуры, влажности, направления и скорости ветра, облачность и количество осадков за 09 UTC на 4 метеорологических станциях, расположенных в Эльбрусском районе: Терскол (37204) – 3150 м, гора Чегет (37205) – 2862 м, Тырныауз (37206) – 1295 м, леднике Гарабаши (37206) – 2326 м.

Из-за того, что станции находятся на различных высотах, они имели разное давление: в Тырныаузе оно составляло около 855 гПа, в Терсколе – 777 гПа, на леднике Гарабаши – 760 гПа, на горе Чегет – 697 гПа. Температура воздуха также понижалась с высотой: в городе Тырныауз она колебалась от 15,3 ºС до 34,9 ºС, в Терсколе и на Гарабаши была схожей – от 7,9 ºС до 27,3 ºС, что связано с близким расположением станций, на Чегете составляла от 2,0 ºС до 19,4 ºС.

В июле наблюдалось повышение температуры, которая к середине месяца достигла высоких значений и начала уменьшаться. Почти сразу после очередного увеличения произошел первый сель 21 июля, температура продолжала колебаться и увеличиваться. После достижения максимума 29 июля наблюдался еще один, более сильный сход грязевых потоков 31 июля. В начале августа температура уменьшалась, 6 августа был зафиксирован прорыв озера Азау, а к середине августа резкие колебания температуры прекратились и стали почти незаметны. На графике атмосферной влажности также можно наблюдать резкие колебания из-за частых ливневых осадков, которые прекратились в середине августа. В некоторые дни заметны резкие скачки, достигающие 100% значений на более высоких станциях, означающие полное закрытие гор облаками. Ход рассмотренных параметров на всех станциях совпадает. На графиках точками обозначены моменты сходов селевых потоков (Рисунок 2).



Рисунок 9 – Ход атмосферного давления, температуры воздуха и атмосферной влажности в Эльбрусском районе за 09 UTC с 1 июля по 15 августа 2025 г.

Скорость ветра на станциях была не очень высокой, так как они окружены горами, влияющими на воздушные потоки. Наибольшие средние скорости ветра наблюдались в Тырныаузе (3-6 м/с), а наименьшие в Терсколе и на Гарабаши (до 3 м/с), на горе Чегет изменение скорости было наибольшим. Это связано с тем, что Тырныауз находится дальше от гор, чем Терскол и Гарабаши, которые являются естественными преградами для ветра; а на горе Чегет, из-за большей высоты и расположения, ветер не имеет какого-либо преобладающего направления. Это видно на графике направления ветра, где в Тырныаузе наблюдался ветер только северных направлений, в Терсколе и Гарабаши южных и западных, а на Чегете различных, в том числе и переменный (Рисунок 3).

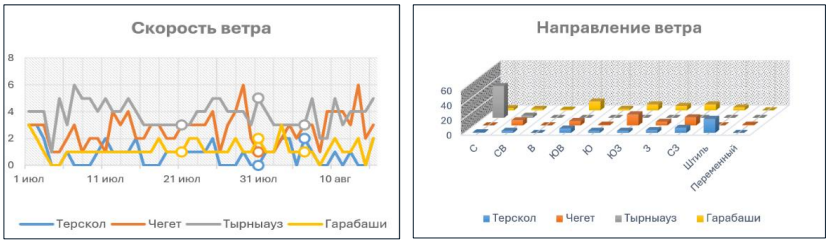


Рисунок 10 – Скорость и направление ветра в Эльбрусском районе за 09 UTC за период с 1 июля по 15 августа 2025 г.

Помимо изменений за лето 2025 года, была проведена оценка температуры воздуха в июле с 2018 по 2025 гг. (Рисунок 4). В каждый из годов наблюдались сели, но в 2025 году они были более интенсивными. На графике видно, что ранее температура была выше, чем в 2025, что позволяет предполагать отсутствие потепления климата, ведущее к таянию ледников. Однако периода в 7 лет недостаточно для точной оценки. В одном из исследований [5] подтверждается, что на территории соседней Карачаево-Черкесской Республики наблюдается небольшое потепление климата. За период с 1972 по 2016 гг. увеличение среднегодовой температуры воздуха составило 1,7 ºС, за последние десять лет ее повышение составило 0,3 °С, а также наблюдается увеличение количества жидких атмосферных осадков на 33,9 мм/год [5].

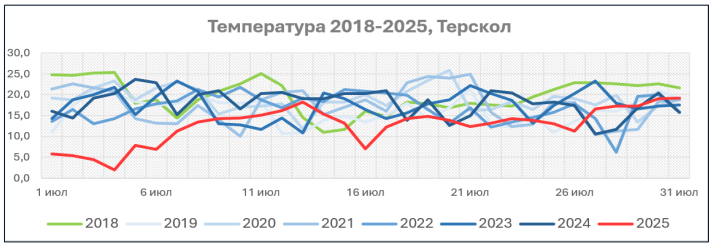


Рисунок 11 – Температура воздуха на станции Терскол за период 2018 – 2025 гг. в июле

Наблюдения за облачностью и явлениями погоды проводились на станциях в городе Терскол и на Чегете. В первой половине июля наблюдались кратковременные ливневые осадки, временами с грозой. 19 июля в 21 UTC начался продолжительный ливневой дождь и наблюдалась гроза. Дождь закончился 22 июля в 03 UTC, далее осадки были зафиксированы вечером 31 июля, 1-2 и 8 августа. Они также имели ливневой характер и сопровождались грозами. Данные наблюдения показывают прямую связь между выпадением осадков и сходом селей.

Подводя итог, в ходе исследования были рассмотрены тенденции изменений метеорологических параметров в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской Республиках и причины возникновения селевых потоков. Исследование подтвердило, что сели в Эльбрусском районе возникают под воздействием различных факторов, в том числе метеорологических. Была установлена связь повышения температуры и выпадения осадков с образованием благоприятных условий для селей. Основными причинами схода селевых потоков летом 2025 года стали интенсивные дожди, аномально высокие температуры воздуха, ускорившие таяние ледников, а также накопление рыхлого материала в бассейнах рек. Анализ многолетних данных показал, что на интенсивность влияет не только температура, но и гидрометеорологические условия и особенности рельефа. Для повышения безопасности в селеопасных зонах необходимо проводить регулярный мониторинг высокогорных озер, ледников и речных бассейнов.

Список литературы:

1. *Флейшман С.М.* Сели - Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 312 с.
2. *М. Н. Петрушина, Д. А. Пуляева, А. Ю. Скаков, А. Х. Боров, Е. Г. Муратова, Д. А. Пуляева, А. Н. Прокинова /2008/. М. Н. Петрушина, А. Ю. Скаков, А. Х. Боров, Е. Г. Муратова, Г.Г. Камкин, А. Н. Прокинова, В.В. Селевёрстов*/ 2017/. Актуализация: редакция БРЭ /2020/. КАБАРДИНО-БАЛКАРИЯ // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2020)
3. Сайт Яндекс карты [Электронный ресурс]: https://yandex.ru/maps
4. Сайт архива погоды RP5 [Электронный ресурс]: https://rp5.ru
5. *Онищенко В. В., Дега Н. С., Бостанова Ф. Х.* Современное состояние горного климата Карачаево-Черкесской республики // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА САМАРКАНДА НА ФОНЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Зотова В.К.[1,2], Лаврова И.В.[1,3]
[1] Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека, Ташкент
[2] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[3] Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, Санкт-Петербург
vika.zotova1982@mail.ru

Аннотация. Рассматривается динамика основных климатических показателей Самаркандского оазиса в условиях глобального потепления. На основе данных сети Узгидромета проанализированы многолетние тренды температуры воздуха и режима осадков до 2024 года включительно.
Ключевые слова. Изменение климата, Самарканд, глобальное потепление, метеорологические параметры, опасные явления, Узгидромет.

CLIMATE CHANGE IN SAMARKAND IN THE CONTEXT OF GLOBAL WARMING

Zotova V.K.[1,2], Lavrova I.V.[1,3]
[1] National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulughbek, Tashkent
[2] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
[3] State Scientific Research Navigation and Hydrographic Institute, St. Petersburg

Annotation. The dynamics of the main climatic indicators of the Samarkand oasis in the conditions of global warming are considered. Based on the Uzhydromet network data, long-term trends in air temperature and precipitation patterns up to 2024 inclusive are analyzed.
Keywords. Climate change, Samarkand, global warming, meteorological parameters, hazardous events, Uzhydromet.

Современные изменения климата признаны одной из наиболее острых проблем устойчивого развития. Для регионов Центральной Азии мониторинг температурного режима и режима увлажнения имеет стратегическое значение. Самаркандский оазис демонстрирует высокую чувствительность к глобальным климатическим трендам, что обусловливает необходимость детального анализа региональных особенностей потепления.

Материалы и методы. Информационной базой послужили архивы многолетних наблюдений сети Узгидромета. Основной акцент сделан на данных метеостанции Самарканд за период 1936–2024 гг., а также на сравнительном анализе станций области по 2025 год. Обработка проводилась методами математической статистики с расчетом линейных трендов. Все тренды в исследовании проверены на значимость по критерию Фишера на уровне значимости 0,05.

Многолетние наблюдения на станции Самарканд демонстрируют устойчивый рост среднегодовой температуры воздуха. Линейная регрессия показывает коэффициент наклона 0,0306, что соответствует увеличению температуры примерно на 0,3 °C за десятилетие (рисунок 1). Для распределения среднегодовой температуры воздуха тренд значимый.

Исследование максимальной годовой температуры воздуха за аналогичный период также подтверждает направленность изменений. Коэффициент наклона тренда составляет 0,0282, что указывает на рост экстремальных дневных температур на 0,28 °C за десятилетие (R^2 =0,259). Тренд значимый. Начиная с 1990-х годов, значения выше 40 °C стали регулярными, а в последние десятилетия участились случаи достижения отметок 41–42 °C. (рисунок 2).

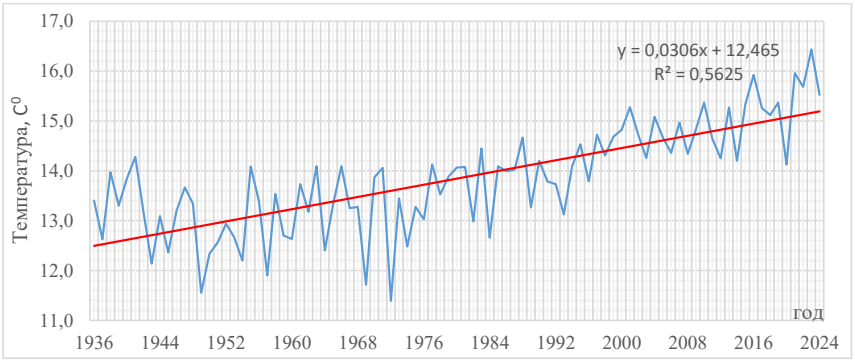


Рисунок 1 – Динамика среднегодовой температуры воздуха на станции Самарканд за период 1936–2024 гг.

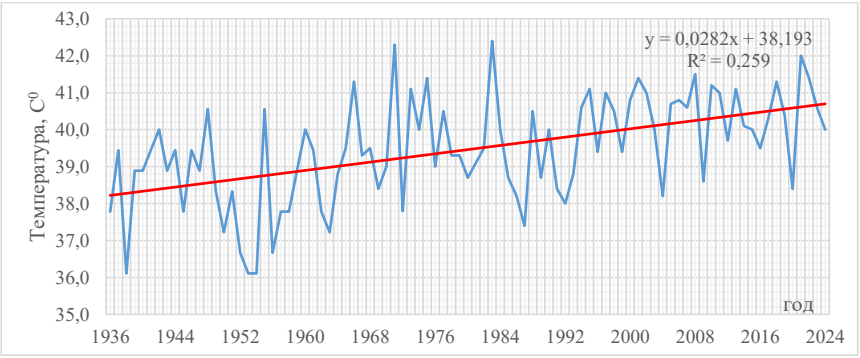


Рисунок 2 – Динамика максимальной температуры воздуха по Самарканду за период 1936–2024 гг.

Анализ временного ряда минимальных годовых температур свидетельствует о серьёзной трансформации климатической системы региона. Зимние минимумы растут опережающими темпами: коэффициент наклона тренда составил 0,0732, что соответствует увеличению примерно на 0,7 °C за десятилетие (рисунок 3).

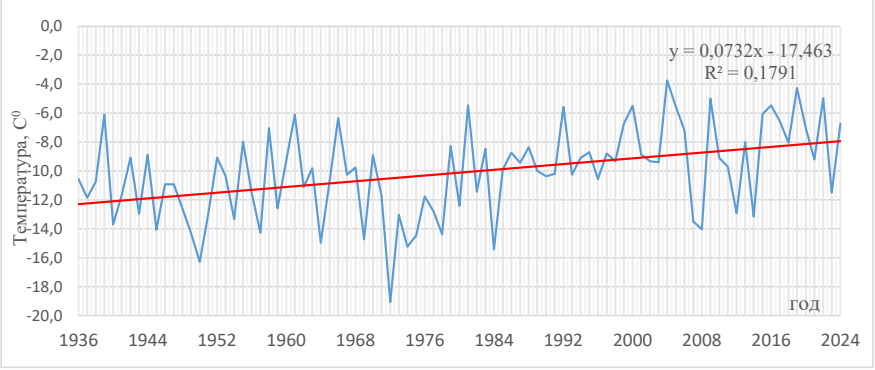


Рисунок 3 – Динамика минимальной температуры воздуха по Самарканду за период 1936–2024 гг.

Параллельно зафиксирован значимый рост минимальных температур в летний период, что подтверждает статистическую устойчивость выявленной тенденции (рисунок 4).

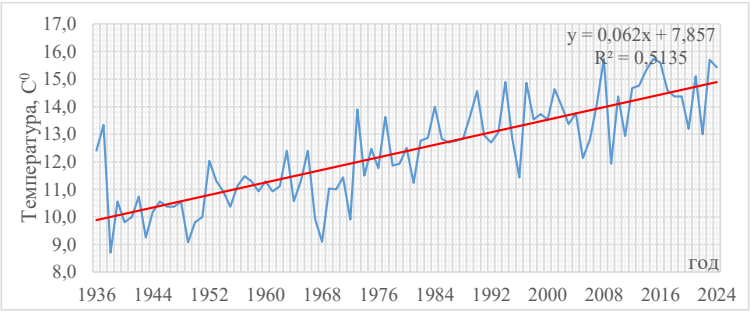


Рисунок 4 – Динамика минимальной температуры воздуха по Самарканду в летний период (1936–2024 гг.)

Данные изменения ведут к увеличению числа ночей, когда температура не опускается ниже комфортных пределов. Это усиливает тепловой стресс для экосистем и населения, снижает эффективность естественного ночного охлаждения и повышает нагрузку на сельское хозяйство и водные ресурсы. Таким образом, рост минимальных температур становится одним из ключевых индикаторов климатической трансформации Самаркандского региона.

При анализе среднегодовой суммы осадков по Самарканду (1936–2024 гг.) не выявлено статистически значимых многолетних изменений Межгодовая вариативность остается высокой: зафиксированы как годы с экстремальным дефицитом влаги (2001 г.), так и влажные периоды (1969 г.). Отсутствие роста осадков при повышении температуры усиливает дефицит влаги в почве (рисунок 5).

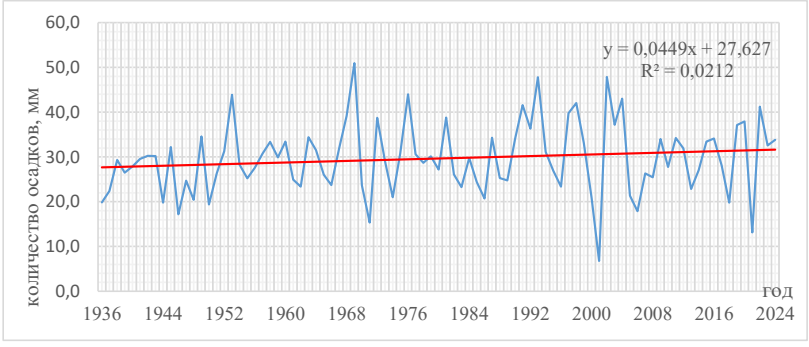


Рисунок 5 – Среднегодовая сумма осадков по Самарканду за период 1936-2024 гг.

В условиях глобальных климатических изменений регистрация новых максимумов и минимумов является индикатором ослабления климатической устойчивости региона. Особую озабоченность вызывает трансформация режима опасных гидрометеорологических явлений. Высокие летние температуры являются одной из главных черт климата Узбекистана. Возникновение таких условий определяется значительным притоком солнечной энергии при слабых затратах тепла на испарительные процессы. Согласно нормам и правилам, применяемым хозяйственными и проектными организациями республики Узбекистан, условия считаются

неблагоприятными, когда максимальная температура достигает 34 °C и выше. Такие значения создают повышенные риски для здоровья населения, сельского хозяйства и инфраструктуры. Температура 40 °C и выше уже индикатор опасных гидрометеорологических явлений. Для оценки рисков возникновения опасных гидрометеорологических явлений в регионе был проведен сравнительный анализ данных станций Самарканд, Дагбит, Нурабад и Кушрабад за период 2000–2025 гг. На графике среднегодового числа дней с максимальной температурой 34 °C и более отчетливо прослеживается общая тенденция к росту этого показателя (рисунок 6). Наиболее высокие значения стабильно фиксируются на метеостанции Нурабад, где в отдельные годы (например, 2021 г.) количество таких дней превышало 110. Важно отметить, что даже на станциях с более умеренным режимом, таких как Самарканд и Дагбит, наблюдается заметный подъем частоты жарких дней в последние пять лет периода.

Еще более выраженную динамику демонстрирует анализ температурных пиков 40 °C и более (рисунок 5).

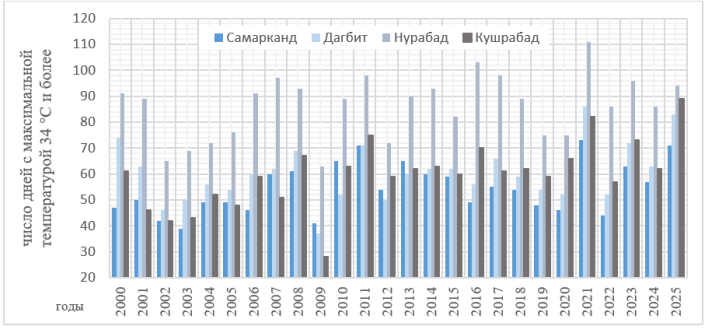


Рисунок 6 – Среднегодовое число дней с максимальной температурой 34 °C и более по Самаркандской области за период 2000-2025 гг.

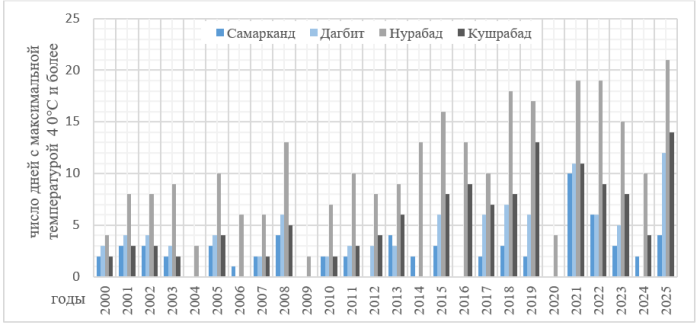


Рисунок 7 – Среднегодовое число дней с максимальной температурой 40°C и более по Самаркандской области за период 2000-2025 гг.

Если в начале столетия (2000–2010 гг.) такие значения носили эпизодический характер и часто не превышали 5 дней в году, то во втором десятилетии ситуация существенно изменилась. На всех рассматриваемых пунктах наблюдения зафиксирован резкий скачок повторяемости сильной жары. Особого внимания заслуживает 2025 год, ставший аномальным для всего региона. В Нурабаде число дней с температурой 40 °C и выше достигло максимума, превысив отметку в 20 дней, а на станциях Дагбит и Кушрабад также зафиксированы рекордные показатели. Рост продолжительности таких периодов напрямую указывает на усиление теплового стресса и трансформацию климата

в сторону большей экстремальности. Сопоставление данных по разным станциям подтверждает, что процессы потепления охватывают всю территорию оазиса, при этом предгорные и пустынные зоны реагируют на глобальные изменения наиболее остро.

Выполненное исследование климатических рядов Самаркандского оазиса позволяет сформулировать следующие основные положения:

Подтверждена тенденция регионального потепления со скоростью 0,3 °C за десятилетие. Рост среднегодовых значений сопровождается опережающим потеплением зимних минимумов (0,7 °C за десятилетие), что ведет к смягчению холодного периода и сокращению числа морозных дней.

Фиксируется изменение структуры экстремальных явлений в Самаркандской области. Рост повторяемости температур выше 34 °C и 40 °C свидетельствует об усилении тепловой нагрузки. Рекорды 2025 года указывают на увеличение волн жары, охватывающих все зоны региона от равнин до предгорий.

Режим увлажнения остается нестабильным при отсутствии значимого роста годовых осадков. Сочетание температурного скачка и стабильного уровня осадков создает условия для нарастающего водного дефицита. Рост испаряемости и трансформация характера осадков усиливают засушливость территории.

Полученные результаты обосновывают необходимость пересмотра норм водопотребления и сроков вегетации культур. Выявленные тренды должны лечь в основу адаптационных планов развития аграрного сектора и городского хозяйства региона в условиях меняющегося климата

Список литературы

1. Агентство по гидрометеорологической службе при Министерстве экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан (Узгидромет). Официальный сайт. URL: https://meteo.uz (дата обращения: 10.03.2026).
2. Доклад ВМО о состоянии глобального климата в 2023 году. Женева: ВМО, 2024. 52 с.
3. *Чуб В. Е.* Изменение климата и его влияние на природные ресурсы Республики Узбекистан. Ташкент: НИГМИ, 2007. 133 с.
4. Третье национальное сообщение Республики Узбекистан по Рамочной конвенции ООН об изменении климата. Ташкент: Узгидромет, 2016. 220 с.
5. *Смирнова Е. Н., Чанышева С. Г.* Опасные метеорологические явления в Узбекистане. Под редакцией О. Л. Бабушкина. Ташкент: НИГМИ, 2007. 158 с.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГРОЗОВОГО РЕЖИМА В БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Смирнова П.Д., Кашлева Л.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Представлен комплексный анализ грозового режима Белгородской области — региона с умеренно-континентальным климатом, расположенного в зоне активного взаимодействия воздушных масс различного происхождения. На основе обобщения данных многолетних метеорологических наблюдений и научных исследований по этой теме рассмотрены основные особенности грозовой активности: сезонная и внутригодовая динамика, среднее число дней с грозами, связь с циркуляционными процессами и синоптическими условиями. Особое внимание уделено положению гроз в системе опасных метеорологических явлений региона, их сопряжённости с ливневыми осадками, шквалистым ветром и градом, а также воздействию на социально-экономическую сферу — сельское хозяйство, энергетику и инфраструктуру. В работе показано, что грозовой режим Белгородской области характеризуется выраженным летним максимумом, значительной межгодовой и внутрисезонной изменчивостью,

а также тенденцией к увеличению частоты и интенсивности грозовых явлений на фоне современных климатических изменений. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования систем прогнозирования опасных явлений погоды, оценки климатических рисков и разработки адаптационных мероприятий в регионе.
Ключевые слова. Грозовой режим, грозовая активность, Белгородская область, умеренно-континентальный климат, число дней с грозой, опасные метеорологические явления, конвекция, ливневые осадки, шквалы, климатические изменения, сельскохозяйственные риски.

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THUNDERSTORM ACTIVITY IN THE BELGOROD REGION

Smirnova P.D., Kashleva L.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Abstract. A comprehensive analysis of the thunderstorm regime in the Belgorod Region is presented — a territory with a temperate continental climate located in a zone of active interaction of air masses of various origins. Based on a synthesis of long-term meteorological observation data and scientific research on the subject, the main features of thunderstorm activity are examined: seasonal and intra-annual dynamics, the average number of thunderstorm days, and the relationship with circulation processes and synoptic conditions. Special attention is given to the position of thunderstorms within the system of hazardous meteorological phenomena in the region, their association with heavy rainfall, squally winds, and hail, as well as their impact on the socio-economic sphere — agriculture, energy, and infrastructure. The study demonstrates that the thunderstorm regime in the Belgorod Region is characterised by a pronounced summer maximum, significant interannual and intraseasonal variability, and a tendency towards increasing frequency and intensity of thunderstorm events against the background of ongoing climatic changes. The obtained results can be used for improving forecasting systems for hazardous weather phenomena, assessing climate risks, and developing adaptation measures in the region.
Keywords. Thunderstorm regime, thunderstorm activity, Belgorod Region, temperate continental climate, number of thunderstorm days, hazardous meteorological phenomena, convection, heavy rainfall, squalls, climatic changes, agricultural risks.

Грозы представляют собой одно из наиболее распространённых и значимых атмосферных явлений, оказывающих существенное влияние на жизнедеятельность человека, состояние природных экосистем и функционирование экономических систем. Изучение грозового режима отдельных регионов приобретает особую актуальность в условиях наблюдаемого глобального потепления, которое сопровождается ростом частоты и интенсивности экстремальных погодных явлений. Как отмечается в исследованиях, наблюдения последних лет свидетельствуют о резком потеплении во все сезоны года, причём скорость глобального потепления в среднем по России за период с 1976 года по 2020 год демонстрирует устойчивую положительную динамику. Эти изменения не могут не отражаться на характеристиках грозовой деятельности, которая тесно связана с термическим режимом атмосферы и процессами конвекции [1-9].

Белгородская область, расположенная на юго-западе Центрально-Чернозёмного региона, представляет собой территорию со сложной динамикой атмосферных процессов. Её географическое положение — в центре Европейской территории России, на юго-восточных и южных склонах Среднерусской возвышенности — обусловливает активное взаимодействие воздушных масс различного происхождения: умеренных морских и континентальных, арктических и тропических. Это создаёт благоприятные условия для развития мощной кучево-дождевой облачности и грозовых процессов, особенно в тёплый период года.

Цель настоящей работы — провести комплексный анализ особенностей грозового режима Белгородской области на основе обобщения доступных метеорологических данных и научных исследований. В задачи исследования входит: характеристика климатических условий региона, определяющих грозовую активность; анализ сезонной и внутригодовой динамики гроз; оценка места гроз в системе опасных метеорологических явлений; рассмотрение сопутствующих грозам опасных процессов и их последствий.

Формирование климата Белгородской области происходит под совместным влиянием солнечной радиации, циркуляции воздушных масс и рельефа. Продолжительность солнечного сияния составляет почти 1900 часов в год, что связано со значительным приходом солнечной радиации.

Большую часть года в регионе господствуют воздушные массы умеренных широт. С западной части приходят морские влажные воздушные массы, с восточных районов — сухой континентальный воздух. Кроме того, в любое время года северные ветры приносят арктический воздух, сопровождающийся порывистыми ветрами и низкими температурами, тогда как южные ветры доставляют жаркий тропический воздух, способствующий образованию суховеев и высыханию верхних слоёв почвы.

Именно это сочетание разнородных воздушных масс создаёт условия для активного развития конвективных процессов. Встреча тёплого и влажного воздуха с холодными воздушными массами приводит к формированию мощных кучево-дождевых облаков — основных «генераторов» гроз. Как отмечается в климатических описаниях, на лето приходится самое большое количество выпавших осадков по сравнению с другими сезонами года (около 200 мм), причём они часто выпадают в виде ливневых дождей и сопровождаются грозами [1-9].

Грозовой режим Белгородской области характеризуется ярко выраженной сезонностью. Основной период грозовой активности приходится на тёплое время года — с мая по сентябрь, с максимумом в летние месяцы. Согласно имеющимся данным, за лето в среднем насчитывается 23–25 дней с грозами. Это значительный показатель, свидетельствующий о высокой степени конвективной активности атмосферы над территорией региона в летний сезон.

Развитие гроз связано с мощным развитием облаков конвекции, которое, в свою очередь, определяется интенсивным прогревом подстилающей поверхности и поступлением влаги. Наибольшее количество дней с грозами в году приходится на июнь, что объясняется максимальной интенсивностью солнечной радиации и активными процессами взаимодействия воздушных масс в этот период.

Внутри летнего сезона грозовая активность распределяется неравномерно. В июне, как правило, наблюдается пик грозовой деятельности, связанный с наиболее интенсивным прогревом и неустойчивостью атмосферы. В июле и августе количество гроз может несколько снижаться, однако и в эти месяцы грозы остаются частым явлением.

Важно отметить, что значительная часть гроз в Белгородской области сопровождается интенсивными осадками. В тёплый период к числу опасных явлений относятся сильные ливни, сопровождающиеся грозами, градом, а также нередкие ураганы со шквалистым усилением ветра. Это означает, что грозы в регионе редко представляют собой «сухие» явления — они практически всегда сопряжены с комплексом опасных погодных условий [1-9].

Грозовая активность в Белгородской области характеризуется значительной изменчивостью от года к году, что связано с вариациями крупномасштабной циркуляции атмосферы. Анализ данных за двадцатилетний период показывает, что частота и интенсивность опасных метеорологических явлений, включая грозы, имеют явную

тенденцию к росту, начиная с 2000 года. Это согласуется с общемировыми тенденциями увеличения экстремальности погоды в условиях глобального потепления.

Полученные среднеобластные значения индексов климатической уязвимости для Белгородской области составляют для зимнего периода 150 баллов, для летнего сезона — 330 баллов, что указывает на преобладание экстремальных метеорологических условий именно в тёплый сезон. Грозы, наряду с ливнями, шквалами и градом, вносят существенный вклад в этот высокий показатель летней уязвимости [9].

При грозах в регионе нередко отмечаются порывы ветра до 15–18 м/с, а в отдельных случаях — до 17 м/с. Такие скорости ветра уже представляют опасность для линий электропередач, зданий и сооружений. Как показывают данные мониторинга, последствиями опасных явлений в социальной сфере являются травматизм, увеличение сердечно-сосудистых и инфекционных заболеваний; в экономической сфере убытки несут сельскохозяйственное производство, система энергосбережения, жилищно-коммунальное и лесное хозяйства [5-6].

Особого внимания заслуживает сочетание гроз с градом. В двадцатилетний период на территории Белгородской области было зафиксировано 7 случаев града, нанёсших значительный ущерб. Хотя это число может показаться небольшим, каждый такой случай способен привести к полной гибели урожая на значительных площадях.

Белгородская область — регион с интенсивным сельскохозяйственным производством. Грозы наносят ущерб сельскому хозяйству по нескольким направлениям. Во-первых, ливневые осадки, сопровождающие грозы, могут приводить к переувлажнению почвы и полеганию посевов. Во-вторых, шквалистый ветер и град наносят прямые механические повреждения растениям. В-третьих, разряды молний могут становиться причиной пожаров, особенно в лесостепных массивах и на сельскохозяйственных угодьях в период уборки урожая [4-8].

Исследование глобального изменения климата, явно прогрессирующего с начала XXI века, является важнейшим направлением в метеорологии. Эти изменения представляют угрозу уже в ближайшем будущем, так как оказывают влияние не только на экологию Земли, но и на жизнедеятельность человека, экономическое развитие территорий, сельскохозяйственное и промышленное производство, продовольственную и энергетическую безопасность.

Для Белгородской области, как и для всего Центрально-Чернозёмного региона, характерно увеличение частоты экстремальных погодных явлений. С начала XXI века отмечается рост экстремальных летних температур, что создаёт предпосылки для усиления конвективных процессов и, соответственно, грозовой активности. Повышение температуры воздуха приводит к увеличению влагосодержания атмосферы, а это, в свою очередь, способствует формированию более мощных кучево-дождевых облаков и увеличению интенсивности грозовых осадков.

Зависимость множества факторов от происходящих климатических изменений, связанных с аномальными погодными явлениями, требует систематизации ретроспективных оценок их воздействия и разработки мер адаптации различных аспектов жизнедеятельности к будущему климату. Применительно к грозовому режиму это означает необходимость:

Таким образом, грозовой режим Белгородской области представляет собой сложную динамическую систему, тесно связанную с общими климатическими процессами и обладающую выраженной региональной спецификой. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на количественную оценку долговременных тенденций, разработку региональных прогностических моделей и формирование системы мер по снижению уязвимости социально-экономических сфер перед грозовыми явлениями.

Список литературы
1. Климат и погода в нашем крае. Климатические особенности Белгородчины [Электронный ресурс] // Инфоурок. — URL: https://infourok.ru (дата обращения: 14.07.2026).
2. Метеонова — Погода и климат Белгородской области и Белгорода [Электронный ресурс] // Метеонова. — URL: https://www.meteonova.ru (дата обращения: 14.07.2026).
3. Мониторинг опасных метеорологических явлений на территории Белгородской области: магистерская диссертация. — 2022. — 73 с.
4. Опасные агрометеорологические явления на территории Белгородской области / М.Г. Лебедева, О.В. Крымская, А.Б. Соловьев и др. — 2016.
5. Опасные метеорологические явления на территории Белгородской области за период с 1971 по 2020 год // Электронный архив СПбГУ. — URL: https://dspace.spbu.ru (дата обращения: 14.07.2026).
6. *Рыженкова И.В.* Повторяемость опасных и неблагоприятных метеорологических явлений на территории Белгородской области // Электронный архив СПбГУ. — URL: https://dspace.spbu.ru (дата обращения: 14.07.2026).
7. Климат Белгородской области // Копилка уроков. — 2020. — URL: https://kopilkaurokov.ru (дата обращения: 14.07.2026).
8. Изменения агроклиматических показателей в XXI веке на территории Белгородской области // КиберЛенинка. — URL: https://cyberleninka.ru (дата обращения: 14.07.2026).
9. Полученные среднеобластные значения индексов климатической уязвимости для Белгородской области // ИнтерКарто. — URL: https://intercarto.msu.ru (дата обращения: 14.07.2026).

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НЕМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ

Копылова С.Д., Кашлева Л.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
s.kopylo@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются случаи отсутствия модуляции на картах дифференциальной отражаемости метеорологических радиолокаторов при наблюдении зон скопления насекомых. Проверяется гипотеза о влиянии ветра на появление данных случаев.
Ключевые слова. Дифференциальная отражаемость, скорость ветра, насекомые.

ON THE CHARACTERISTICS OF RADAR OBSERVATIONS OF NON-METEOROLOGICAL TARGETS

Kopylova S.D., Kashleva L.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. Study of the characteristics of the absence of modulation on differential reflectivity maps of radar observations for cases where the source of reflectivity is non-meteorological targets. The effect of high wind speed on the absence of modulation.
Keywords. Differential reflectivity, wind speed, insects.

В процессе работы сети шторомооповещения РФ было обнаружено следующее явление: на картах радиолокационной отражаемости в нижнем слое (на высоте около 1 км) объекты не фиксируются, в то время как на картах радиальной скорости цели присутствуют. Стоит отметить, что подобная ситуация наблюдается исключительно в

тёплое время года - с мая по сентябрь и примерно с 9-00 до 19-00 по местному времени.

Было проведено исследование и доказано, что источником данных аномальных отражений являются насекомые. Как правило, в этом случае на картах дифференциальной отражаемости наблюдается модуляция параметра в зависимости от азимута антенны, связанная с одинаковой ориентацией целей. Однако одновременно с этим были выявлены случаи, когда при наличии аномальных отражений на картах радиальных скоростей, на картах дифференциальной отражаемости отсутствовала модуляция, что противоречит утверждению о насекомых, как о источниках отражаемости. В отличие от капель воды, чья дифференциальная отражаемость остается практически неизменной, при анализе отражающих сигналов от насекомых можно заметить выраженную модуляцию. Если наблюдать за объектом вдоль направления его движения, значения дифференциальной отражаемости оказываются низкими. Таким образом, значение параметра дифференциальной отражаемости варьируется от минимального к максимальному, формируя характерную модуляционную структуру. Целью моей работы является исследование факторов, влияющих на отсутствие модуляции на картах дифференциальной отражаемости [2].

Для исследования отсутствия модуляции на картах дифференциальной отражаемости, была выдвинута гипотеза о влиянии большой скорости ветра на отсутствие модуляции. Влияние этого фактора на отсутствие модуляции объясняется тем, что при большой скорости ветра увеличивается интенсивность модуляции, т.е. разброс скоростей, а соответственно происходит перемешивание насекомых, из-за чего и пропадает модуляция [1].

Было проанализировано 115 случаев за период с 20.06 по 08.09 2024 года, на которых присутствовала аномальная отражаемость на картах радиальных скоростей. Из которых в 27 случаях – модуляция не наблюдалась, а в 88 – наблюдалась. Для работы с этой информацией мной использовался сайт «Nowcast», где представлены продукты радиолокационного наблюдения, такие как: карты отражаемости, радиальных скоростей и дифференциальной отражаемости [4].

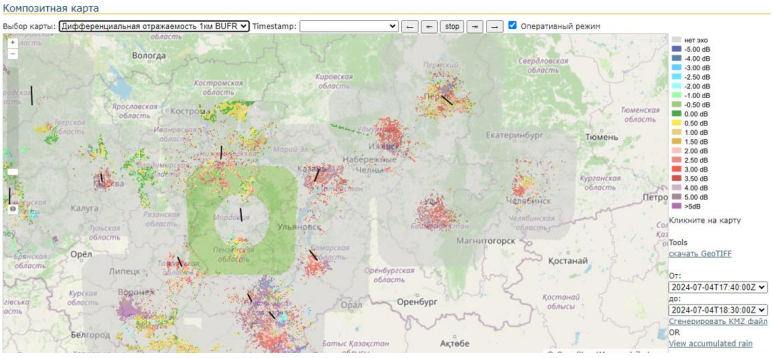


Рисунок 1 - Карта Дифференциальной отражаемости за 04.07.2024

Для примера рассмотрим случай за 04.07.2024, где наглядно можно просмотреть, что в Самаре четко прослеживается модуляция и её направление, а вот в Перми модуляции нет.

С помощью сайта американского Университета Вайоминга были взяты результаты радиозондирования атмосферы для каждого случая. На основе карт и аэрологических данных, были рассчитаны реальные скорости и направления ветра. По расчётам составлена гистограмма относительной зависимости наличия и отсутствия модуляции от скорости ветра [3].

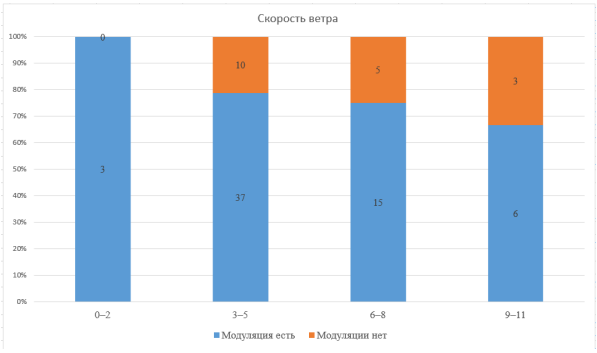


График 2 - Гистограмма относительной зависимости наличия и отсутствия модуляции от скорости ветра

Анализ показал, что с увеличением скорости увеличивается отношение количества случаев без модуляции к случаям с модуляции. Так при скорости 1-2 м/с присутствуют случаи исключительно с модуляцией, при скорости 3-5 м/с появляются случаи с отсутствием модуляции, но их отношение мало ~1/4, при скорости 6-8 м/с отношение увеличивается и равняется 1/3, а при 9-11 м/с и вовсе достигает 1/2. Таким образов прослеживается прямая зависимость величины скорости ветра к отсутствию модуляции, тем самым подтверждая выдвинутую гипотезу.

Список литературы

1. *Готюр И.А., Жуков В.Ю., Кулешов Ю.В., Чернышев С.В., Щукин Г.Г.* Допплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета №21 СПб, 2011, –с.66 - 75.
2. *Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Об особенностях радиолокационных измерений радиальной скорости гидрометеоров при двухмодальном спектре отраженного ими сигнала. Труды 28-го Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред», 2013, вып. 10, т.2, с. 337 – 344
3. Данные радиозондирования атмосферы [Электронный ресурс] http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml
4. Карты радиолокационного наблюдения [Электронный ресурс] https://www.nowcast.ru/RAD/demo.html

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ

Щербакова Ю.Е., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
oneskoula9@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассмотрено изменение метеорологических параметров, предшествующих образованию полярного мезоциклона и последующих моментов времени при его формировании, также был проведен анализ механизмов бароклинной и баротропной неустойчивости с условием Рэлея-Келера. Исследование полярных циклонов проводилось с использованием мезомасштабной численной моделью WRF-ARW.
Ключевые слова. Полярных циклон, мезомасштаб, Норвежское море, численная мезомасштабная модель WRF-ARW, бароклинная и баротропная неустойчивость.

MODELING OF POLAR MESOCYCLONES

Shcherbakova Y.E., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. In this study, changes in meteorological parameters preceding the formation of a polar mesocyclone and the strength of the moments during its approach were analyzed, along with the principle of baroclinic and barotropic instability under Rayleigh-Köhler conditions. The polar mesocyclone study was conducted using the WRF-ARW mesoscale numerical model.
Keywords. Polar mesocyclone, mesoscale, Norwegian Sea, WRF-ARW mesoscale numerical model, baroclinic and barotropic instability.

Полярные циклоны – это циклоны мезомасштаба с непродолжительным периодом существования, которые чаще всего возникают в зимнее время года между морской поверхностью и морским льдом. За счет того, что полярный циклон является мезомасштабным, пространственная протяженность до 1000 км, то основным источником наблюдения являются спутниковые зондирование [2]. Продолжительность жизни таких циклов невелика и составляет от трех до 36 часов. Довольно большую опасность представляют для прибрежных, морских и воздушных зон за того, что скорость ветра в циклоне может достигать 35 м/с, а также сопровождается интенсивными осадками. [2]

Облачная структура полярных циклонов зависит от разных условий: бароклинной и баротропной неустойчивости или конвекции. Также немало важный фактор играет синоптическая ситуация в момент формирования.

Прогноз исследуемых мезоциклонов довольно затруднителен ввиду его небольших размеров и кратковременного существования. Вдобавок одной из основных проблем является сеть метеорологических станций в Арктической зоне, которой довольно мало для более детального изучения данного процесса.

Одним из более распространенных методов анализа полярных циклонов является гидродинамическое моделирование, которое на основе данных наблюдений и математического описания физики атмосферных процессов может помочь в исследованиях и прогнозах метеорологических процессов.

Целью данного исследования является определить факторы, повлиявшие на формирование полярного мезоциклона, а также оценить вклад баротропной и бароклинной неустойчивости.

В исследование полярных циклонов использовалась численная мезомасштабная модель WRF-ARW, а также применялось спутниковое зондирование для определения облачной структуры.

Был проведено исследование мезоциклонов, сформировавшейся в марте с период с 2015 по 2025 года над акваторией Норвежского моря. Анализ дистанционного зондирования изучаемой области выявил, что все полярные циклоны существовали не больше суток, а у большинства прослеживалась вытянутая облачная структура. За счет дальнейшего анализа приземной синоптической карты было установлено, что на форму облачную структуры влияло расположение циклонов и антициклонов.

В представленной работе подробно рассмотрены два мезомасштабных циклона, существовавшие над морской подстилающей поверхностью на юго-востоке от острова Шпицберген 7-8 марта 2016 года.

Модельная область содержит 165 узлов по долготе и 100 узлов по широте, по вертикали достигает изобарической поверхности 50 гПа. Шаг по горизонтали 5 км, по времени 30 секунд. Заблаговременность прогноза составила 36 часов. Численные эксперименты проводились с негидростатической версией модели и стандартным набором параметризаций.

При работе комплексного исследования основных метеорологических параметров был проведен анализ полей ветра, температуры воздуха на стандартных изобарических поверхностях, завихренности и конвергенции.

В ходе анализа было выявлено, что интенсивность, размер и форма полярного мезоциклона не является случайным, а имеет зависимость от двух основных факторов:

1. Основную роль играет месторасположение барических образований синоптического масштаба.
2. Существенное влияние оказывается термическое воздействие теплого течения Гольфстрим, за счет которого возникает бароклинная неустойчивость, связанная, в том числе, и с взаимодействием между морской подстилающей поверхностью и воздухом.

Начальная стадия развития сопровождалась резким усилением горизонтального сдвига ветра, говорящим о наличии в атмосфере баротропной неустойчивости. В этот же момент наблюдается интенсивное нарастание положительный завихренности, что может говорить о начале циклогенеза и вихревого движения. Для оценки бароклинной неустойчивости были проанализированы стандартные изобарические поверхности в слое 1000 до 500 гПа, но более детально были разобран слой 850-500 гПа, как наиболее значимый для формирования полярных мезоциклонов, а также проведен анализ горизонтального сдвига ветра и условие Рэлея-Келера для выявления баротропной неустойчивости. Полученные результаты выявили, что основным фактором формирования являлась бароклинная неустойчивость, но и баротропная неустойчивость играла не мало важную роль.

В дальнейших работах будет составлена таблица характеристик полярных циклонов, анализ адвекции холодного воздуха с льда на подстилающую поверхность моря, температуры на уровне 500 гПа, вертикальных градиент с помощью числа Ричардсона и дивергенции в слое 500-300 гПа.

Список литературы

1. *Marta Moreno-Ibáñez, René Laprise & Philippe Gachon* Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography [Текст] / Marta Moreno-Ibáñez, René Laprise & Philippe Gachon Informa UK Limited, 3 марта 2021 — 32 с.
2. *Erik A. Rasmussen, John Turner* Polar Lows Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions [Текст] / Erik A. Rasmussen, John Turner, 2003 — 624 с.

О ПРОБЛЕМЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА БЛИЖНЕМ ВОСТОКЕ

Аль Меклафи Я., Лобанов В.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
yasseralmekhlafi@gmail.com

Аннотация. Рассматривается проблема изменения климата на Ближнем Востоке, который является одним из наиболее уязвимых к глобальному потеплению регионов. На основе данных современных климатических моделей показано, что темпы роста температуры на Ближнем Востоке значительно опережают глобальные средние значения, что ведёт к экстремальным климатическим условиям, угрожающим здоровью населения, экосистемам, водным и продовольственным ресурсам.
Ключевые слова. Ближний Восток, климатические изменения, температура воздуха.

ON THE ISSUE OF CLIMATE CHANGE IN THE MIDDLE EAST

Al-Mekhlafi Y., Lobanov V.A.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. This article reviews the issue of climate change in the Middle East, one of the regions most vulnerable to global warming. Current climate models show that temperature increases in the Middle East are significantly outpacing global averages, leading to extreme climate conditions that threaten human health, ecosystems, water, and food resources.
Keywords. Middle East, climate change, air temperature.

Регион Ближнего Востока уже сегодня демонстрирует выраженные последствия глобального изменения климата, проявляющиеся в стремительном росте температур, учащении волн жары и нарастающем дефиците водных ресурсов. Согласно современным климатическим моделям (CMIP5 и CMIP6), потепление в отдельных районах, таких как внутренние территории Аравийского полуострова, происходит в 3,5 раза быстрее, чем в среднем по миру, а к 2070-м годам ожидается превышение порога в 3–4 °C относительно доиндустриального уровня — на несколько десятилетий раньше, чем в других регионах планеты.

Потенциальное потепление до 9 °C к 2100 году в центральной части Аравийского полуострова представляет серьёзную угрозу для здоровья населения, водоснабжения, продовольственной безопасности и инфраструктурной устойчивости. Отсутствие влагоемкой растительности и испарительного охлаждения делает регион климатически сопоставимым с арктическими зонами по темпам и масштабам изменений.

Прогнозируемые климатические изменения могут привести к снижению пригодности ряда территорий для постоянного проживания, обострению социальных и экономических рисков, включая внутреннюю и трансграничную миграцию. В этих условиях адаптационные меры — от климатически устойчивой архитектуры до внедрения инновационных технологий микроклиматического регулирования — приобретают стратегическое значение. Одновременно с этим необходимы масштабные усилия по сокращению выбросов парниковых газов: согласно оценкам, глобальные амбициозные меры могут замедлить темпы регионального потепления на 38 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА «ОСТРОВ ТЕПЛА» НА ПРИМЕРЕ МОСКВЫ И МОЖАЙСКА

Бессуднова А.Г.[1, 2], Урсул Д.С.[3]
[1]ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева
[2]ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова»
[3]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
alex2003.01@mail.ru, dursul850@yandex.ru

Аннотация В работе рассматриваются основные причины формирования эффекта городского «острова тепла» (Urban Heat Island, UHI) и методы его исследования. Дана оценка динамики температурного контраста между городами Москва и Можайск, и проведен картографический анализ урбанизации и застройки за период 2001–2023 гг. Результаты показывают устойчивое проявление эффекта «острова тепла» и его усиление в последние десятилетия.
Ключевые слова. Городской остров тепла (UHI), урбанизация, городской климат, температурный контраст, дистанционное зондирование Земли, Москва, Можайск.

INVESTIGATION OF THE «URBAN HEAT ISLAND» EFFECT ON THE EXAMPLE OF MOSCOW AND MOZHAYSK

Bessudnova A.G. [1, 2], Ursul D.S. [3]
[1]Institute of Agrobiotechnology, Timiryazev Moscow Agricultural Academy;
[2]All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov
[3]Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. The article discusses the main reasons for the formation of the Urban Heat Island (UHI) effect and the methods of its research. An assessment of the dynamics of the temperature contrast between the cities of Moscow and Mozhaysk is given, and a cartographic analysis of urbanization and development for the period 2001-2023 is carried out. The results show a steady manifestation of the "heat island" effect and its intensification in recent decades.
Key words. Urban heat island (UHI), urbanization, urban climate, temperature contrast, remote sensing of the Earth, Moscow, Mozhaysk.

Современные процессы урбанизации существенно изменяют природную среду и климатические условия городов. Одним из наиболее заметных последствий урбанизации является формирование эффекта городского «острова тепла». Данный феномен представляет собой устойчивое повышение температуры воздуха в городской территории по сравнению с окружающими сельскими районами. Изучение данного явления имеет важное значение для климатического планирования городов, поскольку повышение температуры негативно влияет на качество городской среды, энергопотребление и здоровье населения.

Формирование эффекта связано с комплексом факторов, среди которых изменение радиационного баланса, высокая теплоёмкость строительных материалов, сокращение площади растительности, а также антропогенные источники тепла. Городские поверхности, такие как асфальт и бетон, обладают низким альбедо и способны поглощать значительное количество солнечной радиации, что приводит к накоплению тепла в течение дня и его постепенному высвобождению ночью. [1, 2]

Существенную роль играет и уменьшение площади зелёных насаждений. В природных ландшафтах растительность способствует охлаждению воздуха за счёт процессов испарения и транспирации. В городской среде этот механизм значительно ослаблен, что увеличивает долю чувствительного теплового потока. [3]

Интенсивность эффекта «остров тепла» зависит от размера города, плотности застройки, уровня антропогенной нагрузки и метеорологических условий. Разница температур между городом и сельской местностью может составлять от 1–2 °C до 7–10 °C в крупных мегаполисах.

Для исследования эффекта «остров тепла» применяются различные методы, включая наземные измерения температуры воздуха, дистанционное зондирование Земли и методы геоинформационного анализа. Базовым подходом является сравнение температурных характеристик городской и сельской территорий. [4] Интенсивность эффекта определяется как разность температур воздуха:

$$\Delta T = T_{urban} - T_{rural} \quad (1)$$

где:
T_{urban} – температура воздуха в городской зоне,
T_{rural} – температура в сельской (контрольной) зоне.

Если значение разности температур превышает 0,5 °C, считается, что эффект «остров тепла» выражен.

В рамках исследования был проведён статистический анализ среднемесячных температур воздуха за период с 2001 по 2023 год. В качестве объектов исследования выбраны города Москва и Можайск. Москва представляет собой крупный мегаполис с высокой плотностью застройки и значительным уровнем антропогенной нагрузки, тогда как Можайск является небольшим городом с меньшей степенью урбанизации. Дополнительно были использованы спутниковые данные о землепользовании и растительном покрове, полученные на основе снимков Landsat (рис. 1). Такие данные

позволяют оценить степень урбанизации территории, плотность застройки и распределение зелёных зон.

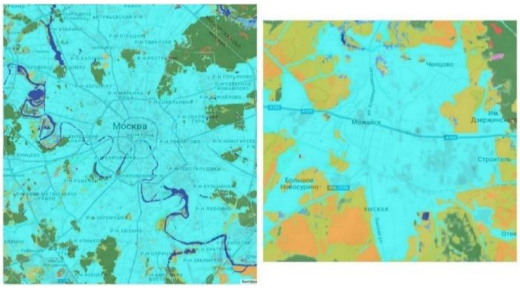


Рисунок 1 – Карты урбанизации и застройки городов Москва и Можайск

Картографический анализ показал значительные различия между исследуемыми городами. В Москве около 50 % территории занимают зоны плотной и высотной застройки, тогда как в Можайске их доля составляет примерно 15 %. Высотные здания способствуют усилению эффекта «остров тепла», поскольку они увеличивают площадь поглощения солнечной радиации и затрудняют циркуляцию воздуха.

Анализ температурных данных показал устойчивое проявление эффекта «остров тепла» в Москве по сравнению с Можайском. В среднем температура воздуха в Москве превышает температуру в Можайске примерно на 1,4 °С (рис. 2).

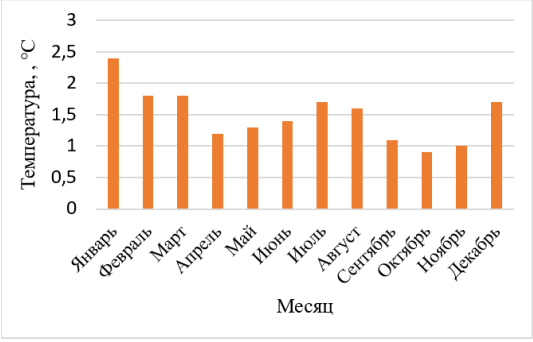


Рисунок 2 – Разница среднемесячных температур воздуха Москва-Можайск

Наиболее выраженный температурный контраст наблюдается в зимний и летний периоды. Максимальная разница температур была зафиксирована в январе и составляет около 2,4 °С. В летний период наибольшее значение наблюдается в июле и достигает примерно 1,7 °С. Минимальная разница температур отмечается в переходные сезоны – весной и осенью. Наименьшие значения наблюдаются в октябре.

Интересной особенностью является относительно высокая интенсивность эффекта «остров тепла» в зимний период. Это может быть связано с антициклональными условиями, слабой циркуляцией воздуха и накоплением тепла в городской среде. В условиях сильных морозов городские поверхности медленнее охлаждаются, что усиливает температурный контраст между городом и сельской местностью.

Анализ многолетней динамики показывает постепенное усиление эффекта «остров тепла» за рассматриваемый период (рис. 3). С 2001 по 2023 год наблюдается увеличение разницы температур между Москвой и Можайском. Такая тенденция может быть связана с дальнейшей урбанизацией столицы, ростом плотности застройки и увеличением численности населения.

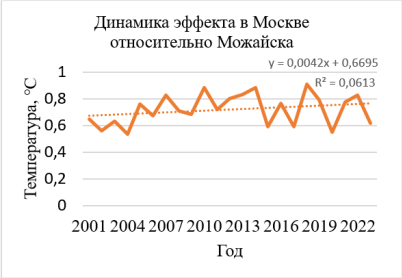


Рисунок 3 – Динамика температурного контраста Москва-Можайск с 2001 по 2023 гг.

По статистическим данным, население Москвы за этот период увеличилось примерно на 3 миллиона человек. Рост населения сопровождается расширением городской инфраструктуры, увеличением транспортной нагрузки и сокращением зелёных территорий, что способствует усилению локального потепления.

Полученные результаты подтверждают существование устойчивого эффекта городского «острова тепла» и демонстрируют его связь с уровнем урбанизации территории. Чем выше плотность застройки и антропогенная нагрузка, тем более выраженным становится температурный контраст между городом и окружающей местностью.

Сравнение Москвы и Можайска наглядно показывает влияние размеров города и характера землепользования на формирование локального климата. В небольших городах с более низкой плотностью застройки и большим количеством зелёных зон эффект «остров тепла» выражен значительно слабее.

Рост интенсивности эффекта в последние годы указывает на необходимость внедрения мер по снижению тепловой нагрузки в городах. К таким мерам относятся развитие зелёной инфраструктуры, создание парков и скверов, использование материалов с высоким альбедо, а также внедрение зелёных крыш и вертикального озеленения. Кроме того, важную роль играет интеграция климатических факторов в городское планирование. Учет особенностей теплового режима позволяет разрабатывать более устойчивые и комфортные городские пространства.

Полученные результаты подтверждают необходимость дальнейшего мониторинга городского климата и внедрения экологически ориентированных решений в градостроительную практику. Развитие зелёной инфраструктуры и устойчивое городское планирование могут существенно снизить негативные последствия эффекта «остров тепла» и повысить климатическую устойчивость городов.

Список литературы

1. *Локощенко, М. А.* Остров тепла Москвы и его климатические характеристики / М. А. Локощенко, Л. И. Алексеева, Е. А. Енукова, И. А. Корнева // Материалы I Белорусского географического конгресса: к 90-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 70-летию Белорусского географического общества, Минск, 8–13 апр. 2024 г. В 7 ч. Ч. 1. Современные проблемы гидрометеорологии / Белорус. гос. ун-т; редкол.: Е. Г. Кольмакова (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2024. – С. 279-284. – URL: https://elib.bsu.by/handle/123456789/313116 (дата обращения: 5.03.2026).
2. *Гиясова И. В.* Влияние урбанизации на микроклимат города // ИВД. 2021. №2 (74). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-urbanizatsii-na-mikroklimat-goroda (дата обращения: 5.03.2026).
3. *Gill, Susannah & Handley, J.F. & Ennos, Roland & Pauleit, Stephan*. (2007). Adapting

Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. Built Environment. 33. 115-133.
4. *Локощенко, М. А.* О современных изменениях “острова тепла” Москвы / М. А. Локощенко, Е. А. Енукова, Л. И. Алексеева // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 511, № 2. – С. 243-253.

ИЗЭНТРОПИЧЕСКИЙ МЕТОД КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Буравцова Е.В., Топтунова О.Н.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
lena060699@yandex.ru

Аннотация. Выполнено сравнение изэнтропического и изобарического методов на примере случайных событий, которое позволило утверждать об их совместном использовании в оперативном прогнозе.
Ключевые слова. Изэнтропический метод, изобарическая поверхность, потенциальный вихрь Эртеля, тропосфера, складка тропопаузы, конвекция, мощный антициклон, прогноз погоды.

THE ISENTROPIC METHOD AS A PROMISING DIRECTION FOR IMPROVING OPERATIONAL SYNOPTIC FORECASTS

Buravtsova E.V., Toptunova O.N.
Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

Annotation. A comparison of isentropic and isobaric methods was performed using the example of random events, which allowed us to assert their joint use in operational forecasting.
Keywords. Isentropic method, isobaric surface, potential Ertel vortex, troposphere, tropopause fold, convection, weather forecast.

Погодные условия вынуждают разрабатывать новые и совершенствовать существующие методы прогноза в метеорологии. При этом, методики прогнозирования синоптических явлений, использующие изобарические поверхности, считаются основными и широко распространены как в оперативном режиме, так и в научной деятельности. При этом существующие наработки в диагнозе и анализе процессов позволяют изучать синоптические процессы более детально. Так, изэнтропический метод анализа известен с 30-х годов прошлого века, но существенное распространение получил только сейчас. При этом часто синоптики мыслят с позиций традиционного изобарического подхода, упуская очевидные преимущества изэнтропического анализа.

В реальных условиях воздушная масса не привязана к уровню давления, она может свободно пересекать изобарическую поверхность. Это затрудняет отслеживание её трансформации — охлаждения, нагрева, подъема или опускания — в рамках одной карты. Ключевой параметр на картах фиксированного уровня, вертикальная скорость (ω), является в них не наблюдаемой, а часто расчётной, производной величиной, что может снижать точность анализа восходящих и нисходящих потоков. Ключевым преимуществом изэнтропического анализа является возможность прямого отслеживания движения воздушных масс. В то время как изобарические поверхности — это статичные геометрические уровни, изэнтропические поверхности (поверхности постоянной потенциальной температуры θ или эквивалентной потенциальной температуры θ_e) ведут себя как материальные поверхности. Базовый принцип изэнтропического анализа существенно отличается от классического подхода. Он заключается в исследовании атмосферных полей на поверхностях постоянной потенциальной температуры или энтропии. Из этого принципа проистекает главное преимущество. В отличие от анализа

«неподвижного слоя», изэнтропический анализ следит за движением и трансформацией самих воздушных частиц. Поскольку потенциальная температура консервативна при адиабатических процессах, этот метод естественным образом описывает трёхмерное движение в атмосфере. Он особенно эффективен для анализа процессов, сопровождающихся влажно-адиабатическим подъёмом (когда конденсация влаги высвобождает скрытое тепло, слегка изменяя θ, но сохраняя общую структуру движения).

В моделях атмосферы наиболее базовым показателем служит давление. Ключевой для изэнтропического анализа является карта давления на заданной поверхности постоянной потенциальной температуры.

Такая интерпретация поля давления как «топографическая карта» изэнтропической поверхности позволяет визуализировать области низкого давления, соответствующие её подъему (восходящие движения воздуха) и высокого — опусканию (нисходящие движения). Не менее важны распределения удельной влажности и векторов ветра на этой поверхности, которые показывают, куда и с каким содержанием влаги движется воздух. Давление на уровне конденсации показывает содержание влаги в атмосфере на изэнтропической поверхности и помогает отслеживать траектории отдельных участков. Давление на уровне конденсации — редко используемый, но простой гидродинамический параметр; чем выше давление конденсации, тем больше содержание влаги в воздухе. Точно так же, как обычное давление на изэнтропической поверхности приводит к образованию холодных и теплых языков, поле конденсации давления приводит к образованию влажных и сухих языков. Высокие значения давления конденсации означают наличие влажных языков, а низкие значения означают наличие сухих языков.

Для анализа динамики используется поле потенциального вихря — величина, сохраняющаяся в адиабатическом и баротропном потоке. Через него видно поле ветра, а производная вертикальной скорости и отклонение потенциальной температуры обозначают аномалию потенциального вихря Эртеля (EPV) (1).

$$P = \frac{\vec{\xi}_\alpha^{\,\nabla\theta}}{\rho} = \frac{1}{\rho}\left[\Omega_x \frac{\delta\theta}{\delta x} + \Omega_y \frac{\delta\theta}{\delta y} + (\xi + f)\frac{\delta\theta}{\delta z}\right] \quad (1)$$

где P – потенциальный вихрь Эртеля с размерностью: 106К*м2/(кг*с) = 1pvu, ξa – абсолютный вихрь, состоящий из планетарного f и относительного ξ вихря ($\xi a = \xi + f$), ρ – плотность воздуха, ∇θ – градиент потенциальной температуры.

Таким инструментом эффективно и удобнодетально диагностировать и прогнозировать условия благоприятные для развития глубокой влажной конвекции.

Мощность воздушного потока в зоне циклонического образования определяется изменением наклона изэнтропической поверхности. Оценить ее можно с помощью потенциала Монтгомери (M) (2):

$$M = (C_p T + gz)_\theta \quad (2)$$

где M — потенциал Монтгомери (единицы: м^2/с^2, т.е. Дж/кг), C_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении, T — температура (K).

Градиент потенциала Монтгомери на изэнтропической поверхности с постоянной потенциальной температурой эквивалентен силе градиента давления на поверхности постоянной высоты. На изэнтропической поверхности геострофический ветер параллелен контурам потенциала Монтгомери и по величине обратно пропорционален расстоянию между ними. В результате создается наглядная трёхмерная структура атмосферных движений на основе двумерной изэнтропической поверхности.

Если рассматривать атмосферные процессы двумя методами, то возникает разное видение, особенно в отношении глубины раскрытия причинно-следственных связей и целостности картины.

По картам абсолютной и относительной топографии изогипсы образуют «волны» и вытянутые высотные ложбины, прослеживается распространение аномалии вниз. На картах относительной топографии (толщины слоя) виден перенос тепла из стратосферы. Аномально высокие значения толщины (индикатор тёплого воздуха) начинают «просачиваться» в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу. Воздушная масса, участвующая в складке, движется по сложной трёхмерной траектории, пересекая множество изобарических поверхностей. Чтобы восстановить целостную картину, была необходимость интегрировать данные с множества уровней, отслеживая, как траектория аномалии температуры, геопотенциала и потенциального вихря смещается и деформируются по вертикали от одного среза к другому.

Изобарический анализ позволяет оценить масштабы аномалий, их смещение и силу. Однако для полного понимания механизма складки — траекторий движения воздушных масс и их адиабатической трансформации — он должен быть дополнен изэнтропическим анализом. Только совмещая «вид сверху» (изобары) с анализом на поверхностях постоянной потенциальной температуры, можно непосредственно увидеть, как стратосферный воздух «продавливается» в тропосферу вдоль изэнтропических поверхностей.

Изэнтропический анализ выявляет аномалии EPV визуализируют механизм стратосферного воздействия на тропосферу. Проникновение воздуха с высоким потенциальным вихрем в тропосферу создаёт зоны повышенной динамической нестабильности. Эти зоны формируют очаги интенсивной конвекции и оказывают воздействие на тропосферу. Динамика данного процесса характеризуется смещением возмущений из района острова Гренландия в направлении Кольского полуострова. Последующее отклонение траектории на юго-запад усиливает адвекцию теплых и влажных воздушных масс вглубь материка.

Однако детальная визуализация проникновения стратосферного воздуха через анализ завихренности и аномалий EPV представляет методическую сложность. Она требует корректного выбора уровня изэнтропических поверхностей, вдоль которых происходит этот перенос. Для исследования данного процесса в умеренных широтах удачным оказался диапазон потенциальной температуры от 310 К до 285 К, который эффективно захватывает ключевой слой стратосферно-тропосферного взаимодействия.

Циклоническая деятельность на высотных картах изэнтропического анализа очагу холода соответствует искривление изэнтропических поверхностей с прогибом вверх, и расстояние между ними будет увеличиваться. А удаленность изэнтропических поверхностей в свою очередь обратно пропорциональна градиенту потенциальной температуры, из этого следует, что статистическая устойчивость уменьшается. Потенциальная завихренность возрастает и аномалия завихренности положительная (рисунок 2).

Однако на этом возможности изэнтропического анализа не заканчиваются. Важную роль играет в формировании синоптических процессов антициклоническая деятельность (рисунок 3).

Появление барических образований, характеризующихся как мощный высотный антициклон с экстремальными значениями приземного давления, представляет собой случайное климатическое событие, отклоняющееся от стационарной нормы.

Наличие замкнутого центра с геопотенциалом, превышающим окружающие значения, на карте абсолютной топографии 300 гПа подтверждает наличие

антициклонического вихря в средней тропосфере. Эта антициклоническая система имеет большую вертикальную мощность, то есть четко прослеживается в виде мощного гребня на более высоких уровнях — 300 и 200 гПа. Сам антициклон характеризуется обширным размером, где зона аномалии охватывает диаметр порядка 1500-2000 км. Аномально высокая толщина атмосферного слоя (ОТ500/1000) указывает на его теплую природу.

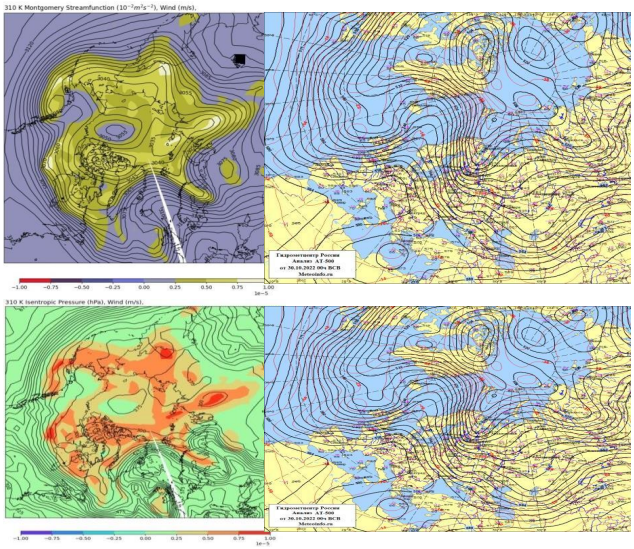


Рисунок 2 – Отношение между M и EPV на поверхности 310 K и изогипсами на поверхности 500 гПа, 30.10.2022 г.

На изэнтропической поверхности в центральной части антициклона изобары поверхность 1,5 EPV (приблизительный уровень динамической тропопазы) прогнуты вверх, что свидетельствует о наличии мощного теплого столба воздуха, занимающего всю толщу тропосферы. На периферии антициклона наблюдается резкое сгущение изобар, маркирующее интенсивную высотную фронтальную зону, где теплый воздух контактирует с более холодным. Вследствие того, что в системе антициклона преобладают крупномасштабные нисходящие движения и дивергенция воздушных потоков в его центральной части, поступление энергии ослаблено, а вертикальный обмен ограничен. Слабый приток энергии указывает на низкую активность и отрицательную завихренность, что в результате приводит к увеличению устойчивости в области, занятой антициклоном.

Изобарические карты, хотя и привычнее для обозначения барических систем, оказываются принципиально неудобны для анализа явлений, связанных со складчатостью тропопаузы и изменением её вертикальной мощности. Эти процессы, являющиеся ключевыми для развития опасной конвекции, плохо отображаются в изобарической системе координат.

В отличие от них, изэнтропический анализ позволяет напрямую диагностировать динамические предвестники конвективных событий. Аномалии EPV и его адвекция служат универсальным индикатором возмущений, которые запускают конвекцию. Анализ тенденции EPV дополнительно локализует зоны наиболее интенсивного динамического воздействия [1].

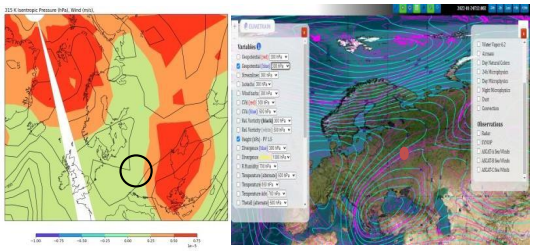


Рисунок 3 – Отношение между EPV на поверхности 310 К и изогипсами на поверхности 300 гПа, 24.01.2022 г

Эти особенности определяют лучшие области применения изэнтропического анализа как специализированного исследовательского и прогностического инструмента:

- Исследование стратосферно-тропосферного обмена, где EPV служит ключевым показателем для идентификации стратосферного воздуха, проникающего в тропосферу, и наоборот.
- Углублённый анализ развития циклонов, особенно быстро развивающихся.
- Прогноз явлений, тесно связанных с сильной конвекцией и интенсивной адвекцией влаги.
- Визуализация мощного антициклона как устойчивого вихря с нисходящими движениями и четкими границами воздушных масс.

На текущий момент, в условиях высокой доступности данных и мощных вычислительных машин, изэнтропический анализ раскрыл свой полный потенциал и перестал быть лишь «альтернативным» методом. Он стал естественным и критически важным дополнением к традиционному изобарическому подходу. Его особая ценность заключается в возможности отслеживать движение и трансформацию конкретных воздушных масс, что незаменимо для понимания и прогноза сложной синоптической обстановки.

Таким образом, изэнтропический и изобарический анализы не являются взаимозаменяемыми методами. Они взаимодополняют друг друга в рамках комплексного синоптического анализа:

- Изобарический анализ задает общую синоптическую рамку и является основой для работы стандартных прогностических моделей.
- Изэнтропический анализ выступает как углубляющий физический инструмент, раскрывающий механизмы процессов, которые часто остаются неочевидными на изобарических картах, особенно в условиях сложной барической топографии и при развитии опасных явлений.

Следовательно, оперативное внедрение изэнтропического анализа в практику прогностических подразделений, в дополнение к стандартному изобарическому, позволит существенно повысить физическую обоснованность анализа синоптической обстановки, уточнить прогнозы мезомасштабных и опасных явлений и, как итог, увеличить общую оправдываемость прогнозов погоды.

Список литературы

1. *Юсупов, Ю.И.* Прогноз шквалов и интенсивных осадков с применением термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля: диссертация ... кандидата физико-математических наук: 25.00.29 / Юсупов Юрий Исаакович; [Место защиты: ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»]. – Москва, 2021. – 129 с.: ил.

2. *Гущина Д.Ю.* Синоптическая метеорология. Анализ метеорологических полей: учебное пособие / Д. Ю. Гущина; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. - Москва: Географический фак. МГУ, 2014. - 119 с.: ил., табл.; 21 см.
3. *Иванова А.Р.* Динамика внетропической тропопаузы Северного полушария: Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук: 25.00.30 – Москва, 2011 – 38 с.
4. *Лыкосов В.Н.* Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы: учеб. пособие / В.Н. Лыкосов и др. Предис: В.А. Садовничий. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 408 с., илл. – (Серия «Компьютерное образование»).
5. *Arakawa A., Mechoso C.R., Konor C.S* An Isentropic Vertical Coordinate Model: Design and Application to Atmospheric Frontogenesis Studies // Meteorology and Atmospheric 50, 31-45, 1992.
6. *Holopainen E.O., Rontu L.* On shear lines in the upper troposphere over Europe, Department of Meteorology, University of Helsinki, Hallituskatu 11-13, SF-00100 Helsinki 10, Finland, 1980.
7. *Hoskins B. J., McIntyre M. E. Robertson A. W.* On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Q.J.R. Meteorol. Soc., – 1985, N 111: – P. 877 – 946.
8. *Truett, Scott C.* Isentropic analysis /, Central Region Technical attachment; 87-4, URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/33757/noaa_33757_DS1.pdf.
9. *Market, P.S., J.T. Moore, and S.M.* Rochette On calculating vertical motions in isentropic space. Natl. Wea. Dig., 24, 2000, 31-37.
10. *Anderson J.L.* The use and interpretation of isentropic analyses, NOAA technical memorandum NWS WR; 188, URL: https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/14453/noaa_14453_DS1.pdf.
11. *Uccelini L. W.* Isentropic analysis for meteorological applications. // Proc. 1st Conf. on Isentropic Analysis and Forecasting – Lancaster, 1995.
12. *Uccellini L.* Operational Diagnostic Applications of Isentropic Analysis // National Weather Digest, 1976, vol. 1, no. 1.
13. *Zyulyaeva Yu.A., Zhadin E.A.* Analysis of Three-dimensional Eliassen-Palm Fluxes in the Lower Stratosphere // Russian Meteorology and Hydrology, 2009, vol. 34, no. 8, pp. 483–490.
14. EUMeTrain: официальный сайт. – Вена – URL: http://resources.eumetrain.org/ePort_MapViewer/index.html (дата обращения: 12.06.2024).
15. Ventusky: официальный сайт. – Kotíkovska, Пльзень – URL: https://www.ventusky.com/?p=54;19;2&l=pressure (дата обращения: 12.06.2024).
16. NWC SAF: официальный сайт – URL: https://www.nwcsaf.org/web/guest/nec/geo-geostationary-archive (дата обращения: 12.06.2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛАКОВ НА СКОРОСТЬ ФОТОЛИЗА

Комбарова А.А., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Olga.aniskina@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено изучению влияния параметров облачности, в первую очередь водности и фазового состояния облаков, на скорость фотолиза озона в атмосфере. Проведены численные эксперименты для различных значений водности (0,25–40 г/м³ для жидкой фазы, 0,02–2,5 г/м³ для ледяной) при различных зенитных углах и на разных широтах. Установлено, что увеличение водности приводит к ослаблению фотолиза под облаком и усилению над ним, при этом эффект максимален для облаков, связанных с глубокой конвекцией и заметно снижается при больших зенитных углах. Выявлены различия в радиационном воздействии жидких и ледяных облаков. Показано, что корректный учёт водности и фазы

облаков существенно изменяет вертикальные профили скорости фотолиза, особенно в тропосфере и нижней стратосфере.

Ключевые слова. Фотолиз озона, облачность, водность облаков, ледность, зенитный угол Солнца, модель Cloud-J, численное моделирование, актинический поток, стратосфера, тропосфера, скорость фотодиссоциации.

INVESTIGATION OF CLOUD EFFECTS ON THE PHOTOLYSIS RATE

Kombarova A.A., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This final qualification work is devoted to the study of the influence of cloud parameters, primarily water content and phase state, on the rate of ozone photolysis in the atmosphere. The Cloud-J model was used, which allows detailed accounting for scattering, absorption and reflection of solar radiation by cloud layers with specified water content and ice content. Numerical experiments were carried out for various water content values (0.25–40 g/m³ for liquid phase, 0.02–2.5 g/m³ for ice phase) It was found that an increase in water content leads to a weakening of photolysis below the cloud and enhancement above it, with the effect being maximal for deep convective clouds and noticeably decreasing at large zenith angles. Differences in the radiative impact of liquid and ice clouds were revealed: the latter do not produce a local maximum of the rate above the upper boundary, characteristic of liquid clouds. It is shown that correct accounting of water content and cloud phase significantly changes the vertical profiles of the photolysis rate, especially in the troposphere and lower stratosphere.
Keywords. Ozone photolysis, cloudiness, cloud water content, ice content, solar zenith angle, Cloud-J model, numerical modeling, actinic flux, stratosphere, troposphere, photodissociation rate.

Водность облаков является критическим, но недостаточно изученным параметром, модулирующим актиничный поток и скорость фотолиза озона.

Исследование выполнено с использованием модели Cloud-J, позволяющей задавать водность (LWC, IWC) в широком диапазоне (0,25–40 г/м³ для жидкой фазы, 0,02–2,5 г/м³ для ледяной) и анализировать вертикальные профили скорости фотолиза.

Установлена обратная зависимость: чем выше водность облака, тем сильнее ослабляется скорость фотолиза под облачным слоем и тем значительнее её усиление над облаком (за счёт многократного рассеяния).

В слое жидкого облака толщиной ~4 км при водности от 0,5 до 40 г/м³ наблюдается плавное уменьшение скорости фотолиза внутри слоя и резкое снижение под ним; при малых зенитных углах (10°) разность скоростей между безоблачным и облачным сценарием достигает заметных величин, прямо пропорциональных водности. Максимальные средние скорости фотолиза соответствуют минимальной водности, и наоборот.

Для облаков верхнего яруса (10–11 км) добавление ледяной фазы приводит к усилению фотолиза внутри облачного слоя в отличие от чисто жидких облаков, где внутри слоя преобладает ослабление.

Над верхней границей ледяных облаков не фиксируется характерного для жидких облаков локального максимума скорости фотолиза, что указывает на различие в радиационных свойствах фаз (индикатрисы рассеяния, альбедо однократного рассеяния).

Для больших зенитных углов (96°) влияние как жидкой, так и ледяной водности практически нивелируется, и профили скоростей для всех значений водности сливаются в единую кривую — это свидетельствует о доминирующей роли геометрии освещения над микрофизикой облака в условиях низкого Солнца.

Наиболее сильные изменения вертикального профиля скорости фотолиза наблюдаются для облаков глубокой конвекции (вертикальная протяжённость 2–10 км, водность 0,5 г/м³ в жидкой части и 0,02 г/м³ в ледяной). Внутри такого облака скорость

фотолиза может возрастать до 30 % относительно безоблачного случая, а под облаком — падать на 20–25 %.

Для слоисто-кучевых (водность 0,5 г/м³, высота 0,5–1 км) и перистых облаков (водность 0,03 г/м³, высота 11–12 км) эффект локализован вблизи слоя и не превышает нескольких процентов в среднем по столбу.

Максимальные различия в скорости фотолиза между безоблачной атмосферой и облачным сценарием достигают значений порядка $7–8\times10^{-4}$ $с^{-1}$ внутри конвективного облака (для июня, широта 20°).

При одинаковых зенитных углах увеличение водности с 0,25 до 2,5 г/м³ даёт прирост ослабления под облаком примерно в 1,5–2 раза, что подтверждает значимость точного задания водности в моделях.

Водность облаков (как жидкая, так и ледяная) является важным параметром, определяющим не только абсолютную величину, но и вертикальное распределение скорости фотолиза озона. Её влияние максимально при малых зенитных углах Солнца и для оптически толстых облаков с высокой водностью; при больших углах (сумерки, полярные широты) влияние водности становится второстепенным по сравнению с потоком излучения.

АТМОСФЕРНЫЕ РЕКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ ПО ПОГОДУ

Шишкин А.Д., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Olga.aniskina@mail.ru

Аннотация. В докладе рассматривается феномен атмосферных рек. Рассмотрены механизмы их формирования, влияние на режим осадков и роль в экстремальных погодных явлениях — наводнениях, оползнях и засухах. Отдельное внимание уделено температурным аномалиям, сопровождающим атмосферные реки, а также наблюдаемому смещению этих потоков к полюсам на фоне изменения климата.
Ключевые слова. Атмосферные реки, водяной пар, осадки, наводнения, засухи, экстремальная погода, изменение климата, перенос влаги, температурные аномалии, циркуляция атмосферы.

ATMOSPHERIC RIVERS AND THEIR INFLUENCE ON WEATHER

Shishkin A.D., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. The report examines the phenomenon of atmospheric rivers – narrow, elongated corridors of concentrated water vapor in the troposphere that play a key role in the global transport of moisture and heat. It describes their formation mechanisms, impact on precipitation patterns (providing 30–90% of annual totals in various regions), and their contribution to extreme weather events such as floods, landslides, and droughts. Special attention is given to temperature anomalies associated with atmospheric rivers, as well as the observed poleward shift of these currents under climate change.
Keywords. Atmospheric rivers, water vapor, precipitation, floods, droughts, extreme weather, climate change, moisture transport, temperature anomalies, atmospheric circulation.

Атмосферные реки (АР) — это естественно возникающие узкие длинные пространственные полосы, воздушные массы которых характеризуются повышенными значениями содержания водяного пара. Протяженность АР может достигать тысяч километров. Эти структуры формируются над океанами, когда нагретая солнцем морская вода испаряется и за счёт циркуляции переносится к полюсам. Явление наблюдается на высотре не более 3000 метров. В любой момент времени в каждом полушарии существует от трёх до пяти таких потоков [1].

Атмосферные реки они переносят больше водяного пара, чем все реки на планете вместе взятые. Объём воды в крупных воздушных потоках в 7–15 раз превышает количество воды в Миссисипи — крупнейшей реке Северной Америки. При этом АР покрывают менее 10% любой заданной внетропической линии широты, но на них приходится более 90% глобального меридионального переноса водяного пара.

Атмосферные реки образуются вдоль границ между большими областями расходящегося приземного воздушного потока, часто в связи с внетропическими циклонами. Достигая побережья и поднимаясь вверх при приближении к горам, водяной пар конденсируется в облака и выпадает в виде дождя или снега [2-3].

Атмосферные реки играют центральную роль в глобальном круговороте воды и являются ключевым источником пресной воды для многих регионов мира:

На западном побережье США они обеспечивают 30–50% годового уровня осадков, а в Калифорнии — около половины годового объёма осадков.

В средних широтах АР обеспечивают 70–90% межгодовой изменчивости осадков.

Наряду с благотворным влиянием, атмосферные реки являются основной причиной экстремальных погодных явлений. Выход АР на сушу вызывает ливневые осадки, штормовые ветры, наводнения, оползни и сели. Исследования показывают, что АР являются причиной большей части сильных осадков и катастрофических наводнений в прибрежных районах средних широт.

Атмосферные реки не только переносят влагу, но и существенно влияют на температурный режим. Приход АР ассоциирован со значительными температурными аномалиями в зимний период.

Глобальное потепление оказывает значительное влияние на АР – с повышением температуры воздуха в атмосфере накапливается больше влаги, что приводит к более частым и обильным осадкам. В прибрежных регионах Восточной Азии на это явление приходится более 80% сильных дождей.

Ключевая тенденция последних десятилетий — смещение атмосферных рек к полюсам в обоих полушариях. Это приводит к тому, что [1-5]:

Субтропические регионы сталкиваются с сокращением запасов воды и засухами.

В более высоких широтах (северо-запад Тихого океана, Европа, Арктика) выпадают более обильные осадки и чаще происходят наводнения.

Районы, получавшие регулярные зимние дожди, теперь сталкиваются с засухами, а в высокие широты приходят ранее нехарактерные шторма.

Согласно климатическим прогнозам, к концу XXI века ожидается глобальное удвоение или более числа экстремальных атмосферных рек, а число случаев их обрушения на сушу может утроиться [1-5].

Заключение

Атмосферные реки представляют собой один из важнейших механизмов глобального переноса влаги и тепла, играя двойственную роль в климатической системе. С одной стороны, они являются жизненно важным источником пресной воды для многих регионов, с другой — основной причиной экстремальных наводнений и штормов. В условиях продолжающегося изменения климата их влияние на погоду будет только усиливаться, что требует совершенствования методов прогнозирования и адаптации к новым климатическим реалиям

Список литературы

1. *Payne A. E., Demory M.-E., Leung L. R., Ramos A. M., Shields C. A., Rutz J. J., Siler N., Villarini G., Hall A., Ralph F. M.* Responses and impacts of atmospheric rivers to climate change // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. Vol. 1, No. 3. P. 143–157. DOI: 10.1038/s43017-020-0030-5.

2. *Gimeno L., Nieto R., Vázquez M., Lavers D. A.* Atmospheric rivers: a mini-review // Frontiers in Earth Science. 2014. Vol. 2, Article 2. DOI: 10.3389/feart.2014.00002.
3. *Hu S., Hu S.* Detected impacts of atmospheric rivers on marine heatwaves // Nature Communications. 2026. DOI: 10.1038/s41467-026-74249-9.
4. Atlantic meridional overturning circulation slowdown modulates atmospheric rivers in a warmer climate // Nature Communications. 2026. Vol. 17, Article number: 5971. DOI: 10.1038/s41467-026-72555-w.
5. *Vallejo-Bernal S. M., et al.* PIKART: A Comprehensive Global Catalog of Atmospheric Rivers // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2025. Vol. 130, No. 15. P. e2024JD041869. DOI: 10.1029/2024JD041869.
6. *Кузьмин И. А., Ермаков Д. М.* Распределение и свойства атмосферных рек над территорией Евразии по последним данным каталога PICART // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2025. С. 172. DOI: 10.21046/23DZZconf-2025a.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ НАД АКВАТОРИЕЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Шаповалов А.Г.[1], Курова В.Д.[1], Лаврова И.В.[1,2], Иванова И.А.[1]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, Санкт-Петербург
pardoos1@yandex.ru, verakurova4@gmail.com, livspb@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования тропических циклонов над акваторией Японского моря. Использованы данные о тропических циклонах с японского сайта JAXA/EORC и массив IBTrACS. В результате сформирована база по 50 тропическим циклонам с 1998 по 2024 гг. Проанализированы распределение количества циклонов по месяцам и годам, районы их формирования, а также основные характеристики циклонов и их траектории в районе Японского моря.
Ключевые слова. Тропические циклоны, Японское море, ветер.

MONITORING OF TROPICAL CYCLONES IN THE SEA OF JAPAN

Shapovalov A.G.[1], Kurova V.D.[1], Lavrova I.V.[1,2], Ivanova I.A.[1]
[1]Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg
[2]AO "State Scientific Research Navigation and Hydrographic Institute", Saint Petersburg

Abstract. The article presents the results of a study of tropical cyclones over the Sea of Japan. Data on tropical cyclones from the Japanese JAXA/EORC website and the IBTrACS array were used. As a result, a database of 50 tropical cyclones has been formed from 1998 to 2024. The distribution of the number of cyclones by months and years, the areas of their formation, as well as the main characteristics of cyclones and their trajectories in the area of the Sea of Japan are analyzed.
Keywords. Tropical cyclones, Sea of Japan, wind.

Тропические циклоны (ТЦ) представляют собой серьезную опасность для судоходства, поскольку часто в зоне их влияния возникают опасные явления по ветру и волнению. Чтобы избежать встречи с ТЦ суда изменяют курс, скорость или укрываются от шторма на безопасном рейде. Как показывает практика, несмотря на современные методы прогноза, и принимаемые меры предосторожности, не всегда удается уклониться от циклона на безопасное расстояние. Это чаще случается, когда судно находится в области зарождения ТЦ или лишено возможности свободно маневрировать. В таком случае, если встреча неизбежна, существуют общие рекомендации для экипажа при встрече с ТЦ - обходить его нужно так, чтобы ветер был справа, правым галсом, по возможности отдаляясь от центра [1-3], поскольку известно, что зона максимальных

скоростей ветра находится справа от его центра по направлению движения. Но под влиянием препятствий - побережья материков, островов, такое правило не всегда выполняется, и поле ветра внутри ТЦ может иметь более сложное распределение. Поэтому для исследования выбран район Японского моря. Тема особенно актуальна, учитывая интенсивное судоходство в этой акватории и ее принадлежность к территориальным водам Российской Федерации.

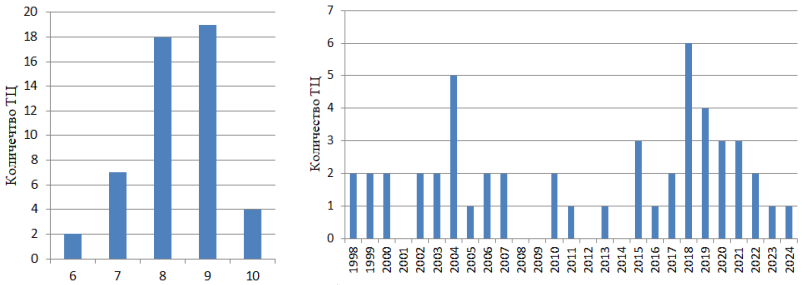
В работе использованы данные по траекториям ТЦ с японского сайта JAXA/EORC [4], и их характеристики из массива IBTrACS [5]. IBTrACS представляет собой наиболее полный глобальный массив ТЦ, который объединяет современные и исторические данные о них от 14 организаций. Из массива в работе использованы данные Национального центра ураганов (National Hurricane Center), поскольку они содержат наиболее полную информацию. В результате сформирована база по 50 циклонам, с 1998 по 2024 гг. В базу вошли только те циклоны, которые проходили через Японское море своим центром.

Для начала выполнен анализ в целом всех ТЦ, которые оказывались над акваторией Японского моря за рассматриваемый период наблюдений.

ТЦ появляются над акваторией Японского моря с июня по октябрь (рисунок 1.а), а чаще всего они возникали в августе (18 случаев) и в сентябре (19 случаев).

Максимум случаев с ТЦ совпадает с максимальными температурами воды в северо-западной части Тихого океана [6].

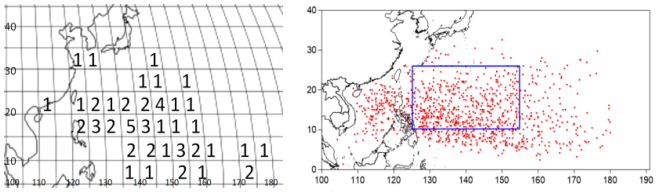
На рисунке 1.б показано распределение ТЦ по годам. В среднем за сезон в Японское море заходят 2 ТЦ. Наибольшее их количество наблюдалось в 2004 и 2018 гг. - по 5 и 6 ТЦ соответственно. В 2001, 2008, 2009,2012 и 2014 гг. ТЦ в Японское море не заходили совсем. В целом эти годы совпадают с периодами максимального и минимального их количества над всей северо-западной частью Тихого океана. Как видно из графика, заметной тенденции на увеличение или уменьшение количества ТЦ не наблюдается.



а) б)

Рисунок 1 - Распределение ТЦ по месяцам (а) и годам (б)

Районы зарождения, откуда приходят ТЦ в Японское море, в больше половины случаев приходится на 10 с.ш. - 25 с.ш. и 125 в.д.- 155 в.д. Распределение по квадратам представлено на рисунке 2.а. Для сравнения район, где возникают более 80% таких циклонов относительно районов зарождения всех ТЦ северо-западной части Тихого океана, представлен на рисунке 1.б.

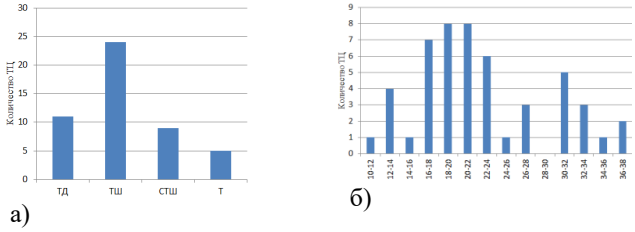


а) б)

Рисунок 2 - Распределение районов зарождения ТЦ по квадратам(а), относительно всех ТЦ северо-западной части Тихого океана (б), квадрат - район в котором формируется 50% ТЦ, которые выходят к Японскому морю

Поскольку акватория Японского моря расположена севернее 40 с.ш., то заходят в нее чаще ТЦ, которые имеют более длительные траектории - в 50% случаев 6-9 дней, и в своей максимальной стадии развития представляют собой преимущественно тайфуны (33 м/с и более) и тропические штормы (от 17 до 24 м/с). За весь период их количество составило 36 и 9 соответственно, что в процентном соотношении -72% и 18% от общего числа. На долю сильных тропических штормов (от 25 до 32 м/с) приходится только 5 циклонов (10%).

Над самой акваторией Японского моря ТЦ проходили чаще всего в категории тропического шторма (24 случая), тропической депрессии - 11 случаев, сильный тропический шторм - 9 случаев, и 5 тайфунов (рисунок 1.а). ТЦ в категории тайфунов наблюдались в августе и сентябре - BART 1999-09-24 03 UTC, GONI 2015-08-25 06 UTC, HINNAMNOR 2022-09-06 00 UTC, CHABA 2004-08-30 15 UTC и JEBI 2018-09-04 09 UTC. При этом самые сильные скорости ветра отмечались в зоне влияния тайфуна BART 37,1 м/с.



а) б)

Рисунок 3 - Распределение ТЦ по категориям: тропическая депрессия (ТД), тропический шторм (ТШ), сильный тропический шторм (СТШ), тайфун (Т) (а). Распределение максимальных скоростей ветра по градациям над акваторией Японского моря в зоне влияния ТЦ (б)

По распределению максимальных скоростей ветра ТЦ над Японским морем по градациям видно, что чаще всего отмечались скорости от 16 до 24 м/с.

На рисунке 4 показаны траектории 15 наиболее интенсивных ТЦ над Японским морем со скоростями ветра более 25 м/с. В этот критерий входит ОЯ над поверхностью воды (более 20 м/с) и ОЯ на побережье (более 25 м/с) [7].

Как видно из рисунка, выделяются 3 основных пучка траекторий: через Корейский полуостров, в районе Японского моря траектории ориентированы на север (MAYSAK и HAISHEN), циклоны, которые пересекают Японское море с траекториями на северо-северо-восток (HINNAMNOR и JEBI), и пути циклонов, которые проходят главным образом через Корейский пролив и направлены на северо-восток вдоль побережья Японии к проливу Цугару (все остальные ТЦ).

При этом распределение скоростей ветра над рассматриваемой акваторией во многом зависят от направления движения ТЦ и близости его к побережью.

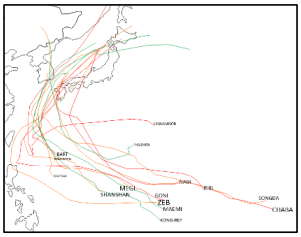


Рисунок 4 - Траектории ТЦ над акваторией Японского моря с максимальными скоростями ветра боле 25 м/с

В ТЦ MAYSAK и HAISHEN зона максимальных скоростей ветра располагалась справа от центра по пути их движения, т.е. в районе восточного побережья Кореи. Нужно отметить, что эти циклоны двигались друг за другом с интервалом в несколько часов.

Циклоны HINNAMNOR и JEBI распределение скорости ветра такое же, как и у MAYSAK и HAISHEN, - максимальные скорости ветра справа от центра циклона по направлению их движения. Циклоны переходят в категорию внетропических у побережья Приморского края, в северной части Японского моря.

Остальные траектории очень схожи, проходят Японское море с юго-запада на северо-восток через Корейский залив, и остров Кюсю. В зависимости от близости циклонов к побережью, конфигурации береговой линии распределение скоростей ветра сильно меняется. У более северных траекторий зона максимальных скоростей ветра находится справа от центра циклона, при приближении к побережью японских островов максимальные скорости ветра отмечаются слева по пути движения циклона.

Оценка распределения скорости ветра внутри ТЦ сделана на основе данных реанализа GFS [8].

Список литературы

1. *Тараканов Г. Г.* Тропическая метеорология. - Л.: Гидрометеоиздат, 1980. - 128 с.
2. Мамедов Э. С., Павлов Н. И. Тайфуны. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 160 с.
3. Похил А. Э., Глебова Е. С. Трансформация гидродинамических полей в тропическом циклоне над островами // Физические проблемы экологии. – 2009. – № 17. – С. 308–318.
4. Японское агентство аэрокосмических исследований Центр исследований Земли JAXA/EORC - https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=e&area=WP
5. Массив IBTrACS https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/27/4/2009jtecha1267_1.xml
6. *Лаврова И.В., Топтунова О.Н., Шишкина Т.Р., Алексеева Е.Г., Ефимова Ю.В.* Влияние температуры поверхности океана на формирование тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана. Навигация и гидрография. 2023. № 72. С. 64-75.
7. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. Рд 52.04.563-2002. Руководящий документ. Утвержден Федеральной службой России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидрометом) 23.08.2002. - 22 стр.
8. Ventusky. Электронный ресурс - https://www.ventusky.com/ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ В Г. ЯКУТСК

Черемных В.С., Кашлева Л.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
fair.boll.xxx@gmail.com

Аннотация. Исследование грозовой активности в г. Якутск через индексы неустойчивости атмосферы.
Ключевые слова. Якутск, гроза, индексы неустойчивости атмосферы.

STUDY OF THUNDERSTORM ACTIVITY IN YAKUTSK

Cheremnykh V.S., Kashleva L.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. Investigation of thunderstorm activity in Yakutsk through atmospheric instability indices.
Keywords. Yakutsk, thunderstorm, atmospheric instability indices.

В условиях резко континентального климата Восточной Сибири грозовая деятельность представляет собой опасное метеорологическое явление, оказывающее влияние на безопасность населения, функционирование транспорта, энергетики и других отраслей хозяйства.

Целью данной работы является анализ случаев гроз в 2023 году по данным пункта наблюдения г. Якутск и оценка прогностической эффективности индексов конвективной неустойчивости атмосферы. В качестве исходной информации использовались данные об опасных явлениях с сайта ВНИГМИ МЦД [1], а также материалы аэрологического зондирования с сайта университета Вайоминга [2] (сроки наблюдений 00Z и 12Z).

В работе были отобраны и проанализированы даты с зарегистрированными грозами, исследована соответствующая синоптическая обстановка), а также рассчитаны и сопоставлены значения индексов Vertical Totals (VT), Cross Totals (CT), Total Totals (TT) и CAPE.

Отсортировав даты по явлению гроза, получилось, что за 2023 г. было 9 дней с грозой: 27.06, 28.06, 29.06, 04.07, 12.07, 23.07, 24.07, 25.07, 30.07.

Таблица 1- дни с грозами, Якутск 2023 год

месяц	день	срок	срок местн.	Н	К	продолж.
6	27	6	15	5.05	6.00	0.56
6	28	0	9	21.00	21.20	0.20
6	29	3	12	0.56	3.00	2.04
7	4	18	3	15.44	18.00	2.16
7	12	6	15	4.24	6.00	1.26
7	23	6	15	3.55	4.45	0.50
7	24	9	18	6.09	8.15	2.06
7	25	6	15	4.30	6.00	2.30
7	30	9	18	7.20	7.35	0.15

Гроза была вызвана прохождением холодного фронта или окклюзии. Представлен типичный случай прохождения холодного фронта.

Индексы неустойчивости

Vertical totals – индекс оценивает разницу температур между средней и нижней частями атмосферы.

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (1)$$

Буква Т и индекс, значат температуру и изобарическую поверхность.

Если VT ≥ 28, тогда в тропосфере есть потенциал конвективной неустойчивости, достаточный для появления гроз.

Cross totals – индекс оценивает разницу между температурой точки росы в нижней части атмосферы и температурой воздуха в средней части атмосферы.

$$CT = Td_{850} - T_{500} \quad (2)$$

Td – температура точки росы, Т – температура воздуха, цифры соответствующая изобарическая поверхность.

18 < CT <19 – умеренная неустойчивость, слабая грозовая активность.

20 < CT < 21 – высокая неустойчивость, грозы

22 < CT < 23 – возможны сильные грозы

24 < CT < 25 – сильные грозы
CT > 25 – очень сильные грозы

Total totals – индекс оценивает температуру и влажность на уровне 850 гПа и статическую стабильность.

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2T_{500} \quad (3)$$

< 44 – грозовая деятельность отсутствует
44 < TT < 45 – отдельная гроза или несколько гроз
46 < TT < 47 – рассеянные грозовые очаги
47 < TT < 48 – значительные количество гроз, отдельные из которых сильные
50 < TT < 51 – рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем
52 < TT < 55 – значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем
TT > 55 – повсеместные грозы с сильными смерчами

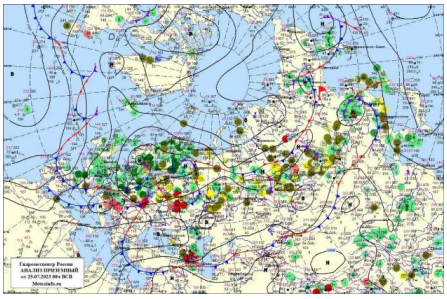


Рисунок 2– Синоптическая ситуация за 25.07

Convective Available Potential Energy (CAPE) – индекс оценивает количество энергии, которой бы обладала бы воздушная частица, если бы её подняли с уровня конденсации до уровня выравнивания температур. CAPE характеризует неустойчивость атмосферы. Считается, как площадь криволинейно трапеции.

$$CAPE = -R_d \int_{P_{LFC}}^{P_{EL}} (T_p - T_e) dlnp \quad (4)$$

CAPE <300 – очень слабая конвекция
300 > CAPE > 1000 – слабая конвекция
1000 > CAPE > 2500 – умеренная конвекция
2500 > CAPE > 3000 – сильная конвекция
3000 > CAPE – очень сильная конвекция

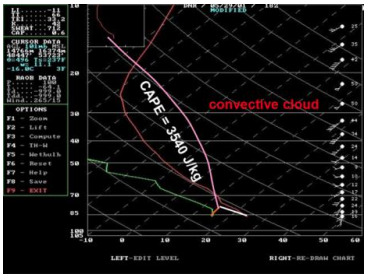


Рисунок 3 – Пример расчета CAPE

Данные индексы посчитаны для каждого дня с грозой.

Таблица 2 – Значения индекса Cross Totals для гроз, Якутск 2023

CT				Гроза			Оправ.	
Месяц	День	Срок	Срок местн.	До	После	Продолж.	До	После
6	27	6	15	15.30	21.90	0.56	-	+
6	28	0	9	14.10	18.70	0.20	-	+
6	29	3	12	16.30	19.30	2.04	-	+
7	5	18	3	20.30	14.30	2.16	+	-
7	12	6	15	18.30	21.50	1.26	+	+
7	23	6	15	18.70	14.10	0.50	+	-
7	24	9	18	17.30	17.90	2.06	-	-
7	25	6	15	19.10	20.50	2.30	+	+
7	30	9	18	8.90	20.10	0.15	-	+

Таблица 3 – Значения индекса Vertical Totals для гроз, Якутск 2023

VT				Гроза			Оправ.	
Месяц	День	Срок	Срок местн.	До	После	Продолж.	До	После
6	27	6	15	30.30	32.90	0.56	+	+
6	28	0	9	30.10	31.70	0.20	+	+
6	29	3	12	28.30	27.30	2.04	+	-
7	5	18	3	26.30	26.30	2.16	-	-
7	12	6	15	30.30	27.50	1.26	+	-
7	23	6	15	25.70	29.10	0.50	-	+
7	24	9	18	28.30	30.90	2.06	+	+
7	25	6	15	32.10	29.50	2.30	+	+
7	30	9	18	28.90	28.10	0.15	+	+

Таблица 4 – Значения индекса Totals Totals для гроз, Якутск 2023

TT				Гроза			Оправ.	
Месяц	День	Срок	Срок местн.	До	После	Продолж.	До	После
6	27	6	15	45.60	54.80	0.56	+	+
6	28	0	9	44.20	50.40	0.20	+	+
6	29	3	12	44.60	46.60	2.04	+	+
7	5	18	3	46.60	40.60	2.16	+	-
7	12	6	15	48.60	49.00	1.26	+	+
7	23	6	15	44.40	43.20	0.50	+	-
7	24	9	18	45.60	48.80	2.06	+	+
7	25	6	15	51.20	50.00	2.30	+	+
7	30	9	18	37.80	48.20	0.15	-	+

Таблица 5 – Значения индекса CAPE для гроз, Якутск 2023

CAPE				Гроза			Оправ.	
Месяц	День	Срок	Срок местн.	До	После	Продолж.	До	После
6	27	6	15	52.46	846.94	0.56	-	+
6	28	0	9	0.00	1413.00	0.20	-	+
6	29	3	12	0.00	489.10	2.04	-	+
7	5	18	3	0.00	0.00	2.16	-	-
7	12	6	15	0.00	317.39	1.26	-	+
7	23	6	15	0.44	4.74	0.50	-	-
7	24	9	18	19.54	1000.00	2.06	-	+
7	25	6	15	643.46	346.45	2.30	+	+
7	30	9	18	0.00	119.32	0.15	-	-

Вывод. В 2023 году в г. Якутск было зафиксировано 9 дней с грозой, во всех случаях, связанных с прохождением холодного фронта. Анализ индексов неустойчивости показал, что наиболее устойчиво наличие гроз отражал индекс TT, тогда как CAPE и другие индексы часто занижали степень конвективной активности. Следовательно, стандартные критерии оценки неустойчивости атмосферы не полностью адекватны для условий Якутска и требуют региональной корректировки.

Список литературы

1. http://aisori-m.meteo.ru/
2. https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html
3. *Богаткни О.Г., Топтунова О.Н., Волобуева О.В., Иванова И.А.* Практикум по авиационной метеорологии, 2022 г. – 87 с.

СТУДЕНЧЕСКАЯ СЕКЦИЯ 2

ПЕРВЫЕ ШАГИ В НАУКЕ

СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПОТОКОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В 25 СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Балджи П.С.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
polina.baldzhi@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается изменение характеристик проявления солнечной активности (СА) и вариации потоков галактических космических лучей (ГКЛ) в околоземном пространстве с применением методов статистического анализа. Объясняются причины выявленных расхождений временного хода указанных переменных на основе известных физических процессов в межпланетном пространстве.
Ключевые слова. Индексы вариаций солнечной активности, галактические космические лучи, цикл солнечной активности.

JOINT ANALYSIS OF SOLAR ACTIVITY CHARACTERISTICS AND GALACTIC COSMIC RAY FLUXES IN THE EARTH VICINITY IN THE 25TH SOLAR CYCLE.

Baldzhi P.S.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. Changes in the characteristics of the manifestation of solar activity (SA) and variations in the fluxes of galactic cosmic rays (GCB) in near-Earth space are considered using statistical analysis methods. The reasons for the revealed discrepancies in the time course of these variables are explained on the basis of known physical processes in interplanetary space.
Keywords. Indices of variations in solar activity, galactic cosmic rays, solar activity cycle.

Солнечные космически лучи (СКЛ) – поток энергичных заряженных частиц (электронов, протонов и ядер элементов), которые испускаются Солнцем в межпланетное пространство – напрямую зависит от глобальных вариаций солнечной активности (СА). Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. Основной источник возникновения СКЛ – поток непрерывно истекающей материи от Солнца, известный как «солнечный ветер», а также: солнечные вспышки, в редких случаях – распад протуберанца (волокна), корональные выбросы массы [1]. Изменение их интенсивности связано с квази-11-летним солнечным циклом Швабе-Вольфа, фаза которого оценивается по поведению некоторых индексов СА, в частности, интегрального радиопотока на волне 10,7 см и числа Вольфа. Солнце проходит через регулярные циклы, длящиеся примерно 11 лет, во время которых его возрастает от минимума до максимума и обратно. Этот цикл напрямую влияет на интенсивность галактических космических лучей, достигающих Земли, но обратно пропорционально: в период солнечного минимума интенсивность галактических космических лучей (ГКЛ) возрастает, солнечного максимума – снижается. Обратная зависимость возникает из-за влияния солнечного ветра и межпланетного

магнитного поля, которые становятся гораздо сильнее и нестабильное в годы максимума [2].

В период солнечного максимума усиливается межпланетное магнитное поле, и гелиосфера (область околосолнечного пространства, в которой плазма солнечного ветра движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью - защитный «пузырь» солнечной системы) становится более «прочной» и турбулентной. Она эффективнее рассеивает и отклоняет заряженные частицы ГКЛ, не давая им проникнуть во внутреннюю часть Солнечной системы.

Галактические космические лучи – это, в основном, заряженные частицы (протоны, электроны, ядра элементов). Двигаясь, они взаимодействуют с неоднородным магнитным полем солнечного ветра. Это взаимодействие работает как «сетка» или «барьер». В солнечный максимум барьер становится сильнее, и меньше ГКЛ может до нас добраться. Этот процесс называется солнечной модуляцией ГКЛ. [3].

Теперь приступим к анализу солнечной активности (СА). На рисунке отображены три цикла: 1997-2008 г.г. (23-й цикл), 2009-2019 г.г. (24-й цикл) и 2020-2026 г.г. (текущий 25-й цикл). Я буду рассматривать лишь последний, так как целью моей работы является сравнение изменения СА с изменениями ГКЛ в текущем, 25 цикле СА На рисунке показано изменение СА с 1.01.1997 по 22.02.2026 через вариации интегрального солнечного радиопотока на волне 10,7 см (рисунок 1).

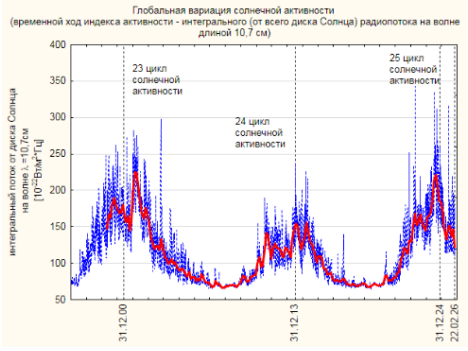


Рисунок 1 – Кривая глобальной вариации солнечной активности, синий – интегральный поток радиоизлучения на волне 10,7 см, красный – аппроксимация временного хода кривой по методу наименьших квадратов

Интегральный поток радиоизлучения Солнца на волне 10,7 — это мера мощности радиоизлучения, приходящей от всего солнечного диска на данной длине волны. Интегральный поток означает, что измеряется излучение не от какой-то одной точки на Солнце (например, от отдельной активной области), а суммарное излучение со всей видимой поверхности диска Солнца. Конкретный диапазон 10,7 см выбран потому, что он идеально подходит для измерения определенных процессов в солнечной атмосфере.

С целью оценки временных изменений СА и ГКЛ для каждой годовой статистической характеристики (математическое ожидание, дисперсия, медиана, асимметрия, эксцесс) интегрального радиопотока строится свой график, а затем проводится та же работа, но уже по анализу числа Вольфа – другому индексу СА, поведение которого в глобальном смысле схоже с поведением интегрального радиопотока, однако, отличается в деталях (рисунок 2). То же – для ГКЛ.

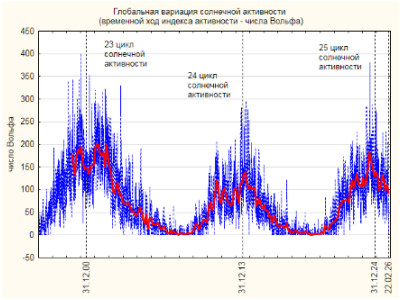


Рисунок 2 – Кривая глобальной вариации солнечной активности, синий – число Вольфа, красный – аппроксимация временного хода кривой по методу наименьших квадратов

«Число Вольфа» (также известное как «Цюрихское число» или «Международное число солнечных пятен») — это показатель активности Солнца. Когда Число Вольфа высокое (Солнечный максимум): на Солнце много пятен, вспышек и выбросов корональной массы, солнечный ветер становится турбулентным, межпланетное магнитное поле усиливается, все это отклоняет и тормозит галактические космические лучи, следовательно, интенсивность ГКЛ низкая. Когда Число Вольфа низкое (Солнечный минимум): на Солнце мало пятен, солнечный ветер ослабевает, и больше ГКЛ может проникнуть во внутреннюю часть Солнечной системы – интенсивность ГКЛ высокая [4].

После проведенного анализа изменения интегрального потока радиоизлучения на волне 10,7 см и числа Вольфа за несколько лет 25 цикла СА, оказалось возможным сравнить полученные данные с изменениями значений потока ГКЛ за те же несколько лет.

Кривая годовых математических ожиданий индексов СА в период с 2020 по 2024 год обратно направлена относительно подобной кривой потока ГКЛ. Найденный эффект соответствует известному эффекту форбуш-понижения (Forbush decrease) интенсивности галактических космических лучей, связывающему СА и ГКЛ [5]. Солнце постоянно испускает поток плазмы — солнечный ветер. Вся эта структура создает вокруг Солнечной системы гелиосферу. Когда активность Солнца низкая (рисунок 3, начала кривых на втором и третьем графиках), солнечный ветер слабый, солнечное магнитное поле не такое мощное. Следовательно, галактическим лучам легко проникнуть внутрь Солнечной системы и долететь до Земли. Когда же активность высокая (рисунок 3, концы кривых на втором и третьем графиках), межпланетное магнитное поле усиливается. Мощное магнитное поле и турбулентный солнечный ветер отталкивают галактические лучи, интенсивность ГКЛ падает до минимума (рисунок 3, конец кривой на первом графике).

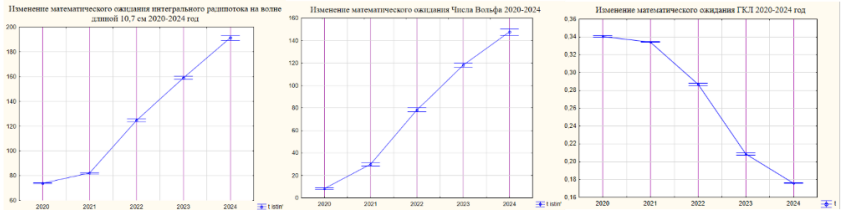


Рисунок 3 – Графики изменения годового математического ожидания следующих величин: первый – интегрального потока радиоизлучения, второй – числа Вольфа, третий – ГКЛ

На графиках медианы ГКЛ в период с 2020 по 2024 год заметен значительно узкий разброс погрешностей, это объясняется тем, что галактические космические лучи приходят к нам извне. Их поток относительно однороден, изменения их интенсивности вызваны глобальными процессами в гелиосфере, а не кратковременными событиями на Солнце.

У индексов СА же наоборот виден широкий разброс, так как солнечная активность по своей природе взрывная и нерегулярная. Число Вольфа: может меняться в разы за несколько дней из-за появления или исчезновения крупных групп солнечных пятен, интегральный поток: также резко возрастает во время солнечных вспышек, когда в короне выделяется огромная энергия (рисунок 4).

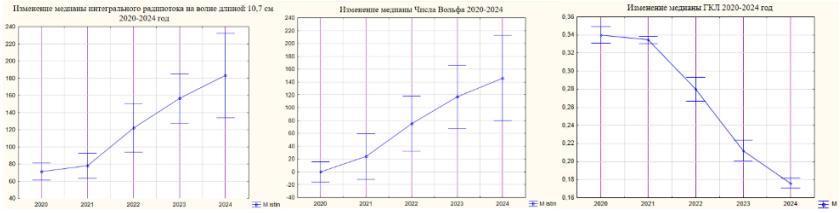


Рисунок 4 – Графики изменения годовой медианы интегрального потока радиоизлучения на волне 10,7 см, годовой медианы числа Вольфа 2020-2024 и годовой медианы ГКЛ

Далее рассматриваем изменении дисперсии описанных выше годовых статистик исследованных величин. Дисперсия — это характеристика разброса и изменчивости данных. На графике ГКЛ вертикальные полосы погрешностей довольно узки, почти близки к нулю, что говорит о том, что оценка дисперсии ГКЛ является очень точной и надёжной. А вот на изменении дисперсии индексов СА полосы погрешностей широкие, сама оценка изменчивости является нестабильной. Это происходит потому, что в годы высокой солнечной активности непредсказуемо и количество самих «всплесков» изменчивости, что объясняет большой разброс годовых средних значений (рисунок 5).

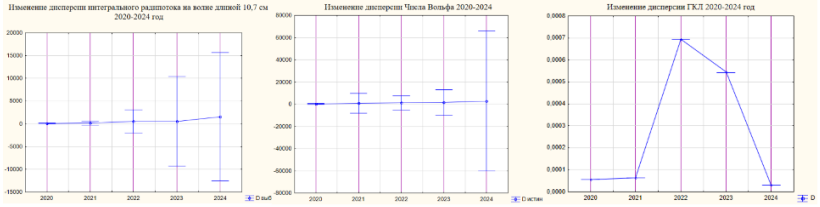


Рисунок 5 – Изменение, дисперсии годовой медианы интегрального потока радиоизлучения на волне 10,7 см, дисперсии годовой медианы числа Вольфа, дисперсии годовой медианы ГКЛ 2020-2024.

Колебания асимметрии годовой медианы ГКЛ к 2022 становятся менее резкими, постепенно убывая. Когда от Солнца приходит мощный поток СКЛ: например, скоростные потоки солнечного ветра, корональный выброс массы (КВМ) и т.п., он «выметает» частицы ГКЛ, вызывая резкое падение их интенсивности. Это создает резкий провал в данных, что статистически проявляется как отрицательная асимметрия годового распределения. Положительная асимметрия может быть связана с редкими событиями увеличения ГКЛ, например, когда ударная волна от КВМ ускоряет частицы. График интегрального потока гораздо более хаотичный, чем график числа Вольфа, это означает, что солнечное радиоизлучение часто имеет резкие, кратковременные всплески (рисунок 6).

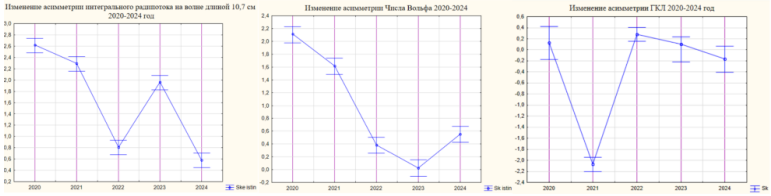


Рисунок 6 – изменение асимметрии годового распределения интегрального потока радиоизлучения на волне 10,7 см, асимметрии годового распределения числа Вольфа, асимметрии годового распределения суточной медианы ГКЛ 2020-2024.

Эксцесс показывает, много ли выбросов в данных, и насколько близко они сгруппированы около среднего. Положительный эксцесс показывает, что в данных присутствует больше выбросов. Отрицательный наоборот – значения равномерно распределены по всему диапазону, и нет явных экстремумов.

На графиках эксцесса годового распределения ГКЛ видно резкое увеличение указанной величины в 2021 году, что характеризует этот год относительно резким изменением ГКЛ (острой вершиной годового распределения). Причины этого необходимо исследовать, но они выходят за рамки данной работы. На втором графике (интегрального радиопотока на волне 10,7 см) можно видеть резкий подъем эксцесса годового распределения указанной величины. Можно предположить, что пик в 2023 году — это период, когда на Солнце произошло большое количество мощных вспышек, всплеск интегрального потока радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см настолько силен, что резко выделяется на фоне обычных значений, делая распределение крайне островершинным (рисунок 7).

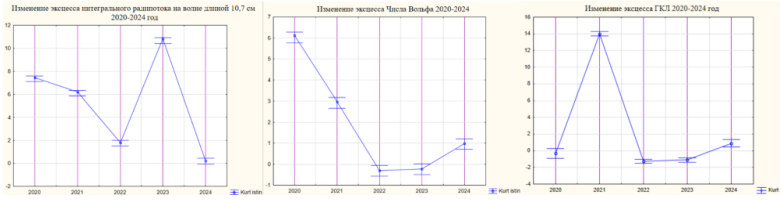


Рисунок 7 – Изменения эксцесса годового распределения медианы интегрального потока радиоизлучения на волне 10,7 см; эксцесса годового распределения медианы числа Вольфа, эксцесса годового распределения медианы ГКЛ 2020-2024.

После сравнения и анализа всех пяти годовых статистических характеристик потока ГКЛ, индексов проявления СА - интегрального радиопотока и числа Вольфа, можно подвести итог: ГКЛ – индикатор того, как солнечная активность воздействует на окружающую космическую среду. В годы максимальной активности Солнца интенсивность ГКЛ падает, что известно, как эффект форбуш-понижения. Именно поэтому графики временного хода указанных величин так зеркально противоположны

Моя работа показала наличие этого эффекта в текущем 25 цикле солнечной активности.

Список литературы

1. Веселовский И. С. и др. Безвспышечное возрастание солнечных космических лучей 14-17 апреля 1994 // Космические исследования. — 1997. — № 2. — С. 127-132.
2. Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Роганова Т.М. «Галактические космические лучи».
3. Базилевская Г.А., Махмутов В.С., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С., Стожков Ю.И. Долговременные измерения космических лучей в атмосфере земли // Известия

российской академии наук. Серия физическая. — 2005. — № 6. — с. 835-837.
4. Максимов, В. П. Солнечные факторы, определяющие состояние космической погоды, и задачи их прогнозирования; ИСЗФ СО РАН. — Иркутск, 2003.
5. А. Бруцека и Ш. Дюрана, Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов. Под редакцией М. Мир, 1980.

«ЭНУМА АНУ ЭНЛИЛЬ» КАК КОРПУС РАННИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ: СТРУКТУРА, МЕТОДЫ, ЗНАЧЕНИЕ

Нестерова А.Ю.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
nesterowa.anastasia2011@gmail.com

Аннотация. Рассматривается метеорологический компонент вавилонского свода предзнаменований «Энума Ану Энлиль» (EAE, таблицы 44–49) как самый ранний из дошедших до нас систематизированных корпусов эмпирических знаний об атмосферных явлениях. Анализируются структура корпуса, методология наблюдений (классификация, корреляционный анализ, количественные оценки), а также примеры протосиноптических схем, включающих классификацию воздушных масс по происхождению и учёт сезонности. Показано, что, действуя в рамках мантической парадигмы («знание до природы»), месопотамские учёные создали эмпирический фундамент, впоследствии воспринятый и переосмысленный античной наукой.
Ключевые слова. Энума Ану Энлиль, история метеорологии, вавилонская наука, мантика, классификация атмосферных явлений, протосиноптика, воздушные массы.

ENŪMA ANU ENLIL AS A CORPUS OF EARLY METEOROLOGICAL OBSERVATIONS: STRUCTURE, METHODS, SIGNIFICANCE

Nesterova A.Y.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. The meteorological component of the Babylonian omen series Enūma Anu Enlil (EAE, tablets 44–49) is considered as the earliest surviving systematic corpus of empirical knowledge about atmospheric phenomena. The structure of the corpus, the methodology of observations (classification, correlation analysis, quantitative estimates), as well as examples of proto-synoptic schemes, including the classification of air masses by origin and consideration of seasonality, are analyzed. It is shown that, operating within the mantle paradigm ("knowledge before nature"), Mesopotamian scholars created an empirical foundation that was subsequently received and reinterpreted by ancient science.
Keywords. Enūma Anu Enlil, history of meteorology, Babylonian science, divination, classification of atmospheric phenomena, proto-synoptics, air masses.

Серия вавилонских предсказаний «Энума Ану Энлиль» (EAE), канонизированная к VII в. до н.э., представляет собой всеобъемлющий свод знаний о знамениях от всей небесной сферы. Её метеорологический компонент (таблицы 44–49), а также смежные солнечные, лунные и планетарные разделы, содержат самый ранний из дошедших до нас систематизированных корпусов эмпирических метеорологических наблюдений. Критические издания последних десятилетий [1 - 7] сделали этот материал доступным для анализа, а эпистемологическая модель «знания до природы» (knowledge before nature), предложенная Ф. Рочберг [8], позволяет рассматривать EAE не как курьёз «магического мышления», а как автономную интеллектуальную систему, в которой эмпирическая дисциплина наблюдения была неотделима от теологической интерпретации.

Метеорологические таблицы EAE организованы по явлениям в последовательности, отражающей логику атмосферных процессов: от динамических причин к наблюдаемым следствиям. Таблицы 44–45 посвящены грому и молнии —

первичным динамическим явлениям, маркирующим конвективную активность. Таблица 46 рассматривает оптические явления (гало, радуга) и аномальные осадки (град, «соляной дождь»), возникающие в сильно развитой облачности. Таблица 47 включает землетрясения — геофизический феномен, включённый в корпус наравне с атмосферными. Таблица 48 систематизирует дождь, туман и грязь — собственно гидрометеоры и их последствия для земной поверхности. Таблица 49 (плохо сохранившаяся) предположительно завершала обзор [1]. Такая структура демонстрирует понимание причинно-следственных связей: от источника энергии (гроза) через оптические эффекты и осадки к изменению состояния подстилающей поверхности (грязь, разливы).

В рамках мантической задачи месопотамские учёные-жрецы (ṭupšarrū) выработали строгую эмпирическую дисциплину, включавшую:

1. Классификацию явлений. Гром классифицировался по тембру (голоса животных — «лев», «скорпион»), количеству раскатов (от 1 до 11) и сочетанию с молнией по сторонам света [1]. Солнечные таблицы фиксировали цвет («красный как факел»), степень видимости («лицо закрыто») и оптические аномалии («солнце ночью») [2]. Лунные таблицы описывали свет Луны как «очень яркий», «очень тёмный», «тёмно-красный», «зелёный» [3].

2. Корреляционный анализ. Основная формула «Если А, то Б» отражала многократно подтверждённые связи. Например: «Если Адад гремит на восходе солнца — в тот день пойдёт дождь» (EAE 45, §1) [1] — классическая примета, указывающая на утреннюю конвективную нестабильность, ведущую к дневным ливням.

3. Количественный подход. В таблицах подсчитывались раскаты грома; в случае гало фиксировались угловые размеры 22° (малое гало) и 46° (большое), а также форма — полная («как круг») или частичная («как бумеранг») [1]. Это свидетельствует о применении простейших измерительных техник.

4. Качественные шкалы. Для описания состояния атмосферы использовались стандартизированные термины: видимость планет — adir («затемнено»), ekil («тускло»), ba'lu («блистательно») [5]. Яркая Луна указывала на чистый сухой воздух (антициклон), тёмная — на влажную дымку или перистые облака [3]. Многие изменения видимости вызваны рассеянием и рефракцией света в атмосфере, особенно заметными в пустынных регионах [5].

Наиболее показательны предсказания, фиксирующие гром «в облаках южного/северного/восточного/западного ветра» [1]. Каждому направлению соответствует свой географический регион (Аккад, Субарту, Элам, Амурру) и тип воздушной массы:

юг — тропический воздух с Аравийского полуострова и Персидского залива (влажный, неустойчивый);

запад — морской воздух с Средиземноморья (главный источник осадков);

север — континентальный воздух с Анатолии и Загроса (сухой, стабильный);

восток — континентальный воздух с Иранского нагорья (сухой, резко континентальный).

Это не просто фиксация направления, а идентификация происхождения воздушной массы — прообраз современного синоптического анализа. Мифопоэтическая классификация четырёх ветров закрепляла эти наблюдения в культурной памяти. Само аккадское слово, обозначающее сторону света, было эквивалентно слову «ветер». Концепция Четырёх Ветров зародилась в Шумере ещё до 3000 г. до н.э.: северо-западный («Регулярный ветер»), северо-восточный («Горный ветер»), юго-восточный («Облачный ветер») и юго-западный («Аморейский ветер») [9; 10]. Шумерская пословица обобщает эмпирические наблюдения: «Северный ветер — ветер удовлетворения, южный ветер

опрокидывает людей, восточный ветер — ветер, приносящий дождь, а западный ветер могущественнее человека» [9; 10].

Дожди систематизированы по месяцам (таблица 48). Дождь в сезон (ноябрь–апрель) — к изобилию; дождь в месяце абу (июль–август) — «падение людей» [1]. Климатические данные подтверждают: летние осадки в Месопотамии — исключительная аномалия. Согласно британским военным отчётам начала XX века, среднемесячное количество осадков в Северной Джезире в июле-августе близко к нулю [11; 12]. Летний дождь губителен для кунжута (šamaššammū), который сеют в июне-июле и который требует сухости при созревании, а также для созревающих фиников [13; 14]. Таким образом, календарная привязка осадков имела не только символическое, но и практическое агрометеорологическое значение.

Отдельно фиксировались редкие явления. Град разного цвета («чёрные камни», «бурые камни», «олово») может отражать реальные наблюдения: градины могут казаться тёмными из-за слоёв мутного льда и захваченных пылевых частиц, а «олово» — указывать на металлический блеск мощного кучево-дождевого облака [1]. «Соляной дождь» может соответствовать пыльной буре с засоленных почв, после которой на поверхности остаётся солёный налёт, либо выпадению солевых частиц из мощных конвективных облаков [1].

Туман дифференцировался по трём ночным стражам (отрезкам) - вечерняя, средняя, утренняя - с различными исходами для страны [1]. Это показывает понимание связи времени возникновения тумана с типом синоптического процесса: вечерний радиационный туман (к хорошей погоде) и утренний, часто связанный с адвекцией влажного воздуха. Постоянный туман интерпретировался как знак стабильности, прерывающийся — как знак распада.

Включение землетрясений (таблица 47) и грязи (таблица 48) в один ряд с грозами и дождями демонстрирует целостный, «экосистемный» подход: процессы в атмосфере, литосфере и на поверхности земли мыслились как единое семиотическое поле. Землетрясения систематизированы по месяцам [1] — это календарно-символическая, а не физическая классификация, но сам факт её включения важен для понимания древней картины мира. Грязь как последствие осадков выделена в отдельную категорию, имеющую критическое значение для земледелия и передвижения [1].

Таким образом, «Энума Ану Энлиль» представляет собой первый в истории систематизированный письменный корпус метеорологических наблюдений. Месопотамские учёные, решая задачу дешифровки божественных знамений, создали эмпирическую дисциплину, включавшую классификацию явлений, выявление устойчивых корреляций, количественные оценки и качественные шкалы. Они разработали протосиноптические схемы, связывающие направление ветра и молнии с типами воздушных масс и траекториями фронтов. Их комплексный подход, охватывавший не только собственно атмосферные явления, но и их последствия (грязь, разливы), а также смежные геофизические процессы (землетрясения), демонстрирует целостное видение мира, в котором небо и земля составляли единое семиотическое пространство. Этот эмпирический материал, переданный через эллинистическую науку грекам, стал необходимым фундаментом для возникновения аристотелевской «Метеорологики» и всей последующей европейской традиции изучения атмосферы.

Список литературы

1. *Gehlken E*. Weather Omens of Enūma Anu Enlil: Thunderstorms, Wind and Rain (Tablets 44–49). Leiden-Boston: Brill, 2012.
2. *van Soldt W. H.* Solar Omens of Enūma Anu Enlil: Tablets 23 (24)–29 (30). Leiden: Nederlands Instituut voor het Nabije Oosten, 1995.

3. *Verderame L.* Le Tavole I–VI della serie astrologica Enūma Anu Enlil. Messina: Di.Sc.A.M., 2002.
4. *Reiner E., Pingree D.* Babylonian Planetary Omens. Part One: The Venus Tablet of Ammisaduqa. Malibu: Undena Publications, 1975.
5. *Reiner E., Pingree D.* Babylonian Planetary Omens. Part Two: Enūma Anu Enlil, Tablets 50–51. Malibu: Undena Publications, 1981.
6. *Reiner E., Pingree D.* Babylonian Planetary Omens. Part Three. Groningen: Styx Publications, 1998.
7. *Reiner E., Pingree D.* Babylonian Planetary Omens. Part Four. Leiden-Boston: Brill, 2005.
8. *Rochberg F.* Before Nature: Cuneiform Knowledge and the History of Science. Chicago-London: The University of Chicago Press, 2016.
9. *Neumann J.* The Winds in the World of the Ancient Mesopotamian Civilizations // Bulletin of the American Meteorological Society. 1977. Vol. 58, No. 10. P. 1050–1055.
10. *Wiggermann F. A. M*. The Four Winds and the Origins of Pazuzu // Das geistige Erfassen der Welt im Alten Orient. Wiesbaden: Harrassowitz, 2007. P. 125–165.
11. General Staff, British Forces in Iraq. Military Report on Mesopotamia (Iraq). Area 1 (Northern Jazirah). London: HMSO Press, 1922.
12. Naval Staff, Intelligence Department. Handbook of Mesopotamia. Vol. I. General. London: HMSO Press, 1918.
13. *Bedigian D*. Is še-giš-ì Sesame or Flax? // Bulletin on Sumerian Agriculture. 1985. Vol. 2. P. 159–178.
14. *Stol M.* Remarks on the Cultivation of Sesame and the Extraction of its Oil // Bulletin on Sumerian Agriculture. 1985. Vol. 2. P. 119–126

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ВЛАГОЗАПАСОВ В МЕТРОВОМ СЛОЕ ПОЧВЫ В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Черкасова А.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
anna-daarica_4erkasova@mail.ru

Аннотация. Оценены наблюдаемые изменения режима влажности почвы для европейской территории России. Произведены оценки основных статистических характеристик для областей/краёв/республик европейской части России за периоды 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг. и рассчитаны кривые сезонного хода для 4 физико-агроклиматических регионов. Показано, что в XXI веке увлажнение почвы выше, чем в период 1958–1999 гг., и наблюдаемые в настоящее время климатические изменения носят положительный характер для сельскохозяйственной отрасли России.
Ключевые слова. Влажность почвы, климат, сезонный ход.

TIME SERIES ANALYSIS OF MOISTURE CONTENT IN A ONE-METRE SOIL LAYER IN THE EUROPEAN PART OF RUSSIA

A.V. Cherkasova
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. Observed changes in soil moisture conditions for European Russia are assessed. Key statistical characteristics are estimated for regions/territories/republics of European Russia for the periods 1958–1980, 1981–1999, and 2000–2024, and seasonal variation curves are calculated for four physical-agroclimatic regions. It is shown that soil moisture conditions are higher in the 21st century than in the period 1958–1999, and the currently observed climate changes are beneficial for Russia's agricultural sector.
Keywords. Soil moisture, climate, seasonal variation.

Пространственно-временная структура поля влажности почв зависит как географического их распределения, так и от климатических условий. Этот вопрос рассматривался в трудах Л.С. Кельчевской, А.В. Мещерской, Н.А. Болдыревой, Н.Д. Шапаевой, В.А. Жукова на данных наблюдений сети станций Госкомгидромета за период 1942–1980 гг. В настоящее время в условиях изменяющегося климата исследования увлажнения почв весьма актуально, что обусловлено их практической полезностью для сельского хозяйства.

В данной работы были использованы архивы средних по областям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы под ранними яровыми и озимыми зерновыми культурами за период 1958-2024 годы по 18 регионам ЕТР (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая, Орловская, Тамбовская, Пензенская, Ульяновская, Самарская, Саратовская, Оренбургская, Ростовская, Волгоградская и Астраханская области, Башкортостан, Калмыкия, Краснодарский и Ставропольский края). Осреднение влагозапасов по области и месяцу существенно сглаживает их, однако позволяет выявить значимые особенности поля, в первую очередь по времени, т.е. судить о наблюдаемых климатических изменениях.

Для изучения временной изменчивости архив данных общей длиной 67 лет был разделён на 3 периода 1958–1980, 1981–1999 и 2000–2024 гг.

Вероятностные характеристики

Для каждого периода были рассчитаны основные вероятностные характеристики. Расчёты выполнялись для каждой из областей, а затем были обобщены по четырём физико-географическим областям (центральные черноземные области, Среднее Поволжье, юг Урала, и Южный регион (Южный федеральный округ и Ставропольский край)).

В большинстве регионов средние и медианные значения влагозапасов значительно выросли на 10-35% от среднего за весь период.

За весь период 1958–2024 гг. в большинстве областей эксцесс близок к нулю (распределение близко к нормальному), в Самарской, Саратовской, Ростовской и Волгоградской областях он отрицательный (распределение имеет гладкий пик), а в Астраханской области – положительный (острый пик). Асимметрия также практически повсеместно близка к нулю, лишь в Астраханской области она равна 1,7, т.е. «длинный хвост» распределения находится в области повышенных значений влагозапасов.

Для оценки ресурсов почвенной влаги обычно используют 7 градаций увлажнения: суровая засуха (0–50 мм продуктивной влаги в метровом слое почвы), недостаточно (51–90 мм), удовлетворительно (91–120 мм), оптимум и ниже (121–140 мм), оптимум (141–160 мм), оптимум и выше (161–200 мм), переувлажнено (более 200 мм).

На рисунке 1 представлено распределение влагозапасов по градациям в апреле, т.е. в начале весны. В большинстве районов Черноземья весной увлажнение почвы во втором временном периоде повысилось по отношению к первому и в третьем по отношению у второму, частота попадания в градации ниже 100 мм («суровая засуха» и «недостаточно», что не обеспечивает получение урожая зерновых колосовых культур) понизилось.

Несколько хуже ситуация на юге страны – Южном федеральном округе и Ставропольском крае. Как видно из рисунка 1, частота весенних засух возросла с 3% в периоды 1958–1980 и 1981–1999 гг. до 7% в XXI веке. Однако по сумме двух неблагоприятных градаций («суровая засуха» и «недостаточно») ситуация улучшилась. Так, в период 1958–1980 гг. наиболее часто увлажнение почвы весной было недостаточным и пониженным (54%), в период 1981–1999 гг. и 2000–2024 гг. оно было

удовлетворительным и несколько ниже оптимума (около 60%), причём в последнем подпериоде оно было оптимальным и несколько ниже уже в 34% лет.

Аналогичная ситуация в южном регионе наблюдается и в мае: число лет с недостаточным увлажнение падает (60, 34 и 35% соответственно), а число лет с оптимальным увлажнением увеличивается (12, 20 и 25%).

С началом календарного лета влагозапасы везде понижаются: посевы активно растут, затраты влаги на транспирацию и рост тканей начинают превышать поступление влаги с осадками. Вместе с тем, тенденция к увеличению влагообеспеченности растений выражена довольно чётко. В центрально-чернозёмных областях, Среднем Поволжье и Южном Урале число лет с оптимальным увлажнением почвы возросло на 45–50%, в южном регионе ситуация несколько хуже, здесь рост составил всего 10%.

Особенно важно, что на юге страны в XXI веке сократилась частота суровых почвенных засух с 72 до 20%. Однако, нельзя утверждать, что эта тенденция сохранится, суровая засуха 2024 г., перешедшая в засуху 2025 г. существенно повлияла на продуктивность посевов в этом регионе.

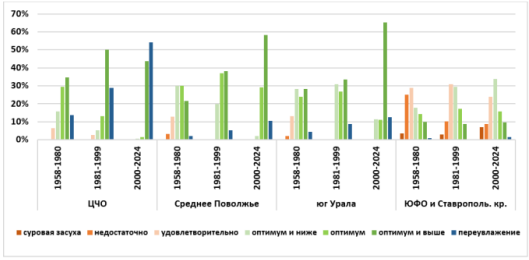


Рисунок 1 – Распределение по градациям запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в апреле

В июле и августе влагозапасы заметно понижаются, и практически на всей территории они варьируют от «удовлетворительно» до «суровой засухи» (за исключением центрально-чернозёмных областей). Однако число лет с плохими и недостаточными влагозапасами снизилось на 25–30%, лишь на юге страны оно осталось неизменным. Вместе с тем, в этот период озимые зерновые и зернобобовые культуры уже созревают, и ведется их уборка, поэтому дефицит влаги не сказывается на их продуктивности.

В сентябре влажность почвы увеличивается за счёт осадков. Также в этот период отбор проб для определения запасов продуктивной влаги проводят на полях с озимыми культурами или предназначенных под их посев. Озимые выращивают в основном по паровым предшественникам, т.е. по технологии увеличивающей количество влаги в почве. Сев озимых в большинстве регионов приходится на конец августа – сентябрь, поэтому увлажнение почвы в этот период важно для качественного производства посевных работ и появления дружных всходов.

Заметно понизилось число лет с суровой засухой в сентябре в южном регионе. Если в период 1958–1980 гг. почвенная засуха наблюдалась в 65% лет, то в период 2000–2024 гг. в большинстве лет (63%) увлажнение почвы было недостаточным, а в каждом пятом году даже удовлетворительным. В сентябре в южном регионе сев озимых, как правило, ещё только начинается, массовый сев производят в октябре, однако тенденция к уменьшению засушливости территории в сентябре в целом положительно влияет на условия для проведения полевых работ.

Сезонный ход влагозапасов

В ходе работы был оценён сезонный ход влагозапасов за период апрель – сентябрь для каждого физико-агроклиматического региона. Средние за декаду значения

влажности почвы рассчитывались методом квадратичных сплайнов средних за месяц значений. Такой метод позволяет получить сглаженный сезонный ход влагозапасов, нивелируя отдельные выбросы значений, связанные с экстремальными событиями.

Сезонный ход влагозапасов уточняет ранее приведённые расчётные данные по средним значениям и повторяемости по градациям. Изменения неодинаковы по времени, в одних регионах наиболее значителен «скачок» влагозапасов от 60–80-х годов прошлого столетия к его последнему двадцатилетию, в других наибольшие изменения происходят уже в нынешнем столетии.

Функции распределения

Повышение увлажнения почвы демонстрируют и кривые распределения Пуассона (весовые), построенные для разных областей/краёв и месяцев.

На рисунке 2 для примера представлены кривые распределения влагозапасов в метровом слое почвы в Ставропольском крае за апрель и июнь. На рисунке 2а видно, что весной со временем форма кривых практически не меняется, а происходит плавное смещение в область больших значений.

Иная ситуация летом (рисунок 2б). В первом подпериоде высота и острота кривой выше, чем во втором и третьем, причем кривые этих подпериодов практически идентичны.

Параметры распределения подбираются, исходя из отношения коэффициентов вариации и асимметрии. Если эта величина равна или превышает 2, то обычно используется распределение Пирсона III типа (четырехпараметрическое γ–распределение) и другие распределения, а если она меньше 2, то распределение Крицкого – Менкеля (трехпараметрическое γ–распределение). Нами были рассчитаны эмпирические кривые обеспеченности за весь период с 1958 по 2024 г. и проведено их сравнение с указанными выше аналитическими кривыми. Результаты исследования получились неустойчивыми: по одной области/краю в некоторые месяцы эмпирическое распределение хорошо аппроксимируется теоретическим, а в другие месяцы совершенно не совпадает. Объясняется этот факт неоднородностью рядов, а именно тем, что влагозапасы являются резко отклоняющейся величиной со значительной погрешностью измерений, которая связана как с редкостью сети станций, ведущих данные наблюдения, так и со сложностью выполнения отбора проб и их инструментальной и расчётной обработки.

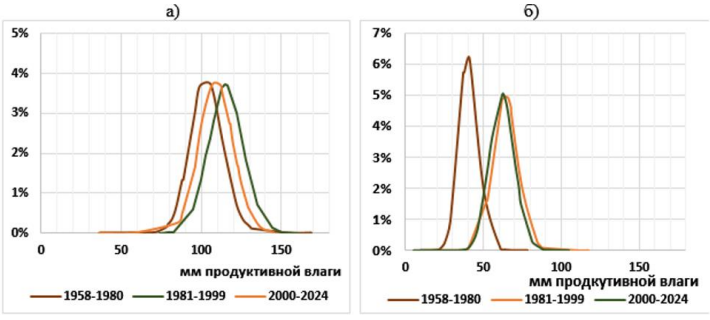


Рисунок 2 – Распределение Пуассона запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в Ставропольском крае в апреле (а) и июне (б)

Список литературы

1. *Кланг П.С., Тарасова Л.Л., Черкасова А.В.* Особенности пространственно-временной изменчивости влагозапасов в почве европейской территории России // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. №4(398). С.153-171 DOI: https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-153-171

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ОПАСНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ В АЭРОПОРТУ КАЗАНИ

Морева Е.А., Сабирова М.В.
Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань
eamoreva@kpfu.ru

Аннотация. В данном исследовании проведен анализ повторяемости таких опасных для авиации явлений как туманы, грозы, гололёд и метели. По данным ежечасных метеонаблюдений 2016-2020 гг. установлено, что частота и количество опасных явлений максимальны в холодный период (с ноября по март). Выявлено, что туманы и гололед чаще всего наблюдаются на аэродроме Казани в ночное и утреннее время, а грозы – в послеполуденное и вечернее. Повторяемость метелей не имеет ярко выраженного суточного хода. Наличие сведений о повторяемости позволяет аэропорту проводить своевременную работу по предупреждению, нейтрализации или смягчению последствий, связанных с опасными явлениями.
Ключевые слова. Аэропорт, опасные погодные явления, климат аэродрома.

FREQUENCY OF DANGEROUS WEATHER PHENOMENA AT KAZAN AIRPORT

Moreva E.A., Sabirova M.V.
Kazan (Volga region) Federal University, Kazan

Annotation. This paper presents an analysis the frequency of such dangerous weather phenomena for aviation as fog, thunderstorms, glazed ice, and snowstorms (blowing snows). During hourly meteorological observations from 2016 to 2020, it was established that the frequency and number of dangerous weather phenomena are maximum during the cold period (from November to March). It was found that fog and glazed ice are most often observed at the Kazan airfield at night and in the morning, and thunderstorms – in the afternoon and in the evening. The frequency of blowing snows does not have a clearly defined daily cycle. Having information about the frequency allows the airport to carry out timely work to prevent, neutralize or mitigate the consequences associated with dangerous phenomena.
Keywords. Airport, dangerous weather phenomena, airfield climate.

Воздушный транспорт осуществляет свою деятельность в условиях наиболее высокого риска метеорологической опасности. Сложные условия на взлете и посадке характеризуются ограниченной видимостью и такими опасными явлениями погоды, как грозы, шквалы, сильные ливневые дожди и вертикальный сдвиг ветра. В холодный период года опасность представляют снежные заносы, обледенение и туманы. При полёте на высотах наибольшую опасность создают грозы по маршруту, турбулентность и обледенение [1]. Целью данного исследования являлось изучение режима повторяемости таких опасных для авиации явлений как туманы, грозы, гололёд и метели.

Аэропорт Казани находится в 28 км от города в юго-восточном направлении. На расстоянии около 20 км к западу от аэродрома протекает река Волга. Территория аэродрома представляет собой пересеченную местность с максимальными отметками 105-125 м к востоку и югу от аэродрома, расположенными на расстоянии 4-6 км. Лесистость окружающей местности невелика: имеются отдельные небольшие лесные массивы в непосредственной близости от аэродрома в южном и юго-восточном направлениях и к северо-западу на расстоянии 10-15 км.

Повторяемость опасных явлений рассчитана на основании ежечасных наблюдений за пятилетний период с 2016 по 2020 годы, при этом учитывались кратковременные явления, отмеченные между сроками. Эти явления были отнесены к ближайшему сроку наблюдения. Разница между местным и всемирным скоординированным временем (ВСВ) составляет 3 часа.

Значение повторяемости вычисляется в процентах как отношение числа наблюдавшихся случаев явления к общему числу наблюдений [2]. Для суточного хода общее число наблюдений равно произведению числа дней в месяце на число лет; для годового хода дополнительно полученное число наблюдений умножается на число сроков (24 часа) [3]. В работе при вычислениях учтены високосные годы в подсчёте общего числа наблюдений.

Повторяемость рассчитывалась по срокам наблюдений за каждый месяц, после чего для каждого явления значения заносились в отдельную аэродромную климатическую сводку. В качестве примера приведена таблица 1 для повторяемости туманов из Руководящего документа [4].

Таблица 1 — Повторяемость туманов (%) в аэропорту Казани в период 2016-2020 гг.

Время (ВСВ), ч	Месяц												Средне-годовая
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
0	2,6	2,6	3,2	2,6	1,3	3,2	2,6	2,6	0,6	1,9	2,6	3,9	2,5
1	3,9	1,3	3,2	2,6	0,6	1,3	1,3	1,9	2,6	1,3	3,9	2,6	2,3
2	2,6	3,9	2,6	1,9	0	0,6	0	0,6	2,6	3,2	3,2	3,9	2,1
3	3,9	2,6	4,5	2,6	0	0,6	0	1,3	0,6	1,9	3,9	4,5	2,3
4	3,9	3,2	4,5	2,6	0	0,6	0	0,6	0,6	3,2	4,5	3,9	2,4
5	1,9	2,6	3,9	0,6	0	0	0	0,6	0,6	1,3	4,5	3,9	1,7
6	2,6	1,9	3,2	0,6	0	0	0	0,6	0	1,3	4,5	2,6	1,5
7	1,9	0,6	2,6	0	0	0	0	0	0	1,3	4,5	1,9	1,1
8	1,9	0,6	2,6	0	0	0	0	0	0	0,6	3,2	1,3	0,9
9	1,3	0,6	1,9	0	0	0	0	0	0	0,6	2,6	1,9	0,8
10	1,3	0,6	1,3	0,6	0	0	0	0	0	0	1,3	1,9	0,6
11	1,3	0	1,3	0	0	0	0	0	0	0	0,6	1,9	0,4
12	0	0	1,3	1,3	0	0	0	0	0	0	0,6	2,6	0,5
13	0	1,3	0,6	1,9	0	0	0	0	0	0	1,3	2,6	0,7
14	0	1,3	1,9	1,3	0	0	0	0	0	0	1,9	1,3	0,7
15	1,3	1,3	1,9	1,3	0	0	0	0	0	0,6	1,9	1,3	0,8
16	1,9	1,3	1,3	1,9	0	0	0	0	0	0,6	3,9	1,3	1,0
17	4,5	1,9	1,3	1,9	0	0	0	0	0	1,3	3,2	1,9	1,4
18	5,2	1,9	1,3	1,3	0	0	0	0	0	1,9	2,6	1,9	1,4
19	1,9	1,9	1,9	1,9	0	0	0	0	0,6	0,6	3,9	1,9	1,3
20	3,2	2,6	1,9	2,6	0	0,6	0	0	0	1,9	2,6	1,9	1,5
21	3,9	1,9	3,2	4,5	0	1,3	0	0,6	0	1,3	1,9	1,3	1,7
22	1,9	3,2	3,9	3,2	1,3	1,9	0	1,3	0,6	1,9	2,6	2,6	2,1
23	1,9	3,9	3,2	3,2	1,9	1,9	0,6	0,6	1,3	1,3	2,6	2,6	2,1
Средне-месячная	2,3	2,0	2,4	1,8	0,2	0,5	0,2	0,5	0,4	1,2	2,9	2,4	1,4

Туман ограничивает дальность видимости и затрудняет взлет и посадку воздушного судна. В аэропорту «Казань» наибольшая сезонная повторяемость туманов приходится на период с ноября по апрель (2,9% и 1,8% соответственно). В мае и июле число случаев с туманами минимально (0,2% от общего числа наблюдений за год). Суточная повторяемость тумана на аэродроме невелика: от 0% днем в летние месяцы до 4,5-5,2% в некоторые сроки наблюдений с ноября по март. Чаще всего в течение года туман отмечается в ночные и утренние сроки: с 17 ч до 7 ч по ВСВ (с 20 ч до 10 ч по местному времени). Максимум среднегодовой суточной повторяемости (2,5%) наблюдается в срок 0 ч по ВСВ или в 3 ч по местному времени. Реже всего в течение года (0,4-0,5%) туман отмечается в дневные часы - 11-12 ч по ВСВ (14-15 ч по местному времени).

В холодный период суточный ход повторяемости туманов менее выражен, чем в летний сезон. Причиной такой закономерности является формирование туманов разных типов. При рассмотрении суточного хода отдельных месяцев, можно отметить, что зимой наблюдается два максимума повторяемости — ранним утром и вечером. В среднегодовых значениях второго максимума нет. Также, в декабре наблюдается нехарактерное среднегодовым значениям некоторое повышение повторяемости туманов в дневное время. Это можно связать с деятельностью адвективных туманов, которые могут образоваться в любое время суток. Максимально продолжительный за исследуемый период туман (33ч 14мин) отмечался 28-30 декабря 2017 года.

К опасным для авиации явлениям погоды относится также и гололед. Для своевременного прогноза и для борьбы с ним необходимо знать повторяемость и условия образования этого явления. В суточном ходе повторяемости гололёда можно выделить те же максимумы и минимумы, что и в соответствующей повторяемости туманов, так как гололёд часто образуется за счёт намерзания на поверхности капель воды, содержащихся в туманах [5]. Гололёд наблюдается только в холодное время года (обычно с ноября по март, в некоторые годы явление регистрировалось в октябре и в апреле). Чаще всего благоприятные условия для образования гололеда на аэродроме Казани создаются в декабре и январе (по 3,1%) (рисунок 1).

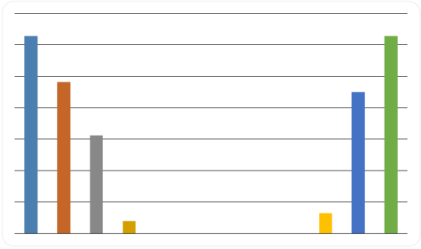


Рисунок 1 — Сезонный ход повторяемости гололеда (%) в аэропорту Казани в 2016-2020 гг.

Суточная повторяемость гололеда равна 0% в период 9-14 ч в марте и 13-14 ч по ВСВ в январе. Максимальные значения числа случаев явления (9% от общего числа наблюдений в данный срок) приходятся на 3 ч по ВСВ (6 ч по местному времени) в декабре. Суммарная общая продолжительность гололеда за сезон постепенно снижалась с 309,7 ч в 2016 до 110,4 ч в 2020 году.

Метель сопровождается ухудшением видимости и сильным ветром, что затрудняет взлет и посадку воздушных судов. В аэропорту Казани наибольшая сезонная повторяемость общей и низовой метели приходится на зимние месяцы. Чаще всего это явление отмечается в исследуемом периоде в январе – 8,3%. В суточном ходе максимальная повторяемость метели в январе приходится на дневное время: с 8 ч до 11 ч по ВСВ (11-14 ч по местному времени) и достигает 10,3-12,9%. В среднем за зиму, на казанском аэродроме в утренние сроки 7-8 ч (4-5 ч по ВСВ) и ночные 21 и 1 ч (18 и 22 ч по ВСВ) метели отмечаются реже всего (1,6-1,9%) (рисунок 2).

Повторяемость метелей характеризуется отсутствием ярко выраженного суточного хода, так как они связаны в основном с барическими системами, приход которых не имеет суточных закономерностей. Самая ранняя за сезон метель в исследуемом периоде отмечалась 2 ноября 2019 года, самая поздняя — 23 апреля в 2018 и 2020 годах.

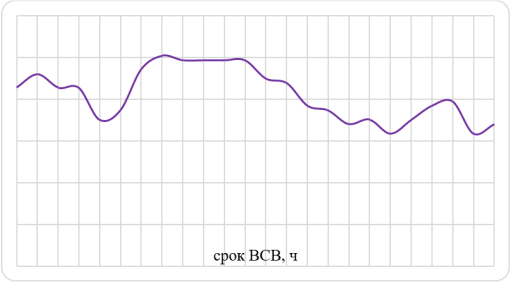


Рисунок 2 — Среднегодовой суточный ход повторяемости метелей (%) в аэропорту Казани в 2016-2020 гг.

Грозовая активность в Казани начинается в мае (в отдельных случаях — в апреле) и заканчивается в августе (в некоторые годы — в сентябре и октябре) (рисунок 3). Максимум повторяемости гроз соответствует максимуму годового хода температуры воздуха и приходится на июль (3,1%).

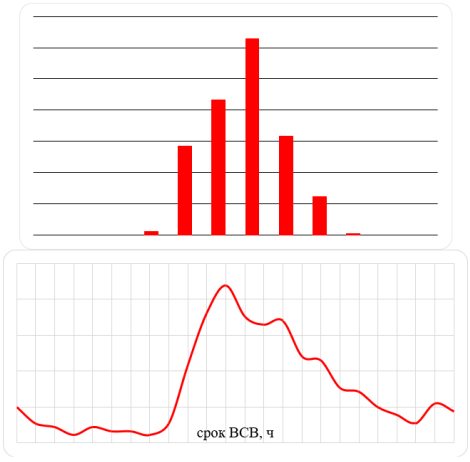


Рисунок 3 — Сезонный (сверху) и среднегодовой суточный (снизу) ходы повторяемости гроз (%) в аэропорту Казани в 2016-2020 гг.

Грозы преимущественно наблюдаются в дневное, послеполуденное и вечернее местное время (с 9 до 16 ч по ВСВ), что связано с максимальным развитием конвекции. Максимальная суточная повторяемость за сроки 14 и 17 ч по местному времени (11 и 14 ч по ВСВ соответственно) в июле достигает 9%. Самая ранняя гроза на аэродроме отмечалась за исследуемый период 15 апреля 2016 года, самая поздняя – 1 октября того же года. Гроза — самое опасное для авиации метеорологическое явление.

Полученные значения повторяемости имеют практическую значимость для авиации, так как способствуют своевременному реагированию и проведению мероприятий по подготовке воздушных судов к взлету и посадке в условиях наблюдения опасных явлений.

Список литературы

1. *Пчелко И.Г.* Авиационная метеорология, 1963 г. - 346 с.
2. *Маховер З.М.* Методические указания по составлению климатической характеристики аэродрома, 1989 г. - 38 с.
3. *Шталь В.А., Белов Н.Ф., Циценко Г.В.* Прикладная климатология, 1981 г. - 166 с.
4. РД 52.21.692-2007. Требования к составлению климатического описания аэродрома, 2007 г. - 41 с.
5. *Хромов С.П.* Метеорология и климатология для географических факультетов, 1968 г. - 491 с.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО И СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА НАД Г. ТОМСК

Беланович В.А., Акимов И.М.
Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск
vbelanovic15@gmail.com

Аннотация. Проведено сопоставление данных лидарного и спутникового зондирования облаков верхнего яруса с целью выявления расхождений результатов измерений. Использованы данные поляризационного лазерного зондирования атмосферы лидаром НИ ТГУ и реанализа MERRA-2. Выявлены основные типы совпадений и расхождений между измерениями, сделанными различными методами.
Ключевые слова. Облака верхнего яруса, высотный матричный поляризационный лидар (ВМПЛ), реанализ MERRA-2, сопоставление данных.

COMPARISON OF LIDAR AND SATELLITE SENSING DATA OF HIGH-LEVEL CLOUDS OVER TOMSK CITY

Belanovich V.A., Akimov I.M., Kuchinskaia O.I., Pustovalov K.N.
National Research Tomsk State University, Tomsk

Abstract. A comparison of lidar and satellite sensing data of high-level clouds was carried out to identify discrepancies in measurement results. Data from polarization lidar and MERRA-2 reanalysis were used. The main types of coincidences and discrepancies between measurements by various methods have been identified.
Keywords. High-level clouds, high-altitude matrix polarization lidar, MERRA-2 reanalysis, data comparison.

Введение. Облака верхнего яруса (ОВЯ) существенно влияют на радиационный баланс Земли и климатические процессы, что обуславливает актуальность задач их обнаружения и прогнозирования [1]. Для уточнения характеристик ОВЯ необходимо сопоставлять данные, полученные различными методами. В данной работе проведено сравнение результатов наземного лидарного и спутникового зондирования для выявления случаев их сходимости или расхождения. Полученные результаты будут использованы для верификации данных в рамках исследований по восстановлению информации о наличии ОВЯ методами машинного обучения.

Данные и методы. В работе использовались данные высотного матричного поляризационного лидара (ВМПЛ) Томского государственного университета. Лидар ориентирован вертикально и позволяет анализировать поляризационные характеристики обратно рассеянного облаками лазерного излучения. Лидар работает на длине волны 532 нм, энергия импульса составляет до 400 мДж, частота повторения импульса 10 Гц. Важным преимуществом ВМПЛ является высокое пространственное разрешение (от 37,5 до 150 м). [2].

Дополнительно к результатам лидарного зондирования в работе использовались данные реанализа MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) [3], подготовленного офисом GMAO (NASA). Данный массив представляет собой современный ретроспективный анализ атмосферы, охватывающий период с 1980 г. по настоящее время. Пространственное разрешение данных составляет 0,5°×0,625°, временное — 1 час для двумерных полей и 3 часа для трехмерных. Из архива MERRA-2 были извлечены профили облачности (CLOUD), а также массовой доли ледяной (QI) и жидкой (QL) фаз воды.

Методика сопоставления. Сопоставление профилей облачности (CLOUD), массовой доли льда (QI) и жидкой воды (QL) по данным реанализа MERRA-2 с границами ОВЯ, определенными согласно данным лидарного зондирования, проводилось по следующим критериям:

1. Степень соответствия высотных положений и амплитуд максимумов распределений QI и CLOUD.
2. Локализация максимумов указанных параметров внутри границ ОВЯ, определенных лидаром.

3. Модальность распределений CLOUD и QI (наличие одного или нескольких ярко выраженных пиков).

4. Сравнительный анализ ширины распределений CLOUD и QI относительно геометрической толщины облака по лидарным данным.

Вертикальный шаг сопоставления и допустимая погрешность определения высот во всех случаях составляли ±500 м.

Результаты. На рис. 1 представлен пример согласованности лидарных данных и результатов спутникового реанализа. Максимумы распределений облачности (CLOUD) и массовой доли льда (QI) локализованы на близких высотах и находятся в пределах облачного слоя, зафиксированного лидаром.

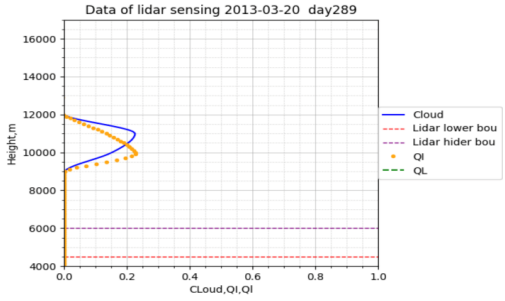


Рисунок 1 – Результаты спутникового и лидарного зондирования 14:25 28.10.2015 г.

Противоположная ситуация наблюдается на рисунке 2. Несмотря на то, что максимумы распределений по данным реанализа согласуются между собой, они смещены в более высокую область относительно данных лидарного зондирования. Вероятно, верхний облачный слой оказался оптически плотным для спутникового датчика, что препятствовало детектированию нижней части ОВЯ. В то же время лидарная система успешно обеспечила зондирование этого нижнего слоя.

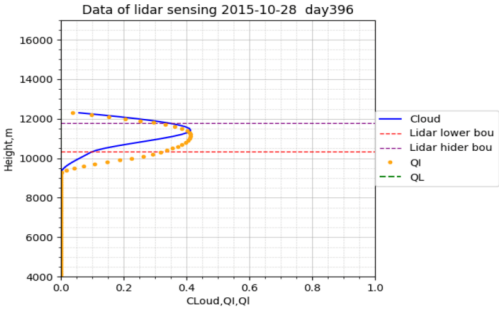


Рисунок 2 – Результаты спутникового и лидарного зондирования 18:54 20.03.2013 г.

На рис. 3 наблюдается частичное соответствие данных. Хотя максимум распределения CLOUD находится за границей лидарного профиля, это расхождение не превышает установленной погрешности. Предположительно, границы облачного слоя, определенные по лидарным данным, соответствуют диапазону между пиком массовой доли жидкой воды (около 6000) и пиком содержания льда (около 8500 м).

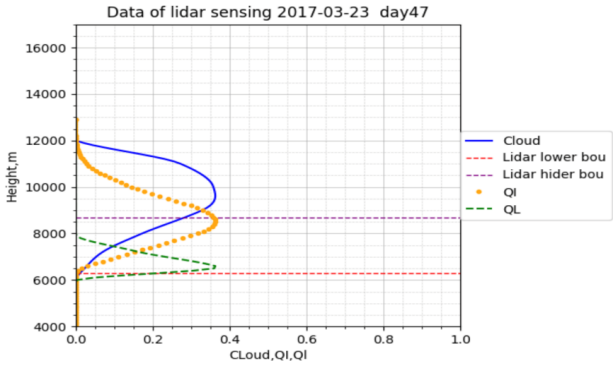


Рисунок 3 – Результаты спутникового и лидарного зондирования 12:34 23.03.2017 г.

На рисунке 4 также представлен случай расхождения результатов лидарных измерений и данных реанализа. Если нижняя граница ОВЯ, определенная лидаром, согласуется с данными MERRA-2, то верхняя граница лидарного профиля не охватывает облачные слои, расположенные выше. При этом наличие облачности на данных высотах подтверждается результатами спутникового зондирования.

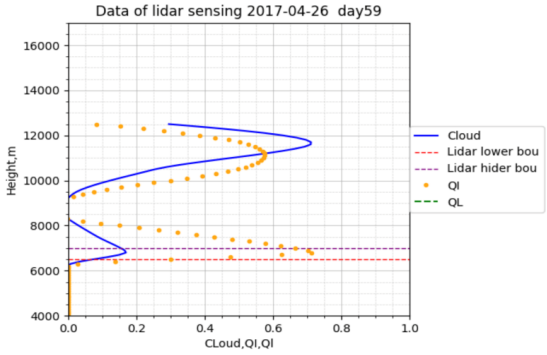


Рисунок 4 – Результаты спутникового и лидарного зондирования 12:46 26.04.2017 г.

Общий объем выборки составил 807 профилей. В 448 случаях (55,5%) максимумы распределений по данным MERRA-2 находились внутри высотных границ ОВЯ, определенных лидаром. В 315 случаях (39%) наблюдалось значимое расхождение данных, а 44 профиля (5,5%) были классифицированы как выбросы и исключены из анализа из-за неполноты данных. Особо го внимания заслуживает внутренняя согласованность параметров реанализа: в 307 случаях (38%) пространственные распределения CLOUD и QI не совпадали между собой. Это существенно затрудняет интерпретацию данных MERRA-2, так как облака верхнего яруса (ОВЯ) имеют преимущественно кристаллическую структуру [4]. Следовательно, наличие ненулевых значений параметра CLOUD при отсутствии соответствующих пиков массовой доли льда (QI) указывает на физическую неоднородность или методические особенности формирования полей реанализа.

Заключение. В работе проведено сопоставление 807 вертикальных профилей облачности (CLOUD), массовой доли льда (QI) и жидкой воды (QL) по данным реанализа

MERRA-2 (NASA GMAO) с результатами лидарного зондирования. Анализ показал согласованность данных в 55,5% случаев, где максимумы распределений реанализа находились внутри определенных лидаром границ облачных слоев (рис. 1). Основными причинами выявленных расхождений (39% случаев) являются высокая оптическая плотность облаков, ограничивающая лидарное зондирование вышележащих слоев (рис. 2, 4), а также методические особенности моделирования в MERRA-2. В частности, в 38% профилей наблюдалось несовпадение пиков CLOUD и QI: наличие облачности при отсутствии ледяной фазы на высотах формирования ОВЯ затрудняет физическую интерпретацию данных, учитывая преимущественно кристаллическую структуру таких облаков. Полученные результаты определяют границы применимости дистанционных методов зондирования ОВЯ и могут быть использованы для оптимизации алгоритмов обработки данных и улучшения алгоритмов обработки данных в дальнейшем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант No 24-72-10127.

Список литературы

1. *Xu, K.-M., & Sun, M.* Impact and variability of cloud types on Earth's top-of-atmosphere energy balance in the tropics: A 19-year analysis of high-resolution CERES data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2026, 131.
2. Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы и Томская ионосферная станция «ЛИДАР-ИОНОЗОНД». URL: https://ckp-rf.ru/usu/73573 (дата обращения: 21.01.2026 г.)
3. NASA, GMAO. Available online: *https://goldsmr5.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/hyrax/MERRA2/ (accessed on February 10, 2026).*
4. Magono, Choji; Lee, Chung Woo. Meteorological Classification of Natural Snow Crystals. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics, 2(4), 321-335.

ИССЛЕДОВАНИЕ АРКТИЧЕСКИХ ВТОРЖЕНИЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАД РОССИИ В ЗИМНИЙ СЕЗОН

Басакина А.В., Ефимова Ю.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
basakina.asya@yandex.ru

Аннотация: В научно-исследовательской работе проводится исследование траекторий циклонов при арктических вторжениях на северо-запад России за зимний период с 2014 по 2024 гг.. Получен и проанализирован архив арктических вторжений, исследованы гидрометеорологические условия при северо-западных и ультраполярных вторжениях на территорию исследования.
Ключевые слова: циклон, арктические вторжения, траектории

STUDY OF ARCTIC INVASIONS INTO NORTHWESTERN RUSSIA DURING THE WINTER SEASON

Basakina A.V., Efimova Yu.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg,

Abstract: This research paper examines cyclone trajectories during Arctic invasions into Northwestern Russia over the winter periods from 2014 to 2024. An archive of Arctic invasions was compiled and analyzed, and the hydrometeorological conditions during northwestern and ultra-polar invasions into the study area were investigated.
*Keywords***:** cyclone, arctic intrusions, trajectories

Арктические вторжения на северо-западную часть европейской территории России приводят к возникновению ряда неблагоприятных гидрометеорологических явлений: штормовые ветра, значительные перепады температуры воздуха. При движении с арктических морей циклоны негативно влияют на условия судоходства [1].

Исследование циклонических арктических вторжений за зимний период с 2014 по 2024 гг., с учетом того, что за последние десятилетия отсутствует систематизированный архив их траекторий, является задачей, несомненно, актуальной и практически значимой.

Целью работы является анализ вторжения циклонических систем из районов Арктики на Северо-Запад России за зимний период с 2014 по 2024 гг.

В работе были использованы данные приземных и высотных барических карт реанализа модели CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) [2].

В процессе научно-исследовательской работы был получен архив циклонических арктических вторжений. Анализ проводился по картам за основные синоптические сроки (за сроки 00, 06, 12, 18 UTC). Район исследования ограничен географическими координатами: 65° - 85° с.ш. и 20° - 70° в.д.

Построение обобщенных траекторий выполнялось синоптическим методом сгущения. Визуализация траекторий «ныряющих» циклонов выполнена с использованием языка программирования Python и библиотек Matplotlib и Cartopy. Всего было выявлено 62 случая выхода циклонов с районов арктических морей на территорию северо-запада России.

В результате анализа вторжения арктических циклонов были разделены на 4 группы: северо-западные (20 случаев), касательные (19 случаев), многоцентровые (19 случаев) и ультраполярные (4 случая).

Наиболее активным по выходу арктических циклонов за весь период наблюдений оказался 2018 и 2023 год (8 случая). Минимальное количество арктических вторжений наблюдалось в 2016 году (3 случай). Сезонный анализ показал, что максимум вторжений приходится на март и ноябрь (по 10 случаев), что объясняется максимальными температурными контрастами между Арктикой и континентом в переходные сезоны.

Основное внимание в работе было уделено северо-западным и ультраполярным вторжениям, как наиболее влияющим на территорию исследования (рисунок 1)

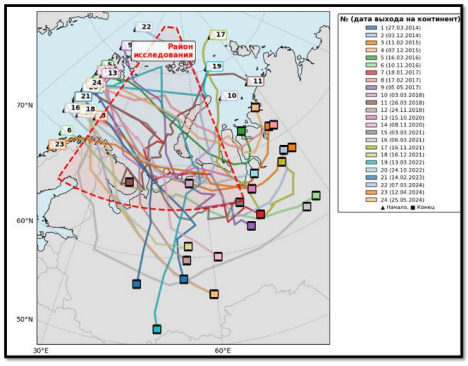


Рисунок 1 – Район исследования и траектории арктических циклонов (северо-западный и ультраполярный типы)

К северо-западным траекториям относились:

циклоны, двигающиеся с района о. Шпицберген на юго-восток и выходящие на Ненецкий АО;

циклоны, выходящие с Гренландского моря на акваторию Баренцева моря и смещающиеся на территорию Архангельской области;

циклоны, выходящие на территорию северо-запада РФ через Кольский полуостров.

К ультраполярным траекториям были отнесены циклоны, приходящие с архипелага Новая Земля или из акватории Карского моря в направлении на юго-запад. При выходе на территорию исследования их движение изменяется на восточное в соответствии в широтно направленным ведущем потоком.

В результате анализа гидрометеорологических условий, сопровождающих выход циклонов по северо-западным траекториям можно заключить, что северо-западные циклоны развивают скорость до 80 км/ч на участке от Кольского полуострова до Урала, давление падает на 27 гПа за 42–48 часов с момента входа на территорию, интенсивность осадков 5–10 мм за 6 часов, ветер в тыловой части фиксируется до 22 м/с. Ультраполярные вторжения вызывают значительные похолодание до –23°C в Ненецком автономном округе и восточной части Республики Коми, куда поступает прямой вынос арктического воздуха.

В результате анализа путей движения циклонов при арктических вторжениях выявлена определяющая роль ведущего потока: для ультраполярных циклонов именно высотная ложбина с ведущим потоком на картах AT-500 перестраивает траекторию циклона при выходе его на континент, разворачивая её на восток. Для северо-западных циклонов характерно их смещение под действием ведущего потока в умеренные широты южном и юго-восточном направлении.

В процессе работы Анастасией Витальевной Басакиной разработана авторская программа на Python для визуализации метеорологических полей по данным ERA5 с графическим интерфейсом (Tkinter), позволяющая в интерактивном режиме анализировать поля давления, температуры, ветра и осадков, а также автоматически фиксировать параметры центров циклонов.

В перспективе планируется верифицировать полученные траектории по данным метеостанций, детально оценить влияние рельефа Кольского полуострова и Уральских гор на эволюцию циклонов, а также расширить временной ряд для выявления многолетних климатических тенденций.

Список литературы

1. *Курочкин Л. Е.* Рекомендации по оценке влияния арктических вторжений при выборе маршрута плавания в Северной Атлантике / Л. Е. Курочкин, С. А. Подпорин, А. В. Холопцев. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центркаталог", 2021. – 80 с.

2. Реанализ CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) // Wetterzentrale: [сайт]. – 2026. – URL: https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr (дата обращения: 23.02.2026).

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА П.ОЙМЯКОН ЗА ПЕРИОД С 1961 ПО 2020 ГОД

Ламанов П.Д., Ефимова Ю.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
lamanovpav@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен анализ термического режима п.Оймякон за период с 1961 по 2020 год, проанализированы месячные, сезонные и годовые температуры, сделаны их градации и на основе этого определены аномальные значения, как месячные, так и суточные. Таким

образом, проведена сравнительная характеристика зависимости вечной мерзлоты от изменений климата на основе официальных данных.
Ключевые слова. Вечная мерзлота, климат, мониторинг, анализ, региональные изменения.

ANALYSIS OF CHANGES IN THE THERMAL REGIME OF P. OYMYAKON FROM 1961 TO 2020

Lamanov P.D., Efimova J.V.,
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Annotation. This article presents an analysis of the thermal regime of Oymyakon for the period from 1961 to 2020, presents monthly, seasonal, and annual temperatures, categorizes them, and identifies abnormal values based on both monthly and daily temperatures. Thus, a comparative analysis of the dependence of permafrost on climate change based on official data been conducted.
Keywords. Permafrost, climate, monitoring, analysis, international changes.

Современные научные исследования по изучению климата в Республике Саха (Якутия) основаны на комплексном подходе, включающем мониторинг климатических параметров, геофизические и геоинформационные методы, а также анализ статистических и эмпирических данных. Постоянный сбор инструментальных измерений температурных колебаний, влажности, атмосферных осадков и других климатических индикаторов ведется на сети метеостанций региона, что позволяет выявлять детальную динамику климатических изменений в пространственно-временном разрезе с высокой точностью. Наряду с этим активно применяются дистанционные методы – спутниковый мониторинг поверхности, анализ тепловых потоков и изменения растительного покрова, что даёт возможность отслеживать температурные аномалии и трансформации ландшафта на больших территориях. Такие исследования выполняются в рамках международных и межрегиональных проектов, что способствует обмену опытом и интеграции новых технологий. Использование методов больших данных, машинного обучения и климатического моделирования усиливает аналитический потенциал ученых, позволяя проектировать сценарии дальнейших изменений и оценивать риски для экосистем и населения. Ключевая задача этих исследований – разработка эффективных стратегий адаптации к климатическим вызовам, направленных на устойчивое развитие Республики Саха и сохранение культурно-исторического наследия коренных народов [2, 3].

Необходимое научное понимание механизмов потепления и его локальных особенностей становится основой разработки целенаправленных мер по смягчению негативных последствий. Перспективы исследований связаны с углублением изучения обратных связей в системе климат-морозный слой-гидросфера-биосфера, расширением мониторинга в труднодоступных районах и совершенствованием инструментальных методик. Интеграция результатов фундаментальных и прикладных исследований позволит выстроить комплексный подход к управлению изменениями в этой уникальной и уязвимой зоне, способствуя сохранению ее природных и социальных ресурсов в условиях продолжающегося глобального потепления [3].

Анализ температурных показателей воздуха в Якутии за последние десятилетия с 1943 по 2022 г.г. со станции Оймякона демонстрирует их устойчивый рост. Среднегодовые температуры воздуха увеличились на 1,5–2°C по сравнению с середины XX века, при этом зимние температуры повысились более резко, чем летние. Эти изменения связаны с глобальными климатическими процессами, но имеют специфичные региональные особенности из-за географического положения и континентального климата (рис.1). Рост температуры воздуха влияет на глубину сезонного оттаивания

активного слоя грунта и инициирует разрушение многолетнемерзлых горизонтов. Вследствие повышенных температур верхний слой вечной мерзлоты начинает терять стабильность. Появляются процессы термокарста – просадок и провалов грунта, вызванных таянием ледяных линз в почвах. Это изменяет рельеф, нарушает гидрологический режим и приводит к деградации растительного покрова, который тесно связан с морфологией почвенного слоя. Научные исследования фиксируют увеличение продолжительности вегетационного периода, смещение зон распространения лесов и изменение видового состава флоры, что отражает реакцию экосистем на изменяющуюся среду [2].

Рассмотрение сценариев на примере Якутии, находящейся в зоне вечной мерзлоты подчеркивает необходимость системного и регионально когерентного реагирования на вызовы изменения климата. Без принятия эффективных мер ожидается не только ухудшение природных условий, но и значительные социально-экономические последствия, затрагивающие миллионы людей и стратегически важные отрасли хозяйства. Таким образом, решающее значение имеет уже сегодня начало последовательных и комплексных действий, направленных на замедление деградации вечной мерзлоты и адаптацию к меняющимся климатическим реалиям. От этих мер зависит не только сохранность природных ландшафтов и инфраструктуры, но и качество жизни населения региона в ближайшие десятилетия [4, 5]

Целью работы является анализ температурного режима в Оймяконе за период с 1961 по 2022 г.г. для определения связи между потеплением климата и таянием вечной мерзлоты.

В научно-исследовательской работе были получены и проанализированы годовые значения температур воздуха в пункте Оймякон (рисунок 1).

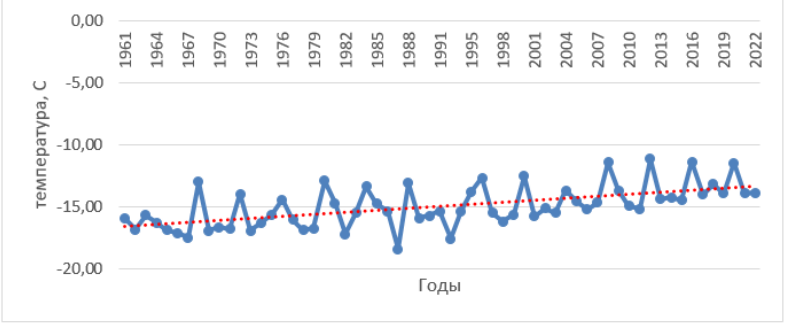


Рисунок 1 – Анализ среднегодовых температурных показателей воздуха в Оймяконе, 1961-2022 гг.

За период с 1961 по 2022 г.г. в Оймяконе наблюдается устойчивое повышение годовой температуры воздуха. Особенно явно это проявляется в последние три десятилетия (рисунок 1). В период С 1961 по 1990 среднее годовое значение составило -15,8^{0}С, а за последние 30 лет -14,2^{0}С Изменение составило столько градусов 1,6^{0}С. То есть мы можем видеть, что температура значительно повысилась (более чем на 1,5^{0}С). Следовательно, потепление климата подтверждается. Также в работе были получены и проанализированы аномалии годовых температур воздуха (рисунок 2).

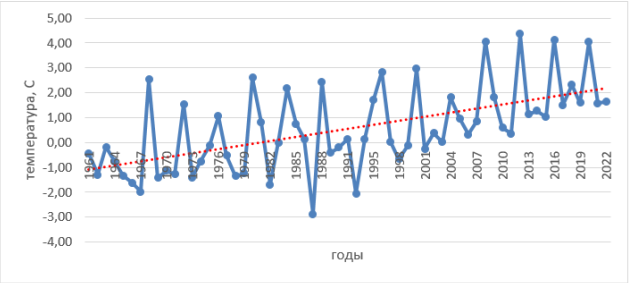


Рисунок 2 – Анализ аномалий среднегодовых температурных показателей воздуха в Оймяконе, 1961-2022 г.г.

В результате анализа температур воздуха (рисунок 2) можно заключить: начиная с 1985-ых годов прослеживается увеличение повторяемости случаев в Оймяконе выше нормы; наиболее значительно выделяется последнее десятилетие, аномалии температур воздуха превышают 2^0C; начиная с 2000 г. не было отмечено не одной отрицательной аномалии температуры воздуха. Самыми холодными по температуре воздуха были 1987 и 1993 г.г., отклонения температур воздуха от нормы составили $-2,9^0$C и $-2,1^0$C соответственно. Наиболее теплыми по температуре воздуха стали 2012 и 2016 г., отклонения температур воздуха от нормы составили $+4,36^0$C и $+4,13^0$C соответственно (рис. 2). То есть мы можем видеть, что самые теплые годы были именно в последнее тридцатилетие (с 1991 по 2020 г.г.), что также подтверждает потепление климата.

Анализ официальных данных со станции Оймякон за 1961-2022 г.г. позволил определить самые теплые и холодные года. Кроме того, мы провели анализ среднемесячных температур воздуха по двум базовым периодам: 1961-1990 и 1991-2020, а также рассчитали отклонения температуры воздуха, т.е. разницу между периодами в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ температуры воздуха в Якутии, 1961-2020 г.г.

месяц	периоды		отклонения
	1961-1990	1991-2020	
январь	-46,91	-45,57	1,34
февраль	-42,93	-42,17	0,76
март	-32,42	-30,17	2,25
апрель	-14,39	-12,72	1,67
май	2,01	3,36	1,35
июнь	11,54	12,74	1,20
июль	13,82	15,33	1,51
август	10,10	10,91	0,81
сентябрь	1,70	2,60	0,90
октябрь	-16,18	-13,73	2,44
ноябрь	-37,17	-34,20	2,97
декабрь	-45,61	-44,95	0,66

Анализ, представленных данных в таблице 1, показывает, что наблюдается общее потепление температуры воздуха в Якутии, практически во всех месяцах, кроме нескольких незначительных случаев, наблюдаются положительные отклонения (повышение температуры) в период 1991-2020 г.г. по сравнению с 1961-1990 г.г. Наибольшие положительные аномалии по температуре воздуха фиксируются в марте, октябре и ноябре (примерно +2.25, +2.44 и +2.97°C соответственно по таблице), что указывает на сильное потепление в переходные сезоны (весна и осень). Зимние месяцы

(январь, февраль, декабрь) показывают также потепление, но меньшей величины: январь ≈+1.34°C, февраль ≈+0.76°C, декабрь ≈+0.66°C. Летние месяцы (май-август) демонстрируют умеренное потепление: май ≈+1.35°C, июнь ≈+1.20°C, июль ≈+1.51°C, август ≈+0.81°C. Самые холодные средние месячные температуры остаются в декабре-январе (около −45…−46°C по норме 1961–1990 г.г. и ≈−45…−44 °C в 1991-2020 г.г.).

В процессе выполнения работы было выявлено, что из зимних месяцев за весь период исследования январь показывает самое значительное повышение температуры воздуха. В 2026 году в январе наблюдались аномально высокие температуры воздуха. Рассмотрим условия формирования термического режима в январе этого года.

12 января 2026 года срочная температура воздуха в пункте Оймякон достигла аномально высокого значения для данного времени года: -26, 5 0С в 22 ч по UTC. Норма для января составляет в Оймяконе -45,6 ^{0}С. В процессе исследовательской работы был проанализирован ряд срочных значений температуры воздуха за январь 2026 года в пункте Оймякон. В результате можно сделать вывод о том, что в течение большей части месяца наблюдалась температура воздуха выше нормы. Анализ синоптической ситуации для таких дней показал, что аномально высокие значения температуры воздуха в п. Оймякон формирует Охотский циклон. Начиная со второй декады января на акваторию Охотского моря активно смещались глубокие циклоны. Оймякон длительное время оказывался в северной, северо-западной высокоградиентной части циклона, наблюдалась облачная погода и адвекция более теплых океанических воздушных масс, что и привело в аномально высоким для этого месяца температурам воздуха.

Выводы. Повышение температуры действительно происходит, особенно явно оно в последние годы. Способствуют повышению мощные Охотские циклоны, которые закачивают более теплый воздух с океана в континентальные районы Сибири и нарушают обычную антициклоническую циркуляцию

Интерпретация и возможные последствия:

– усиление потепления в весенне-осенний периоды может ускорять таяние многолетней мерзлоты и влиять на гидрологию (изменение режима рек и озёр), что особенно критично для Якутии с распространённой вечной мерзлотой;

– положительные аномалии даже зимой означают более частые и продолжительные периоды оттепелей, что повышает риск деградации инфраструктуры (фундаменты, дороги, трубопроводы) и изменения экосистем (сдвиг границ леса и болот);

– умеренное потепление летом может увеличить вегетационный период, но также создать стресс для традиционного земледелия и животноводства через изменение осадков и почвенной влажности;

– наиболее значимые сезонные сдвиги (март, октябрь, ноябрь) указывают на удлинение межсезонья и более быстрые климатические переходы, что усложняет адаптацию природных и хозяйственных систем.

Таким образом, статистические данные, представленные в таблице 1 однозначно показывают общее потепление в Якутии в период 1991 – 2020 г.г. по сравнению с 1961 – 1990 г.г., причём наибольшее потепление приходится на переходные сезоны (март, октябрь, ноябрь). Эти изменения имеют существенные экологические и социально-экономические последствия, требующие дальнейшего детального исследования и адаптации.

Таким образом, наблюдаемые температурные аномалии и устойчивая тенденция к потеплению формируют фундамент для трансформаций природной среды в Республике Саха, задавая новые условия существования экосистем и человеческой деятельности на территории региона.

Потепление приводит к существенным физическим изменениям ландшафта Республики Саха (Якутия), затрагивая прежде всего верхний слой многолетнемерзлых грунтов, глубиной до 20 метров, что вызывает сдвиги и деформации почвенного основания. Появляются термокарстовые провалы и овраги, формируются крупные карстовые образования [1, 5].

Повышение температуры воздуха способствует изменению гидрологического режима озер и рек. Таяние мерзлоты приводит к изменению форм водоемов, а в ряде случаев – к исчезновению озер, что влияет на локальные водные экосистемы. На арктическом побережье ежегодно теряется около 10 квадратных километров суши из-за интенсивной эрозии, вызванной как таянием мерзлоты, так и воздействием морской волны [1, 2]. Повышение температуры воздуха приводит к смещению природных зон. Лесотундра постепенно отступает к северу на 70–90 километров. Замена традиционных мохово-лишайниковых сообществ на лесные массивы сопровождается трансформацией физико-химических свойств почв, их влажности и температуры [2, 3].

Анализ показал, что потепление негативно отражается на традиционных способах природопользования коренных народов, а также на состояниях жилых и производственных объектов, построенных на вечномерзлых грунтах. Инфраструктура, расположенная на мерзлом грунте, страдает от сдвигов и просадок почвы: повреждаются фундаменты домов, изнашиваются дороги и трубопроводы [4, 5]. В результате нарушения устойчивости грунтов происходят деформации зданий и инженерных сооружений, что приводит к высоким затратам на ремонт и реконструкцию, а в некоторых случаях создаёт угрозу безопасности жителей. В удалённых районах нарушение транспортных путей и коммуникаций осложняет доступ к социальным услугам, ухудшая качество жизни. Такие сложности оказывают влияние на экономику региона, включая добывающую промышленность и сельское хозяйство, которые сталкиваются с перебоями и дополнительными издержками, вызванными необходимостью адаптации к изменяющимся климатическим условиям. В сельском хозяйстве сокращение периодов стабильных морозов влияет на сроки посева и урожайность культур, что снижает продуктивность и устойчивость продовольственной системы региона [5].

Анализ современного климатического режима выявил устойчивую тенденцию к повышению среднегодовых температур воздуха, что вызывает углубление верхнего активного слоя почвы и ускорение процессов деградации мерзлоты.

Список литературы

1. *Ананичева М. Д.* Горные ледники Севера России: изменения за последние десятилетия под воздействием вариаций климата // М. Д. Ананичева, Ю. М. Кононов // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2020. Т. 3. – С. 42–72.

2. *Ананичева М. Д., Литвиненко Т. В., Филиппова В. В*. Изменение климата в республике Саха (Якутия) и его влияние на население: инструментальные измерения и наблюдения местных жителей // М. Д. Ананичева, Т. В. Литвиненко, В. В. Филиппова // Географическая среда и живые системы. – 2021. – № 3. – С. 6–21. DOI: 10.18384/2712-7621-2021-3-6-21

3. *Кириллина К. С.* Современные тенденции изменения климата республики Саха (Якутия) // Учёные записки. – 2013. – № 30. – С. 69–77.

4. *Медведков А.А.* Адаптация к климатическим изменениям: глобальный эколого-экономический тренд и его значение для России // Географическая среда и живые системы. – 2018. – № 4. – С. 11–19. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19.

5. *Тананаев Н.И.* Климатические аспекты планирования региональных мероприятий по адаптации к изменениям климата // Вестник СВФУ. – 2025. – № 1. – С. 85–97. DOI: 10.25587/2587-8751-2025-1-85-97.

СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ «ЛАДОЖСКИЙ СНЕГ»

Строчиков Б.Д., Иванова И.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
bstrochikov@bk.ru

Аннотация. Рассматриваются синоптические условия формирования локальных снегопадов, вызванных озёрным эффектом в районе г. Санкт-Петербурга.
Ключевые слова. Конвекция, локальная кучевая облачность, снег, водоёмы.

SYNOPTIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF THE "LADOGA SNOW" PHENOMENON

B.D. Strochikov, I.A. Ivanova
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. Synoptic conditions for the formation of localized snowfalls caused by the lake-effect phenomenon in the St. Petersburg region are considered.
Keywords. Convection, localized cumulus clouds, snow, bodies of water.

Географически г. Санкт-Петербург расположен на берегах Невской дельты и примыкающих островах. Два крупных водных объекта Финский залив (на западе) и Ладожское озеро (на востоке) определяют формирование локальных особенностей погоды.

Ладожское озеро относится к бассейну Балтийского моря Атлантического океана. Площадь озера: без островов 17,87 тысячи км², длина с юга на север — 219 км, наибольшая ширина — 125 км. Глубина изменяется неравномерно: в северной части она колеблется от 70 до 230 м, в южной — от 20 до 70 м [1]. Озеро редко замерзает полностью; в северной части остаются участки открытой воды.

Ладожский снег - это обильные снегопады, сформированные в определённых синоптических условиях.

Трудности прогнозирования таких снегопадов заключаются в правильной оценке условий их возникновения и интенсивности (прогноз количества осадков).

Обильные снегопады в холодный период года образуются на фоне высокой влажности у поверхности Ладожского озера, в сочетании с адвекцией холодного воздуха с северо-востока, востока.

Обычно и ожидаемо, кучево-дождевые облака наблюдаются в тёплый период года, сильно развиты по вертикали и имеют, как правило, небольшую (по сравнению со слоистообразными) горизонтальную протяженность. Основными процессами, приводящими к образованию кучевообразных облаков, являются термическая конвекция и турбулентный обмен. Наиболее благоприятные условия для возникновения конвективных движений создаются над сушей в теплую половину года — днем [2].

В случае «Ладожского снега» конвекция связана с тем, что, холодная воздушная масса, проходя над открытой водой (температура которой около 0 °С), становится неустойчивой и даёт возможность развитию конвективных движений. Кучево-дождевые облака не имеют такого развития по вертикали как облака в летнее время.

Сформировавшиеся кучево-дождевые облака, в соответствии с направлением ведущего потока, перемещаются на сушу и выходят на город, принося с собой осадки в виде снега, состоящего, по сути из Ладожской воды.

Для работы были отобраны случаи с локальным характером снегопадов или усилениях интенсивности осадков при соответствующих направлениях ветра в районе г. Санкт-Петербурга.

Всего было рассмотрено 4 случая явления «Ладожский снег».

Для всех случаев были выделены некоторые, объединяющие их синоптические условия.

Здесь, приведём в качестве примера, два из них.

Первый пример: 04.02-05.02.2018 г. На метеостанции Санкт-Петербург наблюдались кучево-дождевые и слоисто-кучевые облака со снежными осадками, а также северо-восточный ветер. Синоптическая ситуация приведена на рисунке 1.

На синоптической карте видно, что г. Санкт-Петербург находится на северо-западной периферии циклона над ЕТР. Такое синоптическое положение приводит к формированию северо-восточного ветра, со стороны Ладожского озера, над которым развиваются кучево-дождевые облака. На город выходят конвективные облака с осадками в виде снега.

Температура воздушной массы на высоте 1,5 км (АТ-850) составляла –15-17°С – 00UTC [4], что обеспечивало достаточные условия для развития неустойчивости. При этом все индексы конвективной неустойчивости (00UTC - CAPE: 15.47, Lifted index: 14.52, K index: -2.80 и 12UTC - CAPE: 0.04, Lifted index: 19.44, K index: -9.80 [4]) по данным зондирования на станции Воейково указывали на устойчивую стратификацию, без развития конвекции, что подтверждает локальное проявление эффекта Ладожского озера.

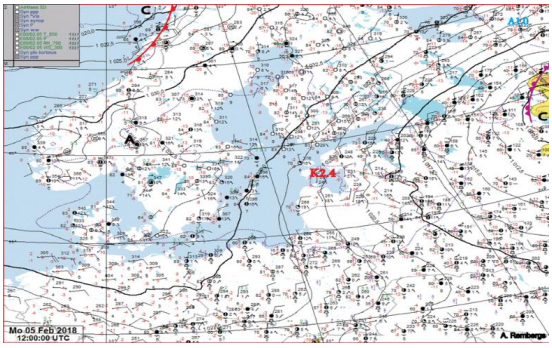


Рисунок 1 – Приземная синоптическая карта за 12UTC 05.02.2018 г. [3]

Интересно сравнить результаты прогноза количества осадков глобальными гидродинамическими моделями ICON, ECMWF и GFS с фактическими данным.

На метеостанции Санкт-Петербург по наблюдениям выпало за день с 09 ч. до 21 ч. 04.02 - 3 мм осадков [5].

Модель ICON даёт 0,3 мм осадков на тот же период, GFS 0,6 мм осадков. Модель ECMWF – 0,4 мм [6].

На метеостанции Санкт-Петербург по наблюдениям за ночь с 21 ч 04.02 до 09 ч.05.02 выпало 6 мм и за день с 09 ч. до 21 ч. 05.02 - 3 мм [5].

Модель ICON даёт 1,1 мм осадков на тот же период. GFS даёт так же 1,8 мм осадков. Модель ECMWF – 1,6 мм [6].

Разница между фактическими данными и данными моделей показывает недостаточный учёт моделями факторов формирования «Ладожского снега».

В качестве второго примера возьмём случай 25.10.2023. В этот день в г. Санкт-Петербурге наблюдалась погода со смешанными осадками при слабых приземных ветрах.

При этом направление ведущего потока северное. Температура на АТ-850 -10°С (00UTC). Над Ладожским озером у поверхности наблюдались ветры северо-восточного направления (Рисунок 2).

Прогностическое поле осадков хорошо подчёркивает особенности их формирования. В этот день осадки в большом количестве не достигли города, основная их часть выпала на побережье озера. По данным станции Воейково за день 25 октября 1 мм осадков.

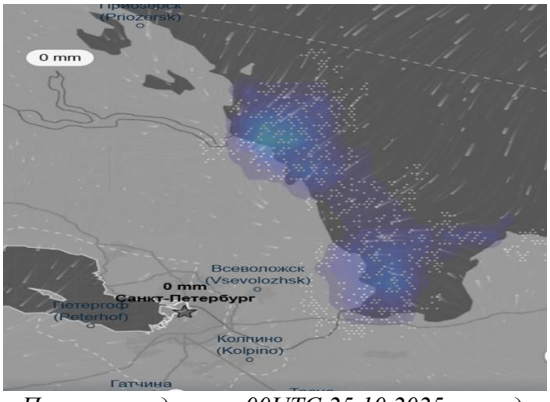


Рисунок 2 – Прогноз осадков на 00UTC 25.10.2025 г., модель ICON [6]

Синоптическая ситуация приведена на рисунке 3. Это малоградиентное барическое поле повышенного давления. Не характерная синоптическая ситуация для формирования конвекции.

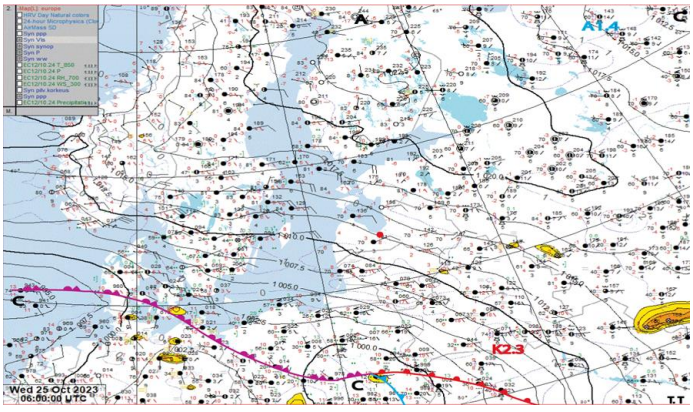


Рисунок 3 – Приземная Синоптическая карта за 06:00 часов UTC 25.10.2023 г. [3]

Так же были рассмотрены синоптические ситуации 22.12.2025 г. и 30.12.2025 г..

22 декабря «Ладожский снег» наблюдался в тыловой части циклона над севером ЕТР [3]. Температура на АТ-850: -15°С (12UTC), ведущий поток на АТ-700 северо-восточного направления (12UTC) [6]. Прогнозируемое количество осадков по данным гидродинамического моделирования на день 22.12.2015г.: ICON - 0,2 мм осадков, GFS -

0,4 мм осадков, ECMWF – 0,2 мм [6]. По фактическим наблюдениям на метеостанции Санкт-Петербург за период 9.00 -21.00 ч. 22.12. 2025 г. выпало 0,3 мм осадков [5], что соответствует прогнозируемому количеству.

30 декабря «Ладожский снег» наблюдался на северной периферии циклона, сформировавшегося по типу «ныряющего», который смещался с северо-запада и прошел через Санкт-Петербург центральной частью накануне [3]. Температура на АТ-850: -11 °С (09UTC), ведущий поток на АТ-700 северо-восточного направления (09UTC) [6]. Прогнозируемое количество осадков по данным гидродинамического моделирования на день 30.12.2015г.: ICON – 3,8 мм осадков, GFS 3,4 мм осадков, ECMWF – 3,0 мм [6]. По фактическим наблюдениям на метеостанции Санкт-Петербург 9.00 -21.00 ч. 30.12. 2025 г. выпало 5 мм осадков [5], что превышает прогнозируемое, но, в целом соответствует категории «умеренный снег» [7].

Таким образом, три рассмотренных случая «Ладожского снега» наблюдались на северных перифериях циклонов, в тыловых частях, при выраженной адвекции холода по высотам (арктическая воздушная масса), направление ведущего потока северо-восточное.

Один случай из рассмотренных наблюдался в малоградиентном барическом поле при адвекции холода, в арктической воздушной массе.

Качество прогноза осадков гидродинамическими моделями в рассмотренных ситуациях улучшилось в 2025 г. по сравнению с 2018 г.

Выявленные синоптические условия могут быть использованы в качестве дополнительных предикторов в прогностической работе.

Список литературы

1. Ладожское озеро. - Текст: электронный // wikipedia.org: [сайт]. - URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ладожское_озеро (дата обращения: 06.03.2026 г.).
2. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы [учебное пособие], 1965 г. - 534-535с.
3. Satelītu attēli un frontāla analīze. - Текст: электронный // videscentrs.lvgmc.l: [сайт]. - URL: https://videscentrs.lvgmc.lv/iebuvets/satelitu-atteli-un-frontala-analize (дата обращения: 23.02.2026 г.).
4. Upper Air Sounding Legacy. - Текст: электронный // weather.uwyo.edu: [сайт]. — URL: https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding_legacy.html (дата обращения: 06.03.2026 г.).
5. Погода в Санкт-Петербурге. - Текст: электронный // rp5.ru: [сайт]. - URL: https://rp5.ru/Погода_в_Санкт-Петербурге?ysclid=mmhw9zj11e899357424 (дата обращения: 07.03.2026 г.).
6. Ventusky - Прогноз погоды, радар и карты ветра. - Текст: электронный // ventusky.com: [сайт]. — URL: https://www.ventusky.com/ (дата обращения: 06.03.2026 г.).
7. Руководящий документ РД 52.27.724–2019 Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения, 2019 г. - 17 с.

МЕЗОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЗОНЕ ОБЛОЖНЫХ ОСАДКОВ

Митюшина В.С., Соловьева А.С., Малыгина Т.И., Кашлева Л.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
alexshh89@hotmail.com

Аннотация. Рассматриваются явления мезомасштабного характера в полях слоистообразных облаков, приводящих к изменению интенсивности осадков на порядок. Представлено проявление мезомасштабных структур на спутниковой и радиолокационной информации.

Анализируются поля осадков по данным метеостанции Петрозаводск за 03 февраля 2007г, за интервал дождя в течение 27 часов интенсивность осадков менялась от слабых до сильных. Такое изменение интенсивности осадков объясняется возникновением «ячеек затопленной конвекции».
Ключевые слова. Мезомасштабные структуры, поле осадков, интенсивность осадков, облака затопленной конвекции.

MEZOSCALE STRUCTURES IN THE AREA OF STEADY PRECIPITATION

Mitiushina V.S., Soloveva A.S., Malygina T.I., Kashleva L.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The phenomena of mesoscale nature in the fields of stratus clouds, leading to a change in the precipitation intensity by an order of magnitude, are considered. The manifestation of mesoscale structures in satellite and radar information is presented. Precipitation fields are analyzed based on data from the Petrozavodsk weather station for February 3, 2007. During a 27-hour rainfall interval, the precipitation intensity varied from light to heavy. Such a change in precipitation intensity is explained by the emergence of "cells of flooded convection".
Keywords. Mesoscale structures, precipitation field, precipitation intensity, flooded convection clouds.

Мезомасштабные неоднородности полей слоистообразных облаков могут существенно влиять на условия полета воздушных судов, конвективные ячейки внутри массива слоистообразных облаков практически не обнаруживаются визуально, их можно распознать с помощью спутниковых снимков или радиолокационных измерениях. Интенсивность осадков в таких полях может варьироваться, при этом усиливаясь до значений, которые характерны для ливневых осадков. Идентификация мезомасштабных процессов в зонах обложных осадков важна для составления краткосрочных прогнозов погоды, что повышает их качество.

Образования конвективных облаков в массиве слоистообразной облачности называются «ячейками затопленной конвекции», они обуславливают полосы выпадения интенсивных осадков.

Для наглядности процесса представлена обработка спутникового снимка (рис. 1-3) за 03 апреля 2024 года 09:10 utc с помощью метода синтезирования цветов для распознавания конвективной облачности внутри облачного массива.

На обработанных снимках легко дешифрируются полосы конвективных облаков, влияющих на распределение полей осадков всего облачного массива.

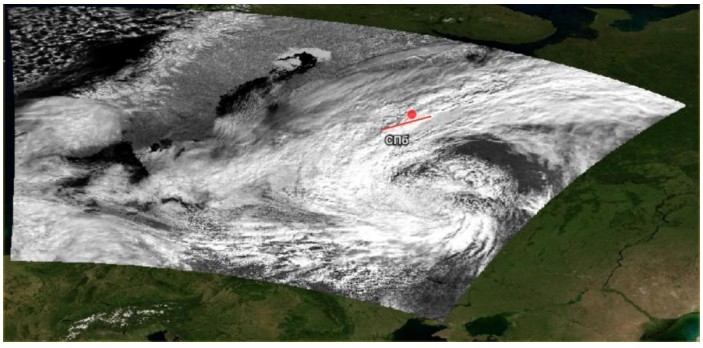


Рисунок 1 – Спутниковый снимок в видимом диапазоне 03.04.2024 за 09:10utc

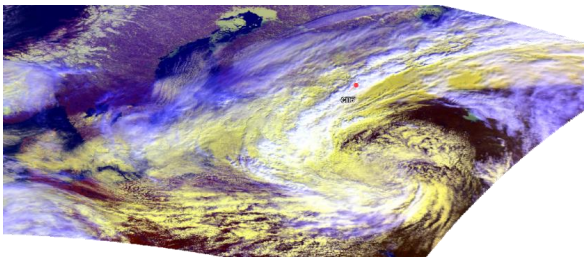


Рисунок 2 – Синтезированный снимок

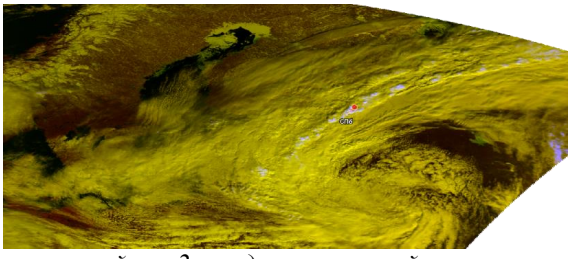


Рисунок3 – Преобразованный рис.2 с выделенными ячейками конвективной облачности

По данным радиолокации (рис.4) массив состоит из слоистообразных (высокослоистых и слоисто-дождевых) и конвективных облаков, также наблюдаются грозовые очаги, что свидетельствует о возможности наличия кучево-дождевой облачности. Высота конвективных облаков достигает 9 км.

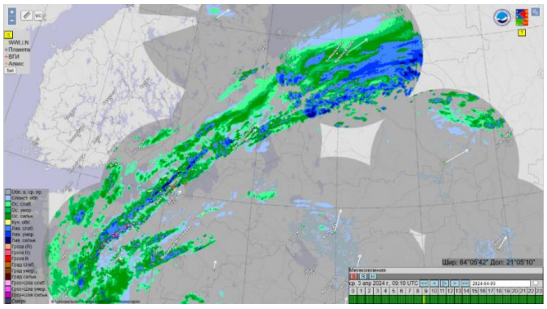
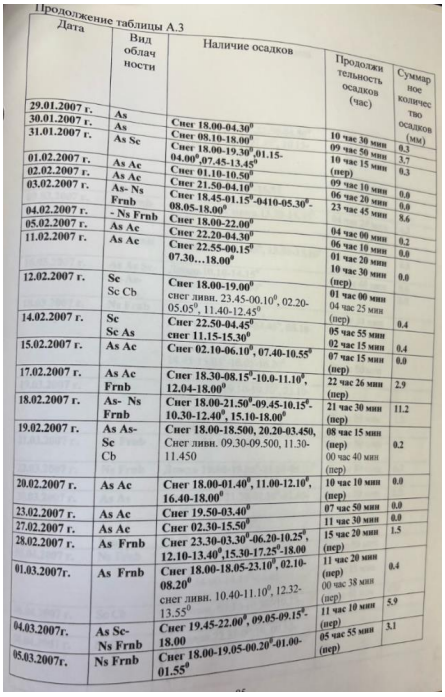


Рисунок 4 – Радиолокационные данные с веб-ресурса МЕТЕОРАД

В работе были использованы результаты исследований Подойниковой С. об осадках и облачности по материалам наблюдений метеорологической станции II разряда Петрозаводск за 2005-2007 гг. Особое внимание уделено анализу фронтальных осадков по приземным и барическим картам 2007 г., а также данным зондирования атмосферы с аэрологической станции Петрозаводск.

Для анализа поля осадков на теплом фронте использованы данные (табл.1), где подробно описаны все случаи с выпадением осадков, соответствующий вид облачности, продолжительность осадков, суммарное количество осадков за каждый случай по материалам метеорологической станции Петрозаводск в период с 2005 г. по 2007 г. В каждом случае указано время начала и окончания выпадения конкретного вида осадков, перерывы, а также время изменения интенсивности осадков: от слабой (значок сверху над временем «0») и умеренной (без значка сверху над временем) до сильной (значок

сверху над временем «2»). На основе таблицы, представленной на рисунке 5, была составлена таблица, представленная на рисунке 6 Характеристики структуры поля осадков фронтальной облачности по синоптическим ситуациям за 2007 г. [3].



Продолжение таблицы А.3

Дата	Вид облачности	Наличие осадков	Продолжительность осадков (час)	Суммарное количество осадков (мм)
29.01.2007 г.	As	Снег 18.00-04.30[0]	10 час 30 мин	0.3
30.01.2007 г.	As	Снег 08.10-18.00[0]	09 час 50 мин	3.7
31.01.2007 г.	As Sc	Снег 18.00-19.30[0],01.15-04.00[0],07.45-13.45[0]	10 час 15 мин (пер)	0.3
01.02.2007 г.	As Ac	Снег 01.10-10.50[0]	09 час 10 мин	0.0
02.02.2007 г.	As Ac	Снег 21.50-04.10[0]	06 час 20 мин	0.0
03.02.2007 г.	As- Ns Frnb	Снег 18.45-01.15[0]-0410-05.30[0]-08.05-18.00[0]	23 час 45 мин	8.6
04.02.2007 г.	- Ns Frnb	Снег 18.00-22.00[0]	04 час 00 мин	0.2
05.02.2007 г.	As Ac	Снег 22.20-04.30[0]	06 час 10 мин	0.0
11.02.2007 г.	As Ac	Снег 22.55-00.15[0] 07.30…18.00[0]	01 час 20 мин 10 час 30 мин (пер)	0.0
12.02.2007 г.	Sc Sc Cb	Снег 18.00-19.00[0] снег ливн. 23.45-00.10[0], 02.20-05.05[0], 11.40-12.45[0]	01 час 00 мин 04 час 25 мин (пер)	0.4
14.02.2007 г.	Sc Sc As	Снег 22.50-04.45[0] снег 11.15-15.30[0]	05 час 55 мин 02 час 15 мин	0.4
15.02.2007 г.	As Ac	Снег 02.10-06.10[0], 07.40-10.55[0]	07 час 15 мин (пер)	0.0
17.02.2007 г.	As Ac Frnb	Снег 18.30-08.15[0]-10.0-11.10[0], 12.04-18.00[0]	22 час 26 мин (пер)	2.9
18.02.2007 г.	As- Ns Frnb	Снег 18.00-21.50[0]-09.45-10.15[0]-10.30-12.40[0], 15.10-18.00[0]	21 час 30 мин (пер)	11.2
19.02.2007 г.	As As-Sc Cb	Снег 18.00-18.500, 20.20-03.450, Снег ливн. 09.30-09.500, 11.30-11.450	08 час 15 мин (пер) 00 час 40 мин (пер)	0.2
20.02.2007 г.	As Ac	Снег 18.00-01.40[0], 11.00-12.10[0], 16.40-18.00[0]	10 час 10 мин (пер)	0.0
23.02.2007 г.	As Ac	Снег 19.50-03.40[0]	07 час 50 мин	0.0
27.02.2007 г.	As Ac	Снег 02.30-15.50[0]	11 час 30 мин	0.0
28.02.2007 г.	As Frnb	Снег 23.30-03.30[0]-06.20-10.25[0], 12.10-13.40[0],15.30-17.25[0]-18.00	15 час 20 мин (пер)	1.5
01.03.2007г.	As Frnb	Снег 18.00-18.05-23.10[0], 02.10-08.20[0] снег ливн. 10.40-11.10[0], 12.32-13.55[0]	11 час 20 мин (пер) 00 час 38 мин (пер)	0.4
04.03.2007г.	As Sc-Ns Frnb	Снег 19.45-22.00[0], 09.05-09.15[0]-18.00	11 час 10 мин (пер)	5.9
05.03.2007г.	Ns Frnb	Снег 18.00-19.05-00.20[0]-01.00-01.55[0]	05 час 55 мин (пер)	3.1

Рисунок 5 – Исходные данные интенсивности и продолжительности осадков

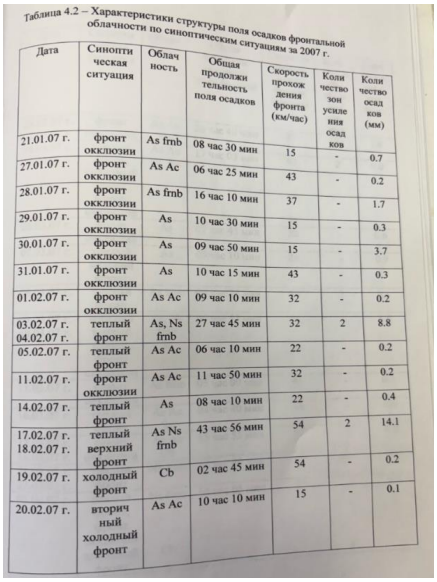


Таблица 4.2 – Характеристики структуры поля осадков фронтальной облачности по синоптическим ситуациям за 2007 г.

Дата	Синоптическая ситуация	Облачность	Общая продолжительность поля осадков	Скорость прохождения фронта (км/час)	Количество зон усиления осадков	Количество осадков (мм)
21.01.07 г.	фронт окклюзии	As frnb	08 час 30 мин	15	-	0.7
27.01.07 г.	фронт окклюзии	As Ac	06 час 25 мин	43	-	0.2
28.01.07 г.	фронт окклюзии	As frnb	16 час 10 мин	37	-	1.7
29.01.07 г.	фронт окклюзии	As	10 час 30 мин	15	-	0.3
30.01.07 г.	фронт окклюзии	As	09 час 50 мин	15	-	3.7
31.01.07 г.	фронт окклюзии	As	10 час 15 мин	43	-	0.3
01.02.07 г.	фронт окклюзии	As Ac	09 час 10 мин	32	-	0.2
03.02.07 г. 04.02.07 г.	теплый фронт	As, Ns frnb	27 час 45 мин	32	2	8.8
05.02.07 г.	теплый фронт	As Ac	06 час 10 мин	22	-	0.2
11.02.07 г.	фронт окклюзии	As Ac	11 час 50 мин	32	-	0.2
14.02.07 г.	теплый фронт	As	08 час 10 мин	22	-	0.4
17.02.07 г. 18.02.07 г.	теплый верхний фронт	As Ns frnb	43 час 56 мин	54	2	14.1
19.02.07 г.	холодный фронт	Cb	02 час 45 мин	54	-	0.2
20.02.07 г.	вторичный холодный фронт	As Ac	10 час 10 мин	15	-	0.1

Рисунок 6 – Характеристики структуры поля осадков фронтальной облачности по синоптическим ситуациям за 2007 г.

Первичный анализ исходных данных выявил неоднократные изменения интенсивности осадков как при ливневых, так и при более редких обложных дождях. Обложные осадки характеризуются неравномерностью — они то усиливаются, то ослабевают. В отличие от традиционного представления о плавном нарастании интенсивности при приближении теплого фронта, реальные изменения носят скачкообразный характер, что указывает на наличие дополнительных мезомасштабных структур, влияющих на неоднородность поля осадков.

Для анализа выбраны случаи осадков слоистообразной облачности, типичных для теплого фронта или фронта окклюзии (рисунок 7). В каждом эпизоде интенсивность менялась несколько раз; поле осадков представлено интервалами усиления и ослабления. Случаи без выраженных пиков интенсивности исключены.

Дата	Зона слабой интенсивности осадков (час)	Зона усиления интенсивности осадков (час)	Зона слабой интенсивности осадков (час)	Зона усиления интенсивности осадков (час)	Зона слабой интенсивности осадков (час)	Общее количество осадков (мм)
01.01.2007 г.	2.3	6.6	0.2	-	-	7.1
11.01.2007 г.	11.2	0.8	2.0	0.9	1.6	3.4
15.01.2007 г.	3.2	1.5	4.3	4.5	2.5	9.6
18.01.2007 г.	0.2	6.6	0.6	-	-	5.4
03.02-04.02.2007 г.	6.5	2.9	1.3	2.6	14.1	8.8
17.02-18.02.2007 г	13.8	1.8	11.8 (пер)	11.9	5.8 (пер)	14.1
28.02-01.03.2007 г.	4.0	2.8	11.1 (пер)	0.7	5.2	1.8
04.03-05.03.2007 г	0.2	9.8	4.9	0.7	0.9	9.0
08.03.2007 г.	2.7	1.6	0.2	-	-	0.3
09.03-10.03.2007 г.	2.4	3.8	0.3	-	-	5.5
21.03-22.03.2007 г.	2.9	1.9	9.8	-	-	9.4
05.04.2007 г.	3.4	7.8	1.3	-	-	4.9
11.04.2007 г.	3.4	3.5	0.3	-	-	1.8
28.04.2007 г.	2.1	0.3	3.1 (пер)	-	-	0.6
30.04.2007 г.	6.0	0.3	0.3	3.8	5.3	10.4
08.05.2007 г.	2.2	1.5	4.0 (пер)	-	-	3.6
09.05.2007 г.	3.1	1.8	2.3	0.8	0.6	
	0.6	4.1	6.5	-	-	19.7
15.05.2007 г.	5.2	0.3	1.0	-	-	3.5
22.05.2007 г.	3.5	1.5	1.9	-	-	4.9
23.05.2007 г.	0.3	1.5	6.3	-	-	11.6

Рисунок 7 – Относительная продолжительность интервалов времени выпадения осадков развития интенсивности при прохождении теплого фронта и фронта окклюзии за первое полугодие 2007 г.

Общая длина поля осадков варьируется от 100 до 1400 км. При скорости фронта 20 км/ч четко выделяются зоны усиления протяженностью 10–300 км (чаще 50–100 км), максимальные размеры которых наблюдаются осенью и зимой [3].

Причина усиления интенсивности на фоне слоистообразной облачности — развитие конвективных ячеек в полосах, параллельных фронту. Это обусловлено повышенной потенциальной неустойчивостью в тонком слое (2,5–4 км) на верхней границе теплого воздушного потока (рис.6). Обработка данных зондирования атмосферы за 2007 г. (рис.7) выявила неустойчивый слой на высотах 3–4 км. В частности, 3 февраля 2007 г. конвективные ячейки на этих высотах определили две зоны усиления осадков, подтвержденные наблюдениями метеостанции Петрозаводск.

По синоптическим картам видно, что территория Петрозаводска находилась под влиянием фронтальной системы барического образования. Фронт окклюзии приближался к метеорологической станции 03 февраля 2007 г. с 00 до 06 UTC, при этом на станции наблюдались обложные осадки по данным в табл.1. С 03 февраля 2007 г. 12 UTC по 04 февраля 2007 г. 00 UTC над станцией проходил теплый фронт, за этот период наблюдалось две зоны усиления интенсивности осадков – это видно по табл.2 и рис.5. Следовательно, это связано с ячейками затопленной конвекции.

Список литературы:

1. *Мазин И.П., Шметер С.М.* Облака, строение и физика образования. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1983. - 279 с.

2. *Назаренко А.В.* Опасные явления погоды конвективного происхождения // Опасные природные явления Часть III. Воронеж: ВГУ, 2008. - 62 с.
3. *Подойникова С.* Мезомасштабные структуры осадков облачности теплого фронта: выпускная квалификационная работа. Руководитель Кашлева Л.В. СПб.: РГГМУ, 2008.

ХИМИЯ ТРОПОСФЕРНОГО ОЗОНА И ЕЁ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Петренко Е.С., Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
elizabethocviv@gmail.com

Аннотация. Представлен комплексный обзор химии тропосферного озона, его источников, методов измерения и воздействия на окружающую среду. Рассмотрены фундаментальные различия в строении и свойствах молекулярного кислорода и озона, объясняющие высокую окислительную способность O_3. Проанализированы основные механизмы образования тропосферного озона: фотохимические реакции с участием оксидов азота и летучих органических соединений, стратосферно-тропосферный обмен, а также вклад молниевой активности. Особое внимание уделено негативным последствиям повышенных концентраций приземного озона: его роли как парникового газа (третьего по значимости после CO_2 и CH_4), воздействию на здоровье человека (респираторные заболевания, преждевременная смертность) и разрушению полимерных материалов. Описаны современные методы мониторинга тропосферного озона. Рассмотрены возможности химико-климатического моделирования, включая модель ИВМ РАН-РГГМУ и международные модели. Сделан вывод о необходимости мониторинга и снижения концентрации озона в тропосфере.
Ключевые слова. Тропосферный озон, химия тропосферы, мониторинг озона, химико-климатическое моделирование.

CHEMISTRY OF TROPOSPHERIC OZONE AND ITS ENVIRONMENTAL IMPACT

Petrenko E.S., Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. A comprehensive review of the chemistry of tropospheric ozone, its sources, measurement methods, and environmental impact is presented. Fundamental differences in the structure and properties of molecular oxygen and ozone, which explain the high oxidative capacity of O_3, are examined. The main mechanisms of tropospheric ozone formation are analyzed: photochemical reactions involving nitrogen oxides and volatile organic compounds, stratosphere-troposphere exchange, as well as the contribution of lightning activity. Special attention is paid to the negative consequences of elevated surface ozone concentrations: its role as a greenhouse gas (the third most significant after CO_2 and CH_4), its impact on human health (respiratory diseases, premature mortality), and the degradation of polymer materials. Modern methods for tropospheric ozone monitoring are described. The capabilities of chemical-climate modeling, including the INM RAS-RSHU model and international models, are discussed. A conclusion is drawn about the need for monitoring and reducing ozone concentrations in the troposphere.
Keywords. Tropospheric ozone, tropospheric chemistry, ozone monitoring, chemical-climate modeling.

Первое упоминание озона восходит в глубокую древность, встречаясь в поэмах Гомера. В 1785 году голландский физик Ван Марум в ходе опытов с электричеством обратил внимание на специфичный запах, появившийся при образовании искр в электрической машине, а также на окислительные способности воздуха после пропускания через него электрических искр. Вещество описано не было, поскольку Ван Марум считал его особой «электрической материей». **Свое название озон получил**

спустя несколько десятков лет, когда в 1840 году немецкий химик К. Шёнбейн впервые выделил чистый озон. Он же и дал веществу название, произошедшее от греческого слова ozein, означающее «пахнуть». Хант в 1848 году выдвинул предположение о том, что озон является не чем иным, как трехатомным кислородом. В 1865–1867-х годах швейцарский химик Ж. Сорэ провел ряд опытов со смесью кислорода и озона и выявил, что плотность озона в полтора раза превосходила плотность кислорода. По скорости диффузии озона и углекислого газа он установил молекулярную формулу, так хорошо известную нам сегодня [1]. Однако, несмотря на первоначальный интерес, озону не нашли достойного применения, а посему на некоторое время о нем позабыли. Вероятно, тернистый путь и временное забвение с лихвой компенсировалось бумом изучения озона в 20–21-х веках. Настоящее сложно представить без озона, ведь он применяется в химических синтезах, используется при создании полупроводников, важен для медицины и многих других отраслей деятельности человека, особенно для метеорологии и экологии.

Говоря о химических возможностях озона, стоит обратить особое внимание на его строение. Озон (O_3) является аллотропной модификацией кислорода и состоит из трех его атомов. Молекула имеет sp^2-гибридизацию, что обусловливает ее особые свойства и отличия от родственного кислорода. Температура кипения O_3 равна -112°C, в нормальных условиях он представляет собой бледно-голубой газ с характерным резким запахом.

Для наглядности сравним O_2 и O_3. В молекуле кислорода атомы соединены достаточно прочной двойной связью, она стабилизирована. Для того, чтобы ее разорвать, потребуется потратить около 498 кДж/моль, либо воздействовать на молекулу извне, например, нагреть. Все это говорит о том, что в атмосфере кислород практически инертен [2]. Ситуация с озоном обстоит иначе. Его молекула имеет изогнутую структуру с валентным углом в 116,8 градусов, а связь принято считать полуторной (данный порядок связи определяют одна связывающая и половина несвязывающей молекулярные орбитали). Длина каждой связи O–O равна 1,278 Å, что меньше длины одинарной, а энергия, необходимая для ее разрыва, в озоне значительно ниже, чем в молекуле O_2 и составляет всего 124 кДж/моль [3]. Поскольку электронная плотность внутри структуры O_3 распределена неравномерно, молекула полярна, а ее структуру представляют в виде локализованной или резонансной (рисунок 1). Окислительно-восстановительный потенциал в 2,07 эВ, легкость разрыва связей делает озон одним из сильнейших окислителей и электроноакцептором [4]. O_3 с легкостью участвует в реакциях даже при низких температурах.

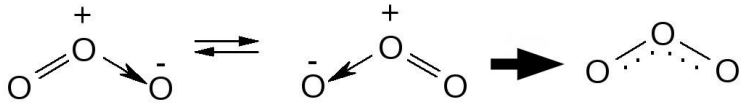


Рисунок 1 – Локализованные и резонансная структуры молекулы озона

Но откуда берется озон в атмосфере? Ответ на этот вопрос был предложен Чепменом в 1930г. Ученый предложил миру циклы фотохимических химических реакций (1-4), основные стадии которых можно описать следующим образом:

$$O_2 \overset{h\nu}{\rightarrow} O^{(3P)} + O^{(3P)} \quad (1)$$

$$O_2 + O^{(3P)} + M \overset{h\nu}{\rightarrow} O_3 + M \quad (2)$$

$$O_3 \overset{h\nu}{\rightarrow} O_2 + O^{(3P)} \quad (3)$$

$$O^{(3P)} + O_3 \overset{h\nu}{\rightarrow} 2O_2 \quad (4)$$

Если говорить об общем количестве озона в атмосфере, то оно крайне мало и преимущественно сконцентрировано в слое от 10 до 50 км. Стратификация O_3 в атмосфере неоднородна и изменчива во всех слоях атмосферы, она сильно зависит от времени года, широтности, глобальной циркуляции и других немаловажных факторов. Минимальное содержание озона в тропосфере наблюдается осенью, а максимальные значения выпадают на весенние месяцы (рисунок 2). При этом вариативность содержания озона в тропосфере зависит от времени суток [5].

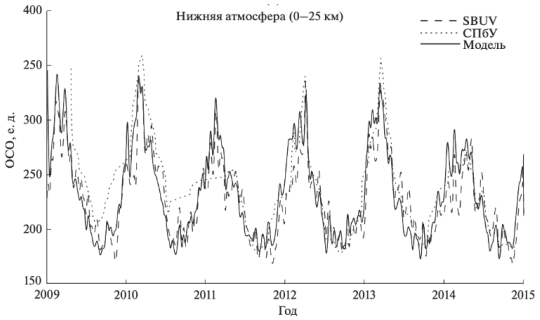


Рисунок 2 – График распределения общего содержания озона в атмосфере в слое 0-25км вблизи г. Санкт-Петербурга в 2009-2014 гг.

Модель образования озона, предложенная Чепменом и включающая в себя реакции фотолитической диссоциации озона, а также фотолиза атомарного кислорода и реакции его рекомбинации, несовершенна, однако в ансамбле с другими реакциями исправно работает, хотя все же больше пригодна для стратосферы, чем для тропосферы. Говоря о нижнем слое атмосферы, главным источником озона является фотохимический смог – оксиды азота и летучие органические соединения (ЛОС), являющиеся продуктами реакции горения органики. Базовый химический цикл можно было бы описать следующими реакциями:

$$NO_2 \overset{h\nu}{\rightarrow} NO + O^{(3P)} \quad (5)$$

$$O_2 + O^{(3P)} + M \overset{h\nu}{\rightarrow} O_3 + M \quad (6)$$

$$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2 \quad (7)$$

Значительный вклад в образование озона вносит также стратосферно-тропосферный обмен (STE), на долю которого приходится около 10-20% O_3, содержащегося в тропосфере [6], а также молниевая активность. Но почему настолько полезный озон считается защитником в стратосфере и одновременно с этим опасным врагом для тропосферы? Ответ на этот вопрос снова кроется в его химических свойствах.

Еще в далеком 1873 году Джеймс Дьюар и Джон Грей Маккендрик провели исследование влияния озона на физиологию животных. После воздействия «озонированного воздуха» подопытные становились вялыми, тяжело дышали, затем и вовсе умирали. Озон, при непосредственном контакте, разрушительно воздействовал на живые ткани, однако подобная угроза нивелировалась, если их покрывали жидкостью [7]. Несмотря на это, в 1896 году Никола Тесла, проявивший недюжинный интерес к дезинфицирующим свойствам O_3, запатентовал первый генератор озона под названием «Фиолетовый луч» для стерилизации и использовании вещества в медицине и других областях, например, для очистки воздуха [8]. Однако в начале 20-го века его детище подверглось жесткой критике со стороны медицинского сообщества.

В 1920 году французские учёные Шарль Фабри и Анри Бюиссон впервые определили общее содержание озона в атмосфере, и это стало основой современных методов озонометрии. Фабри и Бюиссон доказали, что концентрация O_3 – величина изменчивая, к тому же он поглощает существенную долю ультрафиолетового излучения. Вскоре, в 1929 году, был создан спектрофотометр Добсона для наблюдения озона и тогда же была создана Международная комиссия по озону [9]. Общий уровень озона (количество озона в данной вертикальной колонке) в атмосфере измеряется в единицах Добсона: 1 DU равняется слою O_3 толщиной 10 мкм при стандартных давлении и температуре, т.е, $2{,}69 \cdot 10^{16}$ молекулам озона на квадратный сантиметр поверхности Земли или 0,447 миллимолям на квадратный метр.

Количественная оценка озона в тропосфере и отслеживание его влияния на среду и жизнедеятельность живых организмов крайне важна. С одной стороны, стратосферный озон поглощает УФ излучение Солнца, вредное для живых клеток, потому так важен для нас озоновый слой. Однако, с другой стороны, в тропосфере превышение содержания O_3 грозит весьма серьезными последствиями.

Рассмотрим простейшую реакцию озона с углеродом при нормальных условиях, в результате которой образуется углекислый газ:

$$2C + 2O_3 \rightarrow 2CO_2 + O_2 \quad (8)$$

Значит, можно сделать вывод о том, что озон усиливает парниковый эффект. Исследования показывают, что ЛОС и оксиды азота увеличивают концентрацию самого O_3, а он, в свою очередь, активно поглощает инфракрасное излучение поверхности земли в тропосфере, повышая ее температуру. По современным данным, озон является третьим по значимости воздействия на климат газом, составляющим около 10% воздействия антропогенного характера [10]. Озон в тропосфере собрал множество регалий: мощный окислитель и участник процессов химии высоких энергий, вредитель. Результатами его «работы» могут стать разрушения структуры металлов и полимеров, среди которых каучук, лакокрасочные изделия, материалы для облицовки зданий. Что касается воздействия на жизнь человека, то, согласно глобальному исследованию, примерно полмиллиона преждевременных смертей ежегодно связано с воздействием озона, главным образом из-за респираторных причин [11].

Ввиду всех вышеперечисленных причин крайне важно контролировать содержание озона в приземном слое. На данный момент в России действует ПДК, по которому концентрация не должна превышать 0,03 мг/м³ [12]. Непосредственно содержание озона измеряют с помощью различных методов, среди которых спектрофотометры (Добсона и иные), ИК-зондирование с помощью спутников (ИКФС-2 и др.) (рисунок 3), газоанализаторы, озонозонды, самолетное и ракетное зондирование, лидарные методы, дроны с индиготрисульфонатом калия [13].

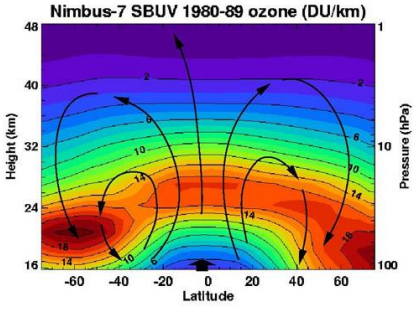


Рисунок 3 – Распределение концентрации озона по данным спутника Nimbus-7

Говоря о моделировании озона, нельзя не упомянуть модель ИВМ РАН-РГГМУ, вычисляющая как общее содержание озона, так и его концентрацию в различных слоях атмосферы, в частности тропосферы [14]. Существуют и другие глобальные, региональные и транспортные химико-климатические модели - SOCOLv3, CAM-chem, GEOS-Chem, WRF-Chem, MOZART, CHARM. В исследованиях зачастую используется ансамблевый метод, так как многие модели имеют свои достоинства и недостатки, а подобный подход к моделированию делает прогноз точнее.

Список литературы:

1. *Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И.* Электросинтез озона. М., 1987.
2. Bond dissociation energy of O_2 measured by fully state-to-state resolved threshold fragment yield spectra // The Journal of Chemical Physics. – 2024. – Vol. 160, № 16. – Article 164302.
3. *Hay P. J.* Geometries and energies of the excited states of O_3 from ab initio potential energy surfaces / P. J. Hay, T. H. Dunning // The Journal of Chemical Physics. – 1977. – Vol. 66, № 5. – P. 2290–2306.
4. *Шиян Л. Н.* Химия воды. Водоподготовка: учебное пособие / Л. Н. Шиян. — Томск: Изд-во ТПУ, 2004. — 72 с.
5. *Смышляев С. П.* Межгодовые и сезонные вариации содержания озона в разных высотных слоях атмосферы Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования / С. П. Смышляев, Я. А. Виролайнен, М. А. Моцаков [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2017. — Т. 53, № 3. — С. 301–315. — DOI: 10.7868/S0002351517030118.
6. Stohl A. Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO / A. Stohl, P. Bonasoni, P. Cristofanelli [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2003. – Vol. 108, № D12. – P. 8516. – DOI: 10.1029/2002JD002490.
7. Anstie, Francis Edmund, and Henry Lawson, editors. The Practitioner. Vol. 12, John Brigg, 1874, p. 143
8. *Л. С. Ковальчук* Исторический обзор развития озонотерапии // Проблемы здоровья и экологии. 2006. №3 (9). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/istoricheskiy-obzor-razvitiya-ozonoterapii (дата обращения: 10.03.2026).
9. *Хргиан А. Х.* Физика атмосферного озона / А. Х. Хргиан; под ред. Г. Я. Русаковой. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1973. — 291 с.
10. *Смышляев С. П.* Спутниковые исследования пространственной и временной изменчивости содержания озона в тропосфере над территорией России / С. П. Смышляев, Я. А. Виролайнен [и др.] // Лаборатория Исследований Озонового слоя и Верхней Атмосферы СПбГУ. — 2023. — URL: https://o3lab.spbu.ru/issledovaniya/proekty/sputnikovye-issledovaniya-prostranstvennoj-i-vremennoj-izmenchivosti-soderzhaniya-ozona-v-troposfere-nad-territoriej-rossii.html (дата обращения: 15.03.2026).
11. *Lin K.* Comprehensive insights into the disease burden linked to air pollution exposure across U.S. states: findings from the 2021 Global Burden of Disease Study / K. Lin, J. Quan, J. Liao [et al.] // Frontiers in Public Health. – 2025. – Vol. 13. – Article 1636544. – DOI: 10.3389/fpubh.2025.1636544.
12. ГОСТ Р 52985-2008 Экологическая безопасность. Общие технические требования. – Введ. 2009-03-01. – Москва: Стандартинформ, 2008. – Приложение Г (справочное) "Экологически допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, воде и почве (грунте)".
13. *Campos P. P. E. Drone- and Paper-Based* Analytical Devices: A Powerful Combination for the Colorimetric Detection of Tropospheric Ozone / P. P. E. Campos, H. A. Silva-Neto, L.

C. Duarte [et al.] // Analytical Chemistry. – 2025. – Vol. 97, № 29. – P. 15818–15825. – DOI: 10.1021/acs.analchem.5c01889. – PMID: 40668975.
14. *Смышляев С. П.* Исследование эволюции озонового слоя Земли с помощью новой версии химико-климатической модели ИВМ РАН - РГГМУ / С. П. Смышляев, А. Р. Яковлев // ISARD-2025: материалы конференции. – 2025. – Доклад № ISARD-2025-ozon004. – URL: https://ucp.academy/events/ISARD-2025/abstract/ISARD-2025-ozon004 (дата обращения: 10.03.2026)

ЭФФЕКТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ В БУХТЕ ТИКСИ

Касьянова А.М.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
isa.kasian@mail.ru

Аннотация. В работе выполнен сравнительный анализ ветрового режима на трех полярных станциях Российской Арктики — о. Визе (открытая акватория Карского моря), о. Котельный (фоновый режим моря Лаптевых) и бухта Тикси (материковое побережье, защищенное хребтом Хараулах). На основе данных наблюдений за 2015–2025 гг. установлено, что, вопреки ожиданиям, максимальные скорости ветра фиксируются не на открытых островных станциях, а в защищенной бухте Тикси. Абсолютный рекорд периода составил 41 м/с (январь 2025 г.). Выполнен синоптический анализ экстремального случая, позволивший выявить механизм орографического усиления ветра при сочетании сверхвысокого барического градиента и сжатия потока в бухте (эффект «аэродинамической трубы»). Полученные результаты демонстрируют определяющую роль локальных факторов в формировании ветрового режима Арктики.
Ключевые слова. Ветровой режим, Арктика, орографическое усиление, бухта Тикси, остров Визе, остров Котельный, аэродинамическая труба, экстремальные порывы ветра.

THE WIND TUNNEL EFFECT IN TIKSI BAY

Kasianova A.M.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
isa.kasian@mail.ru

Annotation. The paper presents a comparative analysis of the wind regime at three polar stations in the Russian Arctic — Vize Island (open waters of the Kara Sea), Kotelny Island (background regime of the Laptev Sea) and Tiksi Bay (mainland coast protected by the Kharaulakh Ridge). Based on observational data for 2015–2025, it was found that, contrary to expectations, maximum wind speeds are recorded not at open island stations, but in the protected Tiksi Bay. The absolute record for the period was 41 m/s (January 2025). A synoptic analysis of the extreme case was performed, which revealed the mechanism of orographic wind amplification due to a combination of ultra-high pressure gradient and flow compression in the bay ("wind tunnel" effect). The results demonstrate the decisive role of local factors in the formation of the Arctic wind regime.
Keywords. Wind regime, Arctic, orographic amplification, Tiksi Bay, Vize Island, Kotelny Island, wind tunnel, extreme wind gusts.

Арктический регион играет ключевую роль в формировании глобальной климатической системы, а изучение его метеорологического режима имеет важное значение для обеспечения безопасности мореплавания по Северному морскому пути и развития прибрежной инфраструктуры [1]. Согласно классическим представлениям метеорологии, характер подстилающей поверхности является одним из важнейших климатообразующих факторов [2]. Принято считать, что открытые островные территории с минимальной шероховатостью подвержены наиболее сильному ветровому

воздействию, в то время как защищенные бухты и долины создают условия для застоя воздуха и ослабления ветра.

Для проверки этой гипотезы были выбраны три полярные станции Российской Арктики, представляющие разные типы подстилающей поверхности (Рисунок 1): остров Визе (открытая акватория Карского моря), остров Котельный (фоновый режим моря Лаптевых) и бухта Тикси (материковое побережье, окруженное отрогами хребта Хараулах). Анализировались среднемесячные значения максимальных порывов ветра за 10-минутный интервал (*ff10*), повторяемость направлений ветра (розы ветров), а также абсолютные максимумы на станциях Тикси (WMO 21824), о. Визе (WMO 20069) и о. Котельный (WMO 21432) за период 2015–2025 гг. [3].



а) *б)* *в)*

Рисунок 1 – Спутниковые снимки районов исследования: бухта Тикси (а), о. Котельный (б), о. Визе (в)

Сопоставление среднемесячных значений ff10 на трех станциях (Рисунок 2) выявило устойчивое превышение показателей Тикси над островными станциями в холодный период года (ноябрь–март). В январе разница с о. Котельный достигает 3,3 м/с, с о. Визе — 2,6 м/с. В летний период (июнь–август) различия минимальны и не превышают 0,5 м/с, что свидетельствует о переходе к фоновому режиму.

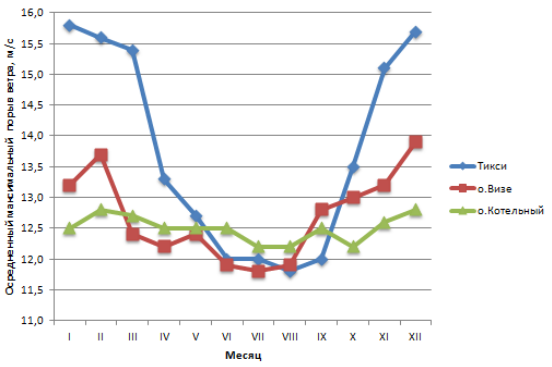


Рисунок 2 – Годовой ход среднемесячных значений максимальных порывов ветра (ff10) на станциях Тикси, о. Визе и о. Котельный за период 2015–2025 гг.

Еще более контрастно различия проявляются при анализе абсолютных максимумов (Рисунок 3). В январе в Тикси зафиксирован уникальный порыв 41 м/с, тогда как максимальные значения на о. Визе и о. Котельный не превышают 29 м/с и 25 м/с соответственно.

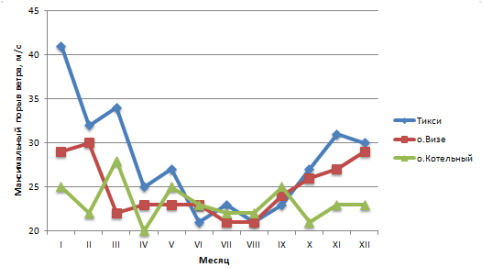
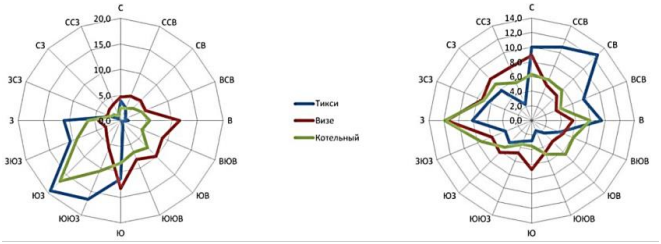


Рисунок 3 – Годовой ход абсолютных максимальных значений порывов ветра на станциях Тикси, о. Визе и о. Котельный за период 2015–2025 гг.

Полученные данные опровергают интуитивное предположение о том, что защищенная бухта должна характеризоваться более слабыми ветрами. Напротив, орография Тикси создает условия для локального усиления воздушных потоков.

На станции Тикси наблюдается ярко выраженная сезонная смена направлений ветра: зимой преобладают южные и юго-западные ветры (до 40–45% повторяемости), летом — северные и северо-восточные (до 30–35%) (Рисунок 4). Ветры юго-восточных румбов полностью экранированы горным обрамлением бухты, что дополнительно подтверждает определяющую роль рельефа.



а) *б)*

Рисунок 4 – Розы ветров для станций Тикси, о. Визе и о. Котельный за февраль (а) и июль (б)

Абсолютный рекорд в 41 м/с 7 января 2025 г. был зафиксирован именно при южном направлении ветра, то есть при потоке, поступающем в бухту с материка и сжимаемом горами. Синоптический анализ экстремального случая на основе приземной синоптической карты за 7 января 2025 г. 12 UTC (Рисунок 5) позволил восстановить механизм формирования ураганного порыва.

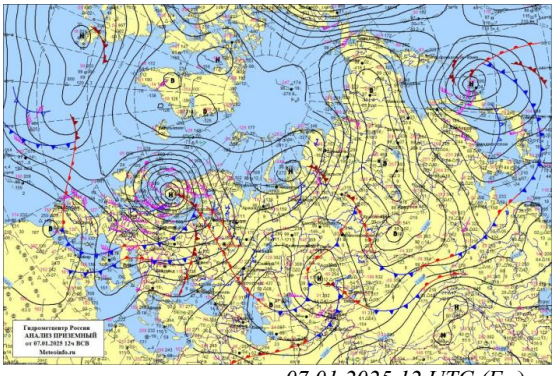


Рисунок 5 – Приземная синоптическая карта за 07.01.2025 12 UTC (Гидрометцентр России)

1. Наличие глубокого циклона над Карским морем с давлением в центре около 980 гПа, в тыловой части которого наблюдались интенсивные северо-западные и западные потоки.

2. Мощный отрог Сибирского антициклона над Восточной Сибирью с давлением до 1045 гПа, из которого распространялись холодные воздушные массы южного и юго-западного направления.

3. Высокий барический градиент между этими барическими образованиями (перепад давления 40–45 гПа на расстоянии 500–600 км) сформировал мощный воздушный поток южного направления, устремлявшийся из области высокого давления над континентом в сторону глубокого циклона над морем.

4. При выходе в бухту Тикси, ограниченную с трех сторон хребтом Хараулах, поток южного направления испытал орографическое сжатие (эффект «аэродинамической трубы»), что привело к локальному усилению скорости до ураганных значений (41 м/с).

Данный случай наглядно демонстрирует, что максимальные значения ветра в Тикси формируются при сочетании крупномасштабных атмосферных процессов (сверхвысокий градиент) и локальных орографических особенностей.

Пространственную независимость параметров приземного ветра в конкретных точках Арктики, а, следовательно, доминирующую роль локальных факторов над крупномасштабной циркуляцией в формировании ветрового поля подтверждают близкие к нулю коэффициенты корреляции между характеристиками ветра на разных станциях (значения не превышают 0,12).

Заключение

1. Вопреки классическим представлениям, защищенная бухта Тикси характеризуется более суровым ветровым режимом, чем открытые островные станции о. Визе и о. Котельный. Средние скорости ветра зимой в Тикси на 2–3 м/с выше, а абсолютный максимум (41 м/с) более чем на 10 м/с превышает показатели островных станций.

2. Основной механизм усиления — орографическое сжатие воздушного потока при его вторжении в бухту, ограниченную горами (эффект «аэродинамической трубы»), в сочетании со сверхвысокими барическими градиентами, формирующимися между глубокими циклонами над морем и отрогом Сибирского антициклона.

3. Полученные результаты демонстрируют необходимость учета локальных орографических эффектов при гидрометеорологическом обеспечении хозяйственной деятельности в Арктике и верификации прогностических моделей.

Список литературы

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / под ред. И.А. Шумакова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 124 с.
2. *Хромов С.П.* Метеорология и климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 456 с.
3. Расписание погоды (rp5.ru): архив метеорологических данных / ООО «Расписание погоды». URL: https://rp5.ru/ (дата обращения: 01.03.2026).