МАТЕРИАЛЫ
II НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЫ – БУДУЩЕЕ МЕТЕОРОЛОГИИ»

26 декабря 2025

Санкт-Петербург
Издательско-полиграфическая ассоциация
высших учебных заведений
2026

УДК 551.5
ББК 26.233
М34

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

Материалы II научно-практической студенческой конференции «МЫ – будущее метеорологии». 26 декабря 2025 г. – СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2026. – 98 с.

Сборник включает доклады студентов и аспирантов – участников конференции, охватывающие широкий спектр исследований: от математического моделирования природной среды и прогноза атмосферных процессов различной длительности до современных методов сбора и обработки гидрометеоданных. Отдельное внимание уделено фундаментальным и прикладным задачам океанологии и гидрологии.

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

Тезисы докладов выходят в редакции авторов.

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

ISBN 978-5-91155-612-9

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1 **ПРИКЛАДНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ**	
Зоммер В.П. Туманы в Краснодарском крае: синоптические условия и региональные особенности (2022–2024 гг.)	5
Колотова Т.В. О влиянии тропических циклонов на Европу в фазе внетропического перехода	8
Щербакова Ю.Е. Исследование полярных мезоциклонов на основе численного моделирования	10
Сунгурова Т.Г. Анализ траектории перемещения тропического циклона Хиннамнор в период 28 августа – 07 сентября 2022 г.	12
Комбарова А.А. Исследование влияния облачности на скорость фотолиза озона	15
Газал Ахмед Использование математических моделей для отслеживания изменения климата в Сирии	18
Ефимов А.И. Анализ траекторий тропических циклонов в северной Атлантике	20
Портнов С.А. Микроклиматическое районирование по агроклиматическим ресурсам	24
Литюшкина С.А. Сравнительный анализ многолетних рядов диоксида углерода (CO_2) для оценки влияния на термический режим арктических морей России	26
Шишкин А.Д. Исследование интегрального влагосодержания атмосферы по данным AMSR	30
Пилипенко И.А. Методы оптимального планирования траектории БПЛА для мониторинга приземного слоя атмосферы в сложных условиях рельефа	33
Нгуен Данг Тоан Сравнение фазового и амплитудного детекторов при обнаружении сдвига ветра по ширине спектра	36
Шнайдер А.В. Новая методика расчета влияния планетарных волн на атмосферную циркуляцию	38
Петухов Г.М. Основные результаты учений VOLCEX25	41
Ивлев М.О. Система анализа облачности на основе пиксельного анализа и улучшенного компьютерного зрения с использованием ИИ	44
Хохлин А.О. Модернизация мобильного счётчика Гейгера для автономного мониторинга радиационного фона	47

СЕКЦИЯ 2 **МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ**	
Озерова Н.А. Проявление эффекта «острова сухости» в г. Санкт-Петербург	51
Добровольский А.В. Программа графического представления информации АМС	60
Харченко М.А. Прогноз тумана на аэродроме города Санкт-Петербурга (Пулково) на основе модели WRF-ARW	62
Фадеев А.С. Анализ волн холода с помощью изэнтропического подхода	66
Калиниченко А.А. Исследование факторов, определяющих эволюцию циклонов умеренных широт	67
Фурлетов Н.М. Применение машинного обучения в постобработке результатов моделей прогноза погоды	72
Черкашин Д.М. Влияние урбанизации на осадки на территории города и его окрестностей (на примере Санкт-Петербурга)	74
Хабибуллин Е.Р. Мониторинг погодных условий в целях безопасности морских перевозок	76

Дудин А.А. Анализ успешности прогнозов температуры воздуха в районе Обской губы с использованием данных прогноза численной модели GFS	79
Шангареев И.А. Влияние климатических факторов на производственные процессы в строительстве: оценка рисков	82
Тажиниязов Н.А. Численное моделирование осадков для территории Каракалпакии	87
Антоновская И.В. Анализ преобладающих форм атмосферной циркуляции во время наступления раннего весеннего половодья	89
Новикова О.А. Разработка программного обеспечения для автоматизированного расчёта площадей аномалий приповерхностной температуры на основе данных реанализа MERRA-2	91
Филаткина Е.В. Методика комплексной оценки воздействия крупных промышленных объектов на региональные экосистемы	94

СЕКЦИЯ 1

ПРИКЛАДНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

ТУМАНЫ В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ: СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ (2022–2024 ГГ.)

Зоммер В.П.
Научный руководитель Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
zommer.lerik@gmail.com

Аннотация. В статье проанализированы туманы в Краснодаре, Анапе и Нальчике за 2022–2024 гг., выделены радиационные, адвективные и орографически усиленные типы туманов, их сезонные максимумы, а также определены условия образования туманов в городах Краснодарского края.
Ключевые слова. Туман; температурная инверсия; сезонность; опасные метеорологические явления.

FOGS IN KRASNODAR KRAI: SYNOPTIC CONDITIONS AND REGIONAL FEATURES (2022–2024)

Zommer V.P.
academic advisor Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. The article analyzes fog in Krasnodar, Anapa, and Nalchik for the period 2022–2024, identifies radiation, advection, and orographically enhanced fog types and their seasonal maxima, and determines the conditions for fog formation in the cities of Krasnodar Krai.
Keywords. Fog; temperature inversion; fog seasonality; hazardous meteorological phenomena.

Введение. Туманы представляют собой одно из наиболее опасных метеорологических явлений на территории Краснодарского края, существенно влияющих на безопасность дорожного движения, авиацию и в целом на хозяйственную деятельность региона.

Задачи исследования:

1. Сбор и классификация случаев туманов по месяцам и годам для каждого пункта наблюдения.
2. Выявление синоптических условий на основе описаний погодных ситуаций, сообщений Краснодарского ЦГМС и характеристик антициклональных систем, приносящих штили и высокую влажность.
3. Классификация типов туманов по механизму образования: радиационные (ночное выхолаживание при антициклоне), адвективные (перенос тёплого влажного воздуха над холодной подстилающей поверхностью), орографические (влияние рельефа).
4. Сопоставительный анализ пространственного распределения туманов и связи с местными особенностями (прибрежное положение, рельеф, урбанизация).

Максимум туманов: октябрь–декабрь (осенне-зимний период), когда резкое суточное колебание температуры, высокая влажность и частые антициклоны способствуют образованию радиационных туманов [1].

Местные особенности пунктов исследования:

Краснодар: *радиационные туманы на равнине*

В Краснодаре преобладают радиационные туманы, образующиеся в условиях антициклона при следующей последовательности: дневное прогревание (15–20 °C), ясное небо, штиль или слабый ветер (< 3 м/с), резкое ночное охлаждение (до 4–9 °C) и высокая относительная влажность (> 90%) [2].

Туманы в Краснодаре наблюдаются преимущественно с 6:00 до 10:00 утра и редко сохраняются после полудня. Типичная синоптическая карта соответствует стационарному антициклону над Восточной Европой с давлением 1030–1035 гПа. Равнинный рельеф и развитая урбанизация способствуют застою холодного влажного воздуха в ночные часы. По ориентировочной оценке, на антициклональные ситуации приходится ~ 75–80% дней с туманом в этом городе.

Анапа: *адвективные морские туманы*

На Черноморском побережье в Анапе важное значение приобретают адвективные морские туманы, возникающие при переносе тёплого влажного воздуха с акватории Чёрного моря (температура воды 12–16 °C в холодный период) на более охлаждённую сушу [2]. Такие туманы образуются при слабом и переменном ветре (2–5 м/с) в условиях температурного контраста между морем и сушей.

Кроме того, в Анапе велика доля радиационных туманов, схожих по механизму с краснодарскими, но отличающихся повышенной влажностью из-за близости к морю. По данным архива погоды АМСГ Анапа за 2024 год суммарное количество осадков составило 628,7 мм, что создаёт условия для высокой влажности воздуха и частого туманообразования, особенно в осенние и зимние месяцы [3]. Туманы в Анапе обычно толще и сохраняются дольше (до 12:00–14:00), что объясняется постоянным поступлением морского влажного воздуха.

Нальчик: *орографически усиленные туманы*

В Нальчике, расположенном в долине предгорьев Большого Кавказа, туманы носят орографический характер с усилением радиационного механизма [4]. Холодный воздух скатывается по склонам и накапливается в пониженных участках долин, где при температурных инверсиях и штиле образуются плотные туманы. Туман часто удерживается долгое время вследствие подпирания слоев горным рельефом и слабого вертикального перемешивания.

Синоптические ситуации, при которых наблюдаются туманы в Нальчике, соответствуют стационарным антициклонам и ложбинам с повышенной облачностью и влажностью; в таких условиях туманы устойчивы и могут сохраняться в течение нескольких суток подряд, в том числе днём.

На рисунк 1 представлен годовой ход случаев туманов по трем пунктам.

Анализ рисунков 1-3 показывает выраженную сезонность туманов с максимумом в осенне-зимний период. Для Краснодара пик приходится на октябрь–ноябрь (6–8 дней), с дальнейшим понижением к весенним месяцам. Анапа характеризуется расширенным периодом с туманами благодаря морскому влиянию, с максимумом в октябре (7 дней) и незначительным числом туманных дней в летние месяцы (1–2 дня). Нальчик демонстрирует наиболее выраженный пик в ноябре (9–10 дней), что отражает особенности орографии и температурных инверсий в долинах предгорий [5]. Рост значений в 2024 году по всем пунктам согласуется с возросшей повторяемостью антициклональных ситуаций.

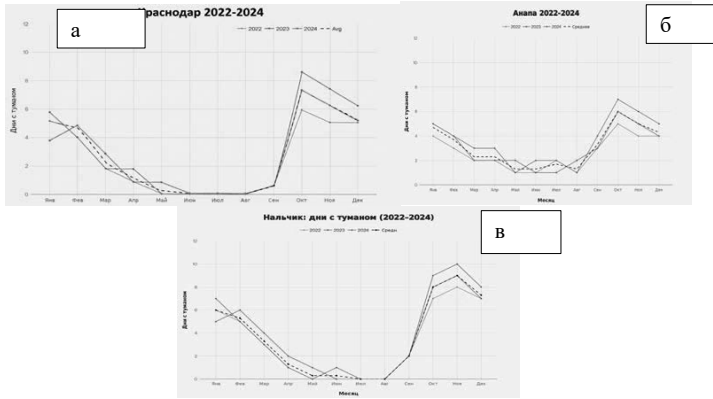


Рисунок 1 - Дни с туманом по месяцам в Краснодаре (2022–2024 гг.) (а), дни с туманом по месяцам в Анапе (2022–2024 гг.) (б), дни с туманом по месяцам в Нальчике (2022–2024 гг.) (в)

На основе проведенного анализа сезонности явления, синоптической обстановки и ключевых метеопараметров, а также с учетом местных особенностей, была разработана таблица для обобщения и систематизации информации об условиях образования тумана в городах Краснодарского края: Краснодар, Анапа и Нальчик.

Таблица 1- Итоговая таблица по анализу туманов по городам Краснодарского края в разных географических условиях за период 2022-2024г

Показатель	**Краснодар**	**Анапа**	**Нальчик**
Среднее число дней с туманом в год	40–42	35–40	50–55
Преобладающий тип тумана	радиационный	адвективный + радиационный	орографически усиленный радиационный
Благоприятная синоптическая ситуация	антициклон, штиль	антициклон + адвекция морского воздуха	антициклон, инверсия температуры, долины гор
Сезон максимума	октябрь–декабрь	октябрь–ноябрь, март–май	октябрь–декабрь
Продолжительность тумана	2–6 часов	4–8 часов	6–12 часов и более

Заключение. Выявленные синоптические особенности (стационарные антициклоны, слабый ветер, высокая влажность, температурные инверсии) формируют основу для развития краткосрочного и долгосрочного прогноза туманов в регионе. Сложность прогнозов туманов требует дальнейшего совершенствования систем мониторинга и предупреждения о таких опасных метеорологических явлениях. Дальнейшие исследования должны включить анализ многолетних климатических трендов и применение численных моделей для расчёта условий туманообразования.

Список литературы

1. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. https://labaved.ru/news/articles/v-2024-godu-tumany-na-kubani-sluchayutsya-chashche-chem-v-2023-uznali-prichinu-.html
2. Данные Краснодарского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС). https://kuban.bfm.ru, https://kubnews.ru
3. Архив погоды Анапы и нормы климата. https://anapa.ginfo.ru/pogoda-2024/, https://anapa.nuipogoda.ru/погода-2024
4. Архив погоды в Нальчике. http://www.pogodaiklimat.ru/weather.php?id=37212
5. Архив климатических данных погода и климат.ру. http://www.pogodaiklimat.ru/climate/34927.htm

О ВЛИЯНИИ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ НА ЕВРОПУ В ФАЗЕ ВНЕТРОПИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Колотова Т.В.
Научный руководитель Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Tamarikz@yandex.ru

Аннотация. Интерес к тропическому циклону часто ослабевает по мере его смещения в более высокие широты и утраты характерных черт, что приводит к прекращению официальных предупреждений или к выводу о снижении его угрозы. Однако ослабевающий тропический циклон нередко трансформируется в быстро движущийся и иногда стремительно углубляющийся внетропический циклон, способный вызывать интенсивные осадки, очень большие волны и ураганные ветры. Внетропический переход (ET) тропических циклонов происходит почти в каждом океаническом бассейне и включает в себя потерю тропических характеристик и приобретение внетропических. Несмотря на то, что общепринятого определения ET не существует, впрочем, как и классификации этапов, в данной работе рассмотрена “Двухэтапная классификация ET”, которая состоит из стадии трансформации и стадии повторного углубления.
Ключевые слова. Циклоны, Северная Атлантика, внетропический переход, реанализ.

ON THE IMPACT OF TROPICAL CYCLONES ON EUROPE IN THE EXTRATROPICAL TRANSITION

Kolotova T.V.
academic advisor Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. Interest in a tropical cyclone often wanes as it moves into higher latitudes and loses its characteristics, leading to the cessation of official warnings or the conclusion that its threat has diminished. However, a weakening tropical cyclone often transforms into a rapidly moving and sometimes rapidly deepening extratropical cyclone, capable of causing heavy precipitation, very large waves, and hurricane-force winds. The extratropical transition (ET) of tropical cyclones occurs in almost every ocean basin and involves the loss of tropical characteristics and the acquisition of extratropical characteristics. Although there is no universally accepted definition of ET, nor is there a universally accepted classification of stages, this paper presents the "Two-Stage Classification of ET," which consists of the transformation stage and the re-deepening stage.
Keywords. Cyclones, North Atlantic, extratropical transition, reanalysis.

Методология: Использован архив приземных карт погоды с сайта wetter3.de (2020–2024) за август-ноябрь.

Отобраны циклоны, которые:

1. Достигали скорости ветра > 17.2 м/с (сила 8 баллов по Бофорту).
2. Существовали не менее 3 дней.
3. Возникли южнее 37.5° с.ш. (тропическое происхождение).
4. Достигли границы Европы (определённой как 15° з.д. – 40° в.д., 37.5° с.ш. – 90° с.ш.).
5. После внетропического перехода повторно углубились.

Всего идентифицировано 5 циклонов.

Потенциальное количество тропических циклонов, достигающих Европы, регулируется влиянием центров действия атмосферы (ЦДА) Северного полушария: Азорского, Канадского и Сибирского антициклонов. Эти ЦДА выступают в роли барьера, отклоняя или блокируя траектории ураганов.

Ярким примером служит ураган «Ванда» (октябрь-ноябрь 2021 г.), чьё проникновение в Европу было блокировано слиянием полей Азорского и Канадского максимумов, создавшим протяжённую зону высокого давления.

В иных синоптических ситуациях циклоны, огибая ослабленный осенью Азорский максимум с севера, сталкиваются с западным отрогом Сибирского антициклона, который к этому сезону усиливает своё влияние на Европу. Их взаимодействие способно формировать интенсивные барические градиенты, что служит причиной экстремальных погодных явлений над континентом.

Сравнительный анализ пяти идентифицированных циклонов позволил выявить ключевые особенности их ЕТ.

В трёх из пяти случаев (Epsilon, Martin, Nigel) циклоны достигали абсолютного минимума давления именно на стадии ЕТ, после завершения трансформации. Это подтверждает, что этап повторного углубления является ключевым для возникновения опасных явлений.

Все рассматриваемые циклоны привели к опасным погодным условиям в Европе, сочетавшим экстремальный ветер и волновую активность с интенсивными осадками, что стало причиной наводнений и оползней.

Результаты анализа представлены в таблице 1.

Результаты исследования подтверждают актуальность проблемы внетропического перехода для Европы. Основной практический вывод заключается в том, что оценка рисков от атлантических ураганов должна учитывать не только их тропическую фазу, но и потенциал к повторному углублению после трансформации, что зачастую и определяет масштаб воздействия на континент. Доминирующее влияние на траекторию и возможность проникновения циклонов оказывают ЦДА (Азорский, Канадский и Сибирский максимумы).

Таблица 1 – Характеристики и последствия тропических циклонов, достигших Европы после внетропического перехода (2020–2024 гг.)

Название	EPSILON	DANIELLE	MARTIN	LEE	NIGEL
min гПа ТС	957	972	965	926	971
min гПа ЕТ	**945**	992	**932**	975	**958**
на сколько гПа углубился в ЕТ	24	2	28	19	17
время повторного углубления, ч	24	12	24	54	48
Регион воздействия	Ирландия Португалия	Португалия Азорские острова	Ирландия Португалия Велико-британия Испания Франция	Ирландия Велико-британия	Азорские острова Велико-британия
Опасные явления	ливни, порывистый ветер, большие волны	большие волны, проливной дождь, наводнения, оползни	проливные дожди. сильный ветер, наводнения	сильные дожди, наводненя	сильный ветер, наводнения

Список литературы

1. Jones S.C., Harr P.A., Abraham J., Bosart L.F. et al. The extratropical transition of tropical cyclones: forecast challenges, current understanding, and future directions //Wea. Forecasting. 2003. Vol. 18, no. 6. P. 1052-1092.
2. Dekker M.M., Haarsma R.J., de Vries H., Baatsen M., van Delden A. Characteristics and development of European cyclones with tropical origin in reanalysis data. Clim. Dyn., 2017, vol. 50, no. 1-2, pp. 445-455.
3. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М.: Гидрометцентр России, 2018. 104 с.
4. Национальный центр ураганов и Центрально-тихоокеанский центр ураганов. [Электронный ресурс]: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2023&basin=at
5. Архив синоптических карт. [Электронный ресурс]: https://www1.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html
6. Сайт RP5 [Электронный ресурс]: https://rp5.ru

АНАЛИЗ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОЦИКЛОНОВ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Щербакова Ю.Е.
Научный руководитель Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
oneskoula9@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассмотрен полярный циклон за 15 марта 2024 года на юго-востоке от острова Шпицберген. Исследование проводилось с использованием мезомасштабной численной модели WRF-ARW. На основе моделирования был проведен анализ синоптических условий и метеорологический параметров.

Ключевые слова. Мезоциклон, полярный циклон, численное моделирование, Шпицберген.

ANALYSIS OF POLAR MESOCYCLONES BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Shcherbakova Y.E.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. This article examines a polar cyclone event southeast of Spitsbergen Island on March 15, 2024. The study was conducted using the WRF-ARW mesoscale numerical model. Based on the modeling, synoptic conditions and meteorological parameters were analyzed.
Key words: Mesocyclone, polar cyclone, numerical modeling, Svalbard.

Значительная часть полярных мезоциклонов формируется в результате баротропной или бароклинной неустойчивости в атмосфере, возникающая за счет контрастов температур между морской подстилающей поверхностью и атмосферой. Поскольку арктические регионы характеризуются слаборазвитой сетью наземных метеорологических станций, что приводит к дефициту данных. Для проведения анализа часто используется спутниковых данных и численное моделирование.

Рассматривая полярный циклон за 15 марта 2024 года, можно выявить возможные механизмы развития и эволюцию мезоциклона с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW.

Зарождение циклона связано с тыловой частью циклона синоптического масштаба и интенсивными потоками тепла и влаги с океана, что создало большой температурный градиент между подстилающей поверхностью моря и воздуха.

Анализ модельного поля температуры на уровне 850 гПа выявил выраженное тепловое ядро, указывая на термический фактор формирования, а температурный вертикальный разрез выявил возмущения до уровня 750 гПа, что может указывать на значительную интенсивность.

Развитие исследуемого полярного циклона было обусловлено множественными факторами, которые повлияли на развитие и интенсивность мезоциклона.

Список литературы

1. *Анискина О.Г., Заболотских Е.В., Шапрон Б.* Моделирование эволюции полярных циклонов с использованием данных спутниковой микроволновой радиометрии [текст] / анискина о.г., заболотских е.в., шапрон б. // Исследование земли из космоса. — 2016. — № 6. — с. 84-91.
2. *Moreno-Ibáñez M. Tellus A*: Dynamic Meteorology and Oceanography / M. Moreno-Ibáñez, R. Laprise, P. Gachon // Stockholm: The International Meteorological Institute, 2021. — С. 32.
3. *Заболотских Е.В.* Особенности формирования и классификация штормовых мезомасштабных вихрей / Е.В. Заболотских, Л.П. Бобылев, А.В. Дикинис, Л.О. Неелова, Ю.Е. Смирнова // Россия: «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», 2009-2013. – С. 18.;
4. *Степанов В.В.* Полярные фронтальные и арктические циклоны в поле облачности / В.В. Степанов // СПб: Государственный научный центр Российской Федерации Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, 2022 — 136 с.

5. *Варенцов М.И.* Оценка качества воспроизведения полярных мезоциклонов по данным реанализов и результатам регионального климатического моделирования / М.И. Варенцов, П.С. Вереземская, Е.В. Заболотских, И.А. Репина. – 2016. – С. 25.

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА «ХИННАМНОР» В ПЕРИОД 28 АВГУСТА – 07 СЕНТЯБРЯ 2022 Г.

Сунгурова Т.Г.
Научный руководитель Волобуева О.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
tatanasungurova@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен анализ прохождения тропического циклона «Хиннамнор», динамика его развития, траектория движения и изменение интенсивности. Рассмотрено влияние циклона на территорию Дальнего Востока, в частности на полеты авиации, возникшие синоптические условия и последствия его прохождения. Приведены и проанализированы спутниковые снимки тайфуна на разных стадиях развития.
Ключевые слова. Тропические циклоны, тайфун «Хиннамнор», опасные явления, Дальний Восток, полеты авиации.

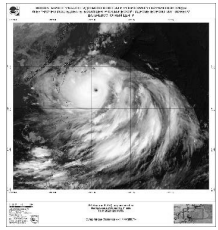
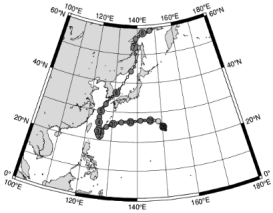
ANALYSIS OF THE TRAJECTORY OF TROPICAL CYCLONE HINNAMNOR IN THE PERIOD AUGUST 28 – SEPTEMBER 07, 2022

Sungurova T.G.
academic advisor Volobueva O.V.
Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg

Abstract. The article presents an analysis of the passage of tropical cyclone «Hinnamnor», the dynamics of its development, trajectory of movement and changes in intensity. The impact of the cyclone on the territory of the Far East, in particular on aviation flights, the synoptic conditions that arose and the consequences of its passage are considered. Satellite images of the typhoon at various stages of its development have been presented and analyzed.
*Keywords.*Tropical cyclones, Typhoon «Hinnamnor», dangerous phenomena, Far East, aviation flights.

Тропические циклоны представляют собой атмосферные вихри, образующиеся в тропических широтах и имеющие пониженное атмосферное давление в центральной части. Диаметр тропических циклонов составляет в среднем 100 – 300 км. Барические градиенты в тропических циклонах велики; ветер достигает силы шторма – от 110 до 123 км/ч. Во всей области тропического циклона присутствуют сильные восходящие движения воздуха и развивается мощная облачная система с обильными ливневыми осадками и грозами [1]. Они опасны: сильными и ураганными скоростями ветра, мощной облачной системой, выпадением большого количества осадков, грозовой деятельностью и штормовым нагоном воды. Эти факторы приводят к затоплению территорий, разрушению инфраструктуры, а также оказывают сильное влияние на транспортную систему. Наибольшее количество тропических циклонов наблюдается в Северо-западном бассейне Тихого океана.

Тропическим циклоном, который оказал сильное влияние на территорию Дальнего Востока, стал «Хиннамнор» (Рисунок 1).

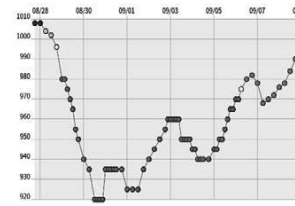


Рисунок 1 – Цветосинтезированое изображение циклона в максимальной стадии развития [2], траектория его перемещения и график изменения атмосферного давления [3]

Циклон зародился над теплой поверхностью северо-западной части Тихого океана 28 августа 2022 года. Давление в центре составляло 1008 гПа, скорость ветра 60 км/ч. Он начал движение в северо-западном направлении, приобретая облачную форму запятой.

В 12 ч скорость ветра продолжала возрастать, давление уменьшалось и ему была присвоена категория тропического шторма. В 00 ч 29 августа «Хиннамнор», двигаясь в западном направлении, усилился до сильного тропического циклона, его облачность стала плотная и приобрела кругообразную структуру. В этот день он интенсивно развивался, на спутниковых снимках хорошо прослеживается формирование глаза (Рисунок 2). Циклон смещался на юго-запад, скорость ветра возросла до 120 км/ч, и он достиг стадии тайфуна. Он имел небольшой размер по площади, а облачные спирали были симметричны. 30 августа циклону была присвоена категория супертайфуна. На следующий день, 31 августа, его траектория сместилась к югу, он продолжал углубляться. Количество облачности, находящейся вблизи центра циклона, начинала увеличиваться, глаз циклона стал очень ярким. В течение суток он достиг максимального развития, скорость ветра составляла до 195 км/ч, а давление опустилось до 920 гПа.

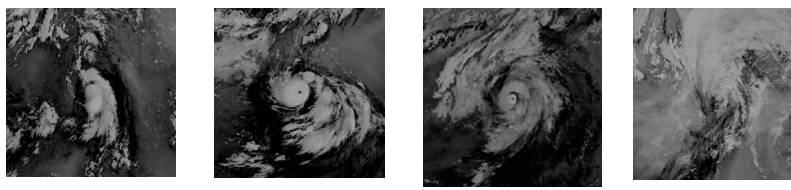


Рисунок 2 – Серия мультиспектральных спутниковых снимков в ИК-диапазоне, демонстрирующих этапы формирования, максимального развития, второго минимума и приближения циклона к территории Приморского края [3]

1 сентября циклон начал быстро заполняться, практически не смещаться, четкая облачная структура распадалась. В 18 ч он остановился над Филлипинским морем, под воздействием другой тропической депрессии и полностью сменил свое направление на северо-западное. На 2 сентября давление в центре составляло 960 гПа, скорость перемещения уменьшилась до 130 км/ч, вокруг центра циклона наблюдалось большое количество облаков. Далее «Хиннамнор» снова начал набирать силу и ускоряться в северном направлении. Проходя над теплой поверхностью океана, циклон снова углубился, двигаясь на север через Восточно-Китайское море, и 4 сентября достиг еще одного минимума давления 941 гПа. Он уже представлял собой большую облачную

систему, с глазом в центре, что хорошо можно увидеть на мультиспектральном снимке (Рисунок 3).

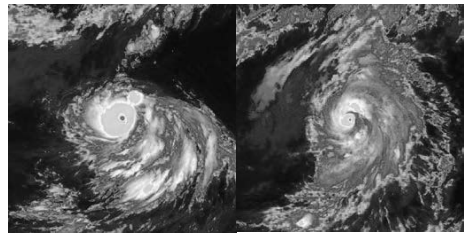


Рисунок 3 - Мультиспектральные спутниковые снимки тайфуна на стадии максимального развития и второго минимума, показывающие структурные особенности облачной системы [3]

5 сентября скорость его перемещения возросла, он начал двигаться на северо-восток и заполняться и 6 сентября в 00 ч вошел в акваторию Японского моря, где давление повысилось до 965 гПа. Облачная структура стала бесформенная, с большим количеством облаков в северной части циклона. При прохождении Японского моря скорость перемещения увеличилась, и к 12 ч 6 сентября он приблизился к Приморскому краю, давление составляло 981 гПа, скорость ветра 100 км/ч. В это время он трансформировался во внетропический циклон. В конце своего жизненного цикла «Хиннамнор» продолжил свое движение вдоль побережья, огибая Приморский край, Хабаровский край, Сахалинскую и Магаданскую области.

«Хиннамнор» - один из самых мощных тропических циклонов, оказавших влияние на Дальний Восток России в 2022 году. По данным «Ежемесячного метеорологического бюллетеня ДВНИГМИ» Приморским УГМС при приближении ТЦ HINNAMNOR было объявлено штормовое предупреждение. 5 и 6 сентября на территории Приморского края ожидались сильные дожди и усиление ветра до 15−20 м/с, на побережье − до 23−28 м/с, с порывами до 35 м/с [4]. По данным из сводок METAR [5], выпущенных с аэродромов Владивостока, Хабаровска, Южно-Сахалинска и Магадана можно проанализировать фактическую погоду во время прохождения циклона. Во Владивостоке с 10 ч 30 мин 5 сентября до 10 ч 30 мин 6 сентября наблюдалась кучево-дождевая облачность и слабый ливневой дождь, временами умеренный, ухудшающий видимость до 3800 м, в западной часть до 1800 м. Давление составляло 1010 гПа и уменьшилось до 994 гПа к 7 ч 30 мин 6 сентября, после чего начало расти. Направление ветра часто изменялось, за сутки от ЮВ к СЗ, наблюдался резкий поворот ветра в начале рассматриваемого периода, скорости низкие – 0-4 м/с, увеличивающиеся только с 6 сентября. В Хабаровске наблюдалась схожая синоптическая ситуация. Ухудшение видимости, ливневой дождь и кучево-дождевая облачность начали наблюдаться с 4 сентября 19 ч 00 мин и продолжились до 7 сентября 10 ч 30 мин. Минимальное давление наблюдалась днем 6 сентября и составляла 984 гПа. Ветер был более сильный, к 7 сентября усилился до 16 м/с с порывами до 23 м/с, направление изменялось с Ю к СВ, а затем к ЮЗ. В Южно-Сахалинске и Магадане также фиксировался ливневой дождь, кучево-дождевая облачность, ухудшение видимости, уменьшение давления и поворот ветра. Однако эти территории циклон затронул меньше, его мощность уменьшилась.

Интенсивные осадки, связанные с развитием глубокой конвекции в системе бывшего тайфуна, в сочетании с повышенным увлажнением поверхности водосбора в предыдущие летние месяцы, явились, на фоне орографических особенностей юго-востока Приморского края, причиной сильнейшего наводнения 2022 года в бассейне

реки Партизанская [6]. В Хабаровском крае и ЕАО ТЦ HINNAMNOR обусловил усиление ветра до 22 м/с, что привело к массовым отключениям света. На территории Приморского края сильный ветер был зафиксирован только в Преображении (на юго-востоке края), порывы ветра достигали 17 м/с [4]. Во Владивостоке, из-за приближающегося тайфуна был введен режим повышенной готовности.

В ходе прохождения тропического циклона образовались неблагоприятные условия для авиации. Кучево-дождевая облачность, сильные осадки, порывы ветра более 15 м/с, низкая облачность и видимость оказывают влияние на безопасность полетов. Однако воздействие циклона на Дальний Восток было не такое сильное, как, например, на Южную Корею, где были отменены сотни рейсов. К территории России «Хиннамнор» подошел на стадии заполнения и был менее интенсивный. В режиме работы аэродромных служб задержек и отмен рейсов практически не наблюдалось.

Список литературы:

1. *Наливкин Д.В.* Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность // Издательство «Наука», 1969 г. 487 с.
2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторинг окружающей среды ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Дальневосточный центр (https://www.dvrcpod.ru)
3. KITAMOTO Asanobu, National Institute of Informatics (NII) (https://agora.ex.nii.ac.jp)
4. *Котович Н.Г., Мезенцева Л.И.* Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНГМИ, 2022 г.
5. Servicio de Información Meteorológica (https://ogimet.com)
6. *Лисицина И.А., Василевская Л.Н., Василевский Д.Н., Крамарева Л.С., Шамилова Ю.А.* Анализ причин наводнения на реке Партизанская (Приморский край) в сентябре 2022 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы, 2023 г. -102-119 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛАЧНОСТИ НА СКОРОСТЬ ФОТОЛИЗА ОЗОНА

Комбарова А.А.
Научные руководители Анискина О.Г., Иманова А.С.
minyoungibts22@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена исследованию факторов, влияющих на скорость фотолиза озона в стратосфере и верхней тропосфере. В статье рассматривается роль облачности – балл, водность, ледность – и зенитного угла Солнца как ключевых модуляторов потока УФ-излучения, определяющих интенсивность фотолиза. Показано, что современные химико-климатические модели часто упрощают влияние этих параметров, что создает неопределенность в расчетах. В результаты проведённых исследований подтверждено, что различные типы облачной структуры по-разному перераспределяют актиничный поток, что особенно значимо для озона. Особое внимание уделяется анализу возможностей модели CLOUD-J для более точной параметризации исследуемых процессов.
Ключевые слова. Озоновый слой, фотолиз озона, ультрафиолетовое излучение, облачность, водность облаков, зенитный угол Солнца, актиничный поток, химико-климатическое моделирование, модель CLOUD-J.

INVESTIGATING THE EFFECT OF CLOUD COVER ON THE OZONE PHOTOLYSIS RATE

Kombarova A.A.
academic advisor Aniskina O.G., Imanova A.S.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Annotation. The work is devoted to the study of factors affecting the photolysis rate of ozone in the stratosphere and upper troposphere. The paper examines the role of cloudiness – cloud fraction, liquid water content, ice water content – and the solar zenith angle as key modulators of the UV radiation flux that determine the photolysis intensity. It is shown that modern chemistry-climate models often simplify the influence of these parameters, which introduces uncertainty into the calculations. The results of the conducted studies confirm that different types of cloud structure redistribute the actinic flux in different ways, which is particularly significant for ozone. Special attention is paid to analyzing the capabilities of the CLOUD-J model for more accurate parameterization of the processes under study.
Keywords. Ozone layer, ozone photolysis, ultraviolet radiation, cloudiness, cloud water content, solar zenith angle, actinic flux, chemistry-climate modeling, CLOUD-J model.

Озоновый слой, расположенный в стратосфере на высотах 15–35 км, выполняет критически важную функцию защиты биосферы от жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца. Концентрация озона регулируется фотохимическими реакциями, ключевой из которых является фотолиз — разрушение молекулы O_3 под действием УФ-излучения. Скорость фотолиза (J-значение) определяет интенсивность последующих фотохимических превращений и баланс озона в атмосфере. Точность расчёта этой реакции напрямую влияет на достоверность прогнозов состояния озонового слоя.

Поток УФ-излучения, достигающий разных высот, непостоянен и модулируется несколькими факторами, включая зенитный угол Солнца и наличие облачного покрова. Облака обладают рассеивающими и поглощающими свойствами в УФ-диапазоне, изменяя интенсивность и угловое распределение радиационного поля. Однако в современных химико-климатических моделях влияние облаков на скорость фотолиза часто упрощается или параметризуется, а совместное влияние водности и зенитного угла изучено недостаточно. Данный пробел ограничивает точность расчётов и создаёт неопределённость в прогнозировании эволюции озонового слоя [3].

Цель настоящей работы — исследовать влияние различных параметров облачности (балл облачности, водность, ледность, вертикальное расположение) на вертикальный профиль скорости фотолиза озона на основе численного моделирования с помощью модели Cloud-J.

Фотолиз озона сопровождается образованием атомарного кислорода как в основном $O(^3P)$

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^3P),\ \lambda < 850\ \text{нм};$$

так и в возбуждённом состоянии $O(^1D)$:

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D),\ \lambda < 320\ \text{нм}.$$

Особое значение имеют химические реации с образованием атомарного кислорода в возбуждённом состоянии $O(^1D)$, поскольку этот активный атом участвует в реакциях с H_2O и N_2O, что приводит к образованию гидроксил-радикала и оксидов азота — ключевых компонентов атмосферной фотохимии. Спектры поглощения озона включают полосы Хартли (200–310 нм, максимум ~255 нм), Хаггинса (310–360 нм), Шалона–Лефевра (320–400 нм) и Шапюи (400–650 нм). Их учёт критически важен для расчёта фотолиза [4, 5].

Облака воздействуют на актиничный поток через рассеяние, отражение и поглощение. В облаках рассеяние происходит на каплях воды, кристаллах льда и аэрозолях. Оптическая толщина облаков определяет, какая часть радиации проходит

сквозь облачный слой. Над плотными облаками может наблюдаться усиление потока за счёт многократного рассеяния и отражения, тогда как под облаками происходит ослабление. Таким образом, облака перераспределяют радиацию по высоте, что существенно влияет на скорость фотолиза.

Исследование влияния облачности на скорость фотолиза озона проводилось с использованием модели Cloud-J (Fast-JX), в которой решаются уравнение переноса излучения для плоскопараллельной атмосферы методом Феотрие в спектральном диапазоне 177–778 нм (18 спектральных интервалов). Учитываются многократное рассеяние, поглощение газами, а также оптические свойства облаков (оптическая толщина, альбедо однократного рассеяния, фазовая функция) [1, 2].

Проведена серия численных эесперементов для разных широт (20°, 40°, 60°, 80° с.ш.), зенитных углов (от 10° до 96°), месяцев, баллов облачности (0, 1, 5, 7, 10) и значений водности/ледности. Рассматривались облака нижнего яруса (1–4 км) и верхнего яруса (10–11 км). Также моделировались три типа облачности: слоисто-кучевые (0.5–1 км, жидкая вода), глубокая конвекция (2–10 км, жидкая + ледяная фазы) и перистые (11–12 км, ледяная фаза).

В безоблачных условиях профиль скорости фотолиза имеет стандартный вид: максимум в стратосфере (на высотах ~20–30 км) и плавное убывание вниз. С увеличением зенитного угла Солнца скорость фотолиза уменьшается, а профиль становится более пологим. При углах > 86° наблюдается резкое падение J-значений выше 30 км, что связано с увеличением оптической массы атмосферы и ослаблением коротковолновой радиации.

При введении облачного слоя (нижний ярус, 1–4 км) наблюдаются характерные изменения:

- Над верхней границей облака скорость фотолиза возрастает (усиление за счёт отражённого и рассеянного излучения).
- Внутри облачного слоя J-значения постепенно убывают.
- Под облаком скорость становится значительно ниже, чем в безоблачном случае.

Разность скоростей (облачный — безоблачный сценарий) показывает, что чем выше водность и больше балл облачности, тем сильнее перераспределение в профиле скорости фотолиза. Для зенитного угла 10° эффект локализован вблизи облачного слоя; для угла 96° изменения затрагивают более широкий диапазон высот, причём в верхней стратосфере (выше 35 км) проявляются артефакты, связанные с малой интенсивностью первичного потока.

При расположении облака на высоте 10–11 км (верхний ярус) добавление ледяной фазы приводит к усилению фотолиза внутри слоя и более резкому снижению под облаком. Однако для зенитного угла 96° влияние облачных параметров практически исчезает: все профили сливаются в одну кривую, что свидетельствует о доминирующей роли геометрического фактора.

На гистограммах средних скоростей для разных водностей видно, что при уменьшении водности средняя скорость фотолиза возрастает. Это подтверждает, что жидкие облака с высокой водностью сильнее ослабляют проходящее излучение.

Для июня (полдень, широты 20°, 60°, 80°) и января (полдень, широты 20°, 60°) были рассчитаны скорости фотолиза при разных зенитных углах: 1°, 29°, 59°, 41°, 81° и трёх типах облачности. Результаты эесперементов показывают, что наибольшие отклонения в сорости фотолиза наблюдаются при развитии глубокой конвекции, причём

наблюдаются они во всей тропосферу. Сравнение средних скоростей показывает, что минимальные значения соответствуют случаю с большим зенитным углом (81°), а максимальные — малым углам (1°–41°). При этом для глубокой конвекции средние значения несколько выше, чем для безоблачной атмосферы, что объясняется усилением рассеянного излучения внутри облака.

Проведённые исследование подтверждает, что учёт детальных микрофизических свойств облаков в моделях типа Cloud-J критически важен для повышения точности расчёта скорости фотолиза озона. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения параметризаций в химико-климатических моделях и для более надёжного прогнозирования состояния озонового слоя в условиях меняющегося климата.

Список литературы

1. *Prather M.J.* Fast-J2: Accurate Simulation of Stratospheric Photolysis in Global Chemical Models // J. Geophys. Res. – 2002.
2. *Prather M.J., Zhu X., Hsu J., Neu J.L.* A quadrature method for averaging photolysis rates over cloudy skies // J. Geophys. Res. – 2008.
3. *Иманова А., Розанов Е., Смышляев С. и др.* Исследование влияния атмосферного рассеяния на скорость фотолиза с помощью модуля Cloud-J // 2025 (в печати).
4. *Мануйлов А.В., Родионов В.И.* Основы химии. – М., 2005.
5. *Ортенберг Ф.С., Трифонов Ю.М.* Озон: Взгляд из космоса. – М., 1990.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В СИРИИ

Газал А.
Научный руководитель Сероухова О. С.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
ahm3d.ghazal@yandex.ru

Аннотация: В статье рассматривается применение математических и статистических моделей для анализа пространственно-временных изменений климата на территории Сирийской Арабской Республики в период 2000–2024 гг. Исследуемый период был разделён на три временных интервала: 2000–2008, 2008–2016 и 2016–2024 гг. На основе спутниковых данных NASA (GLDAS, GRACE, MODIS) разработан составной индекс изменения климата (CHI), включающий осадки, температуру воздуха, эвапотранспирацию, поверхностный сток и влажность. Применение факторного анализа позволило определить веса отдельных параметров и снизить влияние коррелированных переменных. Полученные результаты отражают устойчивую тенденцию усиления климатических изменений, особенно во втором и третьем временных периодах.
Ключевые слова: изменение климата, математическое моделирование, составной индекс, Сирия, дистанционное зондирование.

ASSESSMENT OF CLIMATE CHANGE USING MATHEMATICAL MODELS IN SYRIA

Ghazal A.
academic advisor Seroukhova O.S.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Annotation: The paper analyzes the use of mathematical and statistical models to assess spatial and temporal climate change in Syria during 2000–2024. A composite Climate Change Index (CHI) based on satellite data was developed to evaluate regional climate variability.

Keywords: climate change, modeling, composite index, Syria.

Изменение климата является одной из наиболее серьёзных глобальных проблем современности, оказывая значительное влияние на природные ресурсы, экономику и продовольственную безопасность. Регион Ближнего Востока, и в частности Сирия, относится к числу наиболее уязвимых территорий вследствие повышения температуры воздуха, снижения количества осадков и увеличения частоты засушливых периодов.
В настоящей работе используется аналитический подход, основанный на применении математических моделей для оценки климатических изменений. Исходные климатические данные были получены из спутниковых продуктов GLDAS, GRACE и MODIS с месячным временным и пространственным разрешением. Период исследования охватывает 24 года и был разделён на три временных интервала, что позволило выявить динамику климатических изменений во времени.

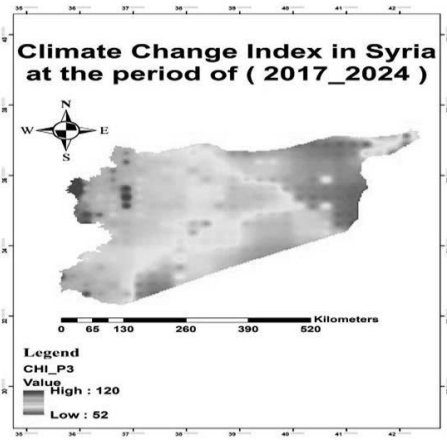


Рисунок 1 - Индекс изменения климата в Сирийской Арабской Республике для третьего временного периода

На первом этапе показатели осадков, температуры, эвапотранспирации, поверхностного стока и влажности были нормализованы методом минимаксного масштабирования. Далее для определения относительной значимости каждого параметра был использован факторный анализ на основе метода главных компонент (PCA). Такой подход позволил уменьшить эффект мультиколлинеарности между переменными и получить объективные веса индикаторов.

Агрегация нормализованных параметров выполнялась с использованием линейной аддитивной модели, в результате чего был сформирован составной индекс изменения климата CHI. Пространственный анализ показал, что наиболее уязвимыми к климатическим изменениям являются восточные и северо-восточные районы Сирии, тогда как прибрежные регионы характеризуются относительной климатической устойчивостью.

Корреляционный анализ выявил значимую связь между индексом CHI и изменением запасов подземных вод, влажностью почвы и моделями землепользования. Индекс объясняет до 69% изменений подземных водных ресурсов, что подтверждает ключевую роль климатических факторов в формировании экологических изменений.

Полученные результаты могут быть использованы для поддержки управленческих решений в области водных ресурсов, сельского хозяйства и адаптации к изменению климата.

Список литературы

1. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, 2021.
2. *Balaganesh G*. et al. Composite drought vulnerability index. Journal of Climate Risk, 2020.
3. *Karazeh A.* et al. Climate change impacts on water resources using remote sensing, 2024.

АНАЛИЗ ТРАЕКТОРИЙ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Ефимов А.И.
научный руководитель Н.В. Федосеева
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург.
efimovlia@gmail.com

Аннотация. Проводится оценка влияния изменения климата на траектории тропических циклонов Северной Атлантики и частота их внетропического перехода.
Ключевые слова. Тропический циклон, изменение климата, восточноафриканская волна, север Атлантического океана.

ANALYSIS OF TROPICAL CYCLONE TRACKS IN THE NORTH ATLANTIC

Efimov A.I.
academic advisor Fedoseeva N.V.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. An assessment is made of the impact of climate change on the trajectories of North Atlantic tropical cyclones and the frequency of their extratropical transition.
Keywords. Tropical cyclone, climate change, easterly wave, North Atlantic Ocean.

Изменение климата влияет на погодные явления по всей планете, в том числе и на тропические циклоны. По данным исследования [1], количество циклонов в Северной Атлантике возросло, также, как и количество циклонов, совершающих внетропический переход, в среднем на 2 циклона/год. Также по данным моделирования [2], показано, что внетропические циклоны усиливают ветер в морях Западной Европы в осенний период, а также дается прогноз на увеличение экстремальных ветров в 5 и 25 раз [3, с. 1783-1788]. Наблюдается тенденция на увеличение интенсивности по сравнению с прошлыми годами [4, с. 3450]. За последние 30 лет было зафиксировано 8 случаев, когда циклоны умеренных широт, образованные из внетропических, оказывали влияние на формирование погоды в Санкт-Петербурге, при этом 4 из них были произошли за последние 15 лет.

Июльский случай поднятия дамбы в КЗС подчеркивает важность продолжения работы в этом направлении, т.к. количество и интенсивность тропических циклонов с каждым годом растет ситуация может принять трагический оборот в будущем, хоть на данный момент опасность таких случаев для россиян сомнительна.

С помощью интернет-ресурсов сайтов Национального Бюро Ураганов США [5] были выявлены и проанализированы 64 случая внетропического перехода тропических циклонов, образованных из восточноафриканской волны. В результате этой работы я

обобщил все траектории и вывел 3 типичных, которые представлены на рисунке 1. Я разделил их на 3 условные группы:

1. «Американский» тип – получил свое название за то, что траектории этих циклонов проходили над территорией Северной или Южной Америки, нанося колоссальный ущерб странам. Происходит при синоптической ситуации, когда центр Азорского антициклона расположен в центре Северной Атлантики.

2. «Морской» тип – получил свое название за то, что почти все время своего пути эти циклоны существуют над Северной Атлантикой. Такие траектории обусловлены тем, что центр Азорского антициклона в этот момент находится над Азорскими островами.

3. «Южный» тип – наиболее редкий, получил свое название за то, что проходит над южной частью Северной Атлантики и в подавляющем большинстве случаев формирует погоду на юге Европы. Такая траектория обуславливается смещением центра Азорского антициклона на запад.

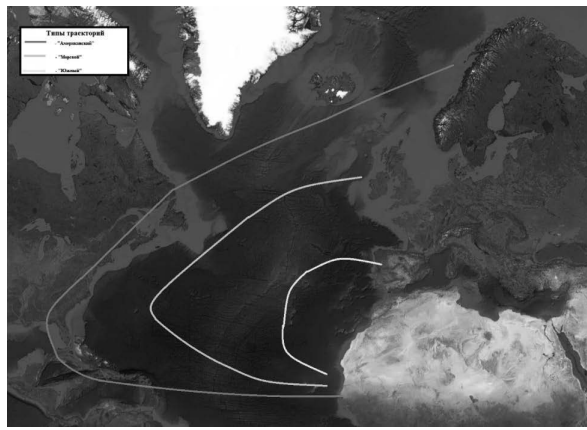


Рисунок 1 – обобщенные траектории циклонов

За последние 2 года было зафиксировано 6 случаев внетропического перехода описываемых циклонов в европейский широты, в 2024 году 2 случая: Кирк, 4-я категория (29 сентября – 7 октября) и Лесли, 2-я категория (2 – 12 октября). В 2025 году таких случаев было зафиксировано уже 3, при этом 2 из них были интенсивными ураганами 5-й категории: Эрин, 5-я категория (11 – 22 августа), Габриэль, 4-я категория (17 – 25 сентября) и Мелисса, 5-я категория (21 – 31 октября).

Расскажу подробнее про 2 самых разрушительных и уникальных случая для Европы, траектории которых представлены на рисунках 2 и 3 соответственно: ураганы 4-й категории Кирк и Габриэль, которые схожи между собой и относятся к «Южному» типу. Оба циклона зародились над островами Кабо-Верде из восточноафриканской волны через 4 дня после ее образования у берегов Африки. Они достаточно быстро усиливали интенсивность и двигались в сторону юга Европы. Габриэль переместился на территорию Португалии 25 сентября и через 2 дня окончательно затух над Испанией, принеся большое количество осадков, наводнения и нанеся большой материальный ущерб, максимальная скорость ветра в Испании в те дни достигала 30 м/с. Кирк вышел на побережье Португалии 7 октября и через 3 дня затух над Западной Германией, он принес массивные осадки по всей территории Южной и большей части Западной Европы (около 70 мм. за 12 ч.), а скорость его ветра в те дни достигала 57 м/с. В результате

прохождения Кирка над территорией Европы, разрушения, травмы и наводнения были зарегистрированы даже в Париже.

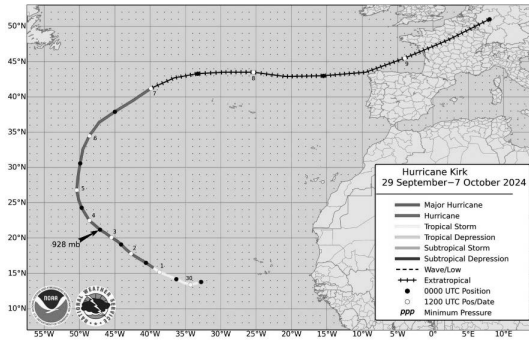


Рисунок 2 – траектория движения урагана Кирк

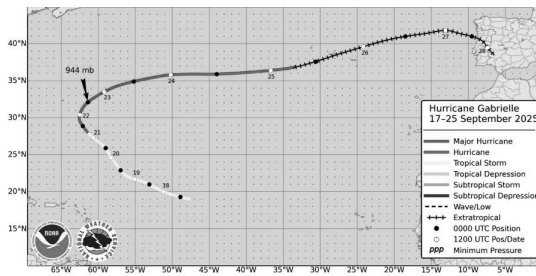


Рисунок 3 – траектория движения урагана Габриэль

Рассмотрим синоптические ситуации, сопутствующие развитию ураганов Кирк и Габриэль, показанные на рисунках 4 и 5, данные взяты [6]. В этот момент оба циклона уже сформировались как интенсивные ураганы с давлением 990 гПа у Кирка и 995 гПа у Габриэля, соответственно.

В случае с Кирком центр Азорского антициклона сместился на север и располагался над Гренландией, а циклон в этот момент попал в северный поток (струйное течение) и двигался на восток по его направлению. В ситуации с Габриэлем центр Азорского антициклона находился над полуостровом, что обеспечило те же условия для дальнейшего прохождения на восток.

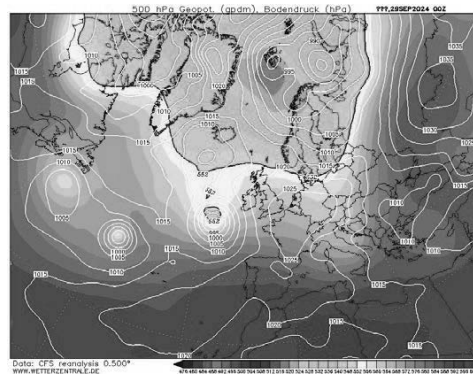


Рисунок 4 – Синоптическая ситуация 29.09.2024 00 UTC

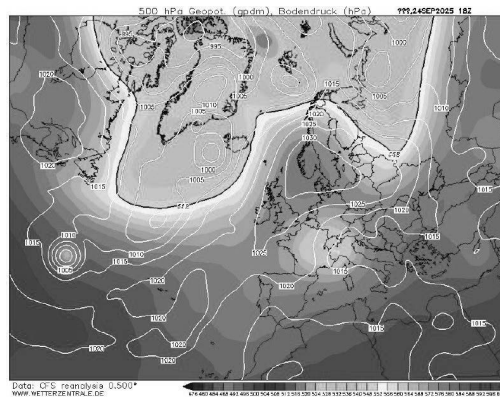


Рисунок 5 – Синоптическая ситуация 24.09.2025 18 UTC

Уникальность этих двух случаев объясняется тем, что до этого тропические циклоны, образованные из восточноафриканских волн, никогда не приносили с собой столько разрушений в Европу и не были такими интенсивными. Это подтверждает мои тезисы о том, что в связи с изменением климата данные циклоны будут чаще приходить в Европу и становиться интенсивнее. Так за период 1990-2010 гг. было выявлено 28 таких случаев, в то время, как только за последние 15 лет произошло уже 36 случаев.

Список литературы

1. *И. И. Мохов, М. Е. Макарова, А. Г. Порошенко,* доклады РАН, том 493, номер 1, 2020 – 106 стр. Ветер и волны в океанах и морях. - Регистр СССР, стр.35. - Л.: Транспорт, 1974.
2. *Мингалев И.В., Астафьева М.Д., Орлов К.Г., Мингалев В.С., Мингалев О.В., Чечеткин В.М.,* Возможность предсказания образования тропических циклонов по спутниковым снимкам, 2011 – стр. 290-296
3. *Reindert J. Haarsma, Wilco Hazeleger, Camiel Severijns, Hylke de Vries, Andreas Sterl, Richard Bintanja, Geert Jan van Oldenborgh, Henk W. van den Brink,* Geophysical Research Letters Volume 40, Issue 9, 2013 – стр. 1665-1893

4. *Benjamin A. Schenkel, Robert E. Hart*, Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA), 2012 – стр. 3453-3475
5. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/index.php?season=2000&basin=atl
6. *https://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php?model=cfsr*

МИКРОКЛИМАТИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ПО АГРОКЛИМАТИЧЕСКИМ РЕСУРСАМ

Портнов С.А.
Научный руководитель Абанников В.Н.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
semenportnow@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты микроклиматического районирования территории Республики Марий Эл на основе анализа агроклиматических ресурсов. Исследование выполнено с использованием данных метеорологических станций за период 2016–2020 гг. Рассмотрены пространственные закономерности распределения фотосинтетически активной радиации (ФАР), суммы активных температур (САТ), продолжительности безморозного периода и гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК). Показано, что микроклиматическая изменчивость определяется рельефом, близостью водных объектов и характером подстилающей поверхности. Выделены три основных микроклиматических агроклиматических района: южный прибрежный (наиболее теплообеспеченный), центральный умеренно-влажный (с подрайонами по условиям увлажнения) и северо-восточный холмистый (прохладный и переувлажнённый). Определены культуры, рекомендуемые для возделывания в каждом районе. Результаты могут быть использованы для оптимизации сельскохозяйственного производства и землепользования в регионе.
Ключевые слова. микроклиматическое районирование, агроклиматические ресурсы, Республика Марий Эл, фотосинтетически активная радиация, сумма активных температур, безморозный период, гидротермический коэффициент Селянинова, подстилающая поверхность, рельеф.

MICROCLIMATIC ZONING BASED ON AGROCLIMATIC RESOURCES

Portnov S.A.
academic advisor Abannikov V.N.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Abstract. The article presents the results of microclimatic zoning of the territory of the Republic of Mari El based on the analysis of agroclimatic resources. The study was carried out using data from meteorological stations for the period 2016–2020. Spatial patterns of distribution of photosynthetically active radiation (PAR), the sum of active temperatures (SAT), the duration of the frost-free period, and the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) were examined. It is shown that microclimatic variability is determined by relief, proximity to water bodies, and the nature of the underlying surface. Three main microclimatic agroclimatic regions are identified: the southern coastal region (the most heat-provided), the central moderately humid region (with subregions according to moisture conditions), and the northeastern hilly region (cool and overmoistened). Crops recommended for cultivation in each region are determined. The results can be used to optimize agricultural production and land use in the region.
Keywords. microclimatic zoning, agroclimatic resources, Republic of Mari El, photosynthetically active radiation, sum of active temperatures, frost-free period, Selyaninov hydrothermal coefficient, underlying surface, relief.

В современных условиях всё более актуальным становится детальное изучение микроклимата территорий, поскольку именно в приземном слое атмосферы формируются условия, определяющие продуктивность сельскохозяйственных культур, комфорт проживания населения и устойчивость экосистем. Микроклимат, являясь составной частью общего климата, формируется под влиянием неоднородностей подстилающей поверхности — рельефа, водных объектов, растительного покрова, типов почв и характера землепользования. Эти факторы обусловливают пространственную изменчивость температурного и влажностного режимов, радиационных потоков и других метеорологических характеристик даже в пределах одного административного региона.

Республика Марий Эл, расположенная в подтаёжной зоне умеренного пояса, обладает разнообразными физико-географическими условиями: здесь сочетаются равнинные участки Марийской низменности, холмистые возвышенности Вятских увалов и крутые склоны Приволжской возвышенности на правобережье Волги. Такая неоднородность рельефа, наличие крупных водохранилищ (Чебоксарского и Куйбышевского) и мозаика почвенно-растительного покрова создают предпосылки для формирования различных микроклиматов, что напрямую отражается на агроклиматических ресурсах — тепле, влаге и свете, доступных для сельскохозяйственных растений.

Цель настоящей работы — на основе анализа режима основных метеорологических характеристик провести микроклиматическое районирование Республики Марий Эл по агроклиматическим ресурсам и дать рекомендации по специализации сельскохозяйственного производства в выделенных районах.

Исследование базировалось на данных метеорологических станций Йошкар-Ола, Козьмодемьянск, Новый Торъял и Морки за 2016–2020 гг. Анализировались следующие агроклиматические показатели:

- фотосинтетически активная радиация (ФАР) как часть суммарной радиации в диапазоне 0,38–0,71 мкм (рассчитывалась как 52 % от суммарной радиации);
- сумма активных температур (САТ) за период со средней суточной температурой выше +10 °C;
- продолжительность безморозного периода (от последнего весеннего до первого осеннего заморозка);
- гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова, характеризующий влагообеспеченность: ГТК = (сумма осадков за период с T>10°C) / (0,1 × САТ).

Для оценки микроклиматической изменчивости ФАР на склонах различной экспозиции и крутизны использовались коэффициенты Гольцберга, учитывающие перераспределение солнечной радиации в зависимости от ориентации и угла наклона поверхности. Районирование проводилось методом объединения территорий со сходными значениями агроклиматических показателей и однотипными условиями рельефа и подстилающей поверхности.

На основе комплекса рассмотренных показателей на территории Республики Марий Эл выделены три агроклиматических микрорайона:

Южный прибрежный район (правобережье Волги, включая г. Козьмодемьянск). Характеризуется максимальной суммой активных температур (2222 °C), наиболее длительным безморозным периодом (175 дней), обеспеченным увлажнением (ГТК ~1,2). Рельеф — крутые склоны южной и западной экспозиции, что увеличивает приход ФАР.

Рекомендуется для выращивания теплотребовательных культур — подсолнечника, поздних сортов картофеля, а также плодовых и ягодных культур.

Центральный район Марийского полесья (равнины и слабоволнистые участки вокруг Йошкар-Олы и Морков). САТ — 2100–2130 °С, безморозный период — 155–162 дня, ГТК варьирует от 0,75 (засушливый подрайон на юго-востоке) до 1,3–1,5 (избыточно влажный подрайон на северо-западе). ФАР близка к фоновым значениям. Район разделяется на два подрайона: 2а — северо-западный (влажный, пригоден для зерновых и льна), 2б — юго-восточный (менее влажный, требует орошения в отдельные годы, но благоприятен для яровой пшеницы и ячменя).

Северо-восточный холмистый район (Вятские увалы, г. Новый Торъял). Наименьшая обеспеченность теплом (САТ ~2006 °С, безморозный период 135 дней), избыточное увлажнение (ГТК >1,5). Рельеф холмистый, с частыми понижениями, где застаивается холодный воздух, что увеличивает риск заморозков. Рекомендуются холодостойкие культуры — озимая рожь, овёс, ранний картофель, многолетние травы. Теплолюбивые культуры здесь нерентабельны.

Проведённые исследования подтвердили, что микроклиматические различия в Республике Марий Эл обусловлены прежде всего неоднородностью рельефа и влиянием водных объектов, что проявляется в изменчивости ФАР, САТ, продолжительности безморозного периода и влагообеспеченности. Предложенное микроклиматическое районирование позволяет дифференцированно подходить к выбору сельскохозяйственных культур и агротехнических приёмов в зависимости от локальных условий. Полученные результаты могут быть использованы как основа для адаптации земледелия в условиях изменяющегося климата, а также для планирования мелиоративных мероприятий (орошение на юго-востоке, дренаж на северо-западе). Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение границ выделенных районов с использованием более детальной сети наблюдений и учётом прогнозных климатических сценариев.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНИХ РЯДОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА (CO_2) ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НА ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ

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

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ многолетних рядов концентрации CO_2, измеренных на станциях Барроу и Териберка на побережье Арктики со средней глобальной концентрацией CO_2 и наиболее продолжительным рядом на станции Мауна-Лоа с 1958 г. Показано, что значения концентрации CO_2 на станциях Барроу, Териберка тесно связаны со значениями средней глобальной концентрацией и так же с концентрацией CO_2 станции Мауна-Лоа с коэффициентами детерминации выше 0,999, что дает основание использовать ряд на станции Мауна-Лоа для оценки его влияния и на арктические моря.
Ключевые слова. Диоксид углерода (CO_2), многолетние ряды на стациях, связь между наблюдениями на станциях, глобальная концентрация.

COMPARATIVE ANALYSIS OF MULTI-YEAR CARBON DIOXIDE (CO_2) TIME SERIES TO ASSESS THE IMPACT ON THE THERMAL REGIME OF RUSSIA'S ARCTIC SEAS

Lityushkina S.A.
academic advisor Lobanov V.A.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Abstract. A comparative analysis of long-term CO_2 concentration time series measured at the Barrow, Teriberka and Mauna Loa stations, together with the global mean CO_2 concentration, and of the Mauna Loa record (the longest, running since 1958) compared with the CO_2 values at Barrow and Teriberka, showed that CO_2 concentrations at Barrow, Teriberka and Mauna Loa are closely related to the global mean, and that Mauna Loa concentrations are likewise closely related to those at Barrow and Teriberka.
Keywords: Carbon dioxide (CO_2), Barrow, Teriberka, Mauna Loa, global mean CO_2 concentration.

В качестве антропогенного фактора, влияющего на термический режим Арктических морей России, выбран диоксид углерода (CO_2). Поставлена цель проанализировать многолетние ряды концентрации CO_2 и на основании анализа выбрать многолетний ряд, который будет привлечен для оценки влияния не температуру воздуха.

Для этой цели были рассмотрены многолетние ряды средней глобальной концентрации CO_2 за январь, апрель, июль и октябрь [1] и многолетние ряды на отдельных станциях в Арктике: Барроу (71,32º с.ш. 156,61º з.д; п-ов, Аляска, США) и Териберка (69,20º с.ш. 35,01º в.д.; РФ) и многолетний наиболее продолжительный ряд наблюдений с 1958 года на станции Мауна-Лоа (19,53º с.ш., 155,58º з.д.; Гавайские о-ва, США) [1-4]. Выбранные многолетние ряды имеют различную продолжительность (и период) измерений: Барроу – 52 года (1973 – 2024 гг.), Териберка – 34 года (1988-2024 гг.), Мауна-Лоа – 67 лет (1958-2024 гг.) и средняя глобальная концентрация CO_2 – 46 лет (1979-2024 гг.). Сравнительный анализ был выполнен на совместный период измерений с 1988 по 2024 гг. На станции Териберка имеют место пропуски в январе и июле 1997 и 1998 гг., в апреле в 1995, 1997 и 1998 гг. и в октябре в 1997, 1998 и 2002 гг.

Выбранные многолетние ряды сравнивались за период совместных наблюдений на основе расчета коэффициентов детерминации (R^2) между ними. Как видно на рис.1, получена тесная взаимосвязь с рядом глобальной концентрации во всех случаях со следующими коэффициентами корреляции: Барроу – от 0,9978 (июль) до 0,9983 (октябрь), Териберка – от 0,9878 (июль) до 0,9964 (апрель) и Мауна-Лоа – от 0,9981 (январь) до 0,9999 (октябрь). Отмечаются систематические отклонения концентрации CO_2 на станциях относительно средней глобальной концентрации и в октябре эти отклонения наименьшие. Эти отклонения связываем с местными условиями, которые нивелируются при получении средней глобальной концентрации.

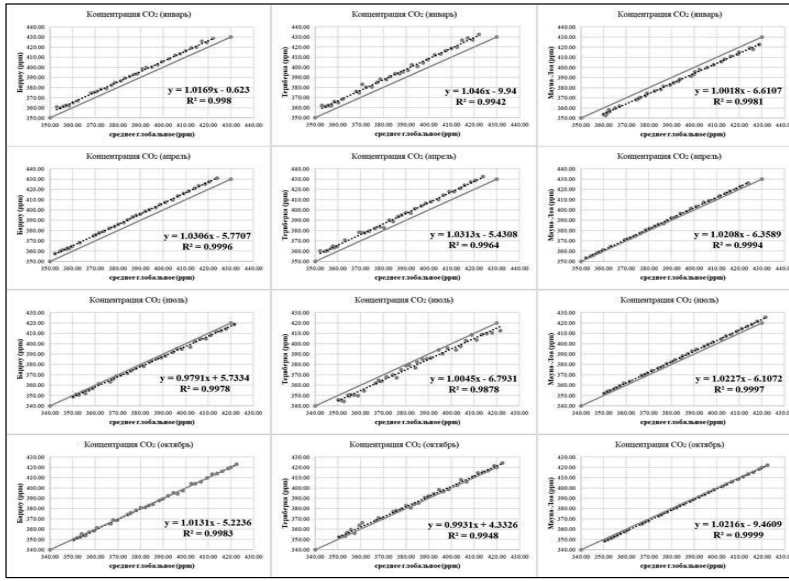


Рисунок 1 – Взаимосвязь многолетних рядов концентрации CO_2 станций со средней глобальной концентрацией за период с 1988 по 2024 гг.

Выполнен расчет количественных характеристик расхождений концентрации CO_2 (ΔCO_2), результаты которого представлены на рис. 2.

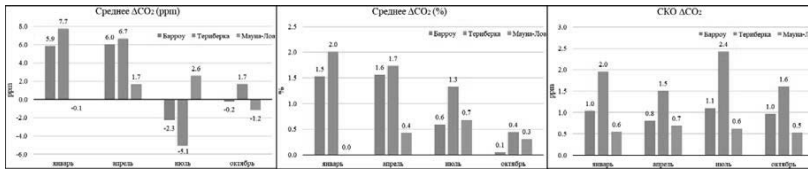


Рисунок 2 – Количественные характеристики расхождений концентрации CO_2 (ΔCO_2)

При оценке количественных характеристик расхождений концентрации CO_2 (ΔCO_2) выявлено (рис.2), что наибольшие средние ΔCO_2 приходятся на январь на станциях Барроу и Териберка и составляют 5,9 и 7,7 ppm (1,5% и 2,0%), соответственно. Вместе с этим на Мауна-Лоа наименьшее среднее ΔCO_2 за рассматриваемые месяцы (-0,1 ppm); наименьшие средние ΔCO_2 на станциях Барроу и Териберка в октябре – -0,2 и 1,7 ppm (0,1% и 0,4%), соответственно. Среднее квадратическое отклонение (СКО) ΔCO_2 в январе: Барроу – 1,0 ppm, Териберка – 2,0 ppm, Мауна-Лоа – 0,6 ppm; в апреле: Барроу – 0,8 ppm, Териберка – 1,5 ppm, Мауна-Лоа – 0,7 ppm; в июле: Барроу – 1,1 ppm, Териберка – 2,4 ppm (наибольшее), Мауна-Лоа – 0,6 ppm; в октябре: Барроу – 1,0 ppm, Териберка – 1,6 ppm, Мауна-Лоа – 0,5 ppm;

Взаимосвязи многолетних рядов концентрации CO_2 на станциях Барроу и Териберка с наиболее продолжительным рядом концентрации на станции Мауна-Лоа показаны на рис. 3.

Также получены высокие коэффициенты детерминации R^2: с Барроу – от 0,9975 (июль) до 0,9987 (апрель), с Териберкой – от 0,9878 (июль) до 0,9957 (апрель).

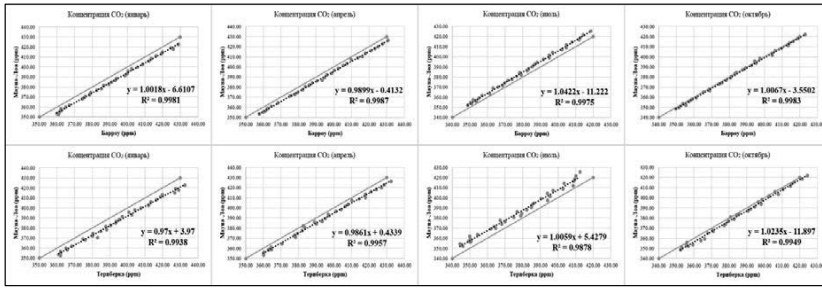


Рисунок 3 – Взаимосвязи многолетних рядов концентрации CO_2 на станции Мауна-Лоа с концентрацией CO_2 станций Барроу и Териберка за период с 1988 по 2024 гг.

Выводы. Совместный анализ многолетних рядов концентрации CO_2 показал, что:

1. ряды на станциях Барроу, Териберка и Мауна-Лоа тесно связаны со средними глобальными значениями с коэффициентами R^2 для Барроу – от 0,9978 (июль) до 0,9983 (октябрь), для Териберка – от 0,9878 (июль) до 0,9964 (апрель) и для Мауна-Лоа – от 0,9981 (январь) до 0,9999 (октябрь);

2. наименьшие систематические отклонения многолетних рядов на станциях от ряда глобальной концентрации отмечаются в октябре: систематическое отклонение на Барроу – 0,1%, на Териберка – 0,4% и на Мауна-Лоа 0,3%;

3. среднее квадратическое отклонение ΔCO_2 станций от среднего глобального значения изменяется в диапазоне: для Барроу – от 1,0 (октябрь) до 1,1 (июль) ppm, для Териберка – от 1,5 (апрель) до 2,4 (июль) ppm и для Мауна-Лоа – от 0,5 (октябрь) до 0,7 (апрель) ppm.

Для построения зависимостей температуры воздуха арктических морей России от индексов циркуляции атмосферы и CO_2 может быть использован наиболее продолжительный многолетний ряд без пропусков на станции Мауна-Лоа в связи с тем, что:

1. ряд на Мауна-Лоа имеет высокую связанность (синхронность) с рядами Барроу (R^2: 0,9975–0,9987) и Териберки (R^2: 0,9878–0,9957);

2. систематическое отклонение (%) концентрации CO_2 на Мауна-Лоа от значений рядов Барроу находится в диапазоне 0,3-1,5% и Териберки – 0,8-2,0%.

Список литературы

1. *Lan, X., G. Petron, K. Baugh, A.M. Crotwell, M.J. Crotwell, S. DeVogel, M. Madronich, J. Mauss, T. Mefford, E. Moglia, S. Morris, J.W. Mund, A.Searle, K.W. Thoning, S. Wolter and J. Miller* (2025), Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from the NOAA GML Global Greenhouse Gas Reference Network, Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network: 1967 - Present, Version: 2025-08-15, https://doi.org/10.15138/wkgj-f215

2. *K.W. Thoning, A.M. Crotwell, and J.W. Mund* (2025), Atmospheric Carbon Dioxide Dry Air Mole Fractions from continuous measurements at Mauna Loa, Hawaii, Barrow, Alaska, American Samoa and South Pole, 1973-present. Version 2025-04-26, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Global Monitoring Laboratory (GML), Boulder, Colorado, USA https://doi.org/10.15138/yaf1-bk21

3. *A.M. Brounshtein, E.V. Faber, N.N. Paramonova, A.A. Shashkov*, (1993). Atmospheric CO_2 monitoring by the Main Geophysical Observatory. In: Report of the seventh WMO

meeting of experts on carbon dioxide concentration and isotopic measurement techniques. WMO, GAW No.88, Rome, Italy, p.91-99.
4. Сайт Королевского Нидерландского метеорологического института (KNMI) [Электронный ресурс]. Дата обращения: 06.04.2025. http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone.a

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ AMSR

Шишкин А.А.
Научный руководитель О.Г. Анискина
cumulusa@yandex.ru

Аннотация. Интегральное содержание водяного пара (IWV) – важнейшая характеристика, используемая в климатических и метеорологических моделях. В работе рассмотрены современные методы определения IWV (радиозондирование, GNSS, эмпирические подходы) и показаны их ограничения, особенно для труднодоступных регионов, таких как Арктика. Основное внимание уделено спутниковому микроволновому методу, основанному на измерении яркостной температуры в линиях поглощения водяного пара (23.8 ГГц) и в окнах прозрачности (18.7 ГГц). Представлен нейросетевой алгоритм восстановления IWV по данным радиометра AMSR2, позволяющий автоматически учитывать нелинейные связи между многоканальными измерениями и искомым параметром. Показаны преимущества метода в Арктике: всепогодность, глобальность и возможность мониторинга над ледовыми и переходными зонами. Полученные данные могут быть использованы для улучшения прогнозов погоды и изучения обратных связей в системе «атмосфера – океан – лёд».
Ключевые слова. интегральное содержание водяного пара, микроволновая радиометрия, AMSR2, яркостная температура, нейросетевой алгоритм, Арктика, спутниковый мониторинг.

ATMOSPHERIC INTEGRATED WATER VAPOR RETRIEVAL FROM AMSR DATA

Shishkin A.A.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg,

Abstract. Water vapor is a key atmospheric component determining the energy balance, latent heat transport, and formation of extreme weather events. The integrated water vapor (IWV) is a crucial parameter used in climatic and meteorological models. The study examines modern methods for IWV determination (radiosondes, GNSS, empirical approaches) and demonstrates their limitations, especially for remote regions such as the Arctic. Particular attention is paid to the satellite microwave method based on measuring brightness temperature at water vapor absorption lines (23.8 GHz) and transparency windows (18.7 GHz). A neural network algorithm for IWV retrieval from AMSR2 radiometer data is presented, which automatically accounts for nonlinear relationships between multi-channel measurements and the target parameter. Advantages of the method in the Arctic are shown: all-weather capability, global coverage, and monitoring over ice and transition zones. The obtained data can be used to improve weather forecasts and study feedbacks in the “atmosphere – ocean – ice” system.
Keywords. integrated water vapor, microwave radiometry, AMSR2, brightness temperature, neural network algorithm, Arctic, satellite monitoring.

Водяной пар является одним из наиболее значимых и изменчивых компонентов атмосферы. Его содержание напрямую влияет на глобальную циркуляцию и

региональные климатические особенности. Интегральное содержание водяного пара (IWV) – суммарное количество водяного пара в вертикальном столбе атмосферы – служит важнейшим показателем, используемым в прогностических моделях, климатических исследованиях и при анализе экстремальных явлений (интенсивных осадков, паводков, тропических циклонов). Особую актуальность мониторинг IWV приобретает в Арктике – регионе с наиболее высокими темпами потепления (арктическое усиление), где рост влагосодержания создаёт положительную обратную связь, ускоряя таяние льдов и снежного покрова.

Традиционные методы измерения IWV (радиозондирование, наземные GNSS-наблюдения, эмпирические оценки по приземным данным) обладают существенными ограничениями: редкая сеть станций, точечный характер, низкая точность в сложных метеоусловиях. Альтернативой является спутниковая микроволновая радиометрия, обеспечивающая глобальный, всепогодный и непрерывный мониторинг. В данной работе представлен алгоритм восстановления IWV по данным спутникового радиометра AMSR2, основанный на нейросетевом подходе, и обсуждаются его преимущества для арктического региона [1-3].

Микроволновый метод основан на измерении яркостной температуры *Tb* – радиотеплового излучения системы «поверхность–атмосфера» на определённых частотах. Для системы океан–атмосфера (без учёта рассеяния) яркостная температура может быть представлена как:

$$Tb = Tатм\uparrow + Tотр\downarrow + Tок\uparrow + Tкосм,$$

где

Татм↑ – собственное восходящее излучение атмосферы,

Тотр↓ – отражённое от поверхности нисходящее излучение,

Ток↑ – излучение поверхности океана, ослабленное атмосферой,

Ткосм – космическое реликтовое излучение, ослабленное в атмосфере.

В микроволновом диапазоне существуют «окна прозрачности», где атмосфера слабо поглощает излучение, и сигнал в основном определяется подстилающей поверхностью. В то же время есть линии резонансного поглощения молекулами газов. Для водяного пара характерна линия поглощения на частоте 22.235 ГГц. Поэтому канал 23.8 ГГц (используемый на AMSR2 и на отечественном МТВЗА-ГЯ) располагается вблизи этой линии и сильно чувствителен к общему содержанию водяного пара в столбе: чем больше пара, тем выше поглощение и собственное излучение атмосферы, а значит, выше измеряемая яркостная температура. Канал 18.7 ГГц находится в окне прозрачности и слабо реагирует на водяной пар, но хорошо «видит» поверхность и облачную жидкокапельную воду.

Используя разность яркостных температур на этих двух частотах (часто с учётом поляризации), можно математически выделить вклад водяного пара, минимизируя влияние температуры поверхности, ветрового волнения и водозапаса облаков [1-3].

Для решения обратной задачи – восстановления IWV по измеренным значениям Tb – разрабатываются алгоритмы, основанные на искусственной нейронной сети. Входными данными служат откалиброванные и прошедшие контроль качества яркостные температуры в каналах 18.7 и 23.8 ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации) спутникового радиометра AMSR2, установленного на борту японского

спутника GCOM-W1 (JAXA). Предварительно проводится географическая привязка и фильтрация выбросов [4-5].

Нейронная сеть обучается на сопоставленных данных: с одной стороны – модельные или измеренные значения Tb, с другой – эталонные значения IWV, полученные из радиозондирований или данных реанализа. В процессе обучения сеть выявляет сложные нелинейные зависимости между входными каналами и целевым параметром, что позволяет автоматически компенсировать межканальные корреляции, шумы и искажения. Такой подход обеспечивает высокую точность восстановления IWV в широком диапазоне атмосферных и поверхностных условий [4-5].

Полученные значения IWV могут быть верифицированы по независимым данным (например, по наземным GNSS-станциям) и в дальнейшем ассимилированы в региональные модели прогноза погоды (например, WRF) для улучшения начальных полей влажности, что повышает качество прогнозов осадков и других гидрометеорологических параметров [4-5].

Арктический регион представляет особую сложность для традиционных методов наблюдений из-за суровых климатических условий, ледового покрова и недостаточной сети станций. Спутниковый микроволновый метод обладает здесь неоспоримыми преимуществами [1-5]:

- Всепогодность – микроволны проникают сквозь облачность, что позволяет получать данные даже при сплошной облачности.
- Глобальность – спутник обеспечивает покрытие любого района, включая высокие широты, ледовые и переходные зоны (кромка льда, зоны смешения).
- Высокое пространственное разрешение – современные радиометры (AMSR2) имеют разрешение, достаточное для изучения мезомасштабных процессов, характерных для Арктики (например, интенсивных циклонов, вторжений тёплого воздуха).

Мониторинг IWV в Арктике критически важен для изучения механизмов арктического усиления. Рост влагосодержания усиливает парниковый эффект, что приводит к повышению температуры, таянию морского льда и уменьшению альбедо – классическая положительная обратная связь. Рассматренный алгоритм позволяет отслеживать эти изменения с высокой временной и пространственной детализацией, предоставляя данные для верификации климатических моделей и анализа тенденций.

Дальнейшие исследования будут направлены на верификацию алгоритма по натурным данным, его адаптацию для исследования в Арктическом регионе.

Список литературы

1. *Wentz F.J.* A well-calibrated ocean algorithm for SSM/I // J. Geophys. Res. – 1997. – Vol. 102. – P. 8703–8718.
2. *Melsheimer C., Heygster G.* Improved retrieval of total water vapor over polar regions from AMSR-E and AMSR2 // Remote Sens. – 2021. – Vol. 13(4). – P. 698.
3. *Гурьянов В.В., Успенский А.Б.* Спутниковые микроволновые методы в метеорологии. – М.: Наука, 2019. – 280 с.
4. *Заболотскtх Е.В., Шапрон Б.* Восстановление интегральной влажности атмосферы над океанами по данным спутникового микроволнового радиометра AMSR2//Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т.1. – №1. – с.207-215

5. *Gao Z., Jiang N., Xu Y., Xu T., Liu Y.* Precipitable Water Vapor Retrieval Over Land From GCOM-W/AMSR2 Based on a New Integrated Method // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2022. – DOI: 10.1109/TGRS.2022.3151384

МЕТОДЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ РЕЛЬЕФА

Пилипенко И.А.
Научный руководитель О.С. Сероухова
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
pilipenkoia2002@gmail.com

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме повышения эффективности метеорологических исследований с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за счет оптимального планирования их полетных траекторий. Автором проведен анализ ключевых методов построения маршрутов в зависимости от конкретных научно-исследовательских задач. Рассмотрены четыре основных подхода: классический метод «Змейка» для покрытия простых областей, метод трапецеидального разбиения для работы в сложной местности с препятствиями, градиентный метод для автономного отслеживания динамических атмосферных параметров и метод адаптивного перепланирования на основе модельно-прогнозирующего управления для работы в изменчивых условиях. Делается вывод, что выбор конкретного метода является компромиссом и определяется поставленной целью. Статья иллюстрирована примерами применения методов для территории Василеостровского района Санкт-Петербурга.
Ключевые слова. беспилотные летательные аппараты (БПЛА), планирование траектории, метеорологические исследования, метод «Змейка», трапецеидальное разбиение, градиентный метод, адаптивное перепланирование.

METHODS OF OPTIMAL UAV TRAJECTORY PLANNING FOR MONITORING THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE IN DIFFICULT TERRAIN CONDITIONS

Pilipenko I.A.
academic advisor O.S. Serouchova
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg,

Annotation. The article is devoted to the urgent problem of increasing the effectiveness of meteorological research using unmanned aerial vehicles (UAVs) due to the optimal planning of their flight trajectories. The author analyzes the key methods of route construction depending on specific research tasks. Four main approaches are considered: the classical "Snake" method for covering simple areas, the trapezoidal partitioning method for working in difficult terrain with obstacles, the gradient method for autonomous tracking of dynamic atmospheric parameters, and the adaptive rescheduling method based on model-predictive control for working in variable conditions. It is concluded that the choice of a specific method is a compromise and is determined by the goal. The article is illustrated with examples of the application of methods for the territory of Vasileostrovsky district of St. Petersburg.
Keywords. unmanned aerial vehicles (UAVs), trajectory planning, meteorological research, Snake method, trapezoidal partitioning, gradient method, adaptive rescheduling.

Современная метеорология переживает революцию, движимую развитием беспилотных авиационных систем. Эти аппараты открывают доступ к данным, которые ранее были недостижимы или чрезвычайно затратны для получения. Однако уникальный потенциал БПЛА для изучения атмосферы может быть раскрыт в полной мере лишь при

одном ключевом условии — грамотном и точном планировании их полетной траектории [1].

Существуют методы построения траекторий в зависимости от поставленной задачи. Метод Змейка. Принцип работы метода заключается следование заданному маршруту с минимальными поворотами [2]. Поэтапно метод работает так: определяем направляющую линию (часто основную ось области), перпендикулярно ей создаются параллельные галсы на расстоянии w × (1 – перекрытие) друг от друга, галсы соединяются чередующимися поворотами на 180°, чтобы получить непрерывный маршрут. Этот метод хорошо работает для простых, выпуклых или почти выпуклых областей без внутренних препятствий. Для наглядного примера применения метода Змейки, была выбрана территория Василеостровского района, города Санкт-Петербурга.



Рисунок 1 - Метод змейки

Трапецеидальное разбиение области — цель состоит в разбиении сложной области с препятствиями на простые подзоны (чаще трапецеидальные, квадратные или треугольные), внутри которых можно легко применить стандартный паттерн покрытия. Измерения происходят внутри ячеек, но при этом за пределами ячеек БПЛА измерение не проводит, из-за чего возникают пропуски в измерениях [3].

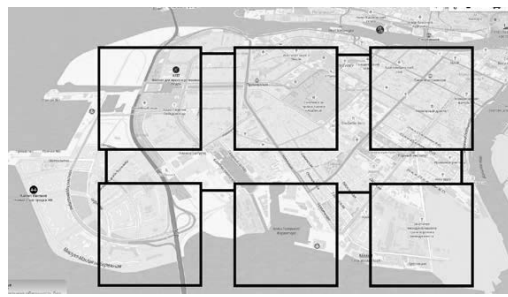


Рисунок 2 - Трапецеидальный метод

Градиентные методы. Вместо того чтобы заранее планировать весь путь, БПЛА в реальном времени принимает решения о направлении движения, основываясь на пространственных производных (градиентах) измеряемых полей. Цель данного метода заключается в автономном отслеживание ключевых атмосферных параметров [4].



Рисунок 3 - Градиентный метод

Метод адаптивного перепланирования. Это создание замкнутого цикла "измерение-модель-планирование-действие". Изначальный план считается лишь отправной точкой и постоянно корректируется по мере поступления новых данных. Этот подход часто реализуется в рамках Модельно-прогнозирующего управления. Реализуется он также в виде цикла [5]. С помощью этого метода можно добиться устойчивости. Система способна реагировать на непредсказуемые изменения, например, внезапное усиление ветра или смещение зоны интереса.

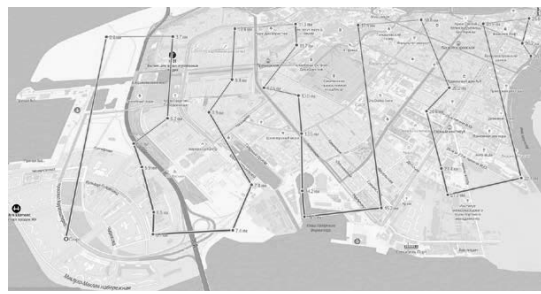


Рисунок 4 - Метод адаптивного перепланирования

В итоге можно сказать, что выбор метода — это всегда компромисс. Применяемый метод зависит от того, какая задача стоит перед БПЛА. Соответственно для нее выбирается наиболее подходящий метод по эффективности работы.

Список литературы

1. *Kaimal J.C., Finnigan J.J.* Atmospheric boundary layer flows, their structure and measurements. New York, Oxford: Oxford Univ. Press, 1994 – P. 289.
2. *Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П.* Радиозондирование атмосферы // Екатеринбург, 2004 596 с.
3. *Kral S., Reuder J., Vihma T., at all.* Innovative Strategies for Observations in the Arctic Atmospheric Boundary Layer (ISOBAR) — The Hailuoto 2017 Campaign // Atmosphere. 2018 V. 9 № 7 P. 268.
4. *Zhou S.H., Wei M., Wang L.J., at all.* Wind shear identification with the retrieved wind of Doppler weather radar // Journal of Tropical Meteorology. 2017 V. 23 (2).
5. *Кулешов В.Н., Смирнов А.В.* Беспилотные летательные аппараты: проектирование и траекторное управлением.: Машиностроение, 2018.

СРАВНЕНИЕ ФАЗОВОГО И АМПЛИТУДНОГО ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ СДВИГА ВЕТРА ПО ШИРИНЕ СПЕКТРА

Нгуен Д.Т.
Научный руководитель В.Ю. Жуков
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
toanthhtvn99@gmail.com

Аннотация: В статье сравниваются фазовый и амплитудный детекторы при радиолокационном обнаружении сдвига ветра методом оценки ширины спектра. Математически доказано, что амплитудное детектирование искусственно расширяет спектр: квадрат его ширины всегда вдвое превышает аналогичный параметр фазового детектора. Это подтверждает, что некогерентные системы являются компромиссным решением, уступающим в точности, но выигрывающим в стоимости.
Ключевые слова: Метеорологический радиолокатор, сдвиг ветра, ширина спектра, фазовый и амплитудный детекторы.

COMPARISON OF PHASE AND AMPLITUDE DETECTORS FOR WIND SHEAR DETECTION VIA SPECTRAL WIDTH

Nguyen D.T.
academic advisor V.Yu. Zukov
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract: The article compares phase and amplitude detectors in radar wind shear detection using the spectral width estimation method. It is mathematically proven that amplitude detection artificially broadens the spectrum: the square of its width is always twice that of the phase detector's corresponding parameter. This confirms that non-coherent systems are a compromise solution, offering lower accuracy but benefiting from reduced cost.
Keywords: Meteorological radar, wind shear, spectral width, phase and amplitude detectors.

Введение. Обеспечение безопасности полетов на этапах взлета и посадки остается приоритетной задачей авиации. Одним из наиболее опасных явлений для воздушных судов признан сдвиг ветра. Сдвиг ветра определяется как изменение скорости и/или направления ветра на небольшом участке траектории полета [1]. На малых высотах при заходе на посадку или при взлете внезапное возникновение сдвига ветра, вызывая резкое изменение воздушной скорости, может привести к критической потере подъемной силы и авиакатастрофам.

Для решения задачи обнаружения и измерения величины сдвига ветра применяются контактные (анемометрические комплексы LLWAS) и дистанционные методы: акустические (содар) [2], оптические (лидар) [3], радиолокационные. Предложенный в работах [4–5] метод определения сдвига ветра по оценкам ширины спектра принимаемого метеорологическим радиолокатором представляется наиболее перспективным для решение этой задачи. Целью данной статьи является сравнение ширины спектра на выходе фазового и амплитудного детекторов. Ниже рассмотрим.

Математическая модель сигналов. Рассмотрим ситуацию, характеризующуюся одновременным присутствием двух отражающих слоев в зоне обзора радиолокатора. Спектральные плотности мощности отраженных сигналов $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$ аппроксимируются функциями Гаусса:

$$S_1(\omega) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi\sigma_1^2}}\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), S_2(\omega) = \frac{P_2}{\sqrt{2\pi\sigma_2^2}}\exp\left(-\frac{(\omega-\omega_2)^2}{2\sigma_2^2}\right),$$

где ω, ω_1 и ω_2 — угловые частоты суммарного сигнала $S(\omega)$ и его составляющих сигнала; P_1 и P_2 — мощности отражений от первого и второго слоев; σ_1 и σ_2 —ширины спектра этих отражений.

Ширина спектра ${\sigma_\Phi}^2$ на выходе фазового детектора суммарного сигнала $S(\omega)$, состоящего из двух составляющих $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$ определяется формулой [5]:

$${\Delta\omega_\Phi}^2 = \frac{1}{P_1+P_2}\left[P_1{\sigma_1}^2 + P_2{\sigma_2}^2 + \frac{P_1P_2}{P_1+P_2}(\omega_1-\omega_2)^2\right].$$

Применение обратное преобразование Фурье (теорема Винера-Хинчина) $R_0(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{S(\omega)\}$, определяется корреляционной функции входного сигнала $R_0(\tau)$:

$$R_0(\tau) = P_1\exp\left(-\frac{\sigma_1^2\tau^2}{2}\right)e^{i\omega_1\tau} + P_2\exp\left(-\frac{\sigma_2^2\tau^2}{2}\right)e^{i\omega_2\tau}.$$

Как известно [6], коэффициент корреляционной функции квадрата огибающей

$(R_E(\tau))$: $R_E(\tau) = R_0(\tau)^2 = P_1^2\exp(-\sigma_1^2\tau^2) + P_2^2\exp(-\sigma_2^2\tau^2) +$

$+ 2P_1P_2\exp\left(-\frac{(\sigma_1^2+\sigma_2^2)\tau^2}{2}\right)\cos((\omega_1-\omega_2)\tau).$

Применение прямое преобразование Фурье (теорема Винера-Хинчина) к $R_E(\tau)$, определяется спектром функций квадрата огибающей:

$$S_E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_E(\tau)e^{-i\omega\tau}d\tau = P_1^2\frac{\sqrt{\pi}}{\sigma_1}\exp\left(-\frac{\omega^2}{4\sigma_1^2}\right) + P_2^2\frac{\sqrt{\pi}}{\sigma_2}\exp\left(-\frac{\omega^2}{4\sigma_2^2}\right) +$$

$$+P_1P_2\sqrt{\frac{2\pi}{\sigma_1^2+\sigma_2^2}}\left[\exp\left(-\frac{(\omega-\Delta\omega)^2}{2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}\right) + \exp\left(-\frac{(\omega+\Delta\omega)^2}{2(\sigma_1^2+\sigma_2^2)}\right)\right].$$

Для вычисления эффективной ширины спектра квадрата огибающей ${\Delta\omega_A}^2$ используется формула:

$${\Delta\omega_A}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty}\omega^2 S_E(\omega)d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty}S_E(\omega)d\omega} = \frac{2}{P_1+P_2}\left[P_1{\sigma_1}^2 + P_2{\sigma_2}^2 + \frac{P_1P_2}{P_1+P_2}(\omega_1-\omega_2)^2\right].$$

Сравнивая полученное выражение с формулой для фазового детектора, можно сделать фундаментальный вывод: квадрат ширины спектра на выходе амплитудного детектора всегда ровно в 2 раза превышает квадрат ширины спектра на выходе фазового детектора во всем диапазоне расстроек частот.

Заключение. Проведенный анализ показал, что некогерентный радиолокатор на основе амплитудного детектирования является компромиссным решением. С одной стороны, система проигрывает когерентным радарам в точности оценки спектральных характеристик из-за двукратного уширения квадрата ширины спектра. С другой стороны, данный метод оправдан в задачах, где допустимы

указанные ограничения ради снижения стоимости и повышения надежности оборудования, либо, когда фазовая информация принципиально недоступна.

Список литература

1. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах. Руководящий документ РД. Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2005. – 264 с
2. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: СО РАН, 2001. – 280с.
3. *Протопопов В.В., Устинов Н.Д.* Лазерное гетеродинирование. М.: Наука, 1985. – 288с.
4. *Жуков В.Ю., Денисенков Д.А.* Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 113–118.
5. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю.* Исследование эффективности методов радиолокационного измерения профиля ветра // VI Всерос. Армандовские чт. Тр. конф. «Радиофизие методы в дистанц. зондировании сред». 2016. — С. 402–406.
6. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники. – М., 1969.

НОВАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН НА АТМОСФЕРНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ

Шнайдер А.В.[1, 2]
Научный руководитель Е.Н. Савенкова[2]
[1] Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
anscheinend21@yandex.ru

Аннотация. В работе предложена методика выделения вклада спектра волн или отдельной волны в атмосферную циркуляцию на примере анализа нормальных атмосферных мод. Предварительные результаты показывают, что предложенный метод может быть использован для анализа отдельных составляющих волнового потока.
Ключевые слова. планетарные волны, нормальные атмосферные моды, остаточная меридиональная циркуляция, потоки волновой активности, динамика мезосферы и нижней термосферы.

A NEW METHOD FOR EVALUATING THE CONTRIBUTION OF PLANETARY WAVES TO ATMOSPHERIC CIRCULATION

Shnaider A.V.[1, 2]
academic advisor E.N. Savenkova[2]
[1] Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St Petersburg
[2] St Petersburg University, St Petersburg

Annotation. This article proposes a method for isolating the contribution of a wave spectrum or a single wave to atmospheric circulation using the example of analyzing normal atmospheric modes. Preliminary results show that the proposed method can be used to analyze individual components of the wave flow.
Keywords. planetary waves, normal atmospheric modes, residual mean circulation, wave activity flux, mesosphere and lower thermosphere dynamics

Атмосфера Земли — колебательная система, в которой суперпозиция и

нелинейные взаимодействия волновых компонент вызывают динамические явления, влияющие на всю систему. Область средней и верхней атмосферы изучена недостаточно, но известно [1, 2], что планетарные волны, достигая мезосферы и нижней термосферы (МНТ), диссипируют, передавая среде энергию и импульс. Часть волн отфильтровывается в районе мезопаузы, а область их поглощения нагревается, формируя локальный температурный режим. В исследованиях динамики МНТ особое внимание уделяется планетарным волнам с периодами 2–30 суток. В [3] показано статистически значимое наличие колебаний с периодами 30 часов – 40 суток. Максимальная волновая активность в МНТ (80–100 км) в Северном полушарии наблюдается летом. В летней мезопаузе формируются серебристые облака (СО) — самые высокие облака атмосферы, наблюдаемые с мая по сентябрь в высоких широтах Северного (реже Южного) полушария. Формирование полей СО зависит от активности планетарных волн и их взаимодействия со средним потоком. В [4] установлено существенное влияние нормальных атмосферных мод (НАМ), в частности усиление 10-дневной волны с зональным волновым числом m=1 в апреле-мае может сдвигать начало сезона СО на более ранние даты.

Для оценки вклада 10-дневных планетарных волн в динамику МНТ использовалась модель МСВА с 56 вертикальными уровнями и горизонтальным разрешением $5^{o} \times 5.625^{o}$. Расчёты выполнены для апреля. На основе полученных метеорологических характеристик зимне-весенней циркуляции рассчитывались остаточная меридиональная циркуляция в концепции преобразованного эйлерова среднего и потоки волновой активности Элиассена-Палма (детали в [5]). Вклад НАМ (периоды 10 и 16 дней) выделялся усреднением по временным окнам, используемым как фильтр.

Проведён эксперимент на данных моделирования с декабря по февраль: расчёты со сроками осреднения 4 часа – 3 дня, 6–10 дней, 10–18 дней и 30 дней. В этих интервалах предполагается активность соответственно приливных волн, семи- и десятидневных волн (НАМ), шестнадцатидневной волны (НАМ) и стационарных планетарных волн с зональными числами 1 и 2. Стационарные волны выделены методом комплексных амплитуд.

Структура и значения результатов разных методов в этом эксперименте схожи. Разница обусловлена тем, что осреднение учитывает все процессы во временном интервале (включая нелинейные взаимодействия волна-волна), а метод комплексных амплитуд — только выбранные нами волны. Уточнение и приближение результатов разных методов возможно при учёте большего числа волн, входящих в интервал.

Далее выполнен эксперимент по выделению квази-десятидневной волны на данных МСВА за апрель с усиленным источником квази-десятидневной волны (вторая ассиметричная НАМ) для лучшего отображения её в данных и удобства анализа. Осреднение проведено по 6 и 12 дням (предполагается, что в этом окне самая сильная волна – как раз десятидневная); рассчитаны вихревая составляющая остаточной меридиональной циркуляции (рис. 2) и поток Элиассена-Палма (рис. 3). Эти поля были рассчитаны также и методом комплексных амплитуд, в котором выделялась только квази-десятидневная волна (период 220 часов).

Из-за осреднения колебания в данных неизбежно уменьшаются, из-за чего уменьшается вихревая составляющая, которую мы рассматриваем, поэтому в данной работе в случае выделения одной волны предлагается вводить коэффициент линейного умножения поля, чтобы приблизить данные метода осреднения к методу комплексных

амплитуд; в данном случае коэффициент равен 6.95. Структура полей по методу выделения гармоник и осреднения примерно совпадает и показывает, что в Северном полушарии десятидневная волна усиливает меридиональную циркуляцию, а в Южном наоборот ослабляет.

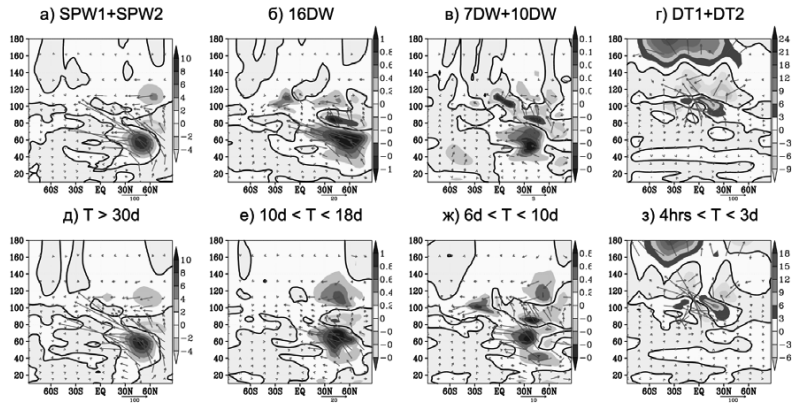


Рисунок 1 – Широтно-высотные распределения волнового потока Элиассена-Палма (стрелки) и его дивергенции (заливка) за декабрь–февраль: (а) стационарные волны с m=1,2; (б) 16-дневная волна; (в) 7- и 10-дневные волны; (г) приливные волны; (д–з) соответствующие осреднения по времени

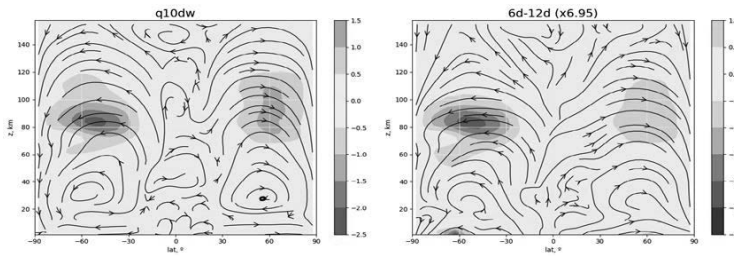


Рисунок 2 – Широтно-высотные распределения вихревого вклада в остаточную меридиональную циркуляцию по модельным данным за апрель; линии тока – направление циркуляции, заливка – значение только меридиональной составляющей; слева – метод комплексных амплитуд, справа – метод осреднения по времени

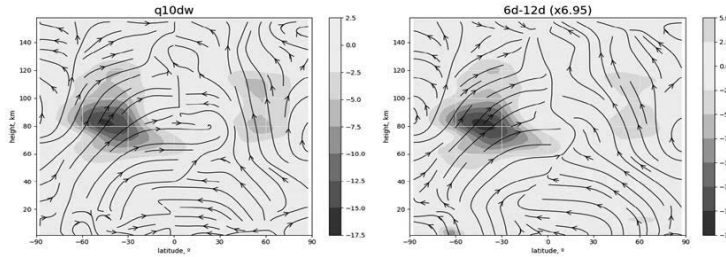


Рисунок 3 – Волновой поток Элиассена-Палма, линии тока – направление потока, заливка – дивергенция потока; слева – метод осреднения по времени, справа – значения, полученные выделением только десятидневной волны по модельным данным за апрель; слева – метод комплексных амплитуд, справа – метод осреднения по времени

Список литературы

1. *Угольников О. С.* Стратосфера и мезосфера Земли: оптические и тепловые свойства // Лекции. БШФФ–2017. С. 3–8.
2. *Бахметьева Н. В., Григорьев Г. И., Лапин В. Г.* О влиянии вихревых движений в мезосфере и нижней термосфере на эволюцию сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями // Известия вузов. Радиофизика, Т. LVII, №5 2014. С. 400–412.
3. *Вергасова Г. В., Казимировский Э. С., Полех Н. М., Хионг Дж., Лю Л.* Проявление колебаний с периодами планетарных волн в вариациях критических частот слоя F2 ионосферы в азиатском регионе // ГЕОМАГНЕТИЗМ И АЭРОНОМИЯ, 2011, том 51, № 6, с. 778–789.
4. *Соколов А.В., Савенкова Е.Н.* Активность 10-дневной волны как возможная причина аномально раннего формирования полей серебристых облаков. Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Материалы XXX Юбилейного Международного симпозиума. Томск, 2024. С. 1096-1099.
5. *Koval, A.V., Chen, W., Didenko, K.A., Ermakova, T.S., Gavrilov, N.M., Pogoreltsev, A.I., Toptunova, O.N., Wei, K., Yarusova, A.N., Zarubin, A.S.* (2021) Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // Ann. Geophys., 39, 357–368, DOI: 10.5194/angeo-39-357-2021

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ УЧЕНИЙ VOLCEX25

Петухов Г.М.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Gena22007@yandex.ru

Аннотация. Приводятся основные результаты проведенного 18 ноября 2025 года международных учений по вулканическому пеплу (Volcanic Ash Exercise - VOLCEX) под эгидой международной организации гражданской авиации (ИКАО).
Ключевые слова. Вулканический пепел, ИКАО, VAA, VAAC, VOLCEX, VONA, WV SIGMET.

THE MAIN RESULTS OF THE VOLCEX25 EXERCISES

Petukhov G.M.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The main results of the international Volcanic Ash Exercise (VOLCEX) conducted on November 18, 2025 under the auspices of the International Civil Aviation Organization (ICAO) are presented.
Keywords. Volcanic ash, ICAO, VAA, VAAC, VOLCEX, VONA, WV SIGMET.

В состав Международной организации гражданской авиации (ИКАО) входит 193 договаривающихся государств (государств-членов ИКАО) включая и Российскую Федерацию. Фундаментальной целью ИКАО является объединение всех стан-участников к совместному приложению усилий в области безопасности полетов для достижения нулевого уровня смертности в гражданской авиации (ГА) [1].

Ключевым стандартом ИКАО способствующим дальнейшему развитию упреждающей стратегии повышения безопасности полетом является Приложение 19 [2], которое призвано помочь государствам в управлении рисками для безопасности полётов и способствовать развитию упреждающей стратегии в сфере безопасности полётов. В целях единообразного подхода при внедрении систем управления безопасностью полетов, было разработано Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) [3].

В данном руководстве содержатся подробные рекомендации относительно принципов и методов управления безопасностью полётов в ГА всех поставщиков обслуживания по всей цепочке обслуживания внутри системы, том числе и обязательство по выявлению опасных факторов, включая естественные факторы, являющиеся следствием воздействия окружающей среды или условий, в которых осуществляется деятельность, например:

a) экстремальные погодные или климатические явления (например, ураганы, метели, засухи, смерчи, грозы, молния и сдвиг ветра);

b) неблагоприятные погодные условия (например, обледенение, переохлажденные осадки, ливень, снег, ветер и ограниченная видимость);

c) геофизические явления (например, землетрясения, извержения вулканов, цунами, наводнения и оползни);

d) географические условия (например, неблагоприятный рельеф местности или большие водные пространства);

e) экологические явления (например, лесные пожары, проявления живой природы и инвазия насекомых или вредителей); и/или

f) связанные со здравоохранением события (например, эпидемии гриппа или других заболеваний).

Опасные факторы являются неотъемлемой часть деятельности ГА, поэтому их выявление и последующая оценка риска для безопасности полетов требуют четкого понимания опасных факторов и связанных с ними последствий. Извержение исландского вулкана Эйяфьядлайёкюдль в марте 2010 года в результате которого было парализовано воздушное сообщение в Европе принесший большой экономический ущерб для ГА и смежных отраслей экономики, стало отправной точкой по проведению учений по вулканическому пеплу.

С 2011 года в Европейском и Североатлантическом регионе ИКАО ежегодно проводятся учения под названием VOLCEX, посвященные вопросам взаимодействия и координации действий при распространении вулканического пепла в воздушном

пространстве Европейских государств, включая западную часть территории России, географически относящаяся к Европе.

Очередные учения VOLCEX25 прошли в период 08:00-16:00 UTC (по Гринвичу) 18 ноября 2025 года в котором приняли участие филиалы ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (Калининграда, Москвы и Санкт-Петербурга) совместно с органами метеорологического слежения (ОМС) Росгидромета. В период учений Исландский ОМС выпустил 7 извещений в формате VONA (Volcano Observatory Notices for Aviation) об извержении вулкана Катла с выбросом вулканического пепла до высоты 20 км, а также одно извещение о внезапном усилении сейсмической активности вулкана Катла до начала учений [4].

Консультативный центр по вулканическому пеплу (VAAC - Volcanic Ash Advisory Center) Лондон выпустил 5 учебных консультативных сообщений о вулканическом пепле (VAA - Volcanic Ash Advisory), ОМС Калининград, Москва и Пулково выпустили учебные сообщения EXER WV SIGMET, сформированные с использованием МетАвиаГис на основе сообщений VAAC Лондон.

Из анализа результатов учений VOLCEX25 были сделаны следующие выводы [4]:

1. Сценарии 2-х этапов учений, с моделированием облака вулканического пепла (VA – Volcanic Ash) на одно и тоже время, но для разных метеорологических условий, был не удобен для работы. Учебные сообщения VAAC Лондона были выпущены с отсутствием синхронизации по реальному времени, т.е все 5 сообщений VAA указывали одно время наблюдения и формирования их выпуска 01:00 UTC.

2. Лондонский VAAC допустил отклонения от установленных Директив учений, в части выпуска дополнительных сообщений VAA, в том числе с изменениями местоположения облака VA.

3. ОМС Москва выпустил учебные сообщения WV SIGMET без перевода строк текста сообщения после сокращения EXER.

4. ОМС Калининград сформировал учебное сообщение EXER WV SIGMET без ошибок, однако при использовании разного программного обеспечения при отправке в автоматизированной системе передачи данных произошла замена знака «-» во второй строке SIGMET на непредусмотренные знаки (–)

5. Значимую поддержку при формировании SIGMET, особенно WV SIGMET на основе визуализации консультативных сообщений VAAC, оказывает применяемое программное обеспечение МетАвиаГис. Вместе с тем, в процессе учений VOLCEX25 выявилась необходимость доработки МетАвиаГис для реализации следующих приложений:

5.1 При визуализации сообщения WV SIGMET (WC SIGMET) отображать два облака VA (два тропических циклона), указанном в данном сообщении.

5.2 При визуализации консультативных сообщений VAA в компоненте формирования SIGMET отсекать затенение областей, выходящих за границы заданного района полетной информации.

5.3 Ускорить реализацию выпуска сформированных сообщений SIGMET с применением МетАвиаГис в целях исключения ошибок в выпущенных сообщениях.

5.4 В разделе «Список сообщений» отображать сообщения SIGMET:

а) в том формате, в каком данное сообщение выпущено (получено) с учетом деления текста на строки;

б) с выделением цвета сокращений для явлений (с принятой цветовой гаммой);

в) выпущенные в период учений (EXER) и мониторингов (TEST).

5.5 Создать на МетАвиаГис линейку и планиметр для измерения расстояния между различными компонентами и объектами, например, для расчета времени начала влияния облака VA (тропического циклона) на воздушное пространство района полетной информации.

Полученные практические результаты учений VOLCEX25, способствуют поддержанию профессиональных компетенций всех участников учений, повышению эффективности обеспечения безопасности полетов, снижению рисков попадания экипажей воздушных судов внештатные условия полета при выполнении полетов в районах с активной вулканической деятельностью.

Список литературы

1. Стратегический план Международной организации гражданской авиации (ИКАО) на 2026-2050 годы «Безопасное небо, устойчивое будущее» официальный сайт. – URL: https://www.icao.int/about-icao/Council/strategic-plan-2026-2050 (дата обращения 03.12.2025).
2. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации «Управление безопасностью полетов»: официальный сайт. – URL: https://elibrary.icao.int/product/686620 (дата обращения 03.12.2025).
3. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Руководство по управлению безопасностью полётов (РУБП): официальный сайт. – URL: https://elibrary.icao.int/product/229754 (дата обращения 03.12.2025).
4. Анализ участия ОМС Российской Федерации в международных учениях VOLCEX25 в Европейском и Североатлантическом регионах ИКАО: официальный сайт. – URL: http://авиаметтелеком.рф/upload/docs/2025/analysis_volcex25_20251125.pdf (дата обращения 03.12.2025).

СИСТЕМА АНАЛИЗА ОБЛАЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ПИКСЕЛЬНОГО АНАЛИЗА И УЛУЧШЕННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИИ

Ивлев М.О.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
ivlev.mxl@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена система гибридного анализа облачного покрова, сочетающая пиксельную обработку изображений с моделями компьютерного зрения на основе искусственного интеллекта. Система работает в онлайн и оффлайн режимах с точностью классификации до 85-95%.
Ключевые слова. Облачный покров, компьютерное зрение, искусственный интеллект, пиксельный анализ, метеорологический анализ, гибридная система, автономная работа.

HYBRID CLOUD COVERAGE ANALYSIS SYSTEM USING PIXEL-BASED AND AI-ENHANCED COMPUTER VISION

Ivlev M.O.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. This paper presents a hybrid cloud coverage analysis system combining pixel-based image processing with AI-enhanced vision models, operating in both online and offline modes with up to 85-95% classification accuracy. The system maintains full functionality offline through localStorage-based persistence.
Keywords. Cloud coverage, computer vision, artificial intelligence, pixel analysis, meteorological analysis, hybrid system, offline operation.

Введение. Оценка облачного покрова представляет собой фундаментальную задачу в метеорологии, авиации и экологическом мониторинге [1]. Современные достижения в области компьютерного зрения и машинного обучения открыли перспективы для создания автоматизированных решений [2]. Настоящая статья документирует разработку гибридной системы, интегрирующей пиксельный анализ с технологиями искусственного интеллекта. Система реализует архитектуру offline-first с синхронизацией облачных сервисов.

Методология.

Алгоритм пиксельного анализа. Разработанный алгоритм пиксельного анализа функционирует в рамках чётко структурированного четырёхэтапного процесса. На первом этапе выполняется нормализация входного изображения, в ходе которой исходное изображение загружается как растровое и отрисовывается на холсте обработки, производится нормализация размеров до максимального разрешения 400×400 пикселей для оптимизации вычислений и осуществляется извлечение данных цветовых каналов RGBA для каждого пикселя изображения.

Второй этап посвящён спектральной классификации, где для каждого пикселя рассчитываются три ключевых параметра. Показатель яркости вычисляется как среднее арифметическое значений красного, зелёного и синего каналов:

$$\text{Яркость} = (R + G + B) / 3 \quad (1)$$

Параметр синевы определяется через разность между значением синего канала и максимальным значением из красного и зелёного каналов:

$$\text{Синева} = B - max(R, G) \quad (2)$$

Индекс серости выводится на основе анализа цветового разброса между каналами:

$$\text{Серость} = 255 - max(|R - G|, |G - B|, |R - B|) \quad (3)$$

На третьем этапе происходит категоризация пикселей согласно заданным критериям. Пиксели идентифицируются как участки чистого неба при условии превышения порога синевы, ограничении яркости и минимальном значении синего канала. Яркие облака детектируются по комбинации высокой яркости и выраженной серости, в то время как серые облака определяются по умеренным показателям яркости в сочетании со значительной серостью.

Завершающий этап включает расчёт итоговых показателей облачности. Процент облачного покрова вычисляется как отношение количества пикселей, классифицированных как облака, к общему количеству пикселей неба и облаков. На основе этого рассчитывается интегральная оценка от 0 до 10 баллов через нормализацию и округление значения облачности.

Алгоритм улучшенного анализа с использованием ИИ. Модуль искусственного интеллекта существенно расширяет возможности базового пиксельного анализа за счёт

внедрения умных алгоритмов обнаружения границ и комплексной контекстной интерпретации изображения. Система осуществляет классификацию по расширенному набору категорий, включающему синие пиксели чистого неба, белые пиксели ярких облачных образований, серые пиксели кучевых облаков, тёмные пиксели кучево-дождевых облаков и теневых областей, а также граничные пиксели, определяющие контуры облачных формаций [3].

Архитектура системы. Технологический стек построен на Next.js 16 с React 19.2, shadcn/ui и Tailwind CSS. Управление состоянием реализовано через React Hooks и SWR для кэширования. Автономная работа обеспечивается localStorage и сервис-воркером PWA.

Результаты реализации

Метрики точности анализа. Анализ отдельных снимков облачного неба указывает на потенциальную работоспособность и перспективность описанного метода для применения в реальных условиях. Однако получение достаточного количества репрезентативных изображений небосвода на данный момент представляет определённые логистические и организационные трудности. Поэтому на данном этапе исследования было принято решение о применении сгенерированных, упрощённых изображений с заведомо известным количеством покрытия «небосвода» «облаками» для оценки точности описанного анализа.

Результаты анализа. Результаты тестирования (n=500 сгенерированных изображений неба): ясное небо (0-12,5%) – точность 94%; незначительная облачность (12,5-25%) – точность 89%; рассеянная облачность (25-50%) – точность 87%; разорванная облачность (50-87,5%) – точность 85%; сплошная облачность (>87,5%) – точность 91%. Общая точность составила 89,2% ± 4,1%.

Сравнительный анализ преимуществ. Проведённый сравнительный анализ выявил специфические преимущества каждого из реализованных методов. Пиксельный анализ демонстрирует высокую надёжность благодаря детерминированному характеру алгоритма, обеспечивающему полную воспроизводимость результатов.

Метод с использованием искусственного интеллекта превосходит пиксельный анализ в сложных сценах с неоднородным освещением и перекрывающимися облачными слоями. Его ключевым преимуществом является способность к контекстной интерпретации погодных условий.

Ограничения и перспективы развития. Несмотря на высокую эффективность, текущая реализация системы имеет определённые ограничения. Модуль искусственного интеллекта в демонстрационной версии использует симуляцию и мультимодальный ИИ, тогда как дальнейшее внедрение потребует интеграции специализированных моделей компьютерного зрения.

Перспективные направления развития системы включают интеграцию с современными ML-моделями, такими как YOLO и Vision Transformers, внедрение многокадрового временного анализа для отслеживания динамики облачности.

Заключение

Продемонстрированная методика представляет собой перспективную реализацию системы гибридного анализа облачности. Двухметодный подход обеспечивает стабильно высокую точность на уровне до 89,2% при сохранении полной функциональности в автономном режиме. Разработанная система вносит значительный вклад в область метеорологического анализа.

Список литературы

1. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1984 г.- 752 с.
2. *LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep learning // Nature. 2015. Vol. 521. 436-444 с.
3. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv:1409.1556. 2014.

МОДЕРНИЗАЦИЯ МОБИЛЬНОГО СЧЁТЧИКА ГЕЙГЕРА ДЛЯ АВТОНОМНОГО МОНИТОРИНГА РАДИАЦИОННОГО ФОНА

Хохлин А.О.
Научный руководитель Т.Е.Симакина
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
senya.khokhlin@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается новый этап разработки мобильного счётчика Гейгера, предназначенного для мониторинга радиационного фона в полевых условиях. Описаны основные направления модернизации прибора, включающие переход на микроконтроллерную платформу ESP32-S3, реализацию автономной передачи данных по сетям GSM/GPRS с использованием модуля SIM800C, разработку локального пользовательского интерфейса на основе OLED-дисплея с кнопочным управлением, а также проектирование защитного корпуса, основанного на принципах психрометрической будки. Предложенные инженерные решения повышают устойчивость работы устройства, автоматизируют передачу измерительных данных и обеспечивают корректные условия функционирования датчиков при длительных полевых измерениях.
Ключевые слова. радиационный фон, счётчик Гейгера, ESP32-S3, SIM800C, автономный мониторинг, мобильные измерения.

MODERNIZATION OF A MOBILE GEIGER COUNTER FOR AUTONOMOUS RADIATION BACKGROUND MONITORING

Khokhlin A.O.
academic advisor T.E. Simakina
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Annotation. The paper presents a new stage in the development of a mobile Geiger counter designed for radiation background monitoring under field conditions. The main aspects of device modernization are described, including the transition to the ESP32-S3 microcontroller platform, implementation of autonomous data transmission via GSM/GPRS networks using the SIM800C module, development of a local user interface based on an OLED display with integrated buttons, and the design of a protective enclosure inspired by the principles of a psychrometric shelter. Proposed engineering solutions improve system stability, enable automatic data transmission, and ensure appropriate operating conditions for sensors during long-term field measurements.
Keywords. radiation background, Geiger counter, ESP32-S3, SIM800C, autonomous monitoring, mobile measurements.

Мониторинг радиационного фона в городской и пригородной среде требует применения компактных и автономных измерительных приборов, способных функционировать в течение длительного времени без постоянного контроля со стороны оператора. Особенно актуальны такие устройства при проведении маршрутных измерений, локальных обследований и экспресс-оценки радиационной обстановки, когда важна не только фиксация значений мощности дозы, но и оперативная передача данных для последующего анализа [1]. Развитие микроконтроллерных платформ и средств

мобильной связи позволяет создавать мобильные измерительные комплексы, сочетающие функции регистрации, хранения и передачи информации.

Ранее разработанная версия мобильного счётчика Гейгера обеспечивала базовые функции измерения и локального хранения данных, однако по мере расширения функциональности были выявлены ограничения, связанные с используемой аппаратной платформой. Однопоточная архитектура и ограниченный объём оперативной памяти микроконтроллера ESP8266 приводили к снижению устойчивости работы при одновременной обработке данных от датчиков, записи на SD-карту, обслуживании веб-интерфейса и приёме GPS-сообщений. При длительной эксплуатации это выражалось в увеличении задержек и нестабильной работе отдельных подсистем.

В рамках нового этапа разработки был выполнен переход на микроконтроллер ESP32-S3, обладающий двухъядерной архитектурой и расширенными вычислительными ресурсами. Архитектура данной платформы обеспечивает параллельное выполнение вычислительных и сервисных процессов, включая обработку данных, работу сетевых интерфейсов и взаимодействие с периферийными устройствами. Это позволило снизить влияние блокирующих операций, характерных для предыдущей версии прибора, и обеспечить более устойчивую работу устройства при одновременном выполнении измерений, записи данных и обслуживании интерфейсов связи. Дополнительным преимуществом ESP32-S3 стало расширенное количество интерфейсов ввода-вывода, представленных на рисунке 1, что упростило подключение периферийных модулей и повысило масштабируемость системы [2].

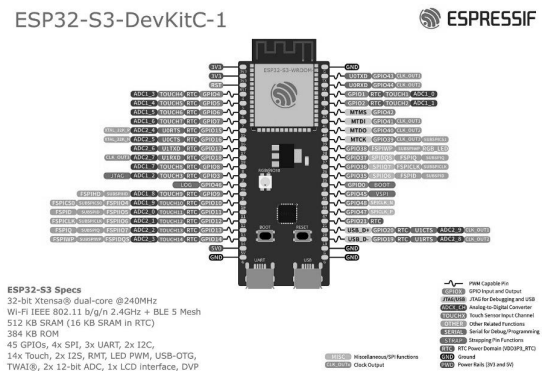


Рисунок 1 – Размещение интерфейсов ввода-вывода на плате ESP32-S3

Для реализации возможности оперативной передачи данных сразу после выполнения измерений в прибор был интегрирован модуль мобильной связи SIM800C, работающий в сетях GSM/GPRS. Применение мобильного канала связи позволяет автоматически передавать результаты измерений на удалённый сервер без участия оператора и без зависимости от локальных сетей Wi-Fi. В разработанном приборе передача данных осуществляется в виде CSV-файлов на FTP-сервер, развёрнутый на базе сетевого хранилища OpenMediaVault. Такая схема обеспечивает централизованное хранение информации, снижает риск потери данных и упрощает их последующую обработку. Взаимодействие с модулем SIM800C реализовано на уровне AT-команд и интегрировано в программную архитектуру устройства таким образом, чтобы сетевые операции не оказывали влияния на выполнение измерительных процессов [3].

Для повышения удобства эксплуатации и обеспечения автономной работы прибора был реализован локальный пользовательский интерфейс. В устройстве использован OLED-дисплей с разрешением 128×64 пикселя, позволяющий отображать значения мощности дозы, параметры окружающей среды, координаты GPS и диагностическую информацию о состоянии системы. Реализованный кнопочный интерфейс обеспечивает навигацию по экранам, управление режимами записи и запуск передачи данных, что позволяет работать с прибором без использования внешних клиентских приложений или веб-интерфейса.

Отдельное внимание при модернизации прибора было уделено разработке защитного корпуса. Конструкция корпуса была полностью спроектирована с нуля в среде трёхмерного моделирования Autodesk Fusion 360. При проектировании использовались принципы, применяемые в конструкции психрометрической будки, в частности система жалюзи, предназначенная для защиты измерительных приборов от прямого солнечного излучения и атмосферных осадков при сохранении свободной циркуляции воздуха [4]. Корпус выполнен в виде двухсекционной конструкции: в нижней части размещены датчики окружающей среды и счётная трубка, для которых важно поддержание стабильных условий, а в верхней — электронные компоненты прибора. Изготовление корпуса осуществлено методом FDM-печати из белого PLA-пластика, что позволяет снизить нагрев устройства при эксплуатации на открытой местности, внешний вид модернизированного устройства представлен на рисунке 2 и 3.

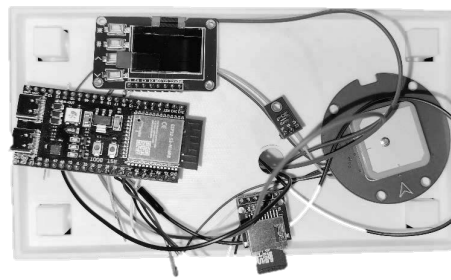


Рисунок 2 – Внешний вид устройства с закрытой крышкой

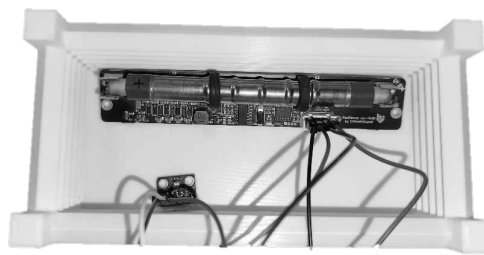


Рисунок 3 – Внешний вид устройства с открытой крышкой

Реализованные конструктивные и программные решения позволили существенно повысить устойчивость работы мобильного счётчика Гейгера и расширить его функциональные возможности. Прибор обеспечивает автоматическую регистрацию и

передачу данных, обладает удобным локальным интерфейсом и может использоваться для длительных полевых измерений радиационного фона. Разработанная архитектура создаёт основу для дальнейшего развития системы, включая расширение набора датчиков и внедрение дополнительных методов обработки и визуализации измерительной информации.

Список литературы

1. *Иванов В. В.* Основы радиационного контроля и дозиметрии: учеб. пособие. — М.: Энергоатомиздат, 2015. — 320 с.
2. Espressif Systems. ESP32-S3 Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. — Espressif Systems, 2022. — Режим доступа: https://www.espressif.com (дата обращения: 15.12.2025).
3. SIMCom Wireless Solutions. SIM800 Series AT Command Manual [Электронный ресурс]. — SIMCom, 2020. — Режим доступа: https://www.simcom.com (дата обращения: 15.12.2025).
4. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). — Geneva: World Meteorological Organization, 2018. — 1150 p.
5. *Климов А. А.* Применение счётчиков Гейгера в задачах экологического мониторинга // Экология и промышленность России. — 2018. — № 4. — С. 45–50.

СЕКЦИЯ 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА «ОСТРОВА СУХОСТИ» В Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Озерова Н.А.
Научный руководитель О.Г. Анискина
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
nadinalex19@mail.ru

Аннотация. Изучается один из эффектов городской среды, вызываемый антропогенным влиянием, - остров сухости. Исследование проводится с использованием модели WRF-ARW и с применением двух параметризаций городской застройки. В основе исследования лежат критические, показательные дни зимнего и летнего периода в условиях циклонического и антициклонического влияния.
Ключевые слова. Городской остров сухости, урбанизация, модель WRF-ARW, модель городского навеса UCM, параметризация энергопотребления зданий BEP.

THE "DRY ISLAND" EFFECT DISPLAY IN ST. PETERSBURG

Ozerova N.A.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St.Petersburg

Abstract. This paper examines one of the effects of the urban environment caused by anthropogenic influence – the dry island. The study is conducted using the WRF-ARW model and two urban parameterizations. The study is based on critical, representative days of winter and summer under cyclonic and anticyclonic influences.
Keywords. Urban dry island, urbanization, WRF-ARW model, urban canopy model UCM, BEP building effect parameterization.

В настоящее время урбанизация достигла глобальных масштабов. Города с большой плотностью населения и развитой инфраструктурой становятся одними из самых уязвимых мест в условиях современного климата. Изменения климата в российских регионах выражаются в увеличении частоты экстремальных природных явлений, повышении уровня моря, таянии многолетней мерзлоты и загрязнении окружающей среды, что приводит к ухудшению условий жизни в городах [1].

При анализе климатических характеристик городов важно учитывать эффект урбанизации, то есть искажающее влияние городов на естественные метеорологические процессы.

Для городского климата характерен феномен «острова тепла», где в центральных частях крупных городов наблюдается максимальная температура воздуха. Интенсивность и размер эффекта варьируются в зависимости от метеорологических условий и особенностей города [2].

Температурная разница между городским островом тепла и окружающими территориями может достигать нескольких градусов Цельсия, обычно она более выражена ночью и чаще наблюдается при слабом ветре [3]. Ночное охлаждение поверхностей и приземного воздуха в городах происходит медленнее из-за накопленного

тепла, что приводит к более высоким ночным температурам воздуха в городских районах по сравнению с более быстрым охлаждением в сельской местности. Интенсивность эффекта острова тепла уменьшается ближе к рассвету.

В данной работе оценивается изменение климата в северных регионах на примере Санкт-Петербурга.

Периоды наибольшей выраженности эффекта острова тепла наблюдаются в зимний период, особенно при малооблачной и безветренной погоде с преобладанием устойчивой стратификации атмосферы, что характерно для антициклонов.

Для Санкт-Петербурга характерно преобладание циклонической циркуляции с изменчивыми погодными условиями, при которых локальные климатические особенности проявляются меньше, что приводит к меньшей разнице температур между центром города и его пригородами. Эффект острова тепла также смягчается близостью Финского залива [4].

Тем не менее, несмотря на преобладание циклонической циркуляции в Санкт-Петербурге, существуют вторжения арктических воздушных масс, а также усиление влияния Сибирского антициклона. Это создает благоприятные условия для усиления острова тепла.

Особый интерес в данное время представляет эффект неразрывно связанный с островом тепла – городской остров сухости. Остров тепла проявляет себя в разнице температур между городом и его окрестностями, а остров сухости – в различном количестве выпадающих осадков. В центре города фиксирует меньшее количество осадков по сравнению и пригородными территориями из-за городской застройки.

В данном исследовании использовалась мезомасштабная гидродинамическая модель WRF-ARW для изучения острова сухости.

Используемая сетка включает в себя три домена (рисунок 1). Первый домен покрывает Европейскую часть России, часть Скандинавии и северо-восток Европы с пространственным разрешением 9 км. Второй домен, или первая вложенная сетка, включает в себя Ленинградскую и Новгородскую области, а также Финский залив и имеет пространственное разрешение 3 км. Третий домен, или вторая вложенная сетка, покрывает район Санкт-Петербурга и близлежащих территорий с пространственным разрешением 1 км.

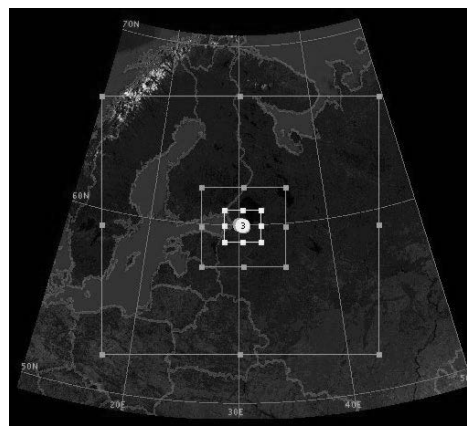


Рисунок 1 – Модельная сетка, используемая в исследовании

Данные NCEP FNL с разрешением 0,25° использовались в качестве исходных данных для постановки начальных и граничных условий модели.

В данном исследовании рассмотрен период с 1 по 31 января 2010 года и с 1 по 31 июля 2010 года. Также проводятся исследование для каждого года в период с 1980 по 2020 для влияния климатических изменений.

Используются две параметризации для уточнения городской застройки. Первая параметризация представлена моделью городского полога UCM. Вторая – параметризация энергопотребления зданий BEP.

Произведено несколько численных экспериментов. Первый запуск модели проведен без включения параметризаций, второй – с использованием модели городского полога и третий – с учетом параметризации энергопотребления зданий.

В модели городского полога предполагаются бесконечно длинные улицы – «уличные каньоны», представляющие геометрию города. В уличном каньоне учитываются затенение, отражение и поглощение радиации. Прогностические переменные включают температуру поверхности крыш, стен и дорог и профили температуры в пределах моделируемых слоев крыши, стен и дорог (рисунок 2).

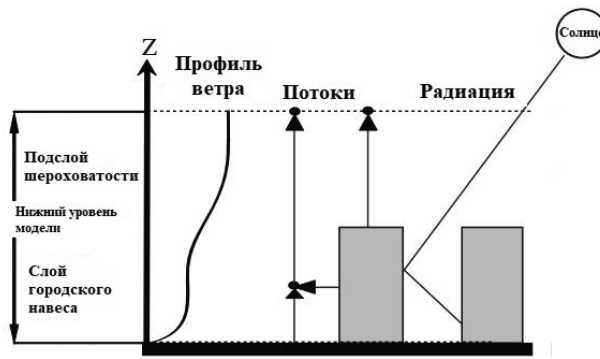


Рисунок 2 – Схематическое изображение модели городского полога [5]

Более близкое к реальности описание зданий с точки зрения их высоты представлено в параметризации BEP [6], где высота каньона не является постоянной величиной, а задается функцией распределения (рисунок 3). Радиационные потоки рассчитываются на каждом уровне каньона с учетом вероятности превышения зданиями высоты этого уровня.

Для оценки влияния городской застройки на остров сухости, то есть на количество осадков в пределах города, отобраны критические дни за зимний и летний периоды 2010 года. Для зимнего периода оценивались дни с зарегистрированным сильным снегопадом; для летнего – случаи грозовой активности [7]. Для подтверждения вероятности происхождения отобранных явлений дополнительно произведена оценка синоптических ситуаций в критические дни [8].

Критические дни, отобранные в зимний период:

- 5 января;
- 7 января;
- 17 января.

Критические дни, отобранные в летний период:

- 1 июля;
- 9 июля;

- 16 июля;
- 24 июля;
- 31 июля.

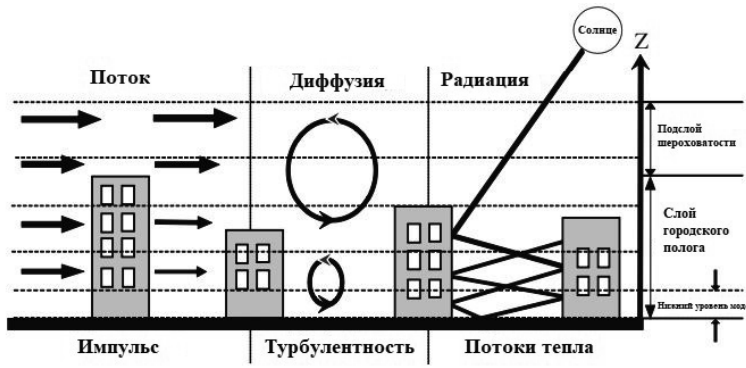


Рисунок 3 – Схематическое изображение модели городского полога [5]

Далее были рассмотрены результаты моделирования за соответствующие дни с целью их последующей оценки. Оценка заключалась в сравнении прогнозируемого количества осадков с фактически измеренным [7]. На данном этапе работы оценка проводилась только путем сравнения графического результата моделирования осадков со станционными измерениями. Верификация данным способом предоставила положительные результаты, что позволило приступить к оценке возможности проявления городского острова сухости.

Для выявления городского острова сухости среди критических дней отобраны один зимний день (7 января 2010 года) и один летний день (1 июля 2010 года). Острова сухости выявлялись при оценке количества выпадающих осадков в динамике в течение отобранных дней.

Рассмотрим 7 января 2010 года, когда погода в пределах Санкт-Петербурга определялась передней частью циклона с постепенным влиянием фронта окклюзии (таблица 1).

Согласно метеорологической станции Санкт-Петербург [7] 7 января 2010 года было зарегистрировано 2 мм осадков в 06 часов ВСВ и 6 мм осадков в 18 часов ВСВ.

Для сравнения с количеством осадков в городе были выбраны две метеорологические станции, находящиеся вне городской застройки: станция Озерки – к северо-западу от города, и станция Шлиссельбург – к востоку от города. Количество зарегистрированных осадков на данных станциях по сравнению со станцией Санкт-Петербург представлено в таблице 2.

Таблица 1 – Синоптические карты за 7 января 2010 года (слева направо, сверху вниз – 00 ВСВ, 06 ВСВ, 12 ВСВ, 18 ВСВ) [8]

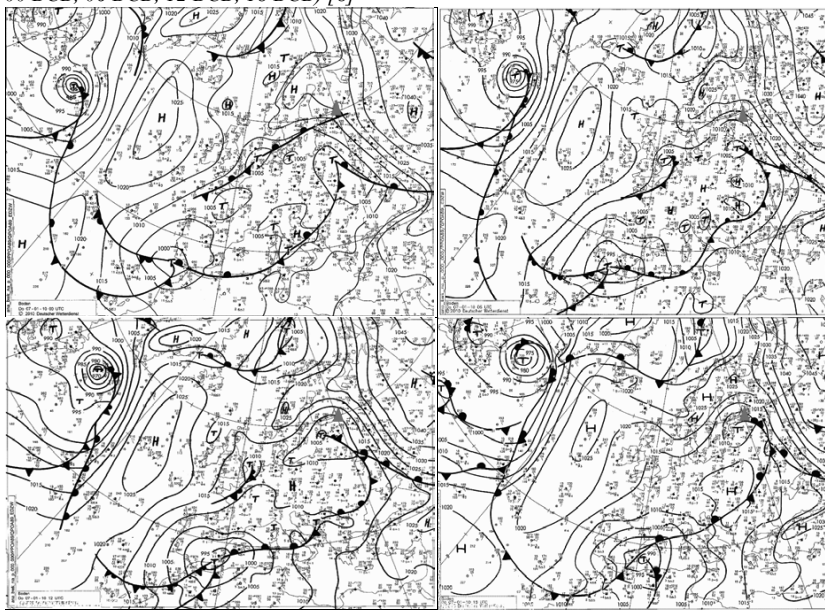


Таблица 2 – Количество осадков на метеорологических станциях Ленинградской области 7 января 2010 года [7]

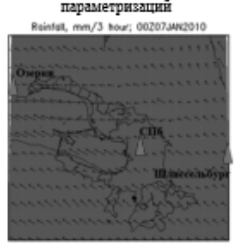
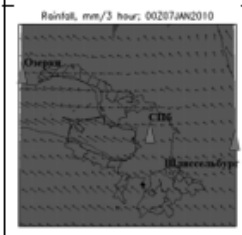
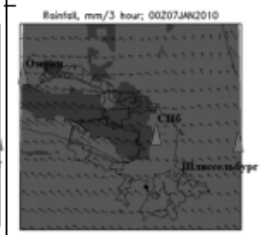
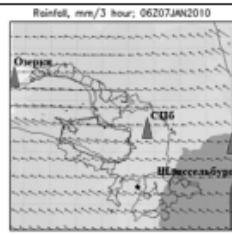
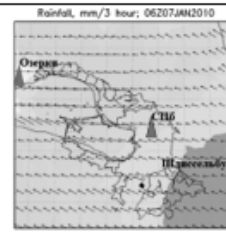
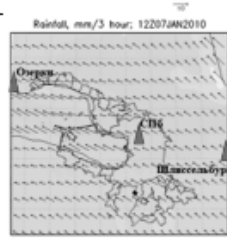
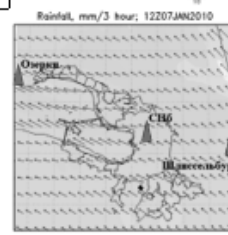
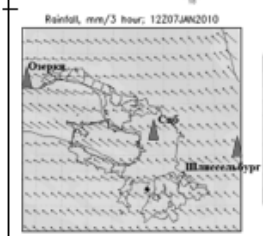
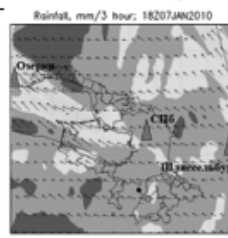
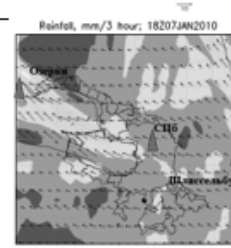
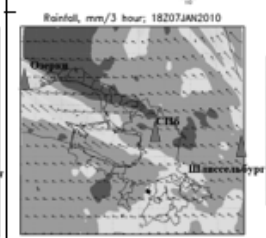
	Санкт-Петербург	Озерки	Шлиссельбург
06 ВСВ	2 мм	4 мм	1 мм
18 ВСВ	6 мм	5 мм	2 мм

Из таблицы 2 можно сделать предварительные выводы о проявлении городского острова сухости.

- Станция Шлиссельбург 7 января регистрировала меньшее количество осадков по сравнению со станцией Санкт-Петербург;
- Станция Озерки 7 января регистрировала большее количество осадков по сравнению со станцией Санкт-Петербург в утренние часы и меньшее количество – в вечерние часы.

Предварительные результаты неоднозначны, требуется рассмотрение результатов моделирования количества выпавших осадков за 7 января (таблица 3). Рассмотрим результаты как без учета параметризаций, так и с учетом параметризаций UCM и BEP.

Таблица 3 – Количество осадков за 7 января 2010 года согласно результатам моделирования

Время	Без использования параметризаций	Параметризация UCM	Параметризация BEP
00 ВСВ			
06 ВСВ			
12 ВСВ			
18 ВСВ			

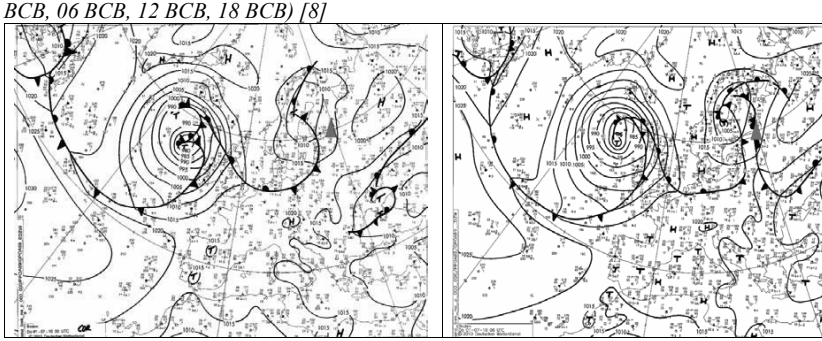
При более детальном анализе можно отметить, что различия в количестве выпавших осадков в пределах Ленинградской области 7 января 2010 года между рассматриваемыми станциями связаны с ориентацией барической ложбины и фронта окклюзии относительно города. То есть наибольшее количество осадков ожидалось именно в западной части области.

Необходимо отметить, что наиболее дискретно описаны осадки при использовании параметризации BEP в связи с тем, что она наиболее детально отражает

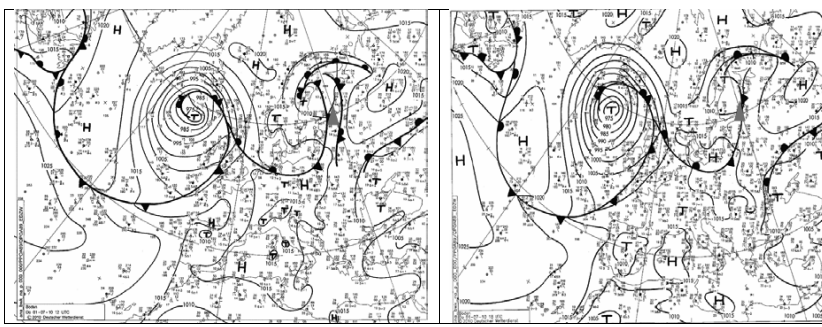
городскую застройку, влияющую на выпадение осадков. Именно при использовании параметризации ВЕР существует возможность наиболее подробно обнаружить городской остров сухости в пределах Санкт-Петербурга.

Далее рассмотрим летний период. 1 июля 2010 года погода в пределах Санкт-Петербурга определялась теплым сектором циклона, фронтом окклюзии более южной фронтальной системы, а также постепенным влиянием холодного фронта (таблица 4).

Таблица 4 – Синоптические карты за 1 июля 2010 года (слева направо, сверху вниз – 00 ВСВ, 06 ВСВ, 12 ВСВ, 18 ВСВ) [8]



Продолжение таблицы 4



Количество зарегистрированных осадков на метеорологических станциях Санкт-Петербург, Озерки и Шлиссельбург за 1 июля 2010 года представлено в таблице 5 [7].

Из таблицы 5 можно сделать следующие выводы о проявлении городского острова сухости.

- Станция Шлиссельбург 1 июля регистрировала наименьшее количество осадков среди трех отобранных для анализа станций;
- Станция Озерки 1 июля регистрировала большее количество осадков по сравнению со станцией Санкт-Петербург в утренние часы и меньшее количество – в вечерние часы;
- Станция Санкт-Петербург за вторую половину дня 1 июля зарегистрировала 26 мм осадков – очень сильные осадки; данный случай требует более детального рассмотрения путем проведения серии численных экспериментов (таблица 6).

Таблица 5 – Количество осадков на метеорологических станциях Ленинградской области 1 июля 2010 года [7]

	Санкт-Петербург	Озерки	Шлиссельбург
06 ВСВ	Нет осадков	4 мм	0,4 мм
18 ВСВ	26 мм	5 мм	Нет осадков

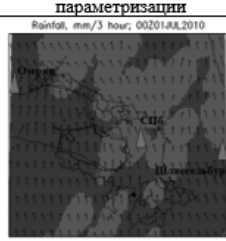
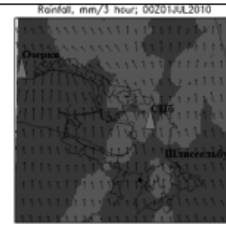
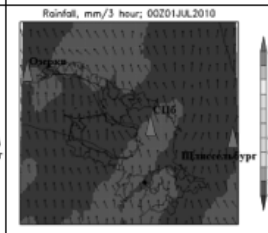
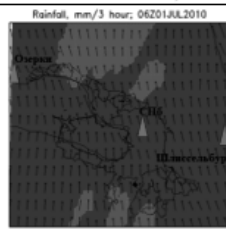
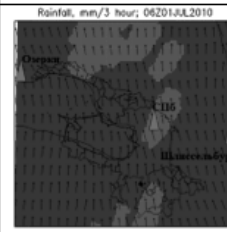
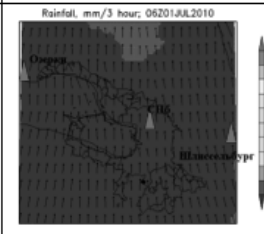
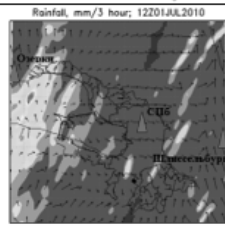
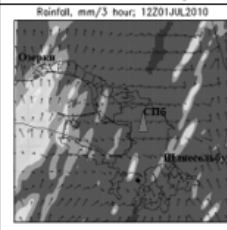
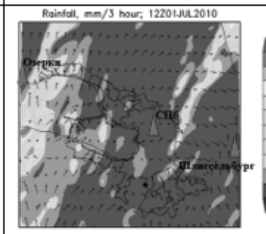
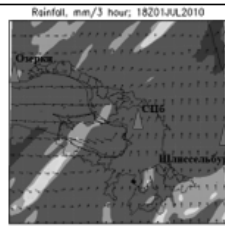
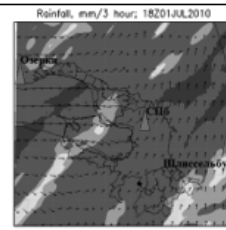
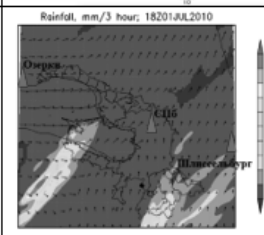
Как и в зимний период, летом существует тенденция на выпадение большего количества осадков на западе Ленинградской области по сравнению с его восточной частью. Данные таблицы 5, указывающие на большее количество осадков на западной станции Озерки по сравнению с восточной станцией Шлиссельбург, подтверждаются данными моделирования в таблице 6.

Городской остров сухости отчетливо прослеживается в течение всех суток. Причем наиболее он заметен при прохождении фронтальной системы, принесшей большое количество осадков с 12 ВСВ по 18 ВСВ. Именно на изображениях за эти часы (таблица 6) можно увидеть, как центр Санкт-Петербурга остается практически без дождей, а выпадают они в основном западнее города.

Также стоит обратить внимание на сильные осадки, зарегистрированные в Санкт-Петербурге 1 июля 2010 года. Данные моделирования как с учетом параметризаций, так и без их учета воспроизводят фактическое количество осадков – 26 мм. Тем не менее, модель отображает их несколько западнее городской метеорологической станции. Это может быть связано как с недостаточным разрешением сетки модели, так и с влиянием городской застройки при моделировании осадков.

Основной целью данной работы являлось обнаружение городского острова сухости в пределах Санкт-Петербурга. Для чего были отобраны критические дни зимнего и летнего периода, а также проведено моделирование атмосферных параметров, в частности – количества осадков. Далее представлены основные выводы, сделанные в ходе работы.

Таблица 6 – Количество осадков за 1 июля 2010 года согласно результатам моделирования

Время	Без использования параметризации	Параметризация UCM	Параметризация BEP
00 ВСВ			
06 ВСВ			
12 ВСВ			
18 ВСВ			

- и в зимний, и в летний периоды прохождение атмосферных фронтов верно отражено всеми параметризациями;
- фактические значения выпавших осадков за каждые 12 часов как 7 января, так и 1 июля соответствуют прогнозируемым в случае без использования параметризаций, а также в случаях с их использованием;
- особенно дискретно и точечно описаны осадки при использовании параметризации BEP в связи с тем, что она наиболее детально отражает городскую застройку, влияющую на выпадение осадков;
- при рассмотрении осадков в течение критических дней в динамике видно существование городского острова сухости, при котором количество осадков в пределах города меньше по сравнению с окрестностями;
- анализируя отобранные метеорологические станции Озерки и Шлиссельбург для обнаружения городского острова сухости, были получены неоднозначные результаты: некоторые временные отрезки показывали преобладание осадков за пределами Санкт-Петербурга по сравнению с его центром, другие же временные отрезки указывали на увеличенное количество осадков в городе по сравнению с его окрестностями. Только при рассмотрении двумерных изображений по результатам моделирования (таблицы 3 и 6) предоставляется возможность полностью оценить картину и утвердить гипотезу о существовании городского острова сухости;
- эффект проявляет себя как в зимнее, так и в летнее время. Причем интенсивность эффекта зависит от количества выпадающих осадков.

Список литкратуры

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 124 с.
2. *Пигольцина Г. Б.* Микроклиматические особенности различных районов Санкт-Петербурга // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2009. №3. С. 130-144.
3. *Матвеев Л.Т., Матвеев Ю. Л.* Доклад Академии наук. 2000. Т. 370. № 2. С. 249-252.
4. Климат Ленинграда. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 252 с.
5. *Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C.S.B., Grossman-Clarke, S., Loridan, T., Manning, K.W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F.P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A.A. and Zhang, C.* (2011), The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. Int. J. Climatol., 31: 273-288.
6. *Martilli A., Clappier A., Rotach M.W.* An Urban Surface Exchange Parameterisation for Mesoscale Models // Bound. – Lay. Meteorol. 2002. V. 104. P. 261–304.
7. Rp5.ru: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rp5.ru/ (дата обращения: 17.08.2025).
8. Wetter3.de: [Электронный ресурс]. – URL: https://www.wetter3.de/ (дата обращения: 03.08.2025).

ПРОГРАММА ГРАФИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ АМС

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 визуализации данных автоматической метеорологической станции 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 visualizing data from an automatic meteorological station 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 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 ПЕЛЕНГ, 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 Python распознает численные значения с дробью если знак для дроби является точка [2]. Для этого в программу вводиться алгоритм, который проводит замену в метеопараметрах знака «,» на «.» если она имеется.

Так же 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).

```
df1['P'] = df1['P'].str.replace(',','.')
df1['ff'] = df1['ff'].str.replace(',','.')
df1['Maxff'] = df1['Maxff'].str.replace(',','.')
df1['T'] = df1['T'].str.replace(',','.')
df1['f'] = df1['f'].str.replace(',','.')
df1['DataTime'] = pd.to_datetime(df1['DataTime'], format='%d.%m.%Y %H:%M')
```

Рисунок 1 – Часть программы, отвечающая за обработку данных

После обработки данных программа запрашивает у пользователя по какой метеорологической характеристике необходимо визуализировать данные. На данный момент в программе на выбор предлагается 4 метеопараметра для вывода графика: температура, давление, скорость ветра и относительная влажность.

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.

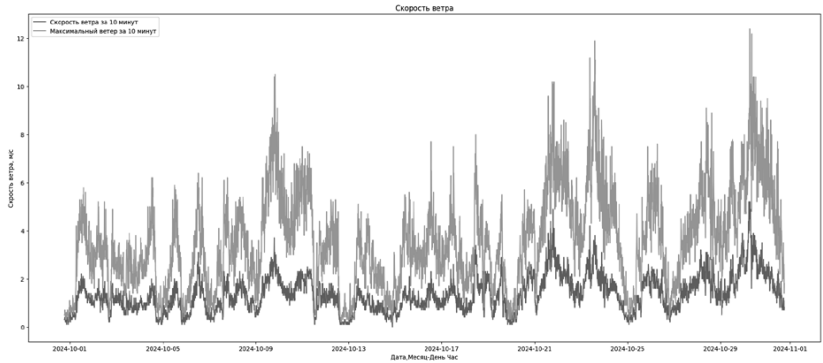


Рисунок 2 – Пример реализации графика скорости ветра за один месяц

Предлагаемая 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.

ПРОГНОЗ ТУМАНА НА АЭРОДРОМЕ ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА (ПУЛКОВО) НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ WRF-ARW

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

Аннотация. Приводятся результаты исследований условий образования тумана и результаты его прогноза тумана за осенний период 2020-2025 на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково), с применением региональной гидродинамической модели WRF-ARW.
Ключевые слова. Аэродром, туман, гидродинамические модели, численные методы, Пулково, численный прогноз.

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

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

Abstract. This paper examines the study and forecast of fog for the autumn period 2020-2025 at the St. Petersburg airport (Pulkovo) using the WRF-ARW regional hydrodynamic model.
Keywords. Airport, fog, hydrodynamic models, numerical methods, Pulkovo, numerical forecast.

Введение. Явления, ухудшающие видимость, представляют особую опасность для транспортных систем, в особенности для авиации. Наиболее опасным из такого рода явлений является туман. В то же время, в качестве одной из ключевых характеристик для командира воздушного судна и управления воздушным движением аэродрома является полётный минимум, который определяется видимостью (а значит наличием тумана) и высотой нижней границы облаков. Особую опасность представляет туман для малой авиации, в частности, для воздушных судов, в оборудование которых не входят приборы, позволяющие осуществлять полёты по правилам приборных полётов, а полёт производится только по правилам визуального полёта.

Для того чтобы спрогнозировать туман, существует множество методов, которые применяют авиационные синоптики. В частности, они могут применять физико-статистические методы, такие как: метод А.С. Зверева, метод Н.В. Петренко для радиационного и адвективного туманов [1]. Перечисленные методы применяются и на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково). В ходе выполнения исследования, в особенности в личных беседах с действующими авиационными синоптиками АМЦ «Пулково», было высказано мнение о недостаточной оправдываемости базовых методов и о возможном повышении качества прогноза при использовании численных моделей атмосферы. Это и определяет актуальность проводимого исследования, посвященного применению и адаптации региональной гидродинамической модели WRF-ARW 4.3 [2] для прогноза тумана.

Используемая модель. Модель WRF-ARW основана на решении уравнений гидродинамики атмосферы. Уравнения записаны в потоковой форме, а в качестве схемы интегрирования по времени применяется схема Рунге-Кутта 2-го или 3-го порядка. Все переменные заданы на сетке С Аракавы [2].

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.

При проведении численных экспериментов использовались следующие параметризации: микрофизика – WSM3 [3]; длинноволновая радиация – RRTM [4]; коротковолновая радиация – DSS [5]; планетарный пограничный слой – MYJ [6,7]; конвекция – KFS [8] (для мелкой сетки – отсутствует); взаимодействие атмосферы с поверхностью – UNLSM [9]; приземный подслой – RMM5 [10].

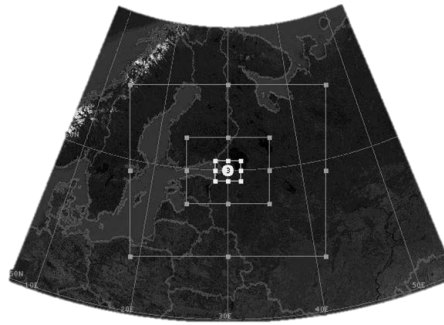


Рисунок 4 - Область прогнозирования и сетки

Результаты моделирования. В исследовании было рассмотрено 32 случая тумана на аэродроме за период с 2020 года по 2025 год. В данной статье будут рассмотрены только 4 случаев.

Таблица 1 - Обобщённая таблица результатов прогноза

Случай №1	Продолжительность			Средняя скорость ветра, м/с.	Другая информация по фактическим данным		
04.10.2025	Начало	Конец	Длительность, ч.		Мин. видимость, км.	Ср.видимость, км.	Верт.видимость, м.
Факт	1:48	10:30	8:42	2,0	0,7	1,8	36,9
Прогноз	4:00	11:00	7:00	2,0 ± 0,5			
Случай №2	Продолжительность			Средняя скорость ветра, м/с.	Другая информация по фактическим данным		
02-03.09.24	Начало	Конец	Длительность, ч.		Мин. видимость, км.	Ср.видимость, км.	Верт. видимость, м.
Факт	21:00	7:00	10:00	0,9	0,2	1,8	-
Прогноз	23:00	9:00	10:00	3,0 ± 0,5			
Случай №3	Продолжительность			Средняя скорость ветра, м/с.	Другая информация по фактическим данным		
28.09.2022	Начало	Конец	Длительность, ч.		Мин. видимость, км.	Ср.видимость, км.	Верт. видимость, м.
Факт	2:30	9:00	6:30	0,7	0,2	2,3	-
Прогноз	21:00	9:00	12:00	1,5 ± 0,5			
Случай №4	Продолжительность			Средняя скорость ветра, м/с.	Другая информация по фактическим данным		
14.10.2021	Начало	Конец	Длительность, ч.		Мин. видимость, км.	Ср.видимость, км.	Верт. видимость, м.
Факт	5:00	10:30	5:30	1,2	0,1	0,7	45
Прогноз	16:00(13)	13:00	21:00	1,5 ± 0,5			

В таблице 1 обобщены результаты численных экспериментов и данные наблюдений из архива регулярных сводок METAR и специальных SPECI, полученные из архива электронного ресурса RP5 [11]. Время местное.

Важным критерием наличия тумана являлось наличие высокой относительной влажности (более 92%), а также умеренных скоростей ветра.

Заключение

В случаях № 1 и № 2 можно наблюдать временной сдвиг на позднее начало появления тумана, в среднем 2 – 3 часа. Тогда как в случаях № 3 и № 4 наоборот более ранние признаки наличия тумана, в среднем за 3 и более часа. В то же время

продолжительность явления тумана также имеет широкую изменчивость, из рассмотренных случаев отметим случай №1 и №2, так как третий по продолжительности совпал хорошо, тогда как в первом случае имеет место превышение времени. То, что касается скорости ветра, то неточность его определения исходит из применения визуального метода оценивания.

Полученные результаты говорят о том, что, оценивая наличие тумана по данным в пространстве пока имеется большой риск получить значительную ошибку. И как следствие в дальнейшем необходимо производить оценку из данных в конкретной точке – точки наблюдателя. Также полученные результаты нужно сравнить с данными, когда имелись схожие синоптические условия, но туман не наблюдался. И следует также отметить что данная работа является частью куда более объёмной работы, которая проводится в данный момент

Список литературы

1. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 616 с.
2. 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.
3. Hong, Song–You, Jimy Dudhia, and Shu–Hua Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
4. Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough,1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated–k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102, 16663–16682.
5. Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two–dimensional model. J. Atmos. Sci., 46, 3077–3107.
6. Janjic, Zavisa I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927–945.
7. Mesinger, F., 1993: Forecasting upper tropospheric turbulence within the framework of the Mellor-Yamada 2.5 closure. Res. Activ. in Atmos. and Ocean. Mod., WMO, Geneva, CAS/JSC WGNE Rep. No. 18, 4.28-4.29.
8. Kain, John S., 2004: The Kain–Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor., 43, 170–181.
9. Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.
10. Jimenez, Pedro A., Jimy Dudhia, J. Fidel Gonzalez–Rouco, Jorge Navarro, Juan P. Montavez, and Elena Garcia–Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. Mon. Wea. Rev., 140, 898–918.
11. Архив погоды в Пулково (аэропорт) // RP5.ru: [сайт]. URL: rp5.ru (дата обращения: 05.10.2025).

АНАЛИЗ ВОЛН ХОЛОДА С ПОМОЩЬЮ ИЗЭНТРОПИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Фадеев А.С.
Научный руководитель Т.С. Ермакова
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
fadeew2002@gmail.com

Аннотация. Волны холода в Северном полушарии представляют собой значимые экстремальные погодные явления, оказывающие серьезное влияние на природные и социально-экономические системы. В работе исследуется формирование и эволюция тропосферных волн холода в периоды расщепления стратосферного полярного вихря с использованием изэнтропического подхода. Диагностика холодных воздушных масс выполняется на основе изэнтропических характеристик холодной воздушной массы (CAM) и отрицательного теплового содержания (NHC), а также их потоков, рассчитанных по данным реанализа MERRA-2. В качестве индикатора вторжений стратосферного воздуха применяется потенциальная завихренность Эртеля, интерполированная на изэнтропические поверхности. Полученные характеристики сопоставляются с данными станционных наблюдений приземной температуры. Установлено, что в периоды расщепления полярного вихря формируются интенсивные изэнтропические потоки холодного воздуха из полярных областей в средние широты, причем максимумы CAM и NHC пространственно совпадают с зонами наиболее сильных отрицательных температурных аномалий у поверхности. Анализ потенциальной завихренности подтверждает проникновение стратосферного воздуха в верхнюю тропосферу, сопровождающее развитие холодных вторжений. Результаты демонстрируют высокую информативность изэнтропических характеристик для описания динамики волн холода и их связи со стратосферными процессами, позволяя более полно учитывать процессы переноса холодных воздушных масс по сравнению с традиционным анализом приземной температуры.
Ключевые слова: волны холода, стратосферно-тропосферное взаимодействие, внезапное стратосферное потепление, полярный вихрь, изэнтропический подход, холодная воздушная масса (CAM), отрицательное тепловое содержание (NHC), потенциальная завихренность Эртеля, реанализ MERRA-2, температурные аномалии.

ANALYSIS OF COLD WAVES USING AN ISENTROPIC APPROACH

Fadeev A.S.
academic advisor T.S. Ermakova
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Abstract. Cold waves in the Northern Hemisphere are significant extreme weather events that have a substantial impact on natural and socio-economic systems. This study investigates the formation and evolution of tropospheric cold waves during periods of stratospheric polar vortex splitting using an isentropic approach. The diagnostics of cold air masses are based on isentropic characteristics such as Cold Air Mass (CAM) and Negative Heat Content (NHC), along with their fluxes, calculated from MERRA-2 reanalysis data. Ertel's potential vorticity interpolated onto isentropic surfaces is used as an indicator of stratospheric air intrusions. The derived characteristics are compared with surface air temperature observations from weather stations. It is shown that during polar vortex splitting events, intense isentropic cold air fluxes form from polar regions toward mid-latitudes, with CAM and NHC maxima spatially coinciding with areas of the strongest negative surface temperature anomalies. The potential vorticity analysis reveals the penetration of stratospheric air into the upper troposphere, accompanying the development of cold outbreaks. The obtained results demonstrate the high informativeness of isentropic characteristics for describing the dynamics of cold waves and their connection with stratospheric processes, allowing a more comprehensive account of cold air mass transport compared to traditional surface temperature analysis.

Keywords: cold waves, stratosphere–troposphere interaction, sudden stratospheric warming, polar vortex, isentropic approach, Cold Air Mass (CAM), Negative Heat Content (NHC), Ertel's potential vorticity, MERRA-2 reanalysis, temperature anomalies.

Волны холода в Северном полушарии являются значимыми экстремальными погодными явлениями, оказывающими существенное влияние на природные и социально-экономические системы. В последние годы особое внимание уделяется роли стратосферно-тропосферного взаимодействия в формировании холодных аномалий, в частности влиянию внезапных стратосферных потеплений, сопровождающихся расщеплением полярного вихря. Однако механизмы переноса холодных воздушных масс в тропосфере остаются недостаточно изученными.

Целью данной работы является исследование формирования и эволюции тропосферных волн холода в периоды расщепления стратосферного полярного вихря с использованием изэнтропического подхода.

Для диагностики холодных воздушных масс применяются изэнтропические характеристики холодной воздушной массы (Cold Air Mass, CAM) и отрицательного теплового содержания (Negative Heat Content, NHC), а также потоки этих величин [1,2]. Вихрь Эртеля, интерполированный на изэнтропические поверхности, используется как индикатор вторжений стратосферного воздуха. Данные характерстики рассчитываются по данным реанализа MERRA2 Полученные характеристики сопоставляются со станционными наблюдениями приземной температуры воздуха.

Показано, что в периоды расщепления полярного вихря формируются интенсивные изэнтропические потоки холодного воздуха, направленные из полярных областей в средние широты. Максимумы CAM и NHC пространственно согласуются с зонами наиболее сильных отрицательных температурных аномалий у поверхности. Анализ потенциальной завихренности выявляет проникновение стратосферного воздуха в верхнюю тропосферу, сопровождающее развитие холодных вторжений.

Полученные результаты демонстрируют высокую информативность изэнтропических характеристик для описания динамики волн холода и их связи со стратосферными процессами. Показатели CAM и NHC позволяют более полно учитывать процессы переноса холодных воздушных масс по сравнению с традиционным анализом приземной температуры.

Список литературы

1. *Iwasaki T. et al.* Isentropic analysis of polar cold airmass streams in the Northern Hemispheric winter //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2014. – Т. 71. – №. 6. – С. 2230-2243.
2. *Liu J. et al.* The distinct roles of the Stratospheric Polar Vortex during the initiation and intensification stages of the 2016 East Asian Cold Air Outbreak //Atmospheric Research. – 2024. – Т. 311. – С. 107713.
3. *Gelaro R. et al.* The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) //Journal of climate. – 2017. – Т. 30. – №. 14. – С. 5419-5454.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭВОЛЮЦИЮ ЦИКЛОНОВ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ

Калиниченко А.А.
Научный руководитель О.Г. Анискина

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
kalinichenko.antonina2020@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается влияние различных атмосферных параметров на зарождение и эволюцию внетропических циклонов на примере трёх циклонов, сформировавшегося в Атлантическом океане из волны на арктическом фронте. Исследуется на протяжении всего жизненного цикла циклона бароклинность, вертикальный сдвиг ветра в пограничном слое и температурная адвекция (как составные части бароклинности), завихренность, дивергенция и, соответственно, сама тенденция вихря скорости.
Ключевые слова: зарождение и эволюция циклонов, бароклинность, вертикальный сдвиг ветра, температурная адвекция, завихренность, дивергенция, тенденция вихря скорости.

RESEARCHING OF FACTORS DETERMINING ON EVOLUTION OF MIDDLE LATITUDE CYCLONES

Kalinichenko A.A.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg

Annotation. We analyze the influence of various atmospheric parameters on the birth and evolution of extratropical cyclones using the example of 3 cyclonee which formed from a wave on the Arctic front in the Atlantic Ocean near the coast of North American in the period from 2021 to 2024. Baroclinicity, vertical wind shear in the boundary layer and temperature advection as components of baroclinicity, vorticity, divergence, and, accordingly, the velocity vortex tendency itself are studied throughout the cyclone's life cycle.
Key words: birth and evolution of cyclones, baroclinicity, vertical wind shear, temperature advection, vorticity, divergence, velocity vortex tendency.

Циклоны и антициклоны являются крупномасштабными атмосферными вихрями, определяющими погоду на огромных территориях. Однако, в силу большого количества факторов, влияющих на процесс циклогенеза, на сегодняшний день не существует завершенной физической теории, которая бы полностью описывала процесс зарождения и дальнейшей эволюции циклонов [1]. Также одним из главных недостатков всех существующих на данный момент концептуальных моделей возникновения и эволюции циклонов является отсутствие точных количественных критериев, по которым можно определить возникновение и развитие этих барических образований [2]. К тому же, влияние различных атмосферных факторов на зарождение и дальнейшую эволюцию циклонов на сегодняшний день оценивалось лишь на основе анализа упрощенных физических систем, а не с точки зрения анализа реальных атмосферных полей.

Целью работы был поиск такого сочетания атмосферных параметров, при котором наиболее вероятен циклогенез и дальнейшее развитие циклонов умеренных широт на основе анализа фактических полей метеорологических величин.

В данной статье представлены результаты подробного анализа трёх циклонов, сформировавшихся в Атлантическом океане из волны на фронте в период с 2021 по 2024 год. Изменение параметров прослеживалось в течении всего жизненного цикла циклонов с дискретностью шесть часов от момента зарождения до полного заполнения. В ходе работы анализировались: бароклинность, вертикальный сдвиг ветра в пограничном слое и температурная адвекция как составные части бароклинности, завихренность, а также дивергенция и тенденция вихря скорости.

Для определения основных этапов жизни циклонов использовался архивы спутниковых снимков ИСЗ Terra/MODIS [3], ИСЗ GOES East, GOES West и MSG [4]. При определении стадий развития приходилось сопоставлять синоптические карты из разных источников. Стадия волны и стадия молодого циклона, как правило, выделились в

соответствии с картами, предоставляемые национальным центром экологического прогнозирования NCEP, а стадия максимального развития и стадия заполнения в соответствии с картами Немецкой и Британской службы погоды [5]. Для расчета анализируемых метеорологических параметров необходимы исходные данные о геопотенциальной высоте, температуре и скорости ветра. В качестве таких данных были взяты данные анализа модели GFS с разрешением $0{,}25^0$ из базы данных Национального центра атмосферных исследований NCAR [6].

В качестве примера рассмотрим изменение параметров циклона, сформировавшегося из волны на полярном фронте 08.12.2021. Жизненный цикл циклона представлен на рисунке 1.

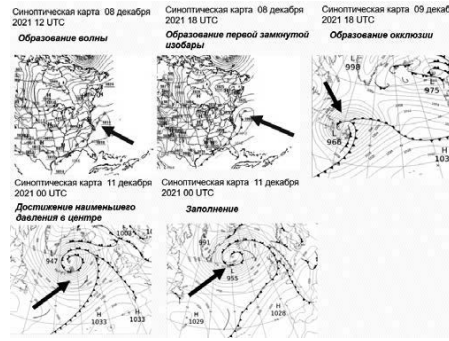


Рисунок 1 – Основные этапы развития циклона по данным архива синоптических карт Британской службы погоды [5]

Волна образовалась на полярном фронте приблизительно в 12 UTC 08.12.21. Первая замкнутая изобара появилась в 18 UTC 08.12.21. Окклюдирование произошло в 18 UTC 09.12.21. Наименьшее давления в центре изучаемого циклона было достигнуто в 00 UTC 11.12.21. Заполняться циклон начал в 18 UTC 11.12.21.

В качестве примера, иллюстрирующего эволюцию метеопараметров в течении жизненного цикла циклона, на рисунке 2 приводится изменение температурной адвекции на уровне 1000 гПа.

До появления волны значения температурной адвекции были близки к фоновым. С появлением волны в районе фронта усиливается адвекция тепла до значений (+4 +6) $*10^{-4}$ К/с, за холодным фронтом, соответственно, усиливается адвекция холода до значений (-2 -4) $*10^{-4}$ К/с. Далее по мере развития циклона температурные контрасты обостряются. Максимальные контрасты наблюдались на момент образования окклюзии – перед теплым фронтом значения до (+10 +12) $*10^{-4}$ К/с, за холодным (-10 -12) $*10^{-4}$ К/с. Далее температурные контрасты начали сглаживаться и на этапе заполнения наблюдались лишь отдельные зоны с положительной температурной адвекцией до значений (+4 +6) $*10^{-4}$ К/с.

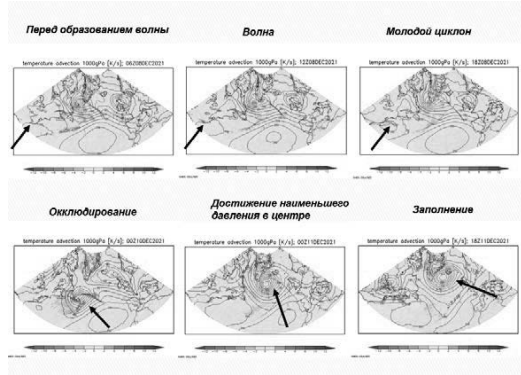


Рисунок 2 – Изменение приземных значений температурной адвекции по мере развития изучаемого циклона

Аналогичным образом были проанализированы остальные параметры. В ходе анализа было установлено, что у данного циклона перед образованием волны на фронте значения практически всех параметров близки к фоновым за исключением бароклинности и вертикальных сдвигов ветра в пограничном слое. По мере развития циклона значения исследуемых параметров увеличиваются, это особенно хорошо наблюдалось на момент образования окклюзии.

В результате анализа всех трёх циклонов были получены средние значения метеорологических величин, представленные в таблице 1. Максимальные значения по каждому параметру выделены сиреневым цветом, а минимальные –голубым. Желтым цветом выделены те значения метеопараметров, которые перед образованием волны в среднем значительно повышены в сравнении с фоновыми.

Таблица 1 – Значения исследуемых атмосферных параметров осредненные по трем циклонам

П-р	Стадии развития									
	Перед образованием волны		Волна		Молодой циклон		Максимальное развитие		Заполнение	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
DI, ед.	**3,2**	**1,2**	4,2	1,5	5,2	1,8	**11,8**	2,5	8,5	1,8
WS, м/с	**15,8**	7,5	19,2	7,5	27,5	10,8	**35,8**	12,5	20,8	**2,5**
TA*10^4, ^{0}C	2,3	-3,0	5,0	-5,7	7,7	-10,3	**9,7**	**-10,3**	5,7	-4,3
Ω*10^3, 1/c	0,30	0,07	0,43	0,07	**0,70**	-0,03	**0,70**	**-0,07**	0,42	0,00
DIV_{1000} 10^3, м/с	0,04	**-0,14**	0,14	-0,20	0,16	-0,24	0,21	**-0,38**	0,06	-0,11
DIV_{300} *10^3, м/с	0,04	-0,04	0,14	-0,08	0,23	-0,14	**0,34**	-0,16	0,21	-0,11
$\frac{\partial \Omega_z}{\partial t}$ * 10^3,1/c^2	0,23	-0,23	0,67	-0,30	1,03	-0,50	0,70	**-0,70**	0,17	-0,10

Из таблицы 1 видно, что максимальные значения анализируемых параметров наблюдаются либо на стадии максимального развития, либо на стадии молодого циклона. Перед образованием волны на фронте наблюдаются несколько повышенные значения параметров в сравнении с фоновыми, особенно повышенные значения имеют бароклинность, вертикальные сдвиги ветра в пограничном слое и отрицательная дивергенция на уровне 1000 гПа. Также можно заметить, что в стадии максимального развития наблюдаются наибольшие контрасты метеорологических величин в различных частях циклона.

Полученные закономерности также отражены в графиках осредненных метеорологических величин в ходе эволюции циклонов, представленных на рисунке 3:

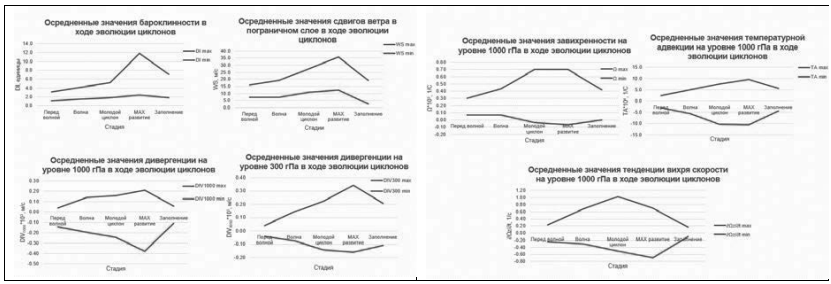


Рисунок 3 – Графики осредненных значений метеовеличин в ходе эволюции циклонов

Бароклинность и вертикальные сдвиги ветра в пограничном слое имеют похожий ход изменения с максимумом на стадии максимального развития. При анализе дивергенции особое внимание следует уделять отрицательным значениям дивергенции на уровне 1000 гПа, а на уровне 300 гПа, наоборот, положительным. Из графиков видно, что данные значения были максимальны также на момент стадии максимального развития циклона. Анализируя ход изменения температурной адвекции видно, что наибольшие контрасты температур в различных частях циклона наблюдались на стадии максимального развития циклона. Максимальные значения завихренности фиксируются либо на стадии молодого циклона, либо на стадии максимального развития. Тенденции вихря скорости максимальна на этапе молодого циклона.

Таким образом, в ходе работы была получены средние значения атмосферных параметров, при которых наиболее вероятен циклогенез, и по которым можно определять переход с одной стадии развития циклона на другую. Также было выявлено, что перед образованием волны на фронте в среднем наблюдаются несколько повышенные значения метеопараметров в сравнении с фоновыми значениями. Особенно велики значения бароклинности, вертикальных сдвигов ветра и конвергенции на уровне 1000 гПа. Исходя из этого, можно сделать вывод, что данные факторы являются ключевыми при оценке возможности образования волны на фронте с последующим процессом циклогенеза. Кроме того, было установлено, что по мере развития циклона наблюдается увеличение по модулю всех значений метеопараметров, как правило, с максимумом на стадии максимально развития. Также важно отметить, что на стадии максимального развития были отмечены наибольшие контрасты всех метеовеличин в различных частях циклона. С началом заполнения контрасты внутри циклона сглаживаются, а модули значений всех изучаемых метеопараметров уменьшаются.

Список литературы

1. *Погосян Х. П.* Общая циркуляция атмосферы. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1972. – 394 с.
2. *Степанов В.В.* Полярные фронтальные и арктические циклоны в поле облачности – СПб.: ААНИИ – 2022. - 136 с.
3. Архив спутниковых снимков: сайт – URL: https://worldview.earthdata.nasa.gov/ (дата обращения 28.11.2025).
4. Архив спутниковых снимков: сайт – URL: http://resources.eumetrain.org/ePort_MapViewer/index.html (дата обращения 28.11.2025).
5. Архив синоптических карт: сайт – URL: https://www.wetter3.de/ (дата обращения 28.11.2025).
6. База данных Национального центра атмосферных исследований NCAR: https://rda.ucar.edu/ (дата обращения 28.11.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПОСТОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ

Фурлетов Н.М.
Научный руководитель О.Г. Анискина
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
meteofurletov@gmail.com

Аннотация. Машинное обучение (ML) трансформирует метеорологическую постобработку, устраняя систематические ошибки численного прогнозирования погоды (NWP). Обзор прослеживает эволюцию от точечной детерминистической коррекции к генеративному даунскейлингу (GAN, U-Net) [1-3] и вероятностной калибровке — от квантильных моделей [4, 5] до диффузионных ансамблей [8]. Рассматриваются 4D-архитектуры (ConvLSTM, GNN, Transformers) [9-11], проблема рекалибровки «блендов» [13], а также методы повышения доверия через физически-информированное обучение (PIML) [14, 15] и объяснимый ИИ (XAI) [16].
Ключевые слова: ML, метеорология, постобработка, NWP, даунскейлинг, GAN, диффузионные модели, PIML, XAI.

APPLICATION OF MACHINE LEARNING IN THE POST-PROCESSING OF WEATHER FORECAST MODEL RESULTS

Furletov N.M.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Abstract. Machine Learning (ML) is transforming meteorological post-processing by addressing systematic biases in Numerical Weather Prediction (NWP). This review traces the evolution from deterministic point-wise corrections to generative downscaling (GAN, U-Net) [1-3] and probabilistic calibration—ranging from quantile models [4, 5] to diffusion ensembles [8]. It examines 4D architectures (ConvLSTM, GNN, Transformers) [9-11], the challenge of "blending" recalibration [13], and methods for enhancing trust through Physics-Informed Machine Learning (PIML) [14, 15] and Explainable AI (XAI) [16].
Keywords. ML, meteorology, post-processing, NWP, downscaling, GAN, diffusion models, PIML, XAI.

Детерминистическая калибровка и даунскейлинг.

Эволюция детерминистических методов ознаменована переходом от линейных схем к нелинейным гибридам. Использование "MOS random forests" (MOS-RF)

позволило оценивать адаптивные коэффициенты регрессии, обеспечив стабильность на малых выборках [1]. Качественный скачок произошел с внедрением статистического даунскейлинга как задачи super-resolution. Вместо локальной коррекции пикселей, GAN [2] и U-Net [3] генерируют пространственно когерентные поля осадков и ветра высокого разрешения непосредственно на новых сетках.

Вероятностная и ансамблевая калибровка

Развитие вероятностной постобработки для коррекции неопределенности NWP прошло путь от непараметрической квантильной регрессии (QRNN) [4] к дистрибутивной регрессии, где нейросети оптимизируют параметры полных распределений [5]. Для сохранения пространственной структуры (разрушаемой универиантными методами) внедрены GAN-архитектуры [6, 7]. Новейшим этапом стали Диффузионные модели (например, SEEDS [8]), обеспечивающие стабильную генерацию высокоточных калиброванных ансамблей при сниженных вычислительных затратах.

Пространственно-временная обработка и блендинг

4D-природа метеоданных обусловила применение специализированных архитектур:

- Локальный масштаб (Nowcasting): ConvLSTM интегрирует свертки в LSTM-ячейки для моделирования динамики полей [9].
- Глобальный масштаб: GNN на икосаэдрических сетках [10] и Трансформеры [11] эффективно улавливают глобальные пространственные зависимости.

Увеличение числа ML-моделей выявило проблему «блендинга»: простое усреднение откалиброванных прогнозов нарушает итоговую калибровку, что требует внедрения этапов рекурсивной рекалибровки [13].

4. Физическая согласованность и интерпретируемость

Проблема «черного ящика» решается двумя путями:

1. PIML: Внедрение физических законов через «жесткие» ограничения (уравнения в архитектуре) [15] или «мягкие» (штрафные функции потерь) [10]. Это улучшает регуляризацию и точность на малых данных [14].

2. XAI: Инструменты типа SHAP позволяют диагностировать физическую обоснованность решений модели, переходя от простой оценки ошибки к пониманию её источников [16].

Заключение. Переход от точечных правок к генерации полей и от универиантных вероятностей к физически-информированным ансамблям сформировал новый стандарт метеорологической постобработки. Приоритетами будущих исследований остаются рекалибровка мультимодельных блендов и глубокая гибридизация ML с фундаментальной физикой.

Список литературы

1. *Muschinski T., Mayr G. J., Zeileis A., Simon T.* Robust weather-adaptive post-processing using model output statistics random forests // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2023. – Vol. 30, No 4. – P. 503–514. – DOI: 10.5194/npg-30-503-2023.

2. *Harris L., McRae A. T. T., Chantry M., Dueben P. D., Palmer T. N.* A Generative Deep Learning Approach to Stochastic Downscaling of Precipitation Forecasts // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2022. – Vol. 14, No 10. – P. e2022MS003120. – DOI: 10.1029/2022MS003120.

3. Interpolation-Free Deep Learning for Meteorological Downscaling on Unaligned Grids Across Multiple Domains with Application to Wind Power [Электронный ресурс]. – 2024. – arXiv:2410.03945. – URL: https://arxiv.org/abs/2410.03945 (дата обращения: 07.11.2025).

4. *Cannon A. J.* Quantile regression neural networks: Implementation in R and application to precipitation downscaling // Computers & Geosciences. – 2011. – Vol. 37, No 9. – P. 1277–1284. – DOI: 10.1016/j.cageo.2010.07.005.

5. *Rasp S., Lerch S.* Neural Networks for Postprocessing Ensemble Weather Forecasts // Monthly Weather Review. – 2018. – Vol. 146, No 11. – P. 3885–3900. – DOI: 10.1175/MWR-D-18-0187.1.
6. *Dai Y., Hemri S.* Spatially Coherent Postprocessing of Cloud Cover Ensemble Forecasts // Monthly Weather Review. – 2021. – Vol. 149, No 12. – P. 3923–3937. – DOI: 10.1175/MWR-D-21-0046.1.
7. *Bihlo A.* A generative adversarial network approach to (ensemble) weather prediction // Neural Networks. – 2021. – Vol. 139. – P. 7567. – DOI: 10.1016/j.neunet.2021.02.003.
8. *Li L., Carver R., Lopez-Gomez I., Sha F., Anderson J.* SEEDS: Emulation of Weather Forecast Ensembles with Diffusion Models // Science Advances. – 2024. – Vol. 10, No 13. – P. eadk4489. – DOI: 10.1126/sciadv.adk4489.
9. *Shi X., Chen Z., Wang H., Yeung D., Wong W., Woo W.* Convolutional LSTM Network: A Machine Learning Approach for Precipitation Nowcasting [Электронный ресурс]. – 2015. – arXiv:1506.04214. – URL: https://arxiv.org/abs/1506.04214 (дата обращения: 07.11.2025).
10. *Dunstan T., Strickson O., Bennett T. [et al.]* FastNet: Improving the physical consistency of machine-learning weather prediction models through loss function design [Электронный ресурс] // arXiv. – 2025. – arXiv:2509.17601. – URL: https://arxiv.org/abs/2509.17601 (дата обращения: 07.11.2025). – DOI: 10.48550/arXiv.2509.17601.
11. *Willard J. D., Harrington P., Subramanian S., Mahesh A., O'Brien T. A., Collins W. D.* Analyzing and Exploring Training Recipes for Large-Scale Transformer-Based Weather Prediction // Artificial Intelligence for the Earth Systems. – 2025. – Vol. 4, No 2. – P. e240061. – DOI: 10.1175/AIES-D-24-0061.1.
12. *Zhang Y., Liu J., Shen W.* A Review of Ensemble Learning Algorithms Used in Remote Sensing Applications // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No 17. – P. 8654. – DOI: 10.3390/app12178654.
13. *Trottaa B., Johnson R., de Burgh-Day C. [et al.]* Statistical post-processing yields accurate probabilistic forecasts from Artificial Intelligence weather models [Электронный ресурс] // arXiv. – 2025. – arXiv:2504.12672. – URL: https://arxiv.org/abs/2504.12672 (дата обращения: 07.11.2025).
14. *Kashinath K., Mustafa M., Albert A. [et al.]* Physics-informed machine learning: case studies for weather and climate modelling // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 379, No 2194. – P. 20200093. – DOI: 10.1098/rsta.2020.0093.
15. *Zanetta F., Nerini D., Beucler T., Liniger M. A.* Physics-Constrained Deep Learning Postprocessing of Temperature and Humidity // Artificial Intelligence for the Earth Systems. – 2023. – Vol. 2, No 4. – P. e220089. – DOI: 10.1175/AIES-D-22-0089.1.
16. *Flora M. L., Potvin C. K., McGovern A., Handler S.* A Machine Learning Explainability Tutorial for Atmospheric Sciences // Artificial Intelligence for the Earth Systems. – 2024. – Vol. 3, No 1. – P. e230018. – DOI: 10.1175/AIES-D-23-0018.1.

ВЛИЯНИЕ УРБАНИЗАЦИИ НА ОСАДКИ НА ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА И ЕГО ОКРЕСТНОСТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ САНКТ-ПЕРЕБУРГА)

Черкашин Д.М.
Научный руководитель Анискина О.Г.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
d.cherkashin@rshu.ru

Аннотация. В исследовании приводится анализ результатов численных экспериментов с моделью WRF-Chem для дней (14, 28, 29, 30 июля 2021 года), когда наблюдались разности

осадков в пределах 5 мм и более между экспериментами, локализованными на территории Санкт-Петербурга и его окрестностей.
Ключевые слова. WRF-Chem, осадки, урбанизация, Санкт-Петербург,

URBANIZATION INFLUENCE ON PRECIPITATION IN THE CITY AREA AND ITS SURROUNDINGS (THE CASE OF SAINT PETERSBURG)

Cherkashin D.M.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorology University (RSHU), St. Petersburg

Abstract. In this study is presented an analysis of the results of numerical experiments with the WRF-Chem for the days (July 14. 28, 29, 31 2021), when precipitation differences within 5 mm and more were observed between experiments localized in St. Petersburg and its surroundings.
Key words. WRF-Chem, precipitation, urbanization, St. Petersburg,

В условиях активной урбанизации, которой подвержены современные мегаполисы, оказывается существенное влияние на состояние атмосферы на территории городской среды [1]. Это проявляется в виде городского острова тепла, развитие сильной конвекции и увеличение антропогенных аэрозолей, которые попадают в атмосферу и далее участвуют, как активные ядра конденсации. Как следствие, это вносит вклад в изменение интенсивности количества осадков на территории города и его окрестностей [2, 3].

В качестве данных использовались результаты численного моделирования WRF-Chem (за июль 2021 года) по трем экспериментам. В первом (CTRL) эксперименте городская застройка была представлена в виде однородной поверхности и без использования параметризации Building Effect Parameterization (BEP). Во втором (Simple Urb) и в третьем (Urb) эксперименте городская застройка была представлена в виде усложненной классификации, которая включала 11 локальных климатических зон [4], и только в Urb использовалась параметризация Building Effect Parameterization (BEP).

Анализ показал, что численные эксперименты с включенной и выключенной городской параметризацией BEP (Building Effect Parameterization) и с усложненной городской застройкой и без неё показали, что влияние урбанизации приводит к выпадению осадков раньше по времени с подветренной стороны городской территории. Кроме того, урбанизация приводит к снижению частоты количество осадков (рисунок 1).

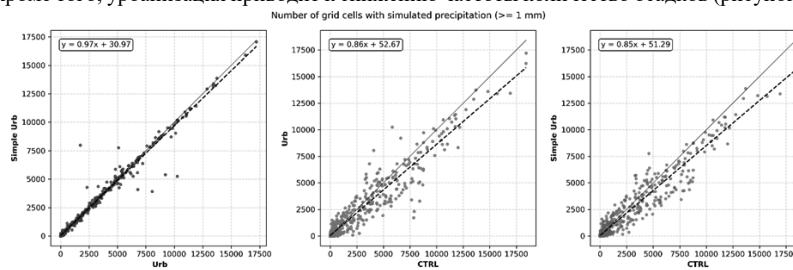


Рисунок 1 – Диаграммы рассеяния между результатами моделирования Urb и Simple Urb (слева), Urb и CTRL (по центру), Simple Urb и CTRL (справа) количества ячеек сетки с моделируемыми осадками 1 мм или более

Список литературы

1. *Liu H. et al*. Effect of urbanization on the urban meteorology and air pollution in Hangzhou //Journal of Meteorological Research. – 2015. – Т. 29. – №. 6. – С. 950-965.

2. *Tysa S. K., Ren G.* Observed decrease in light precipitation in part due to urbanization //Scientific reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 3864.
3. *Seino N., Aoyagi T., Tsuguti H.* Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? //Urban Climate. – 2018. – Т. 23. – С. 8-35.
4. *Stewart I. D., Oke T. R.* Local climate zones for urban temperature studies //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2012. – Т. 93. – №. 12. – С. 1879-1900

МОНИТОРИНГ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ В ЦЕЛЯХ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

Хабибуллин Е.Р.
научный руководитель Восканян К.Л.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Мониторинг погодных условий играет значительную роль в обеспечении комфорта и безопасности судоходства, а также эффективности экономических показателей работы флота. В работе показаны возможности и необходимость учета пространственного распределения гидрометеорологических характеристик для обеспечения безопасного судоходства.
Ключевые слова. Судоходство, метеомониторинг, скорость ветра, высота волны, автоматические буйковые станции

WEATHER MONITORING FOR MARITIME SAFETY

Khabibullin E.R.
academic advisor Voskanyan K.L.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. Monitoring weather conditions plays a significant role in ensuring the comfort and safety of navigation, as well as the efficiency of the fleet's economic performance. The work demonstrates the possibilities and necessity of taking into account the spatial distribution of hydrometeorological characteristics to ensure safe navigation.
Keywords. Shipping, weather monitoring, wind speed, wave height, automatic buoy stations

Современные морские суда могут осуществлять плавание в сложных погодных условиях. Тем не менее ветер и волнение, интенсивные встречные течения и ряд других гидрометеорологических факторов влияют на скорость и путь судов и, соответственно, эффективность плавания: увеличивается продолжительность перехода, возрастает возможность повреждения палубных и трюмных грузов, ухудшаются условия работы и отдыха экипажа, снижается комфорт для пассажиров.

Своевременный учет гидрометеорологических условий повышает не только безопасность плавания судов, но и эффективность экономических показателей работы флота. Использование благоприятных погодных условий является значительным резервом снижения стоимости морских перевозок [1].

Рассмотрим возможности комплексного мониторинга гидрометеорологических параметров на примере архивных данных четырех автоматических метеостанций у полуострова Флорида (рис. 1).

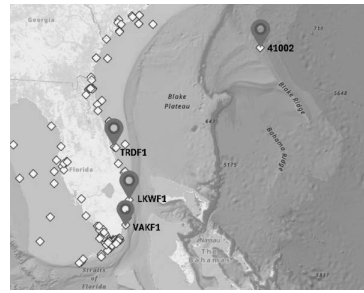


Рисунок 1 - Места установки буйковых метеостанций

Выбор точек для исследования обусловлен их близостью к месту с большим количеством маршрутов морских судов (рис. 2). Станции расположены на довольно большом расстоянии друг от друга, что поможет проследить различие гидрометеорологических условий.

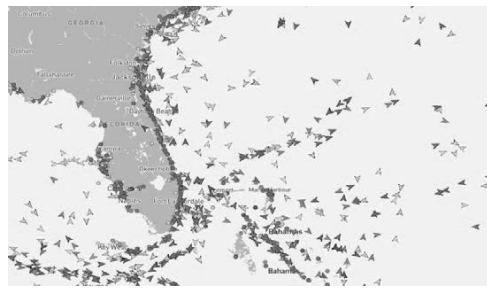


Рисунок 2 – Карта активных морских маршрутов

Данные по станциям были получены с сайта National Data Buoy Center [3], в текстовом формате, оцифрованы и синхронизированы для дальнейшей работы. Первичный контроль информации позволил выявить единичные разрывы в данных исследуемых метеостанций (рис. 3). Такие единичные разрывы легко можно ликвидировать путем нахождения среднего значения.

#YY	MM	DD	hh	mm	WDIR	WSPD	GST	PRES	ATMP	WTMP
2024	4	27	6	0	92	8	10,5	1020,7	23,9	25,4
2024	4	27	6	30	98	9,4	11,4	1020,6	23,8	25,4
2024	4	27	7	0	85	9,3	11	1020,5	23,7	25,3
2024	4	27	7	30				1020,3		25,25
2024	4	27	8	0	96	9,3	11,3	1020,1	23,6	25,2
2024	4	27	8	30	104	9,6	10,7	1020,2	23,6	25,2
2024	4	27	9	0	106	9,7	11,9	1020,5	23,6	25,1

Рисунок 3 – Фрагмент данных с единичными разрывами

Опасными для судов в море считаются скорости ветра от 18-20 м/с (65-75 км/ч) и выше, соответствующие шторму (8 баллов по Бофорту), при которых волны достигают 2-3 метров и более, создавая аварийную обстановку, особенно для маломерных судов [2].

Более подробно рассмотрим данные о скорости ветра за весь 2024-й год. Анализируя график (рис. 4), можно заметить большой скачок скорости ветра (выше 20 м/с), который наблюдался на всех станциях в период с 9 по 10 октября 2024 года. Одновременно с этим наблюдалось понижение давления до 980 гПа. Как известно, в это время в этот период над исследуемой территорией наблюдался ураган «Милтон» — чрезвычайно мощный атлантический ураган 5 категории, который стал самым интенсивным тропическим циклоном, когда-либо зарегистрированным над Мексиканским заливом.

С помощью сайта интерактивных карт Ventusky [4], проследим высоту волн и скорость ветра (рис. 5), которые могут представлять опасность для совершения морских перевозок в районе установки станций. Действительно, на станциях TRDF1 (центр урагана) и 41002 (восточная переферия) скорость ветра была меньше, чем на двух других, что подтверждает точность данных, а высота волны на станции TRDF1 была значительно большей, чем на станции 41002, что объясняется траекторией его движения.

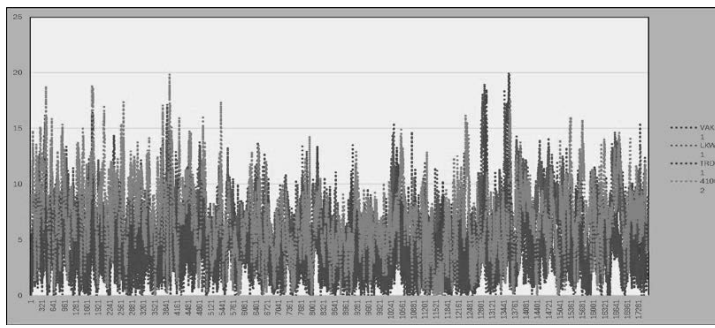
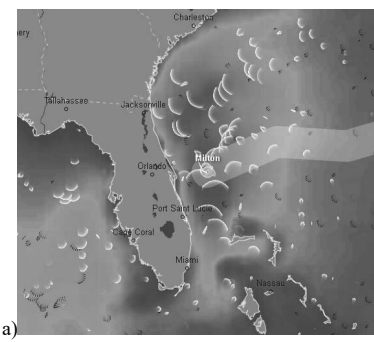


Рисунок 4 – График скорости ветра по всем станциям за 2024 год

а)



б)

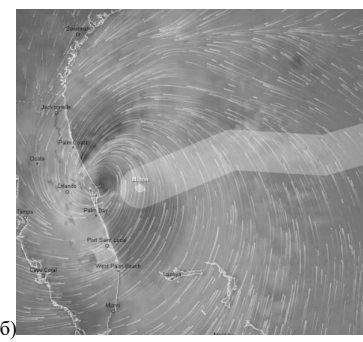


Рисунок 5 – Интерактивная карта Ventusky за 10 октября 2024 года
а) карта общей высоты волн б) карта скорости ветра

Таким образом, имея точные данные о пространственном распределении скорости и направления ветра, атмосферного давления, а также высоте волны, можно проложить

маршруты судов в обход местности с неблагоприятными или опасными гидрометеорологическими условиями, что позволит обеспечить безопасность грузо- и пассажироперевозок.

Список литературы

1. *Бабич С.В., Боков В.Н., Лопатухин Л.И.* Вероятностный анализ и моделирование синоптической, сезонной и межгодовой изменчивости ветра и волнения // Вероятностный анализ и моделирование океанологических процессов. – М., 2008. - 345 с.
2. Ветер и волны в океанах и морях. - Регистр СССР, стр.35. - Л.: Транспорт, 1974.
3. Национальный Центр данных буйков [Электронный ресурс] *https://www.ndbc.noaa.gov/*
4. Интерактивный сервис Вентускай (Ventusky) [Электронный ресурс]. - URL: *https://www.ventusky.com*

АНАЛИЗ УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РАЙОНЕ ОБСКОЙ ГУБЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ПРОГНОЗА ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ GFS

Дудин А.А.
Науные руководители Ефимова Ю.В., Иванова И.А.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. В представленной части научно-исследовательской работы проводится анализ успешности прогноза температуры воздуха в районе Обской губы с использованием данных прогноза численной модели GFS в период с 1 по 30 ноября 2025. В ходе выполнения работы создан архив прогностических данных, проведена оценка успешности прогноза по территории и сопоставлено расположение узлов сетки модели и станций, выбранных для исследования.
Ключевые слова. Оценка, модель, узел сетки, температура, прогноз, успешность.

ANALYSIS OF THE SUCCESS OF AIR TEMPERATURE FORECASTS IN THE OB BAY AREA USING FORECAST DATA FROM THE GFS NUMERICAL MODEL

Dudin A.A.
academic advisor Efimova Yu.V., Ivanova I.A.
Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Annotation. The presented part of the research paper analyzes the success of forecasting air temperature in the Ob Bay area using the forecast data of the GFS numerical model for the period from November 1 to November 30, 2025. In the course of the work, an archive of predictive data was created, an assessment of the success of the forecast for the territory was carried out, and the location of the grid nodes of the model and the stations selected for the study were compared.
Keywords. Evaluation, model, grid node, temperature, forecast, success rate.

Прогнозы температуры, основанные на данных моделей, важны для конечного потребителя и осуществления оперативной синоптики, в особенности для удалённых районов, в частности расположенных за полярным кругом, от успешности таких прогнозов во многом зависит возможность осуществления хозяйственной деятельности. В районе Обской губы находятся объекты, связанные с нефтяной промышленностью, которые нуждаются в постоянной оперативной синоптической поддержке. Целью научно-исследовательской работы является анализ успешности прогноза температуры

воздуха в районе Обской губы с использованием данных прогноза численной модели GFS в период с 1 по 30 ноября 2025 года. Известно, что модели не дают прогноз в точке, но синоптикам, например, в условиях крайнего севера, приходится использовать данные моделей, чтобы прогнозировать температуру воздуха. Данный этап исследования посвящён подготовке к уточнению результатов прогнозов температуры воздуха на сутки модели GFS в районе Обской губы.

Для выполнения поставленной задачи необходимо провести оценку прогностических значений температуры воздуха согласно критериям успешности прогноза, основанным на «Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения» и методическим рекомендациям по верификации метеорологических прогнозов [1, 2]. Для расчёта критериев использовались следующие формулы:
Средняя абсолютная ошибка:

$$\bar{\delta}_{\text{абс}(t)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|t_{\text{п}} - t_{\phi}\right|_i, \quad (1)$$

Средняя систематическая ошибка:

$$\bar{\delta}_{(t)} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_{\text{п}} - t_{\phi}) = \overline{t_{\text{п}}} - \overline{t_{\phi}}, \quad (2)$$

Оправдываемость прогноза температуры воздуха по территории:

$$P_{\text{тер}} = \frac{a*100+b*0}{n} \quad (3)$$

где:
a – количество успешных прогнозов на станциях; b – количество неоправдавшихся прогнозах на станциях; n – количество станций; t_{ϕ} - фактическое значение температуры воздуха; $t_{\text{п}}$ - прогностическое значение температуры воздуха; N-количество пар "прогноз - наблюдение “.

Для анализа успешности прогноза температуры воздуха выбраны станции Новый Порт, Мыс Каменный, Салехард. Ныда и Антипаюта.

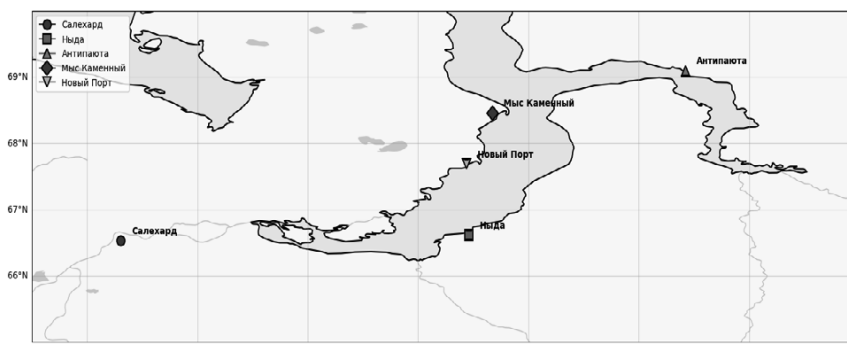


Рисунок 1 – Распределение станций на исследуемой территории

Таблица 1- Показатели средней абсолютной и систематической ошибки прогноза температуры воздуха на каждой из станций.

Расположение станций и ближайших к ним узлов сетки GFS						
	Широта, ° с.ш	**Долгота, ° в.д**	**Ближайшие узлы**	**Широта, ° с.ш**	**Долгота, ° в.д**	**Удалённость, км**
Новый Порт	67.69	72.88	Узел 1	67.75	73.00	8.3
Мыс Каменный	68.46	73.35	Узел 2	68.50	73.25	6.0
Салехард	66.53	66.61	Узел 3	66.50	66.50	5.9
Ныда	66.62	72.92	Узел 4	66.50	73.00	13.8
Антипаюта	69.10	76.85	Узел 5	69.00	76.75	11.8

Для осуществления оценки был составлен архив за период с 1 по 30 ноября 2025 года, содержащий прогностические значения модели в ближайших к станциям узлах сетки и фактических наблюдений на пяти выбранных станциях в исследуемом районе (рис. 1, табл.2).

Таблица 2 – Показатели средней абсолютной и систематической ошибки прогноза температуры воздуха на каждой из станций.

	Средняя абсолютная ошибка, °С	**Средняя систематическая ошибка, °С**
Модель	**GFS**	
Заблаговременность	24ч	
Новый порт	2.1	1.4
Мыс Каменный	2.4	0.2
Салехард	2.5	2.1
Ныда	2.6	1.4
Антипаюта	3.3	1.4

В результате проведённых расчётов средней систематической ошибки была выявлена тенденция прогнозов к завышению (рис. 2). Расчёт средней абсолютной ошибки показал, что наименее успешные прогнозы в период исследования наблюдались на станции Антипаюта. Количество неуспешных прогнозов на этой станции составило 37% (табл. 2).

Оценка успешности прогнозов температуры воздуха по территории показала(рис.2), что на протяжении всего периода исследования оправдываемость прогнозов в большинстве случаев (53%) была выше или равна 80%, что является хорошим показателем

В результате выполненного исследования в период с 1 по 30 ноября 2024 был детально проанализирован архив с данными прогнозов температуры воздуха и фактических температур с заблаговременностью 24 ч. На его основе рассчитаны и проанализированы критерии успешности и оправдываемости прогноза температуры воздуха по территории. Выявлены ближайшие к станциям узлы сетки.

В дальнейшем планируется продолжить исследовательскую работу, используя полученные данные, для уточнения результатов прогнозов моделей.

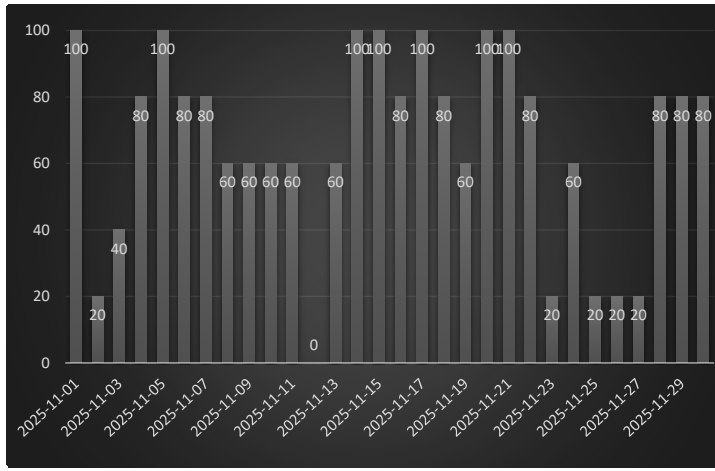


Рисунок 2 - Гистограмма оправдываемости прогнозов температуры воздуха по территории

Список литературы

1. Наставление, по краткосрочным прогнозам, погоды общего назначения: РД 52.27.724 – Москва ФГБУ «Гидрометцентр России». 2019. с.62
2. Киктев Д.Б. Методические рекомендации по верификации метеорологических прогнозов

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ОЦЕНКА РИСКОВ

Шангареев И.А.
научный руководитель Восканян К.Л.
[1]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Подчеркивается необходимость анализа климатических факторов для разработки эффективных стратегий адаптации и минимизации рисков в процессе проектирования, строительства и эксплуатации зданий. Исследование направлено на оценку местных климатических условий и выявление потенциальных рисков, что является ключевым шагом к обеспечению устойчивого развития строительной отрасли.
Ключевые слова. Строительство, пофакторный анализ, микроклимат, температура воздуха, критические значения.

THE IMPACT OF CLIMATIC FACTORS ON CONSTRUCTION PRODUCTION PROCESSES: RISK ASSESSMENT

Shangareev I.A.
academic advisor Voskanyan K.L.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. The article emphasizes the need to analyze climate factors in order to develop effective adaptation strategies and minimize risks during the design, construction, and operation of buildings. The

study aims to assess local climate conditions and identify potential risks, which is a key step towards ensuring sustainable development in the construction industry.
Keywords. Construction, factor analysis, microclimate, air temperature, critical values.

В последние десятилетия глобальные изменения климата стали одной из самых актуальных проблем, с которыми сталкивается человечество. Эти изменения проявляются в увеличении средней температуры, изменении режимов осадков, повышении уровня моря и увеличении частоты экстремальных погодных явлений. Все эти факторы оказывают значительное влияние на различные сферы деятельности, включая строительство. Важно понять, как климатические изменения влияют на производственные процессы в строительстве, чтобы разработать эффективные стратегии адаптации и минимизации рисков.

Исследование влияния климатических факторов на производственные процессы в строительстве является важным шагом к обеспечению устойчивого развития отрасли в условиях глобальных изменений климата. Понимание этих факторов поможет не только минимизировать риски и улучшить качество строительства, но и способствовать созданию безопасной и комфортной среды для жизни людей. Адаптация технологий и внедрение инновационных решений станут ключевыми аспектами успешной работы строительной отрасли в будущем.

Основной целью работы является анализ влияния различных климатических факторов, таких как температура, осадки, ветер и экстремальные погодные явления, на процессы проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений. Важной целью является выявление и оценка рисков, которые могут возникнуть в результате изменения климатических условий.

На основе данных общего и пофакторного анализа климата будет произведена оценка местных условий – анализ микроклимата. Для наиболее общей оценки климатических условий района строительства можно использовать данные климатического районирования. Климатические характеристики районов и подрайонов дают общее представление о климатическом фоне, о характере зимы и лета, о средних значениях температуры, ветра и влажности и других параметрах, которые в дальнейшем подлежат более детальной оценке на уровне пофакторного анализа климата.

Для более детального рассмотрения влияния данных факторов на строительство объектов капитального строительства был выбран жилой комплекс, расположенный на юге нашей страны в городе Сочи, Краснодарского края.

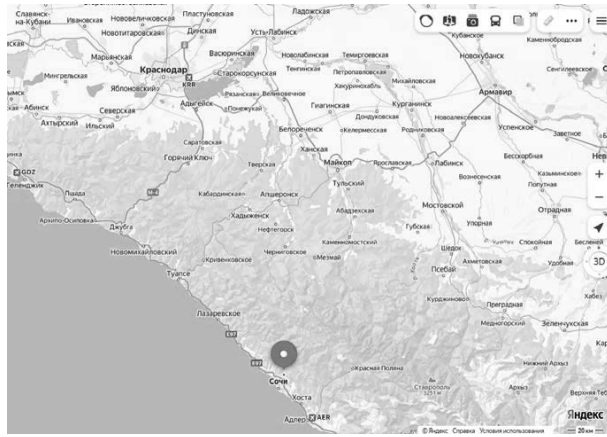


Рисунок 1 – Местоположение объекта на Яндекс картах

Для изучаемой территории характерно формирование субтропического типа климата, которое происходит под влиянием двух физико-географических факторов: теплового эффекта Черного моря и защитного эффекта Главного Кавказского хребта, отгораживающего побережье от холодного воздействия континентального воздуха.

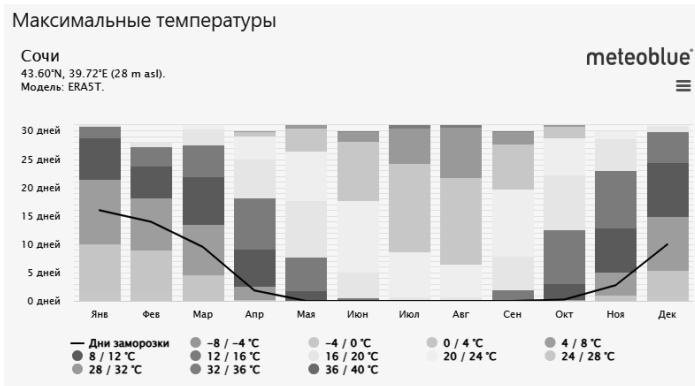


Рисунок 2 – Месячные максимальные температуры по м/ст АгроСочи

Средняя годовая температура воздуха по метеостанции АгроСочи составляет + 14 ºС. Средняя месячная температура воздуха самого холодного месяца +2,9 ºС (январь 1992г). Средняя месячная температура воздуха самого теплого месяца +26,2 ºС (август 2001, 2009 гг).

Относительная влажность воздуха меняется в широких пределах. Максимальная относительная влажность воздуха наблюдается в мае (78%), минимальная – в декабре (70%). Средняя годовая относительная влажность воздуха составляет 74%. Средний годовой недостаток насыщения воздуха водяным паром составляет 4,8 мбар.

Пофакторный анализ позволяет проводить качественную оценку летнего температурно-влажностного режима. Характер этой связи показан на рис.3, где даны

верхние и нижние критические значения относительной влажности, ограничивающие зону оптимальных значений, при различных температурах воздуха. Из представленного графика следует, что для сохранения комфортных или близких к ним условий в летнее время при повышении температуры воздуха от 18 до 28 ºС надо, чтобы относительная влажность воздуха снижалась от 50…70% до уровня 30…50%.

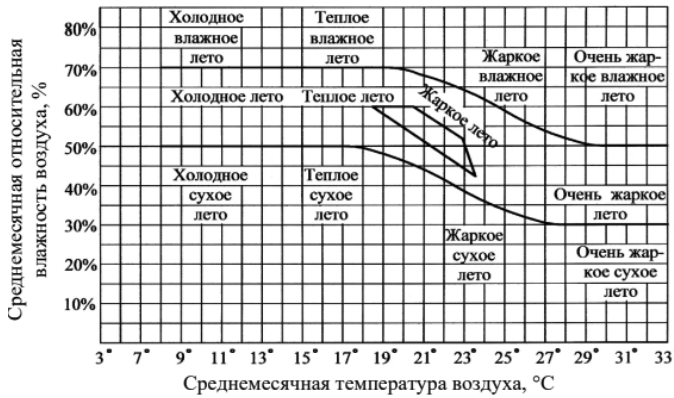


Рисунок 3 – Диаграмма для оценки летнего температурно-влажностного режима района строительства

Микроклимат и степень комфорта городских территорий в значительной степени зависят от ветрового режима. Оценка ветрового режима местности проводится при решении планировочных задач, связанных с ветрозащитой аэрацией и выбором оптимальной ориентации зданий, типов секций, квартир и т.п. В архитектурно-строительной климатологии ветровой режим характеризуется направлением движения, скоростью и повторяемостью ветра.

Максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь 6,5 м/с, средняя скорость за период со средней суточной температурой воздуха <8 ºС – 3,1м/с. Максимальная скорость ветра 34 м/с, порыв 40 м/с. Суточный ход скорости ветра в зимнее время сглажен, в теплый период наблюдается увеличение скорости ветра в дневные часы. Ветровой режим в Сочи можно определить, как среднединамический (V=1-4 м/с).

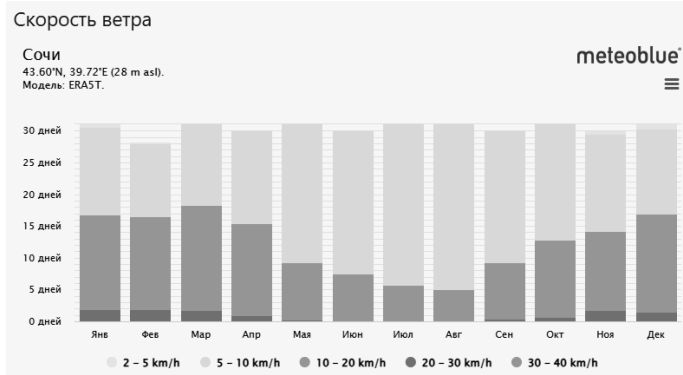


Рисунок 4 – Средняя месячная скорость ветра в Сочи (км/ч)

При пофакторном анализе климата важное значение имеет оценка воздействия излучении суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации на горизонтальную поверхность в течение года.



Рисунок 4 – График суммарной солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность на горизонтальную поверхность по месяцам в Сочи

Ограничение теплового воздействия инсоляции на помещения с помощью специальных солнцезащитных устройств в соответствии с требованиями норм следует применять для районов между 57 и 47 °с.ш. при ориентации окон жилых зданий на юго-запад (сектор горизонта от 200 до 270°) и для районов южнее 47 °с.ш. при ориентации на юг и юго-запад (сектор горизонта от 160 до 290°).

Список литературы

1. *Горбунов, А. В. (2020).* Климатические изменения и их влияние на строительную отрасль. М.: Издательство МГСУ.
2. *Куликов, С. П. (2019).* Адаптация строительных технологий к изменяющимся климатическим условиям.Научные труды СПбГАСУ, 3(45), 112-118.

3. *Федоров, А. Н., Сергеева, М. В*. (2017). Климатические факторы и их влияние на проектирование зданий. Строительные технологии, 4(6), 28-34.
4. *Интерактивный сервис «Погода и климат» [Электронный ресурс]. - URL: http://www.pogodaiklimat.ru/*
5. *Интерактивный сервис «Строительная климатология СП 131.13330.2020» [Электронный ресурс]. - URL: https://helpeng.ru/engineer/climatology/climatology-2020*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДКОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КАРАКАЛПАКИИ

Тажиниязов Н.А.
Научный руководитель О.Г. Анискина
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
niyazbek.tazhiniyazov@bk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования метеорологических полей, в первую очередь осадков, для территории Каракалпакстана (Приаралье) с использованием мезомасштабной атмосферной модели WRF-ARW версии 4.3. Исследование охватывает март – начало апреля 2020–2024 гг. на сетке с шагом 9 км (внешний домен d01) и 3 км (вложенный домен d02). Прогноз выполнялся на срок 10 суток с дискретностью анализа результатов 3 часа. Проведена верификация модельных данных по температуре воздуха на высоте 2 м и суммарным осадкам на основе наблюдений метеостанции Муйнак. Установлено, что модель удовлетворительно воспроизводит температурный режим однако прогноз осадков характеризуется крайне низкой корреляцией с наблюдениями, что обусловлено как объективными факторами (аридный климат, локальный характер осадков), так и методическими ограничениями. Показано, что повышение пространственного разрешения до 3 км улучшает воспроизведение локальных барических неоднородностей и температурной изменчивости, но не решает проблему прогноза осадков в регионе.
Ключевые слова: численное моделирование, WRF-ARW, осадки, Каракалпакстан, Приаралье, верификация, мезомасштабное моделирование, микрофизика облаков.

NUMERICAL MODELING OF PRECIPITATION FOR THE TERRITORY OF KARAKALPAKSTAN

Tajiniyazov N.A.
academic advisor Aniskina O.G.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Abstract. The paper presents the results of numerical modeling of meteorological fields, primarily precipitation, for the territory of Karakalpakstan (the Aral Sea region) using the WRF-ARW mesoscale atmospheric model version 4.3. The study covers March – early April 2020–2024 with spatial resolutions of 9 km (outer domain d01) and 3 km (nested domain d02). The forecasts were performed for a 10-day lead time with 3-hour output intervals. Verification of model data against observations from the Muynak weather station was carried out for 2-m air temperature and total precipitation. It was found that the model satisfactorily reproduces the temperature regime (best results in 2022, while precipitation forecasts show extremely low correlation with observations (which is attributed to both objective factors (arid climate, local nature of precipitation) and methodological limitations. It is shown that increasing spatial resolution to 3 km improves the reproduction of local baric inhomogeneities and temperature variability but does not solve the problem of precipitation forecasting in the region.
Keywords. numerical modeling, WRF-ARW, precipitation, Karakalpakstan, Aral Sea region, verification, mesoscale modeling, cloud microphysics.

Каракалпакстан расположен в северо-западной части Узбекистана, в зоне резко континентального климата с крайне ограниченным количеством атмосферных осадков. Среднегодовое количество осадков не превышает 100 мм, при этом осадки распределены по сезонам крайне неравномерно. В условиях продолжающегося усыхания Аральского моря и связанных с этим климатических изменений понимание механизмов осадкообразования и совершенствование методов прогноза осадков приобретает особую значимость.

Целью данной работы является оценка возможностей модели WRF-ARW в воспроизведении полей давления, температуры, ветра и осадков для территории Каракалпакстана в весенний период, а также выявление типичных синоптических ситуаций, приводящих к выпадению осадков в исследуемом регионе.

Для численных экспериментов использована мезомасштабная атмосферная модель WRF-ARW версии 4.3 – полностью сжимаемая негидростатическая модель, широко применяемая в научных исследованиях и оперативном прогнозировании. Область исследования включает северо-западную часть Республики Каракалпакстан с центром в районе города Муйнак (43°46′ с.ш., 59°02′ в.д.). Расчётная область содержит два вложенных домена: d01 (внешний): шаг ~9 км, d02 (вложенный): шаг ~3 км, охватывает территорию Приаралья с детализацией локальных особенностей циркуляции.

Начальные и граничные условия получены из архивов модели NCEP/GFS с шагом 0,25°. Фактические данные о температуре на уровне 2 м (дискретность 3 часа) взяты с сайта «Погода и Климат», данные об осадках – из архива Гидрометцентра Узбекистана.

Моделирование выполнено для каждого дня марта и первых дней апреля 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 годов. Прогноз осуществлялся на срок 10 суток с выводом результатов каждые 3 часа (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 UTC).

Анализ полей давления на уровне моря для обоих доменов показал:

Внешний домен d01 даёт сглаженное, крупномасштабное описание барических образований, позволяя проследить общую синоптическую картину – развитие циклонической деятельности, формирование антициклонов и их заполнение.

Внутренний домен d02 благодаря более высокому разрешению детализирует структуру барических образований: выявляет вторичные ложбины, локальные минимумы давления (на 1–3 гПа глубже, чем в d01) и более точно позиционирует фронтальные зоны.

Верификация прогноза температуры на высоте 2 м показала, что во всех случаях, где корреляции положительны, внутренний домен d02 демонстрирует более высокие значения r, чем внешний d01. Это подтверждает, что увеличение пространственного разрешения до 3 км улучшает воспроизведение температурной изменчивости.

Коэффициенты корреляции для осадков ожидаемо низкие. Анализ временных рядов осадков выявил, что модель систематически либо пропускает реальные эпизоды осадков, либо даёт ложные сигналы в периоды, когда осадков не наблюдалось. Внутренний домен d02 в ряде случаев усиливает ложные сигналы и не улучшает воспроизведение осадков.

Модель WRF-ARW удовлетворительно воспроизводит крупномасштабные барические поля и температурный режим в Приаралье, особенно при повышенном пространственном разрешении.

Прогноз осадков в регионе остаётся крайне сложной задачей. Повышение разрешения до 3 км улучшает воспроизведение локальных барических неоднородностей и температурной изменчивости, но не решает проблему прогноза осадков.

Для улучшения прогноза осадков в аридных регионах рекомендуется:
использование ансамблевых подходов;
применение более сложных микрофизических схем (WSM6, Morrison);
учет динамики подстилающей поверхности (состояние почвы, влажность);
локализация модели с учётом региональных особенностей.

Список литературы

1. *Balliev A.I.* Климатическая характеристика города Муйнак // Научная статья. – Республика Каракалпакстан.
2. *Zhou J., Huang J., Yao Y. et al.* Projected Temperature and Precipitation Changes in Central Asia From High-Resolution WRF Simulation Under 2 SSP Scenarios // International Journal of Climatology. – 2025. – Vol. 45, No. 14.
3. Анализ долгосрочных тенденций осадков в южном Приаралье // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 4. – С. 317–332.
4. *Skamarock W.C., Klemp J.B. et al.* A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3 // NCAR Technical Note. – 2021.
5. *Hong S.-Y., Lim J.-O.J.* The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) // Journal of the Korean Meteorological Society. – 2006. – Vol. 42, No. 2. – P. 129–151.

АНАЛИЗ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ФОРМ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В ПЕРИОД НАСТУПЛЕНИЯ РАННЕГО ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ.

Антоновская И.В.
Научный руководитель Ефимова Ю.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
antonovskyaira@gmail.com

Аннотация. В статье проведен анализ зависимости наступления раннего половодья от преобладающей формы атмосферной циркуляции за период с 1962 по 2021г.
Ключевые слова. Форма циркуляции, весенний сезон, половодье.

ANALYSIS OF THE PREVAILABLE FORMS OF ATMOSPHERIC CIRCULATION DURING THE EARLY SPRING FLOOD.

Antonovskaya I.V.
academic advisor Efimova Y.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

Annotation. The article analyzes the dependence of the onset of early floods on the prevailing form of atmospheric circulation for the period from 1962 to 2021.
Keywords. Circulation pattern, spring season, flood.

В Архангельской области на северо-западе России в весенний сезон часто происходят одни из самых мощных наводнений в регионе. Весеннее половодье возникает из-за возрастающего притока воды в речное русло, вызванного таянием снега. Ранние

половодья являются наиболее опасными. Так как к ним городские службы не готовы, поэтому анализ условий их формирования представляет особый интерес [1]. Датой, до которой наступившие половодья будут считаться ранними, является 24 апреля.

В ходе проведения научно-исследовательской работы были определены года с ранним наступление весеннего половодья за период с 1962 по 2021г. Для более детального анализа и проведения оценки климатических изменений, анализа даты наступления раннего половодья с 1962 по 2021г. были разделен на два периода продолжительностью 30 лет: 1962 -1991 гг. и 1992-2021 гг. [2].

Наступление раннего половодья в период 1962-1991 гг. наблюдалось в: 1967, 1973, 1975, 1983, 1984, 1990 и 1991 годах, а в период 1992-2021 гг. наблюдалось в: 1995, 2000, 2007, 2008, 2013, 2016 и 2021 годах. Количество случаев ранних половодий в обоих периодах неизменно.

В работе проведен анализ зависимости наступления раннего половодья от преобладающей формы атмосферной циркуляции за период с 1962 по 2021г. В классификации Вангенгейма все виды атмосферных процессов сгруппированы в три формы атмосферной циркуляции: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C). В работе для исследования влияющей формы циркуляции был выбран период 14 дней до наступления половодья. На графиках рисунков 1 и 2 представлено количество случаев всех 3 форм циркуляции в этот период для каждого раннего половодья.

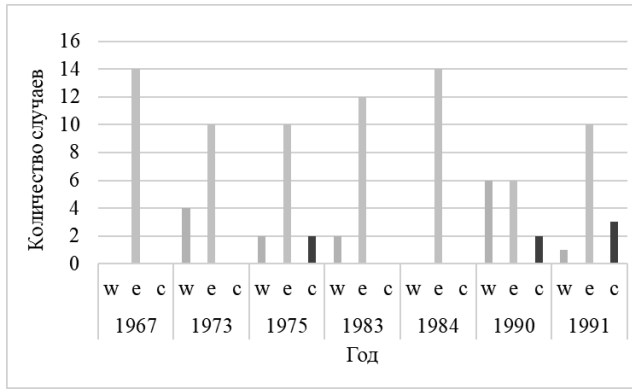


Рисунок 5 – Формы циркуляции для раннего половодья за период 1962 - 1991 г.

Проанализировав атмосферные формы циркуляции для раннего половодья за период 1962 - 1991 г. очевидно, что для наступления раннего половодья характерна восточная циркуляция.

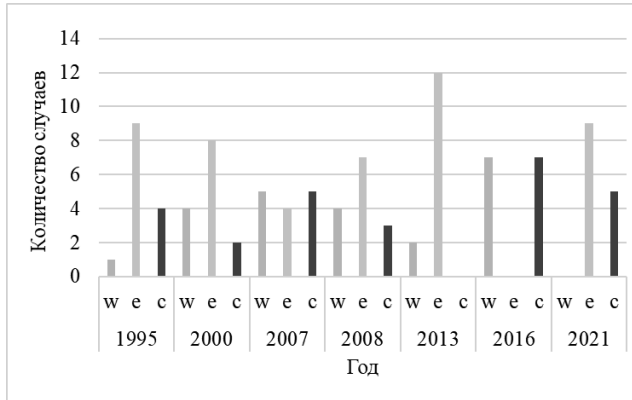


Рисунок 6 – Формы циркуляции для раннего половодья за период 1992 - 2021 г.

Проанализировав атмосферные формы циркуляции для раннего половодья за период 1992 - 2021 г. можно заметить, что так же, как и ранее, для наступления раннего половодья характерна восточная циркуляция. Однако во втором исследуемом периоде при уменьшении влияния на район исследования восточной формы, которая тем не менее является преобладающей, возрастает, практически одновременно, число дней с западной и меридиональной формой атмосферной циркуляции. Интересно, что в 2016 году не наблюдалось ни одного случая восточной атмосферной формы циркуляции, которая могла бы поспособствовать наступлению раннего половодья.

В работе был проведен анализ синоптических условий над исследуемой территорией, сопутствующих восточной форме циркуляции, как преобладающей перед ранними половодьями. Была выявлена наиболее характерная ситуация, которая была связана с распространением гребней антициклона, имеющего европейское происхождение. В 2016 году в период перед весенним половодьем в большей степени на таяние снежного оказала влияние меридиональная форма с продвижением южных циклонов над бассейном река Вага.

Список литературы

1. *Бузин В.А*. Опасные гидрологические явления. Учебное пособие. - СПб.: изд. РГГМУ, 2008 - 228 с.
2. *Малинин В.Н.* Статистические методы анализа гидрометеорологи ческой информации - СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 408 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ПЛОЩАДЕЙ АНОМАЛИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5

Новикова О.А.[1, 2]
Научный руководитель Ермакова Т.С.[2]
[1]Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
[2]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

xelga.tyan@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного обеспечения на языке Fortran, предназначенного для автоматизированного расчета площадей аномалий приповерхностной температуры на основе данных реанализа ERA5. Актуальность работы обусловлена необходимостью количественной оценки термических факторов, влияющих на модуляцию планетарных волн (ПВ) и развитие внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Описан алгоритм расчета площади ячеек с учетом сферичности Земли и фильтрации данных по длительности существования аномалий. Приведены результаты работы программы на данных для зимы 1984-1985 и объяснена необходимость внедрения дополнительного фильтра для фильтрации шума.
Ключевые слова: полярный вихрь, планетарные волны, аномалии температуры, ERA5, Fortran, фильтрация шума.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATED CALCULATION OF NEAR-SURFACE TEMPERATURE ANOMALY AREAS BASED ON ERA5 REANALYSIS DATA

Novikova O.A.[1,2]
academic advisor Ermakova T.S.[2]
[1]Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg
[2]St Petersburg University, St. Petersburg

Annotation. The article discusses the development of software in the Fortran language designed for the automated calculation of surface temperature anomaly areas based on ERA5 reanalysis data. The relevance of the work is due to the need for a quantitative assessment of thermal factors affecting the generation (amplification) of planetary waves and the development of sudden stratospheric warmings (SSW). An algorithm for calculating the cell area taking into account the Earth's sphericity and filtering data by the duration of anomalies is described. The results of the program on data for the winter of 1984-1985 are presented and the necessity of introducing an additional filter for noise filtering is explained.
Keywords: polar vortex, planetary waves, temperature anomalies, ERA5, Fortran, noise filtering.

Изучение механизмов взаимодействия аномалий приземной температуры с процессами усиления ПВ является важной задачей для понимания климатических процессов. ПВ с волновыми числами m=1 и m=2 играют критическую роль в переносе энергии из тропосферы в стратосферу, что может приводить к ослаблению полярного вихря и возникновению внезапных стратосферных потеплений (ВСП) [1].

Для разработки программного обеспечения был выбран язык Fortran. Данный выбор обусловлен необходимостью обработки значительных массивов реанализа ERA5. Программа реализует последовательную проверку каждой ячейки сетки на соответствие заданным критериям аномальности. Математическое ядро программы базируется на формуле расчета площади ячейки с учетом сферичности Земли, что позволяет избежать искажений, характерных для регулярных сеток в высоких широтах (формула 1).

$$S_{anomal(\pm)} = \sum_{i=1}^{N} \left[\left(\frac{\Delta\phi_{lat} \cdot \pi}{180} \right) \cdot \left(\frac{\Delta\lambda_{lon} \cdot \pi}{180} \right) \cdot R^2 \cdot \cos\left(\phi_{lat} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right] \quad (1)$$

где $\Delta\phi_{lat}$ – шаг сетки по широте в градусах, $\Delta\lambda_{lon}$ – шаг сетки по долготе в градусах, ϕ_{lat} – широта центра ячейки в градусах, R^2 - средний радиус Земли ($R \approx$ 6371км), N - количество ячеек с аномалиями.

Алгоритм также включает «фильтр устойчивости», который фиксирует аномалию только в том случае, если она сохраняется в узле сетки в течение минимум 3 дней подряд. Это позволяет исключить краткосрочные синоптические колебания, не

влияющие на усиление ПВ. В программе также было задано две зоны с различными естественными синоптическими условиями. Зона 1 соответствует Евразии и ограничена координатами 335–190° в.д. и 40–85° с.ш. Зона 2 охватывает Северную Америку и ограничена координатами 190–335° в.д. и 40–85° с.ш. Такое деление необходимо для выявления асимметрии в распределении тепла и холода, которая напрямую влияет на амплитуду ПВ. Для оценки работоспособности ПО были проведены расчеты площадей аномалий приповерхностной температуры для периода 11.01.1984–28.02.1985 гг. Этот период характеризуется развитием мажорного ВСП по типу расщепления. На Рисунке 1 представлен график полученных площадей аномалий с окном осреднения 3 дня.

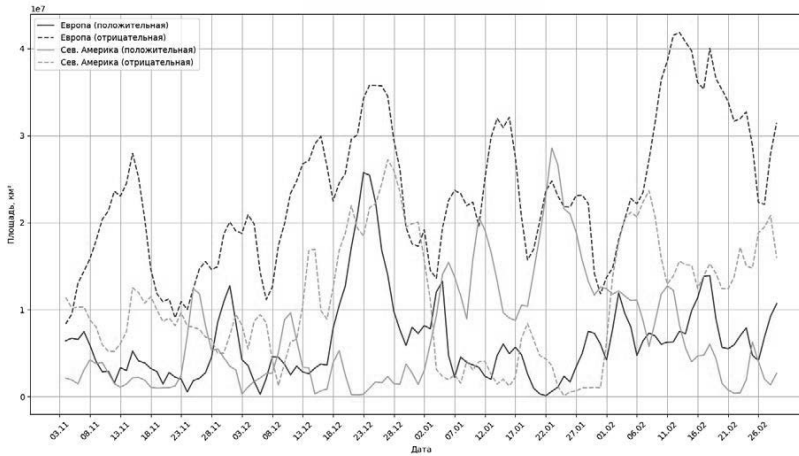
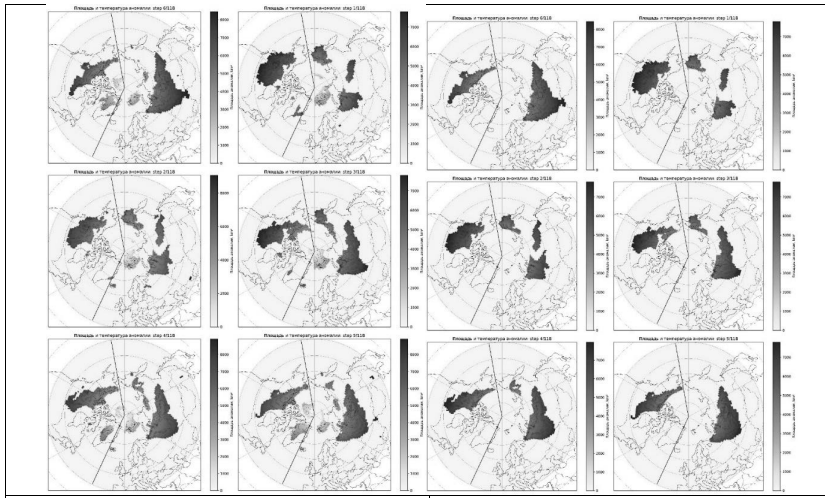


Рисунок 7 – Количественная оценка пространственного охвата аномалий температуры в Северном полушарии (по 2 зонам) по результатам работы разработанной программы

Для пространственной оценки на основе имеющейся программы была написана еще одна программа, позволяющая сохранять аномалию в виде площади ячейки, а также в качестве второй переменной — среднюю за осредненный период аномалию температуры для этого узла. Это расширение позволяет не только получать суммарные показатели, но и анализировать локальную интенсивность термических возмущений в каждой точке сетки. Использование второй программы позволило визуализировать структуру этих очагов. На Рисунке 2 (а) показаны результаты пространственной оценки: распределение площадей ячеек в сочетании с их средней интенсивностью.

При анализе результатов первой версии программы было обнаружено значительное количество мелких изолированных аномалий, связанных с кратковременными погодными флуктуациями. Такие участки создают вычислительный шум и не участвуют в формировании устойчивых планетарных волн.



а б

Рисунок 8 – Структура полей приземных аномалий температуры до внедрения фильтра (а) и после очистки данных от кратковременных флуктуаций (б)

Для очистки данных был внедрен фильтр по минимальному размеру кластера, учитывающий только те области, которые состоят из 100 и более связанных узлов сетки. Результаты работы этого алгоритма отражены на Рисунке 2 (б). Сравнение с исходными данными показывает, что фильтрация эффективно отсекает шум, оставляя только климатически значимые центры действия, что критически важно для повышения точности будущих расчетов.

Заключение. Разработанный программный комплекс на Fortran позволяет проводить детальный анализ приземных термических условий в выделенных синоптических зонах Евразии и Северной Америки. Внедрение дополнительного программного модуля обеспечило возможность сохранения не только суммарных площадей, но и распределения локальных температурных отклонений (Рисунок 2(а)). Применение кластерного фильтра (Рисунок 3(б)) решило проблему шума. В рамках дальнейших исследований планируется применить методы кластерного и кросс-корреляционного анализа для оценки влияния полученных площадей температурных аномалий на механизмы генерации и усиления планетарных волн в стратосфере.

Список литературы

1. *Моханакумар К.* Взаимодействие стратосферы и тропосферы / пер. с англ. Р.Ю. Лукьяновой; под ред. Г.В. Алексеева. — М.: Физматлит, 2011. — 452 с.

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Филаткина Е.В.
Научный руководитель Кашлева Л.В.
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
Fila17rus@gmail.com

Аннотация. В статье представлена методика комплексной оценки воздействия крупных промышленных объектов на региональные экосистемы, основанная на интеграции гидродинамического моделирования атмосферных процессов с оценкой критических нагрузок на природные комплексы. Предложен алгоритм двухэтапного анализа, включающий расчет полей концентраций загрязняющих веществ с использованием моделей WRF и CMAQ, а также оценку превышения критических нагрузок для различных типов экосистем. Разработан индекс продуваемости региона для характеристики способности территории к самоочищению атмосферы. Методика адаптирована для российских климатических условий с учетом зимних инверсий и влияния снежного покрова.
Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, критические нагрузки, экосистемы, промышленные объекты, качество атмосферы, WRF, CMAQ.

METHODOLOGY FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF LARGE INDUSTRIAL FACILITIES IMPACT ON REGIONAL ECOSYSTEMS

Filatkina E.V.
academic advisor Kashleva L.V.
Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Peterburg

Abstract. The article presents a methodology for comprehensive assessment of the impact of large industrial facilities on regional ecosystems, based on the integration of hydrodynamic modeling of atmospheric processes with the assessment of critical loads on natural complexes. A two-stage analysis algorithm is proposed, including calculation of pollutant concentration fields using WRF and CMAQ models, as well as assessment of critical load exceedances for various ecosystem types. A regional ventilation index has been developed to characterize the territory's ability for atmospheric self-purification. The methodology is adapted for Russian climatic conditions, taking into account winter inversions and snow cover influence.
Keywords: hydrodynamic modeling, critical loads, ecosystems, industrial facilities, air quality, WRF, CMAQ.

Современное промышленное развитие требует научно обоснованных подходов к оценке воздействия крупных объектов на окружающую среду. Особую актуальность приобретает разработка методик, позволяющих комплексно оценивать влияние промышленных предприятий на региональные экосистемы с учетом специфики российских климатических условий [1].

Целью исследования является разработка методики комплексной оценки воздействия крупных промышленных объектов на региональные экосистемы, основанной на интеграции гидродинамического моделирования с оценкой критических нагрузок.

Методологические основы исследования: Предлагаемая методика базируется на трехэтапном подходе, учитывающем временную динамику накопления и выведения загрязняющих веществ в экосистемах.

Первый этап включает гидродинамическое моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере с использованием системы моделей WRF-CMAQ.

Для описания переноса загрязнений в окружающей среде используют уравнение турбулентной диффузии:

$$\partial C/\partial t + \nabla\cdot(uC) = \nabla\cdot(K\nabla C) + R + S + D \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества, u – вектор скорости ветра,
K – коэффициент турбулентной диффузии, R – химические реакции, S – источники выбросов, D – процессы осаждения.

Второй этап предусматривает оценку превышения критических нагрузок на экосистемы с учетом баланса поступления и выведения веществ:

Превышение = Фактическая нагрузка – Критическая нагрузка (2),

где фактическая нагрузка определяется как интегральное поступление вещества за период времени с учетом процессов аккумуляции и естественного выведения из экосистемы.

Третий этап включает анализ долгосрочных экологических последствий и оценку устойчивости экосистем к воздействию.

Для характеристики способности территории к самоочищению атмосферы предложен индекс продуваемости региона (далее – ИПР):

$$ИПР = (Vср \times fповт \times Kтурб) / (Нинв \times τзастоя) \quad (3)$$

где все параметры представляют собой средние многолетние климатические характеристики:

Vср – средняя скорость ветра (м/с),

f повт – повторяемость ветров >3 м/с (%),

Kтурб – коэффициент турбулентности (безразмерный),

Нинв – высота инверсии (м),

τзастоя – время застоя воздушных масс (ч).

Значения ИПР варьируют в диапазоне от 0,1 (слабая продуваемость, высокий потенциал накопления загрязнений) до 5,0 (высокая продуваемость, благоприятные условия рассеивания).

Алгоритм комплексной оценки включает три основных этапа:

1. Предварительная оценка – анализ климатических условий, определение ИПР, картирование чувствительных экосистем.

2. Детальное моделирование – настройка WRF для региона с пространственным разрешением 1-3 км и временным шагом 1 час для краткосрочного прогноза (до 72 часов), калибровка CMAQ по данным мониторинга, расчет полей концентраций. Для анализа долгосрочных процессов (сезонная и межгодовая изменчивость) используется осреднение по периодам от 1 месяца до 1 года с учетом характерных метеорологических режимов региона.

3. Оценка экологических рисков – сопоставление с критическими нагрузками, анализ кумулятивного воздействия с учетом процессов накопления и выведения веществ в различных компонентах экосистем (почва, растительность, водные объекты), оценка скорости восстановления экосистем после снижения нагрузки, анализ трансграничного переноса [2].

При этом учитывается, что критические нагрузки определяются балансом между поступлением загрязняющих веществ и способностью экосистемы к их нейтрализации или выведению. Временные масштабы накопления и выведения различаются для разных веществ: для серы и азота – от нескольких месяцев до нескольких лет, для тяжелых металлов – десятки лет.

Предлагаемая авторами методика учитывает специфику российских климатических условий: модификацию параметров турбулентной диффузии для устойчивой стратификации; включение модуля аккумуляции загрязнителей в снежном покрове; учет влияния крупных водоемов на местную циркуляцию [3].

На основе ИПР выделены зоны:

- исключения (ИПР < 0,3) – особо охраняемые территории;
- ограничений (0,3 < ИПР < 0,7) – требуются дополнительные меры защиты;
- рекомендуемые (ИПР > 0,7) – благоприятные условия рассеивания.

Качество моделирования оценивается по индексу:

$$\text{Индекс качества} = \sqrt{[(\Sigma(\text{Смод} - \text{Снабл})^2)/n]} / \text{Сср_набл}, \quad (4)$$

где Смод и Снабл – модельные и наблюдаемые концентрации соответственно.

Таким образом, предлагаемая авторами методика обеспечивает комплексную оценку воздействия крупных промышленных объектов на региональные экосистемы с учетом российских климатических особенностей. Интеграция гидродинамического моделирования с оценкой критических нагрузок позволяет принимать научно обоснованные решения при размещении промышленных предприятий и планировании природоохранных мероприятий.

Внедрение методики будет способствовать устойчивому развитию регионов и минимизации экологических рисков.

Список литературы:

1. Методы расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе / Утв. Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273. – М., 2017. – 119 с.
2. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) // Official website. – URL: https://www.emep.int/ (дата обращения: 23.12.2025).
3. Гидрометцентр России // Официальный сайт. – URL: https://www.meteorf.ru/ (дата обращения: 23.12.2025).
4. Единая государственная система экологического мониторинга (ЕГСЭМ) // Росприроднадзор. – URL: https://rpn.gov.ru/activity/environmental-monitoring/ (дата обращения: 23.12.2025

Научное издание

МАТЕРИАЛЫ II НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «МЫ – БУДУЩЕЕ МЕТЕОРОЛОГИИ»

Подписано в печать 15.07.2026. Формат 60×84/16.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 5,7. Тираж 50. Заказ 181.

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