

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИИ АКАДЕМИИ НАУК АБХАЗИИ

На правах рукописи

Пачулия Эсма Витальевна

**Исследование влияния атмосферной циркуляции на
изменчивость ветрового режима на территории
Республики Абхазия**

Специальность: 1.6.18. «Науки об атмосфере и климате»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сухум - 2025

Работа выполнена в Государственном научном учреждении
«Институт экологии, Академии наук Абхазии»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Экба Январби Алиевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Закинян Роберт Гургенович
	доктор физико-математических наук, профессор Аджиева Аида Анатольевна
Ведущая организация:	Майкопский государственный технологический университет

Защита **состоится** «25 сентября 2025 г., 12:00 ч, на заседании разового диссертационного совета «ИЭ А 1.6.25.06 при Институте экологии Академии наук Абхазии» по адресу: Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Академика Марра 9»

С электронной версией диссертации и авторефератом можно ознакомиться на сайте Академии наук Абхазии по e-mail: <http://akademana.org> по адресу: Республика Абхазия, г. Сухум, ул. Академика Марра 9»

Автореферат **разослан** «25» августа 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

к.ф.м.н. /Гицба Я.В./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Работа посвящена исследованию влияния атмосферной циркуляции на изменчивость ветрового режима на территории Республики Абхазия. Шквалы, скорость ветра при которых достигает 25 м/с и более, а в случае катастрофических - 33 м/с и более, относятся к опасным явлениям погоды. В последнее десятилетие увеличилась повторяемость таких явлений, в т.ч. и в Абхазии. В связи с наблюдаемым за последние десятилетия увеличением опасных погодных явлений исследование, направленное на выявление их причинно-следственных статистических связей является актуальным, и механизм формирования этих опасных явлений до настоящего времени до конца не раскрыт, поэтому трудно предвидеть или предсказать такие явления. Ветер является одной из важных черт состояния атмосферы, главные элементы которой подвержены годичным, дневным и другим повторяющимся и непериодическим колебаниям. Все движения воздуха в атмосфере всегда турбулентны, вследствие чего направление и скорость ветра очень изменчивы. Прогнозы шквалов и интенсивных осадков являются одними из главных задач в численной метеорологии, поскольку, при определенных условиях, эти явления могут развиваться до уровней неблагоприятных (НЯП) или даже до опасных явлений погоды (ОЯ) и представлять угрозу безопасности населения и нанести значительный ущерб различным отраслям экономики. Эти явления, а также град, сильные грозы возникают благодаря развитию глубокой влажной конвекции.

Методы прогноза гроз, града, шквалов и интенсивных осадков основаны на определении возможной конвекции. Основная сложность в прогнозировании активной конвекции и ее динамики заключается в интенсивном взаимодействии процессов, имеющих различные масштабы во времени (от 10^2 до 10^5 секунд) и пространстве (от 10 до 10^6 м). Но, тем не менее, исследование особенностей формирования шквалистых порывов ветра, наносящих значительный ущерб народному хозяйству РА, является актуальным.

Существенное уточнение прогнозов шквалов осуществляется за счет использования радиолокационных и спутниковых данных, а в последнее время и за счет гидродинамических прогнозов базовых метеорологических полей. Однако практически все существующие методы прогноза шквалов имеют недостаточно высокие показатели качества прогнозирования. В оперативной практике отсутствуют методы прогнозирования катастрофических шквалов.

В связи с вышесказанным можно утверждать, что любое новое исследование шквалов и разработка методов их прогноза является как важной задачей для практики, так и актуальным научным исследованием.

Таким образом, актуальность темы диссертационного исследования определяется недостаточным развитием концептуальной модели физико-синоптических процессов формирования сильных шквалов, необходимостью совершенствования методов их прогнозирования, особенно шквалов с ветром разрушительной силы.

Целью диссертационного исследования является изучение влияния атмосферной циркуляции на изменчивость ветрового режима в Абхазии, выявить механизмы формирования шквалов в разных климатических зонах и создать модель для расчёта сильных ветров и шквалов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- выполнялись исследования, направленные на дальнейшее развитие концептуальной модели физико-синоптических процессов формирования сильных шквалов;
- выполнялись исследования по разработке комплекса предикторов, обуславливающих возникновение сильных шквалов;
- разрабатывалась физико – статистическая модель определения шквального ветра для заблаговременного оповещения.

Объектом исследования являются сильные ветра и шквалы как опасные явления погоды.

Предмет исследования - условия возникновения, обуславливающие факторы и методы прогнозирования сильных ветров и шквалов.

Методика выборки и обработки данных заключается в следующем:

1. Все данные были получены на метеорологических станциях, находящихся на территории Республики Абхазия, а именно метеостанции «Сухумский Маяк».
2. Производится ручная выборка данных, а именно порывистых ветров, скорость которых больше 8 м/с, и соответствующие параметры давления и температуры.
3. По полученным данным производится сравнительный анализ, строятся графики и получаем долгосрочный прогноз порывистых ветров.

Научная новизна заключается в следующем:

- Углубление понимания взаимосвязей: исследование раскрывает сложные взаимосвязи между атмосферной циркуляцией и ветровыми характеристиками на территории Абхазии. Это позволяет более точно прогнозировать и интерпретировать погодные явления.
- Адаптация к региональным особенностям: работа учитывает специфические атмосферные и климатические условия региона Абхазии, что позволяет применить полученные результаты в практических задачах с высокой степенью надежности.
- Усовершенствование методов прогнозирования погоды с использованием данных о циркуляции атмосферы имеет важное практическое значение для различных отраслей.

- Основа для дальнейших исследований: проведение более глубоких исследований в области атмосферной динамики и ее влияния на климатические процессы.

Практическая значимость: результаты работы пригодны для применения в реальных ситуациях, таких как разработка мероприятий по адаптации к изменяющимся климатическим условиям и повышение устойчивости социально-экономических систем. Эти аспекты подчёркивают значимость и вклад данного исследования в развитие метеорологической науки и его приложение в практике. В заключении диссертационной работы подводятся итоги проведенного анализа и делаются научные выводы, обобщающие полученные результаты.

Достоверность результатов данного исследования обеспечивается сравнением результатов с известными аналитическими решениями, положительными результатами сопоставления построенных математических моделей с другими численными решениями и экспериментами.

Положения, выносимые на защиту:

1. На территории Абхазии наибольшие значения средних месячных скоростей ветра (3,7–3,8 м/с) наблюдаются зимой с декабря по март, наименьшие значения (2,9–3,1 м/с) приходятся на период с мая по октябрь. Сильные ветры (более 8 м/с) отмечаются, главным образом, в холодную часть года (декабрь-апрель) и преимущественно имеют юго-восточное и северо-западное направление. Повторяемость сильных ветров имеет положительную тенденцию, с максимумом в мае (97%) и октябре (95%).
2. Циклоническая деятельность усиливается осенью, за период исследования было выявлено 436 случаев циклона, из них 279 случаев проходили осенью, зимой и в первый месяц весны в марте, так как в этот период сохраняются те циклонические возмущения, которые появляются в октябре месяце.
3. При формировании шквала атмосферное давление в начале процесса имеет минимальное значение, а затем непрерывно возрастает до момента реализации максимальных значений скорости ветра, при этом скорость воздушного потока меняется практически синхронно с атмосферным давлением и в противофазе с температурой окружающего воздуха, самый информативный предиктор для прогноза шквалов является слой 700-750 ГПа.
4. Применение преобразования Фурье позволяет выявить колебательные компоненты, а именно частоту колебаний, позволяющий дать долгосрочный прогноз. Разработанная нами математическая модель показала, что, за последующие 10 лет, количество шквалов остается прежней.

Личный вклад соискателя. Автором лично проведен аналитический обзор математических моделей. Постановка задач исследования, анализ, обобщение данных осуществлены совместно с научным руководителем. Алгоритмы численных расчетов и разработка программного обеспечения выполнены автором самостоятельно. Основные выводы и положения диссертационной работы сформулированы лично автором.

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на: VIII Всероссийской Черноморской школе-семинаре молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников (Геленджик - 2017 г.), международной научно-практической конференции «Открытые физические чтения» (Луганск - 2018 г.), V Международной научно-практической конференции (Майкоп - 2019 г.), научно-практической конференции «Системный подход к рациональному природопользованию регионов России» (Туапсе - 2019 г.), научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава физико-математического факультета АГУ (Сухум - 2020 г.), VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп - 2021 г.), научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава физико-математического факультета АГУ (Сухум - 2021 г.), XII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (Махачкала - 2022 г.), научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава физико-математического факультета АГУ (Сухум - 2023 г.), VII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп - 2023 г.), научном Форуме абхазских молодых ученых (Сухум – 2024 г.), научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава физико-математического факультета АГУ (Сухум - 2024 г.), VIII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп - 2025 г.), научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава физико-математического факультета АГУ (Сухум - 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации имеется 23 публикации, 6 из них в рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объем работы составляет 119 страниц, включая 28 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 102 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, объект исследования, научная новизна, апробация работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены характеристики модели циклонов и антициклонов, условия их образования, некоторые особенности развития погоды в циклонах и антициклонах, а также была рассмотрена повторяемость и характеристика шквального ветра в прибрежной зоне.

Циклоны возникают на малоподвижных фронтах, на холодных замедляющихся фронтах либо у точек окклюзии (точка смыкания холодной и тёплой ветвей фронта) в существовавших ранее циклонах. **Антициклоны** возникают в холодном воздухе недалеко от линии фронта у поверхности земли. **Большая часть циклонов и антициклонов** относится к фронтальным барическим образованиям. В следствие неравномерного распределения тепла по широтам и постоянного переноса холодных и тёплых масс воздуха в тропосфере происходит неравномерное распределение горизонтальных градиентов температуры. Районы, где происходит сближение тропосферных масс воздуха с различными температурными свойствами, называются тропосферными фронтальными зонами.

Характеристики погоды в циклонах и антициклонах:

- **Циклон** приносит осадки, понижение температуры и низкое давление. В циклоне может быть и ненастная, и солнечная погода — в зависимости от свойств воздушных масс в передней и тыловой его частях.
- **Антициклон** сопровождается ясной погодой, отсутствием ветра и осадков. Летом он приносит жаркую погоду, зимой — сильные морозы, морозные туманы.

В приморской зоне Абхазии с мая по сентябрь возрастает повторяемость ветров западных румбов за счёт хорошо развитой бризовой циркуляции. Анализируя сезонный ход ветрового режима за последнее пятилетие, отметим, что разброс данных значителен в 2020 г. и 2021 г. (15,6 м/с и 14, 8 м/с соответственно) (рисунок 1).

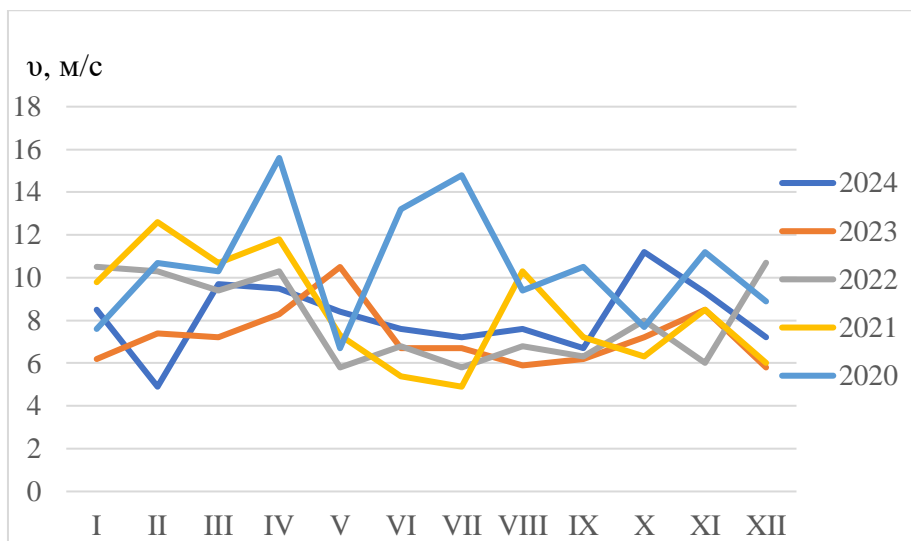


Рисунок 1. Среднемесячное распределение скорости приземного ветра в г. Сухум по данным гидрометеостанции «Сухумский Маяк» за последние пять лет.

Рассмотрен годовой ход приземного ветра на основе данных метеостанции «Сухумский маяк» за последние пять лет (рисунок 2). Наибольшее количество абсолютных максимальных значений ветра наблюдались в 2020, 2021 и 2024 гг.

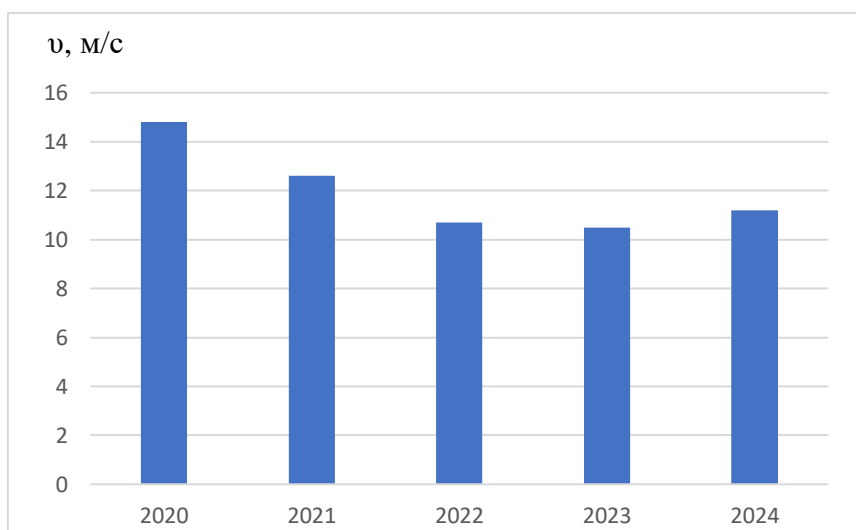


Рисунок 2. Абсолютные максимальных значения приземного ветра в г. Сухум по данным гидрометеостанции «Сухумский Маяк» за последние пять лет.

Для характеристики ветрового режима прибрежной зоны г. Сухума проведена статистическая обработка данных по гидрометеорологической станции «Сухумский маяк» за период с 1999 по 2024 гг. (табл. 1).

Таблица 1

Среднемесячная повторяемость ветра различных румбов в прибрежной зоне

г. Сухум в период с 1999 по 2024 гг. (%)

Мес/румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Шт
I	2,45	22,30	24,80	7,10	3,05	5,45	15,05	5,20	15,3
II	2,05	15,30	27,30	10,50	5,15	5,25	23,80	7,50	8,10
III	2,80	13,75	18,30	9,60	6,65	11,00	22,30	6,55	7,90
IV	1,25	9,20	15,65	10,70	6,10	13,65	27,80	5,10	11,60
V	1,70	8,20	12,10	9,50	4,60	14,85	32,50	6,10	10,55
VI	2,10	11,10	13,55	8,15	9,90	14,30	32,35	5,65	9,70
VII	1,05	9,65	18,75	9,00	7,20	15,40	25,30	3,40	9,85
VIII	1,00	11,25	13,15	7,20	5,95	14,95	28,15	4,10	9,65
IX	2,55	15,10	15,10	8,40	5,50	13,60	24,80	5,15	8,20
X	3,30	18,30	22,15	7,80	5,35	9,70	15,70	6,85	8,20
XI	3,55	22,65	23,25	8,25	3,85	6,95	12,50	5,50	8,60
XII	4,25	22,75	24,10	7,55	3,30	4,50	13,30	4,35	8,20
Сред.	2,30	14,95	19,00	8,60	5,50	10,8	22,80	5,50	9,65

Наибольшей среднегодовой повторяемостью в прибрежной сухумской акватории обладают ветры западного (22,8%) и восточного (19%) направлений, наименьшей – ветры южного (5,5%) и северного румбов (2,3%).

Среднегодовая повторяемость штиля составляет 9,7%. Наибольшая повторяемость наблюдается в зимний период (10,4%), наименьшая - в осенний (8,5%).

Глава закончена анализом приведенного литературного обзора и выделением актуальных проблем, требующих решения.

Во второй главе описываются физические основы образования и прогноз шквалов, условия возникновения, а также рассмотрены некоторые физико-статистические методы прогноза шквалов. Среди методов прогноза возникновения шквалов наибольшее применение получили методы, основанные на определении степени неустойчивости атмосферы. В Гидрометцентре Абхазии в качестве основного метода реализуется физико-статистический подход к прогнозу сильных шквалов на основе выходных данных региональной гидродинамической модели. В качестве предикторов используются фактические и прогностические поля приземного давления, значения температуры воздуха и влажности (точки росы) у поверхности Земли и на высотах изобарических поверхностей, а также диагностические данные упорядоченных вертикальных движений на поверхности 850 гПа. В зависимости от синоптических условий, при которых наблюдаются возникновение и развитие шквалов, различают **внутримассовые и фронтальные шквалы**. Фронтальные шквалы наблюдаются в 75% случаев, а внутримассовые - только в

25% случаев. Внутримассовые шквалы обычно бывают умеренными или слабыми, наблюдаются с мая по август, как правило, во вторую половину дня.

В рамках исследования проведена, как уже указывалось выше, количественная оценка влияния на величину скорости сильных шквалов таких параметров атмосферы, как максимальная конвективная скорость W_m , м/с, лапласиан приземного давления Δp , гПа/(600км)², и ветер средней и нижней тропосферы.

Согласно исследованиям Б.Е. Пескова критерии аналогичных ветровых параметров, благоприятных для возникновения шквалов, получены с учетом деления летнего периода на подпериоды: весна до 20 мая, основной период с 20 мая по 10 августа, конец лета – осень с 10 августа; поздняя осень после 10 сентября. Критериальные значения параметров: для весны – ($V_{v75} = 11$, $V_{s75} = 17$, $V_{85} = 11$); для основного периода – ($V_{v75} = 7$, $V_{s75} = 12,5$, $V_{85} = 7$); для конца лета – ($V_{v75} = 9$, $V_{s75} = 15$, $V_{85} = 9$); для поздней осени – ($V_{v75} = 11$, $V_{s75} = 17$, $V_{85} = 11$).

Рассчитывались следующие статистические характеристики параметров атмосферы: среднее; медиана; стандартное отклонение; минимальное значение; максимальное значение; 25 % и 75 % точки. Также было рассчитано расстояние Махаланобиса, позволяющее оценить информативность каждого предиктора. Построены гистограммы распределения.

На основе результатов анализа материалов статистической обработки получены выводы. Получено, что самым информативным предиктором для прогноза шквалов, из рассмотренных характеристик ветра, является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа (расстояние Махаланобиса $Ma = 0,39$). Учет этого параметра позволяет оценить степень перемешивания воздуха в облаке. Сильное перемешивание выравнивает не только скорость ветра, но и его направление. При слабых ветрах в случае отсутствия шквалов направление ветра сильно меняется по слоям, и модуль среднего вектора ветра меньше, чем в случаях со шквалами. Расстояние Махаланобиса средней скалярной скорости ветра в слое 700–500 гПа чуть меньше ($Ma = 0,37$). Наименьшее значение Ma оказалось у скорости ветра на поверхности 850 гПа ($Ma = 0,3$).

Относительно других рассмотренных параметров атмосферы, как и следовало ожидать, наибольшее расстояние Махаланобиса оказалось для максимальной конвективной скорости ($Ma = 1,6$), затем – для лапласиана приземного давления ($Ma = 1,0$). Полученные результаты оценки информативности предикторов подтверждают рассмотренную и представленную ниже их визуальную оценку на основе графического и табличного материала.

Гистограммы распределения параметров атмосферы для случаев со шквалами и без шквалов представлены на рис. 3 (а),(б).

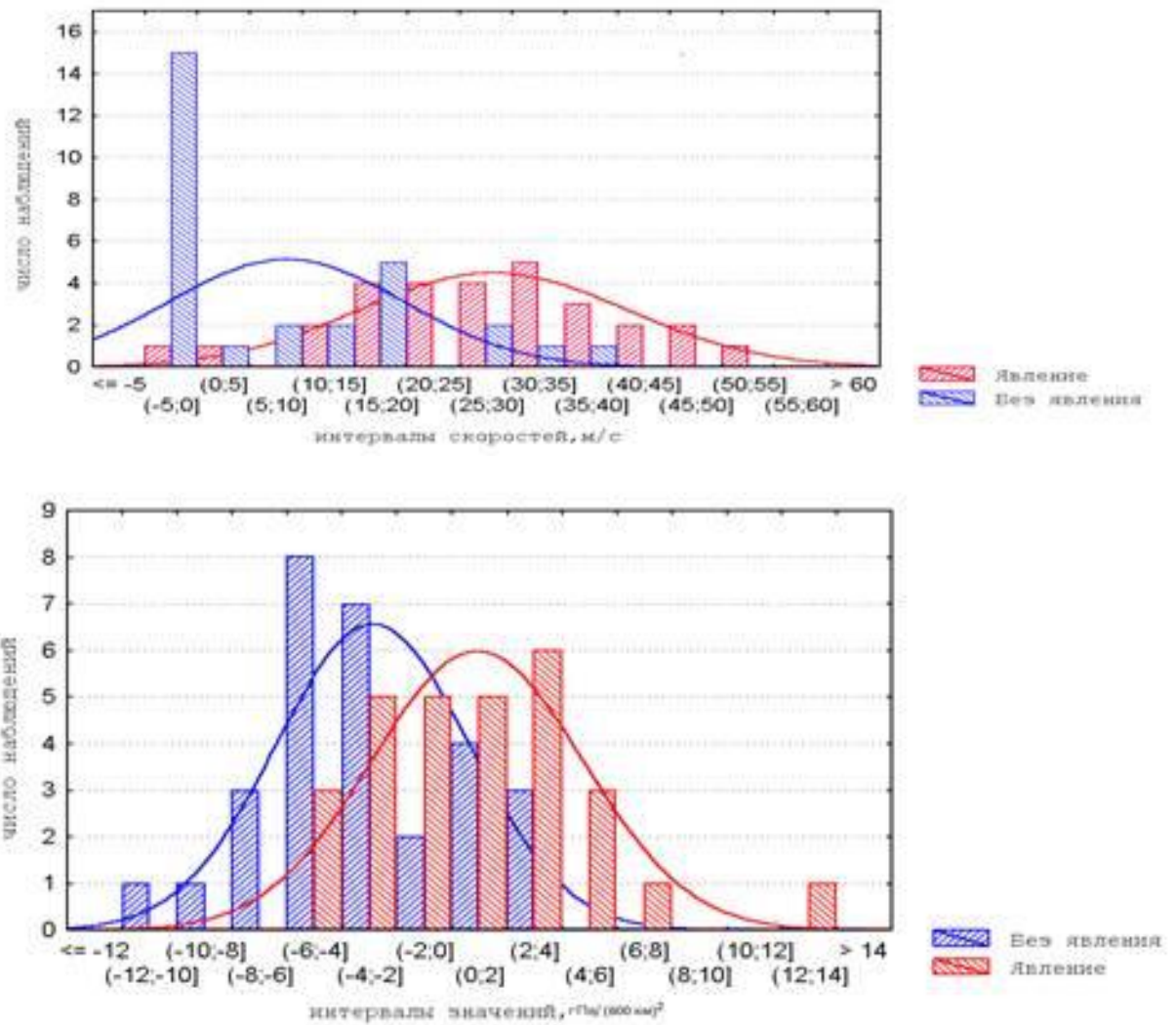


Рисунок. 3. Гистограммы и их огибающие (в случаях со шквалами и без шквалов) для распределений вертикальной конвективной скорости (а) и лапласиана приземного давления (б)

Лапласиан для случаев со шквалами должен изменяться от 0 до - 4 гПа/(600 км)², а скорость высотных ветров должна превышать 2–4 м/с. Скорость ветра у поверхности земли при шквале в наибольшей степени связана с суммой скоростей ветра в нижнем слое тропосферы. Коэффициент корреляции между максимальной скоростью ветра при шквале и суммой скоростей ветра равен 0,49 и статистически значим на уровне значимости 5% (рисунок 4, 5).

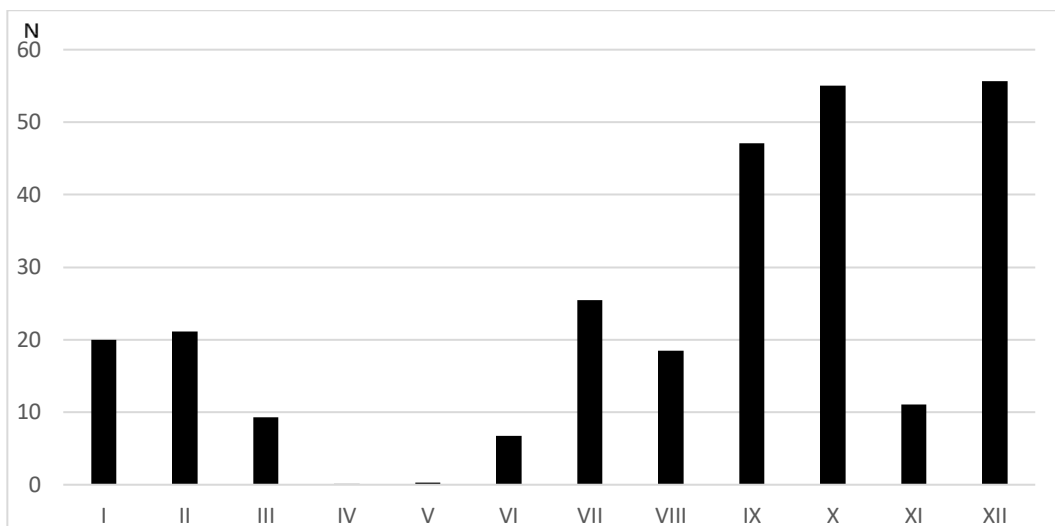


Рисунок 4 Лапласиан приземного давления за период 2024 г. по месяцам для городов Афон и Гудаута.

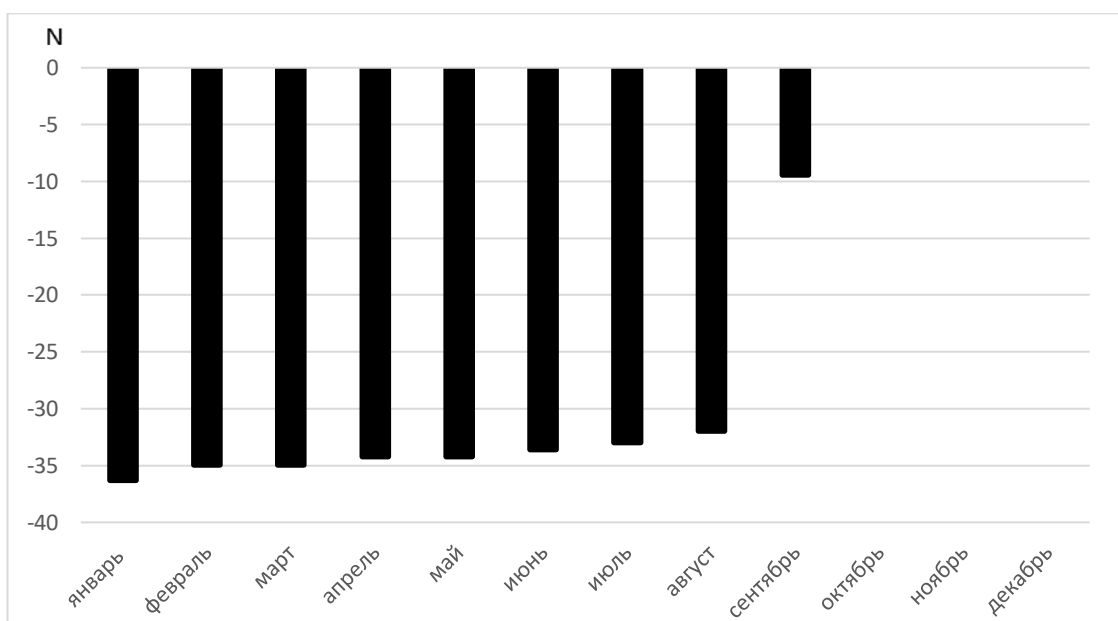


Рисунок 5 Лапласиан приземного давления за период 2024 г. по месяцам для городов Очамчыра и Ткуарчал.

Большее количество случаев без шквалов находится в диапазоне значений лапласиана приземного давления $-6 - -4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, для случаев со шквалами – в диапазоне $0-4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$. Это вполне объяснимо, поскольку при лапласиане $\gg 5 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ чаще всего образуется много слоистой облачности, что приводит к уменьшению максимальной температуры и, как следствие этого, уменьшению энергии неустойчивости и снижению конвективных скоростей. При лапласиане $\ll -10 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$ шквалы не развиваются и с большой вероятностью можно прогнозировать их отсутствие. Этот вывод подтвержден в исследованиях, где лапласиан приземного давления рассчитывался на выборке более 120 тыс. случаев. Причем показано, что диапазон значений

лапласиана приземного давления закономерно сужается по мере усиления шквалов от 15–19 до 20–24 м/с и более 25 м/с.

Заметная роль в возникновении сильных шквалов принадлежит скорости горизонтального переноса в средней тропосфере. Она влияет на увеличение (примерно на 4–4,5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале. Самым информативным предиктором среди характеристик ветра для прогноза шквалов является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа. Учёт этого параметра позволяет оценить степень перемешивания воздуха в облаке. При увеличении температуры и влажности воздуха повторяемость шквалов растёт лишь до определённых значений, при дальнейшем повышении температуры и увеличении влажности воздуха наблюдается уменьшение вероятности возникновения шквалов.

В третьей главе проводится разбор метода прогноза шквалов с термодинамическими параметрами, а также эффективность использования предикторов и его применение на практике.

Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы основан на определении зон активной конвекции и расчёте в этих зонах по скорости ветра в тропосфере максимальных порывов ветра у земли. Так для статистической обработки отбираются термодинамические параметры атмосферы и радиолокационные характеристики конвективной облачности, имеющие наилучшую связь со скоростью ветра при шквале. Например, максимальная температура воздуха в день со шквалом, максимальная температура точки росы в утренний срок, атмосферное давление у поверхности земли и другие. Прогноз шквалов разрушительной силы может быть дан лишь весьма предположительно, если в данном районе ожидаются синоптические условия, благоприятные для их развития. К таким условиям относятся:

- большая удельная влажность внутри воздушной массы;
- неустойчивость воздушной массы;
- высокая температура перед холодным фронтом при большом контрасте температур;
- перемещение холодного фронта со скоростью 30–40 км/ч и более и наличие на фронте волновых возмущений; $W = 10 D \cdot \Delta T$ 38
- расходимость относительно слабых южных или юго-западных потоков в передней части высотной барической ложбины или в тыловой части высотного гребня;
- расходимость изогипс и значительное ослабление ветра в зоне струйного течения (для фронтальных шквалов);
- значительная конвергенция ветра у поверхности земли.

При последних трех условиях обычно вертикальная составляющая скорости $w > 0$, что благоприятствует понижению температуры на высотах и сохранению относительной неустойчивости воздушной массы до больших высот. В результате интенсивные конвективные движения, благоприятные для гроз и шквалов, могут достигать тропопаузы и нижней стратосферы.

В частности, для вычисления V_{\max} (м/с) может быть применена формула (1):

$$V_{\max} = 5 + 2,5\Delta T \quad (1)$$

где $\Delta T = T_0 - Q_{0w}$; T_0 – ожидаемая температура воздуха в приземном слое перед дождем; Q_{0w} – потенциальная температура смоченного термометра, полученная путем перемещения вдоль влажной адиабаты с уровня, на котором температура смоченного термометра равна 0°C , до поверхности земли.

Так зная мощность приближающегося облака или облаков фронтальной системы (например, по радиолокационным данным) и сумму скоростей ветра в слое земля – поверхность 500 гПа (по данным последнего зондирования), можно предсказать факт появления шквала. Заметно, что чем больше мощность облака, тем меньше может быть сумма скоростей ветра в слое земля – поверхность 500 гПа. При уменьшении же мощности облака для возникновения шквала суммарное значение скоростей ветра в рассматриваемом слое должно возрастать. На границе проведена демаркационная линия, отделяющая область шквалов от области отсутствия шквалов. Например, точка, соответствующая сумме скоростей 50 м/с и мощности облака $\Delta H = 600$ гПа, попадает в область шквалов; при той же сумме скоростей, но при мощности облака 450 гПа точка ляжет вне области шквалов – шквала не будет.

Чтобы определить конвективность используются индексы неустойчивости.

Индекс Вайтинга:

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - D_{700}, \quad (2)$$

где T_{850} , T_{500} – температура воздуха на уровнях 850 и 500 гПа, T_{d850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, D_{700} – дефицит точки росы на 40 уровне 700 гПа. При значении индекса более 20 есть вероятность развития конвективных явлений.

Индекс **Total Totals**: используется для прогноза развития конвекции.

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2T_{500}, \quad (3)$$

При значении $TT > 49$ следует прогнозировать развитие конвекции.

Индекс Шоултера:

$$SI = T_{500} - T_{pm500}, \quad (4)$$

где T_{pm500} – температура кривой состояния частицы, поднятой с уровня 850 гПа до уровня конденсации по сухой адиабате, затем до уровня 500 – по влажной адиабате. При

этом, температура точки росы частицы принимается средней в слое 850 – 500 гПа. При $SI < -3$ следует ожидать развития конвекции.

Индекс потенциальной неустойчивости (EPI):

$$EPI = \theta_{e,500} - \theta_{e,850}, \quad (5)$$

где θ_e – эквивалентно-потенциальная температура на соответствующем уровне (850 или 500 гПа). Отрицательные значения EPI указывают на неустойчивость в атмосфере и, следовательно, благоприятные условия для развития глубокой конвекции.

В качестве основного метода реализуется физико-статистический подход к прогнозу сильных шквалов на основе выходных данных региональной гидродинамической модели. В качестве предикторов используются фактические и прогностические поля приземного давления и геопотенциала основных изобарических поверхностей, значения температуры воздуха и влажности (точки росы) у поверхности Земли и на высотах изобарических поверхностей, а также диагностические данные упорядоченных вертикальных движений на поверхности 850 гПа.

В четвертой главе содержится практическая работа, где рассматривается физико-статистические модели климатических изменений. В этой главе подробно расписана математическая модель Фурье для долгосрочного прогноза, выведена формула, по которой построены графики зависимости основных климатических параметров для возникновения шквалов. В этой главе рассмотрены основные принципы и методы анализа термодинамических параметров, их влияния на формирование шквалов, а также разработана математическая модель прогноза с использованием этих данных. Результаты данного исследования могут иметь важное практическое применение в сферах, зависящих от точности прогнозирования метеорологических явлений.

Ниже приведены основные аспекты, которые подчеркивают актуальность этого подхода:

- **улучшение точности прогнозов:** применение математических моделей позволяет учитывать множество параметров атмосферы, что значительно повышает точность прогнозов шквалов. Анализ термодинамических параметров (таких как температура, влажность, давление) предоставляет более полное представление о состоянии атмосферы и ее способности к генерации сильных ветровых явлений.
- **адаптация к изменяющимся климатическим условиям:** в условиях изменяющегося климата, где резкое ухудшение погодных условий становится все более вероятным событием, прогнозирование шквалов становится критически важным. Использование математических моделей позволяет учесть эти изменения и адаптировать прогнозы к новым климатическим реалиям.

- **безопасность транспорта и строительства:** сильные ветровые явления, такие как шквалы, могут представлять серьезную угрозу для безопасности транспорта, а также для зданий и инфраструктуры. Предварительное оповещение о возможности шквала позволяет принимать меры предосторожности, минимизируя риски для людей и имущества.
- **экономическая значимость:** прогнозирование шквалов с высокой точностью имеет непосредственное экономическое значение. Это позволяет компаниям и организациям принимать своевременные решения относительно транспортных маршрутов, сельскохозяйственных операций, а также планирования строительства и ремонта.
- **эффективность энергетических решений:** энергетические предприятия, особенно те, которые работают на альтернативных источниках энергии, могут значительно выиграть от точных прогнозов. Это позволяет эффективно управлять работой ветрогенераторов и других возобновляемых источников энергии, предотвращая повреждение оборудования при сильных ветрах.

Реализация метода прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы включает несколько ключевых этапов, это: **сбор и анализ метеорологических данных.**

В наше время, когда изменения климата и экстремальные погодные явления становятся все более частыми и непредсказуемыми, разработка эффективных методов прогнозирования шквалов приобретает критическое значение. Начиная с теоретического обзора основных принципов, касающихся воздушных масс, их движения и влияния термодинамических параметров на формирование шквалов, мы перейдем к реальной практике, где разберемся с методами сбора и анализа метеорологических данных, а также рассмотрим применение современных математических моделей для создания прогностических сценариев. Кроме того, будут представлены примеры успешного применения этих прогнозов в реальных ситуациях, от авиации до сельского хозяйства и строительства.

Существуют 2 величины x , y которые характеризуют состояние атмосферы.

Для дальнейшей работы ведем обозначения:

P – давление, T – температура, f – влажность, v – w – скорость ветра.

Запишем модель состояния атмосферы по x , y .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = k_1 y, \\ \frac{dy}{dt} = -k_2 x \end{array} \right\}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = k_1 \frac{dy}{dt} = -k_1 k_2 x \quad (6) - \text{уравнение гармонических колебаний.}$$

так как $-k_1 k_2 = \omega_0^2$, то уравнение (6) запишется в следующем виде:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x \text{ уравнение гармонических колебаний.}$$

Проверим данное уравнение:

$$x = a \cos \omega_0 t + b \sin \omega_0 t,$$

$$x' = -\omega_0 a \sin \omega_0 t,$$

$$x'' = -\omega_0^2 a \cos \omega_0 t = -\omega_0^2 x.$$

Далее запишем уравнение вертикального потока, или уравнение движения.

$$\frac{dw}{dt} = g \frac{\Delta T}{T} = \frac{g}{T} (T - \bar{T})$$

T - температура, \bar{T} - средняя температура.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dT}{dz} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{dT}{dz} \cdot w = -\gamma w.$$

dz - высота вертикали, $\frac{dz}{dt}$ - скорость.

T	T_1	T_2	T_3	...	T_n
t	1	2	3	...	n

где t - года.

$$\Delta T = T - \bar{T}.$$

ΔT	ΔT_1	ΔT_2	...	ΔT_n
t	1	2	...	n

w	w_1	w_2	...	w_n
t	1	2	...	n

$\frac{d\Delta T}{dt}$	$\Delta T_2 - \Delta T_1$	$\Delta T_3 - \Delta T_2$...	$\Delta T_n - \Delta T_{n-1}$
t	1	2	...	n

Из статистики мы получаем модель для построения графика по ветру.

$$\begin{cases} y = a_0 + k_1 w \\ x = b_0 + k_2 \Delta T \end{cases}$$

будем считать, что $a_0 = 0, b_0 = 0$.

$$\begin{aligned} y &= k_1 w \\ x &= k_2 \Delta T \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \frac{dw}{dt} = k_2 \Delta T \\ \frac{d\Delta T}{dt} = -k_1 w \end{cases}$$

где k_2 – полученный коэффициент корреляции.

$$\frac{d^2 w}{dt^2} = k_2 \frac{d\Delta T}{dt} = -k_1 k_2 w = -\omega_0 w$$

$$\frac{d^2 w}{dt^2} = -\omega_0^2 w$$

$$\omega_0 = \sqrt{k_1 k_2}$$

$$w = a \cos \omega_0 t + b \sin \omega_0 t$$

$$t = 0, \quad w(0) = a.$$

где a - скорость в первый год (1999 г).

$$\frac{dw}{dt} = -a\omega_0 \sin \omega_0 t + b\omega_0 \cos \omega_0 t$$

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_{t=0} = b\omega_0$$

$$\left(\frac{dw}{dt}\right)_0 = (k_2 \Delta T)_0 = b\omega_0$$

(0 – это первый год, 1999 г).

$$b = \frac{(k_2 \Delta T)_0}{\omega_0} = \frac{k_2}{\sqrt{k_1 k_2}} \cdot (\Delta T)_0 = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} (\Delta T)_0$$

$$w = w(0) \cdot \cos \omega_0 t + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \cdot (\Delta T)_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (7)$$

Далее построим для ветра график по формуле (7).

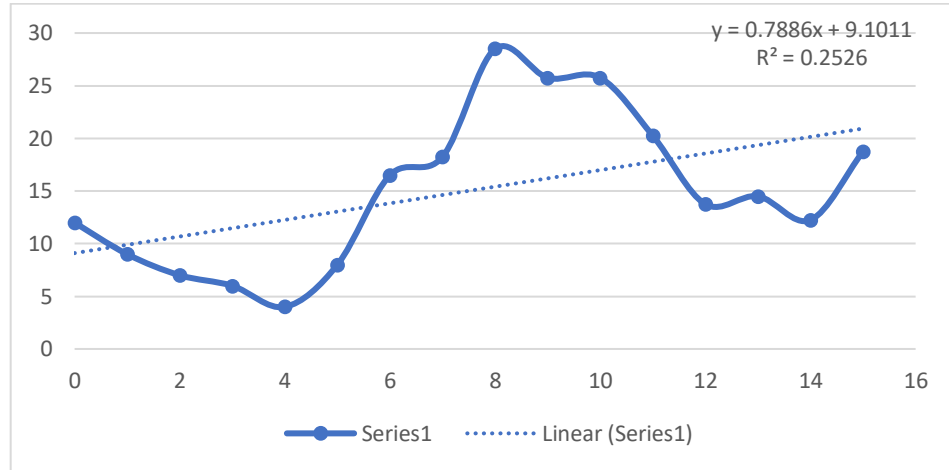


Рисунок 6. Распределение скорости ветра более 8 м/с, на основе данных метеорологической станции «Сухумский Маяк».

Проделаем данную работу также для постарения модели для температуры.

$$\frac{d^2 \Delta T}{dt^2} = -k_1 \frac{dw}{dt} = -k_1 k_2 \Delta T = -\omega_0^2 \Delta T$$

$$\frac{d^2 \Delta T}{dt^2} = -\omega_0^2 \Delta T$$

$$\Delta T = c \cos \omega_0 t + d \sin \omega_0 t$$

$$t = 0, \quad (\Delta T)_0 = c$$

$$\frac{d \Delta T}{dt} = -c \omega_0 \sin \omega_0 t + d \omega_0 \cos \omega_0 t$$

$$\left(\frac{d \Delta T}{dt} \right)_0 = \omega_0 d = -k_1 (w)_0$$

$$d = -\frac{k_1}{\omega_0} (w)_0 = \frac{k_1}{\sqrt{k_1 k_2}} \cdot w_0 = -\sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \cdot w_0$$

$$\Delta T = (\Delta T)_0 \cos \omega_0 t - \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \cdot w_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (8)$$

По формуле (8) строим график для температуры.

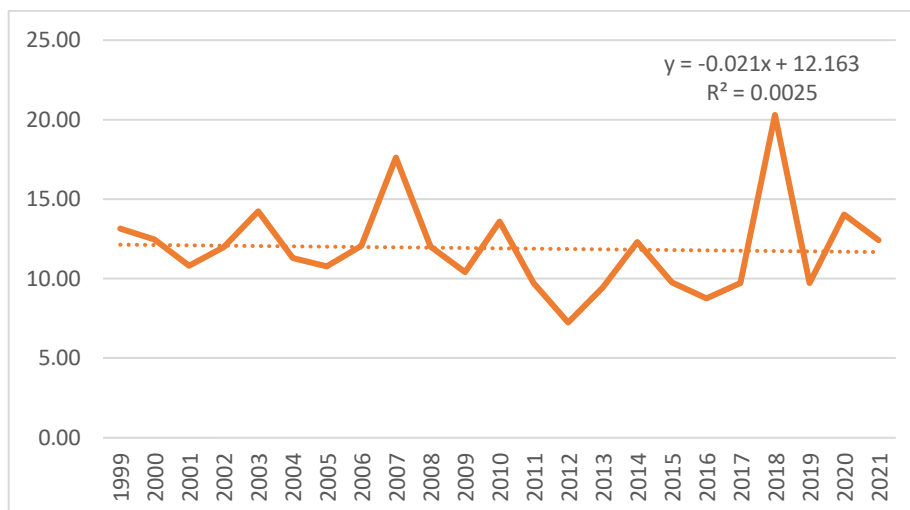


Рисунок 7. Распределение температуры на основе данных метеорологической станции «Сухумский Маяк».

После построения графиков по формулам (7) и (8), данные графики необходимо наложить на один график, и тем самым получить график сравнения.

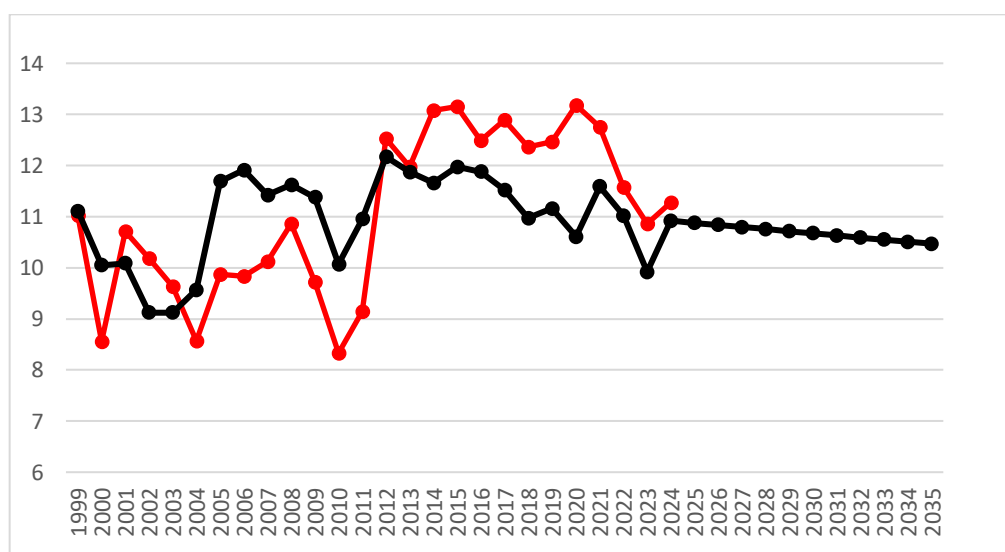


Рисунок 8. График сравнения естественного и модельного хода распределения шквалов.

Проведенный расчет по метеорологическим станциям выбранного региона показал, что для шести станций нестационарная модель параметра локализации экстремума в GEV-модели оказалась значимой даже для короткопериодных метеорологических станций. В зависимости от фазы климатического изменения режима увлажнения в регионе, статистические оценки приобретают разные значения. Согласно рисунку 9 в современный климатический период следует ожидать больших по величине экстремумов, нежели чем в предыдущий период.

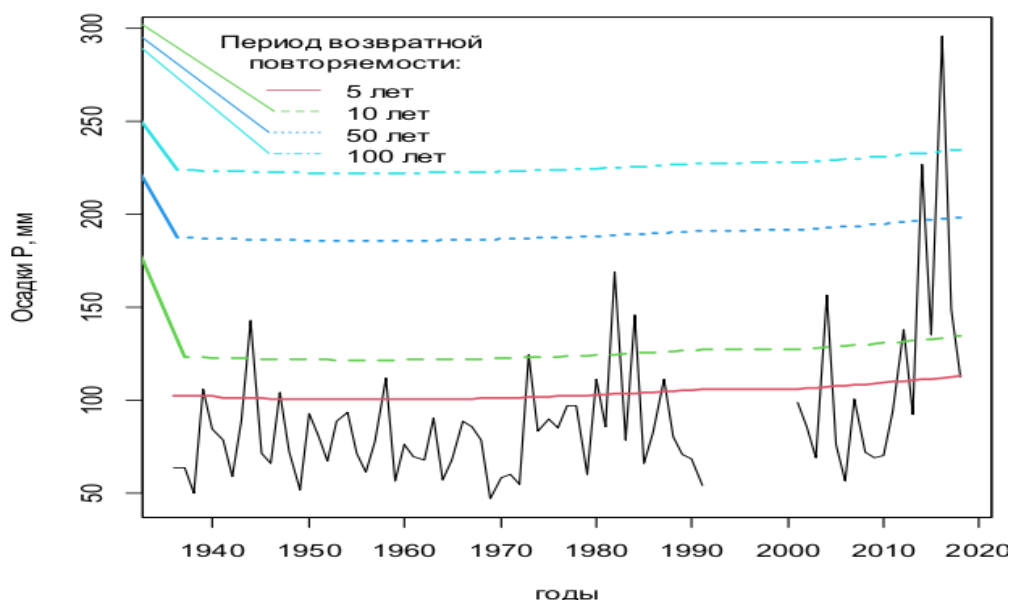


Рисунок 9. Распределение максимального суточного количества осадков редкой повторяемости для станции «Сухумский Маяк».

Обильное выпадение осадков в горах Абхазии формируют оползни, сели, наводнения, паводки на реках. В связи с неравномерностью выпадения атмосферных осадков в теплый период года часто в приморской зоне Абхазии наблюдается засуха.

Отметим, что с изменениями глобальных процессов на территории Абхазии участились шквалистые ветры ураганной силы.

Анализируя данные ОЯП МЧС РА за период 2014-2023 гг. нами выявлено, что доминируют наводнения и ураганы с частотой проявления 160 и 120 – соответственно (рисунок 10).

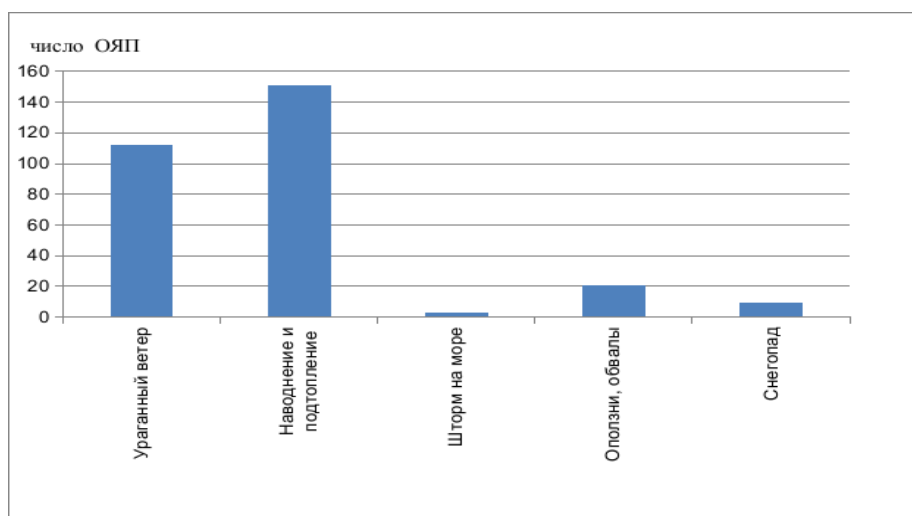


Рисунок 10. ОЯП на территории Абхазии по данным МЧС РА за период 2014-2023гг.

Нами также дана оценка распределения ОЯП по районам Абхазии (рисунок 11).

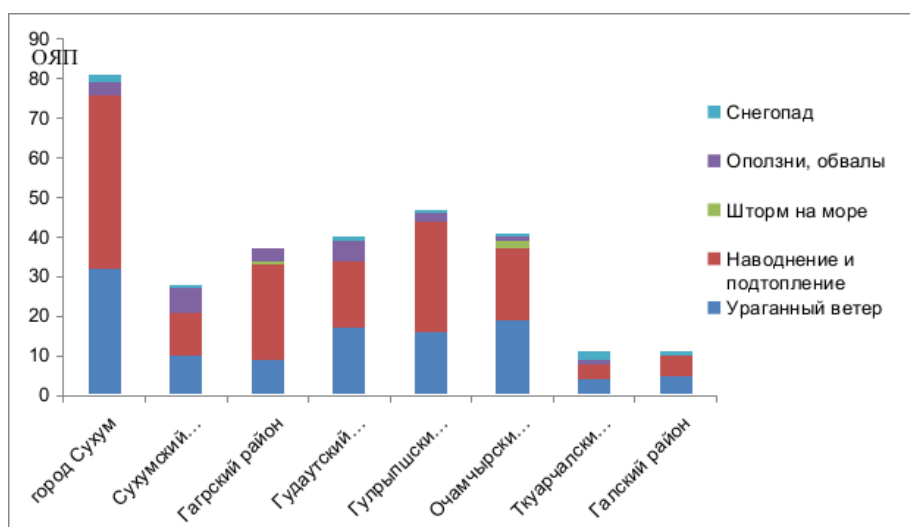


Рисунок 11. Динамика ОЯП по районам Абхазии за период 2014-2023 гг.

Видно, что по проявлению ОЯП за рассматриваемый период доминирует г. Сухум и Гулрыпшский район, однако за последние три года частота их проявления преобладает в Гагрском районе.

Основные результаты и выводы

1. В подавляющем большинстве случаев циклоны и антициклоны возникают в зоне основных атмосферных фронтов. Чаще всего циклоны возникают на малоподвижных фронтах, на холодных замедляющихся фронтах либо у точек окклюзии (точка смыкания холодной и теплой ветвей фронта и окклюзии) в существовавших ранее циклонах. Антициклоны возникают в холодном воздухе недалеко от линии фронта у поверхности земли. Прогноз возникновения новых барических образований является наиболее трудной частью синоптического анализа.

2. Чем контрастнее температуры встречающихся потоков воздуха, тем мощнее будет шквал. Шквалы могут появиться в любой сезон, но чаще всего это происходит в конце весны и летом, когда поверхности воды и земли прогреваются, и у холодных потоков воздуха больше шансов вклиниться в тёплые. Шквалы чаще всего возникают в тёплых районах, а также на больших открытых территориях, где могут встретиться очень контрастные по температуре воздушные массы из разных областей.

3. Заметная роль в возникновении сильных шквалов принадлежит скорости горизонтального переноса в средней тропосфере. Она влияет на увеличение (примерно на 4–4,5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале. Самым информативным

предиктором среди характеристик ветра для прогноза шквалов является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа. Учёт этого параметра позволяет оценить степень перемешивания воздуха в облаке. При увеличении температуры и влажности воздуха повторяемость шквалов растёт лишь до определённых значений, при дальнейшем повышении температуры и увеличении влажности воздуха наблюдается уменьшение вероятности возникновения шквалов.

4. В качестве основного метода реализуется физико-статистический подход к прогнозу сильных шквалов на основе выходных данных региональной гидродинамической модели. В качестве предикторов используются фактические и прогностические поля приземного давления и геопотенциала основных изобарических поверхностей, значения температуры воздуха и влажности (точки росы) у поверхности Земли и на высотах изобарических поверхностей, а также диагностические данные упорядоченных вертикальных движений на поверхности 850 гПа. Однако **точность прогноза шквала остаётся недостаточной** в силу невозможности учёта всего комплекса процессов подсеточного масштаба. Кроме того, в оперативной практике практически отсутствуют методы прогнозирования катастрофических шквалов, скорость ветра при которых превышает 33 м/с.

5. Вывод Фурье позволяет выявить колебательные компоненты сигналов и функций. Например, по величине коэффициентов разложения видно, какие частоты преобладают в данной функции, а колебания каких частот не встречается у этой функции. Из анализа конечного ряда данных путём разложения в ряд Фурье: точное значение получаемой частоты (периода) колебаний определяется только выбором интервала анализируемых данных.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. Условие формирования сильных ветров и шквалов на территории РА. Академия Наук Абхазии, серия «Естественные науки», №12, 2022 г, с. 109-119, Сухум.
2. Эмба Я.А., Пачулия Э.В. «Особенности динамики формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия». ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки», Сухум.
3. Пачулия Э.В., проф. Эмба Я.А. «Условия формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия». ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки» №12. Изд-во «ИП Белкина Е.А.», 2022 г.-С 101

4. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. «Роль давления в формировании сильных и шквальных ветров», ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки» №12. Изд-во «ИП Белкина Е.А.», 2023 г, Сухум.
5. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. «Синоптические и термодинамические условия образования шквалов». Вестник. Академия наук Абхазии. Серия «Естественные науки» №14. 2024г, с 83-89, Сухум.
6. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. «Особенности динамики формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия». Первый Абхазский форум молодых ученых. Материалы научной конференции, посвященной 25-летию Академии наук Абхазии. Сухум, 2024г. С 257-264.
7. Пачулия Э.В., Ахсалба А.К. Характеристика ветрового режима г. Сухум Республики Абхазия. Сборник трудов VIII Всероссийской Черноморской школы-семинара молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников (Геленджик) «Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России». Изд-во ЮФУ, 2017. С. 178-180.
8. Пачулия Э.В., Ахсалба А.К. Особенности формирования шквалов на территории Абхазии. Тезисы докладов (молодежная секция) международной научно-практической конференции «Открытые физические чтения». Изд-во ЛНУ им. В. Даля. Луганск, 2018. С.24.
9. Пачулия Э.В., Ахсалба А.К. Ветровой режим атмосферы на территории Абхазии. Материалы V Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Изд-во «ИП Кучеренко В.О.». Майкоп, 2019. С.95-102.
10. Пачулия Э.В., Ахсалба А.К. Исследование динамики ветрового режима на территории Абхазии. Материалы научно-практической конференции «Системный подход к рациональному природопользованию регионов России». Туапсе, 10-13 декабря, 2019. С. 78-82.
11. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕТРОВОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ АБХАЗИИ АГУ, 2020 г.
12. Эжба Я.А., Пачулия Э.В. «Исследование характеристик метеорологических образований (циклонов и антициклонов) на территории Абхазия». VI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий», Республика Адыгея, г. Майкоп, 17-21 мая 2021 г.» Изд-во: ИП Кучеренко В.О. Часть 2-С.178-187.
13. Эжба Я.А., Пачулия Э.В. «Исследование характеристик и динамики метеорологических образований (циклонов и антициклонов) определяющие климатические условия на территории РА», АГУ.
14. Пачулия Э.В., Эжба Я.А «Механизмы формирование шквалов на территории Абхазии». АГУ – 2022 год.
15. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛЬНЫХ ВЕТРОВ И ШКВАЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ АБХАЗИЯ. Севастополь – 2022 год.
16. Пачулия Э.В., Эжба Я.А Прогнозирование и оценка сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия. АГУ – 2023 год.
17. Пачулия Э.В., Эжба Я.А. «Анализ метеоусловий формирования сильных ветров и шквалов на территории республики Абхазия». Сборник трудов XII Всероссийская

- научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» («ГЕОКАВКАЗ-2022»). Махачкала, 2022, С.666-670.
18. Экба Я.А. проф. ф.м.н., Ахсалба А.К. доц.ф.м.н. Пачулия Э.В., Строчан Т.П., Хинтуба Л.В., Капба И.В. «Мониторинг циркуляционных процессов в атмосфере на территории Абхазии, на основе спутниковых наблюдений».
 19. Пачулия Э.В., Экба Я.А. «Физико-статистические методы оценки вероятности возникновения сильных ветров и шквалов в Абхазии». Материалы VII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп, 15-19 мая 2023г. С 100-110.
 20. Пачулия Э.В., Экба Я.А. «Условие возникновения шквалов на территории Абхазии». Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды». Севастополь 2024г.
 21. Ахсалба А.К., Кишмария Я.Ш., Пачулия Э.В. «Опасные явления погоды и их влияние на социально-экономическое развитие Республики Абхазия». Сборник АГУ – 2024г.
 22. Пачулия Э.В., Экба Я.А. «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗА ШКВАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУРЬЕ АНАЛИЗА.». Материалы VIII международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». Майкоп, 15-19 мая 2025г. С 100-110.