

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Экба Январби Алиевич,
доктор физико-математических наук,
профессор, вице-президент Академии Наук Абхазии

Сухум – 2025

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Характеристика и модели циклонов, антициклонов и ветра	
1.1 Условия возникновения и эволюция внетропических циклонов и антициклонов	12
1.2. Характеристики погоды в циклонах и антициклонах.....	21
1.3. Характеристика ветрового режима на территории Абхазии.....	35
Глава 2. Физические условия образования и прогноз шквалов	
2.1. Физические условия образования шквалов.....	45
2.2. Основные статистические характеристики параметров атмосферы при шквалах.....	55
2.3. Анализ различных сочетаний предикторов для прогноза шквала.....	57
Глава 3. Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы.	
3.1. Разработка метода прогноза шквалов.....	64
3.2. Оценка эффективности использования предикторов и качества прогноза шквалов.....	66
3.3. Реализация метода прогноза шквалов и его применение на практике.....	71
Глава 4. Физико-статистические модели климатических изменений	
4.1. Общая схема моделирования и методы декомпозиции сложного процесса.....	79
4.2 Алгоритм построения общей статистической модели пространственно- временных колебаний	83
4.3 Опасные явления погоды и их влияние на социально-экономическое развитие Республики Абхазии.....	92
Заключение.....	101
Список литературы.....	103
Приложение.....	116

Введение

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 наблюдаемыми за последние десятилетия увеличением опасных погодных явлений исследование, направленное на выявление, их причин и следственных статистических связей является актуальными. 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 неперiodическим 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 (Пачулия, Экба 2020).

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 изучение влияние 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 которого 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 данной кандидатской исследовательской работы подводятся итоги проведённого анализа и выносятся 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.

Апробация работы. По теме диссертации имеется 23 публикаций. Результаты исследования были доложены на: VIII Всероссийской Черноморской школы-семинара 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 профессорского - 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 профессорского - преподавательского состава физико - математического факультета АГУ (Сухум - 2021 г.), XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (Махачкала - 2022 г.), научно - практической конференции профессорского - 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.),

Научный Форум абхазских молодых ученых (Сухум – 2024 г.), научно - практической конференции профессорского - 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 профессорского - преподавательского состава физико - математического факультета АГУ (Сухум - 2025 г.).

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.

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, а также погоды в циклонах и антициклонах.

- **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. Вследствие 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 (Дашко 2005).

Характеристики погоды в циклонах и антициклонах:

- **Циклон** приносит осадки, снижение 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.

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. Так **во второй главе** описываются физические основы образования и прогноз шквалов, условие возникновения, а также рассмотрены некоторые физико - статистические методы прогноза шквалов.

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. Так **в третьей главе идёт** разбор метода прогноза шквалов с термодинамическими параметрами, а также эффективность использования предикторов и его применение на практике.

Исходным материалом для выполнения работы являются многолетние ряды метеорологических характеристик по заданной метеостанции: температура воздуха или суммы осадков, обобщённые за месяц или год. Перед началом третьего этапа статистического исследования необходимо провести арифметический и логический контроль собранных данных с целью устранения ошибок наблюдения. В статистике ошибкой наблюдения называют расхождение между расчётным и действительным значениями исследуемой величины. В зависимости от причин возникновения различают ошибки регистрации и ошибки репрезентативности.

Таким образом **в четвертой главе** содержится практическая работа, где рассматриваются 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.

Сильная ветровая нагрузка со скоростью ветра более 10–11 м/с может наблюдаться в течение 14–16 часов. Атмосферное давление в начале

процесса формирования шквала имеет минимальное значение, а затем непрерывно возрастает до момента реализации максимальных значений скорости ветра. Скорость воздушного потока меняется практически синхронно с атмосферным давлением и в противофазе с температурой окружающего воздуха. **В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Глава 1. Характеристика и модели циклонов и антициклонов

1.1. Условия возникновения и эволюция внетропических циклонов и антициклонов

Для получения объективных современных представлений о климатологии циклонов необходимо исследовать их характеристики за длительный промежуток времени, исчисляемый несколькими десятилетиями. Для этих целей в течение последних 15 лет ведущими оперативными центрами были созданы так называемые ре-анализы, то есть динамически согласованные последовательности анализов состояния атмосферы, выполненные с применением одной и той же конфигурации модели и замороженной схемы усвоения. Именно ре-анализы представляют широкие возможности для получения достоверных оценок циклонической активности и ее изменчивости (Рудева 2008).

Однако, при использовании данных ре-анализов для исследования изменчивости циклонической активности, возникает проблема однородности данных. Наблюдается существенная зависимость трендов основных климатических параметров от количества усваиваемой информации (White 2000), что особенно проявляется в южном полушарии, где количество наблюдений значительно меньше (Hewson 1998, Швень 2006). Данные ре-анализа NCEP/NCAR (Kalnayetal 1996, Kistleretal 2001) используются за период 1948-2004 гг. Этот ре-анализ построен на основе спектральной модели NCEP с разрешением T62, которая является одной из наиболее успешных моделей общей циркуляции атмосферы в примитивных уравнениях с полной параметризацией основных атмосферных процессов.

В 1999-2002 гг. в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды был выполнен проект по созданию долгопериодного и высококачественного ре-анализа второго поколения ERA-40 (Uppalaetal, 2005) ERA-40 является на сегодняшний день одной из лучших моделей ре-анализа и широко используется в исследованиях климатических изменений.

Данные ERA-40 начинаются с сентября 1957 г., когда была существенно улучшена сеть метеорологических наблюдений перед началом Международного геофизического года, и заканчиваются в августе 2002. В отличие от более ранних ре-анализов ERA-40 характеризуется высоким пространственным разрешением (спектральное разрешение модели T159) В модели ERA-40 увеличен объём усваиваемой информации за счет спутниковых данных, а так же анализируется большее количество параметров, таких как содержание озона, характеристики ветровых океанических волн (Данилов, Пилеич 2012).

В связи с глобальными и региональными изменениями климата, в том числе глобальным потеплением и увеличением частоты экстремальных погодных явлений, возрастает потребность в надежной информации об опасных явлениях погоды, в том числе о максимальной скорости ветра.

С другой стороны, для улучшения результатов прогнозирования с помощью численных моделей, в которых используются характеристики приземного ветра, также необходимо иметь репрезентативные, не искаженные данные (Алексеева 2007).

Как известно, циклоны и антициклоны определяют погоду на Земле. Известно, что циклоны связаны с пониженным давлением, а антициклоны обусловлены повышенным давлением в атмосфере. Антициклон — это плоское устойчивое вращение воздуха вокруг центра с повышенным давлением. Однако в антициклонах сила, обусловленная градиентом давления, направлена от центра, а не к центру вращения.

Как известно, циклоны связаны с пониженным давлением, а антициклоны связаны с повышенным давлением в атмосфере, это хорошо видно на синоптических картах погоды.

Прежде чем описывать циклоны и антициклоны, напомним, что они собой представляют. Циклон – **вращающийся**, а антициклон –

вращающийся против в переводе с греческого языка. Циклонами и антициклонами называют **вихревые движения** в атмосфере (Дашко 2020).

В циклонах и антициклонах воздух вращается в приземном слое на высоте 2-16 км. Если не учитывать грозные фронты, то обычно воздух в циклонах и антициклонах вращается на высоте 2-10 км. Поэтому самолеты, которые летают на высоте 10 км, практически не замечают этого вращения. Есть еще одно важное свойство у циклонов и антициклонов, они представляют собой **устойчивые** вихревые вращения в атмосфере. Поэтому они определяют погоду. Нам в прогнозе погоды говорят – пришел циклон, значит, установилась погода с пониженным давлением и осадками. Или говорят, пришел антициклон, значит, в ближайшие дни будет ясная погода и повышенное давление. Поэтому при описании отдельного циклона или антициклона мы можем считать, что изобары давления устойчивые и не меняются со временем (Пачулия, Эжба 2022).

Средний размер циклона порядка тысячи километров в диаметре. Антициклоны обычно имеют средний размер в два - полтора раза больше.

Следовательно, циклоны и антициклоны представляют собой **плоские** вихревые движения в атмосфере, так как их толщина на два порядка меньше диаметра. Циклоны представляют собой огромный воздушный плоский диск с толщиной меньше одного процента от диаметра, вращающийся в горизонтальной плоскости около Земли (рисунок 1.1).

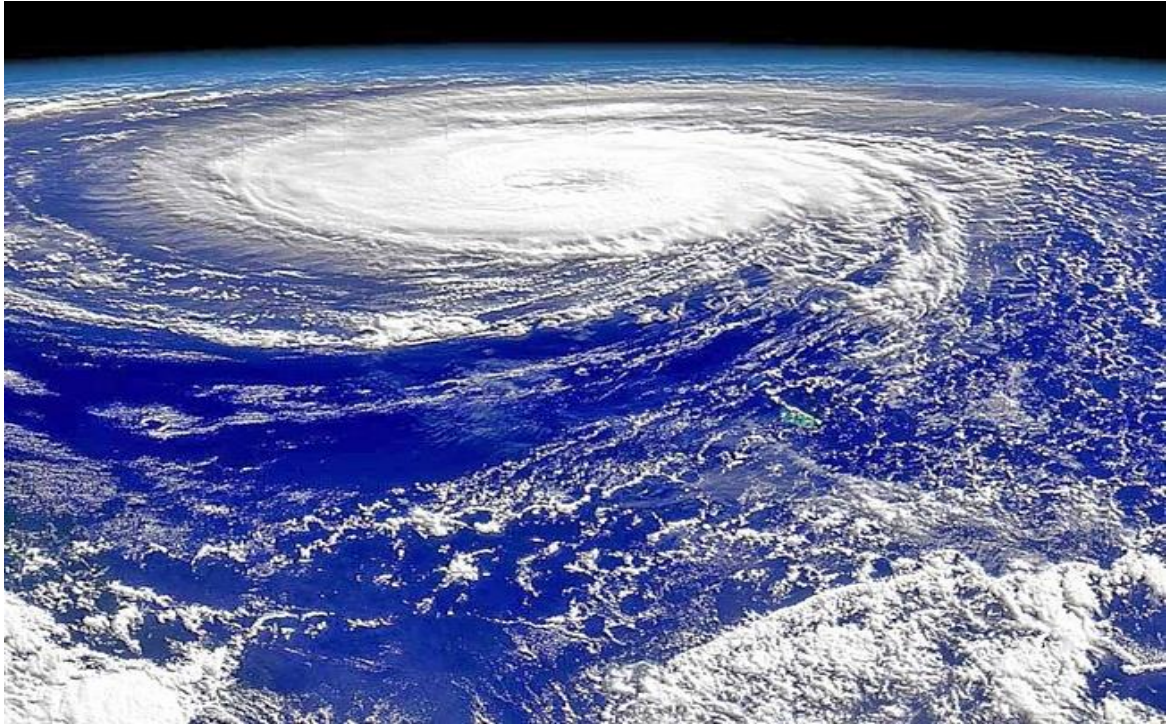


Рисунок 1.1. Фото циклона, сделанное из космоса.

Антициклон, как и циклон, вращается в горизонтальной плоскости вокруг центра с повышенным давлением (рис.1.2).

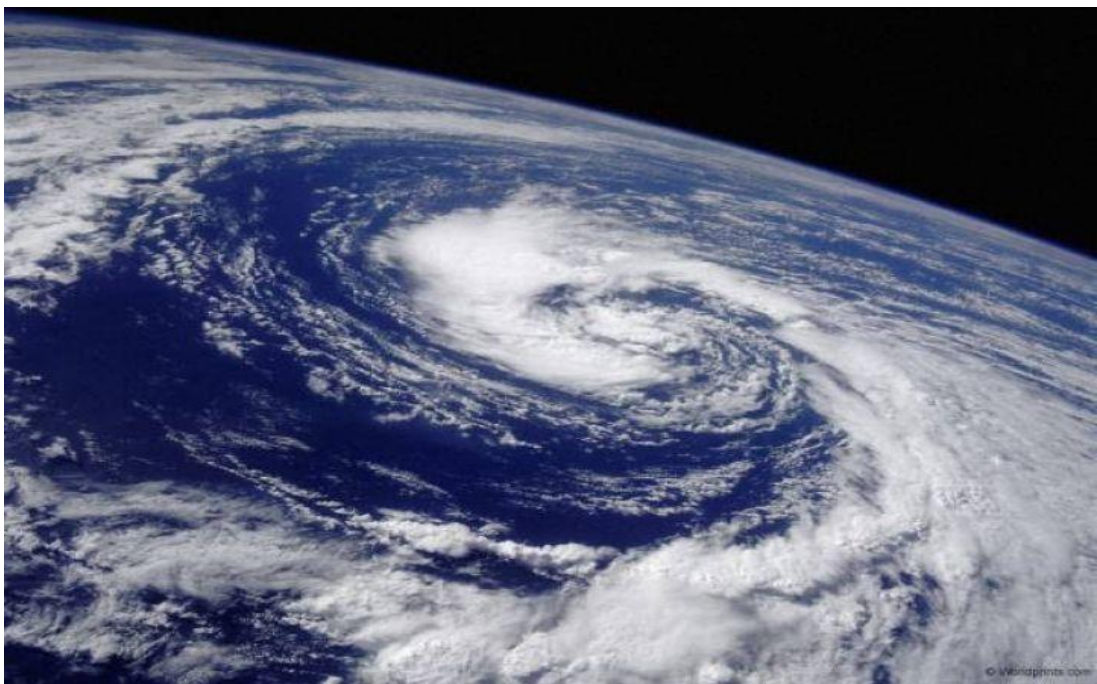


Рисунок 1.2 Фото антициклона, сделанное из космоса.

Таким образом, циклоны и антициклоны представляют собой **устойчивые плоские вращения** воздуха в атмосфере вокруг центра с пониженным и повышенным давлением соответственно.

Это утверждение вызывает большие сомнения. Сила Кориолиса, конечно, есть в атмосфере, она связана с вращением Земли вокруг своей оси. Но сила Кориолиса мала, при этом она не везде действует одинаково и вряд ли приводит к той картине, которую нам показывают в сми в прогнозе погоды (рисунок 1.3).

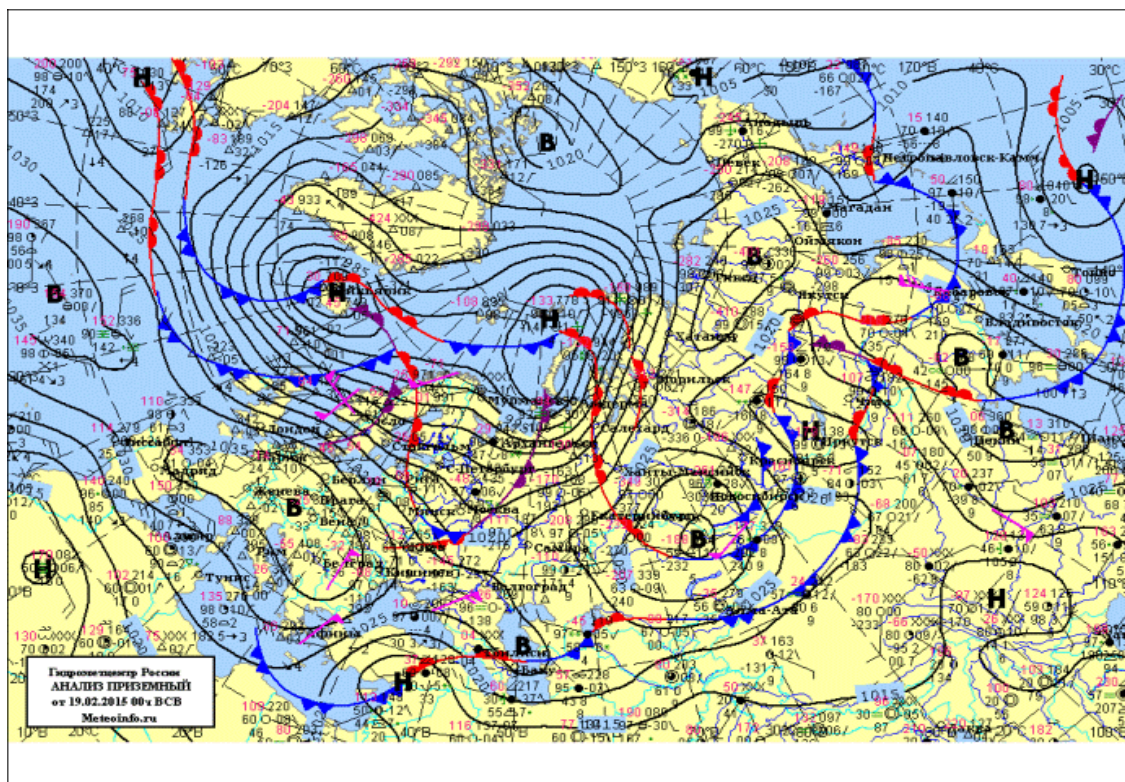


Рисунок 1.3. Синоптическая карта погоды.

Во-первых, на вращение воздуха в циклонах и антициклонах влияние оказывает только горизонтальная проекция силы Кориолиса, которая равна

$$F_{Kz} = -2\rho v \Omega \sin(\varphi),$$

где ρ – плотность воздуха, v – скорость воздуха, Ω – угловая скорость вращения Земли, φ – широта. Сила Кориолиса мала, так как $\Omega = 1/24$ часа. Эта величина имеет значение порядка 10^{-5} Гц.

Во-вторых, на экваторе, где находится нулевая широта, $\sin(0) = 0$, поэтому горизонтальная проекция силы Кориолиса вблизи экватора равна нулю. Если следовать положению, что за циклоны и антициклоны ответственна сила Кориолиса, то вблизи экватора не должно быть циклонов и антициклонов. Это объясняется тем, что на экваторе ветры дуют перпендикулярно изобарам, что предотвращает усиление низкого давления и, как следствие, образование тропических циклонов, следовательно, вблизи экватора, где сила Кориолиса равна нулю, мощные вихри не образуются (Калинин, Ветров 2002).

Представим себе антициклон с радиусом в тысячу километров. Известно, что в центре антициклона обычно стоит ясная погода, и нет ветра, а воздух в основном вращается на периферии антициклона на расстоянии тысячи километров от центра.

Чтобы воздух вращался вокруг центра, на него должна действовать центробежная сила, которая будет задавать центробежное ускорение. Однако в антициклоне повышенное давление в центре, и объемная сила, индуцированная градиентом давления, будет направлена не к центру, а от центра антициклона. Т.е., согласно законам механики, воздух в антициклоне не может вращаться вокруг центра, так как нет силы, которая задавала бы это вращение. Более того, в антициклоне сила, задаваемая градиентом давления, действует в направлении от центра. Исходя из обычных представлений, антициклон не может существовать в принципе и должен «разлететься во все стороны». Однако на записях, сделанных из космоса, видно, что в антициклоне воздух вращается, так же как и в циклоне, вокруг центра на расстоянии тысячи километров (Киктев, Муравьев, Смирнов 2019).

Очевидно, что вращение воздуха в циклонах и антициклонах — плоское, и никакими восходящими и нисходящими потоками воздуха невозможно объяснить ту картину горизонтального вращения, которую

наблюдают из космоса (см. рисунок 1.1 и 1.2). Потому что горизонтальное вращение воздуха задается силами, которые действуют в горизонтальной плоскости, а не в вертикальной. Если неправильно вычислить потоки воздуха, то неправильно будет предсказываться изменение давления на карте погоды (рисунок 1.1), следовательно, неправильный будет и прогноз погоды.

Можно точнее измерить давление с шагом 100 метров, а не 10 километров, можно использовать для решения уравнений более мощные компьютеры и пригласить самых лучших программистов, но если у Вас неправильные формулы стоят в программе, то все равно будет неправильный результат. В настоящей работе ставится и решается задача проведения расчётов скорости изменения основных метеорологических параметров при установлении циклонов и антициклонов, и выявления статистики трендов этих явлений в связи с климатическими изменениями.

Зима. Зимой над Черным морем господствует низкое давление в то время, как к северу и к востоку от него находятся области повышенного давления. Поэтому ветры в это время направлены в сторону Черного моря, т.е. с севера и северо-востока.

На климат Абхазии значительное влияние оказывают воздушные массы, которые формируются в Арктике и восточной Сибири. Зимой со стороны Черного моря часто приходят циклоны. Они приносят обильные осадки и повышение температуры. Во время циклонов погода характеризуется неустойчивостью, частыми дождями в прибрежной зоне и продолжительными снегопадами в высокогорных районах.

Весна. Первый месяц весны, март, характеризуется неустойчивой погодой. В это время еще сохраняются те циркуляционные процессы, которые действовали зимой. Под действием циклонов, идущих со Средиземного моря, происходит повышение температуры воздуха.

Весной усиливается термическая конвекция, но несмотря на это из-за ослабления циклонов количество осадков меньше, чем зимой.

Лето. Под влиянием Азорского субтропического максимума на побережье Абхазии ослабевают фронтальные процессы и, в связи с возрастанием радиационных процессов, устанавливается несколько повышенное давление с длительным господством сухой погоды с преобладанием местного тропического воздуха. В летние месяцы уменьшается влияние сухих и жарких ветров – фёнов.

Осень. Осенью восстанавливаются те циркуляционные процессы, которые приостановились весной. В сентябре число циклонических возмущений, возникающих в Средиземном море, еще очень невелико, в последующие осенние месяцы оно постепенно возрастает и во второй половине ноября приближается к зимним значениям. Прохождение холодных фронтов сопровождается шквалами, грозами и выпадением ливневых осадков (Пачулия, Экба 2023).

По данным Сухумской метеорологической станции в Абхазии господствующими в течение года являются западные и северо-восточные ветры, причем первые дуют в осенние месяцы, а вторые в основном – зимой. Причины такого явления заключаются в усилении осенью циклонической деятельности и прохождением в тыл теплового воздуха холодных масс (рисунок 1.4). Нередки так же юго-западные ветры. Характерно, что на Черноморском побережье Абхазии сила ветров невелика. Несмотря на это, иногда, особенно осенью над побережьем проходят сильные шквалы, вызывая большие разрушения. Причины такого явления заключаются в усилении осенью циклонической деятельности и прохождением в тыл теплового воздуха холодных масс. Самой спокойной в отношении ветров является северная часть побережья в то время, как к югу повторяемость и сила ветров постепенно увеличиваются, что объясняется степенью защищенности этих пунктов горами.

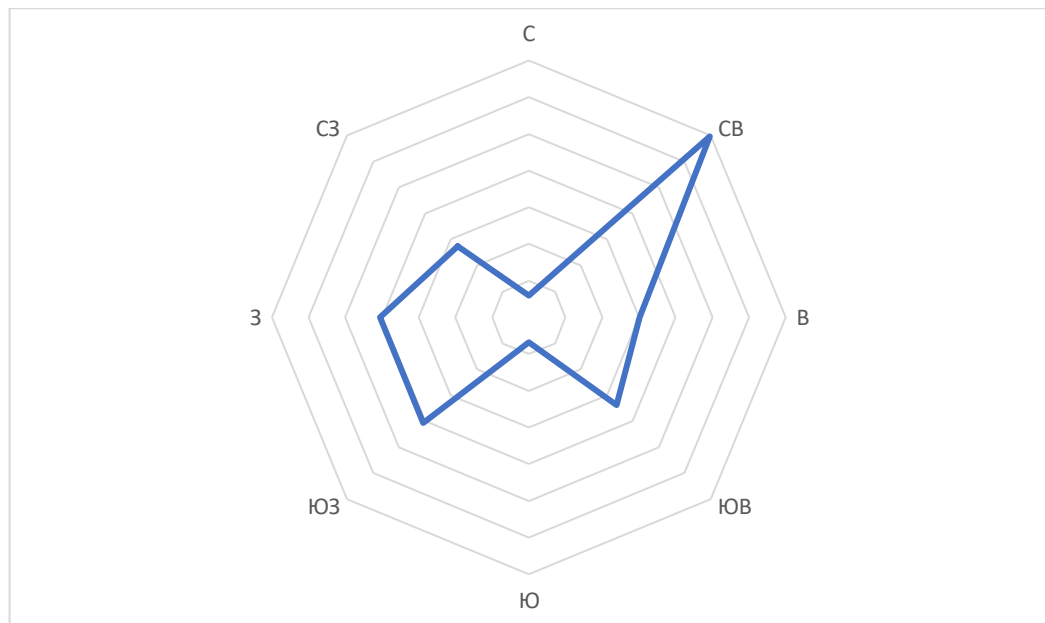


Рисунок 1.4. Роза ветров по данным Сухумской метеорологической станции «Сухумский - Маяк».

Наряду с радиационными и циркуляционными факторами на климат Абхазии огромное влияние оказывает рельеф. Главный Кавказский хребет, направляющийся с северо-запада на юго-восток, является естественным рубежом, который с севера защищает территорию Абхазии от вторжения холодных воздушных масс, а также затрудняет перенос тропических воздушных масс с юга на север, чем способствует повышению температуры воздуха на горных склонах.

Местами южные отроги Главного Кавказского хребта близко подходят к морю и тем самым прикрывают прибрежные курорты от северных и северо-западных холодных ветров. Для иллюстрации этого положения можно назвать курорты Гагра и Новый Афон. В Гагре средняя зимняя температура воздуха (около 7°C) гораздо выше, чем для таких пунктов как Очамчыра или Гал, расположенных несколько южнее, но не защищенных горами. С повышением высоты местности над уровнем Черного моря происходит понижение температуры в среднем на $0,6^{\circ}\text{C}$ на 100 метров, а годовое количество осадков резко увеличивается. Кроме того, система

Кавказских гор обуславливает возникновение барьерных орографических осадков, обостряет фронтальную деятельность в проходящих циклонах и вызывает длительное стационарирование циклонических систем в Закавказье (Ахсалба, Пачулия 2019).

1.2. Характеристики погоды в циклонах и антициклонах

Атмосфера является чрезвычайно подвижной средой, где постоянно формируются и разрушаются вихри различных размеров. Самые мелкие из них со скоростями ветра более 20 м/с – торнадо (в Европе их называют тромбами), обладающие большой разрушительной силой, способные поднимать в воздух автомобили, вырывать из Земли с корнем вековые деревья, стирать с лица Земли поселения, имеют диаметр от 20 м до 1-2 км. Время их существования – от нескольких минут до нескольких часов.

Кроме внетропических циклонов и антициклонов выделяют ещё тропические циклоны, субтропические антициклоны.

Тропические циклоны (рисунок 1.5) зарождаются в штилевой зоне над океанами (преимущественно между широтами 5-20° обоих полушарий).

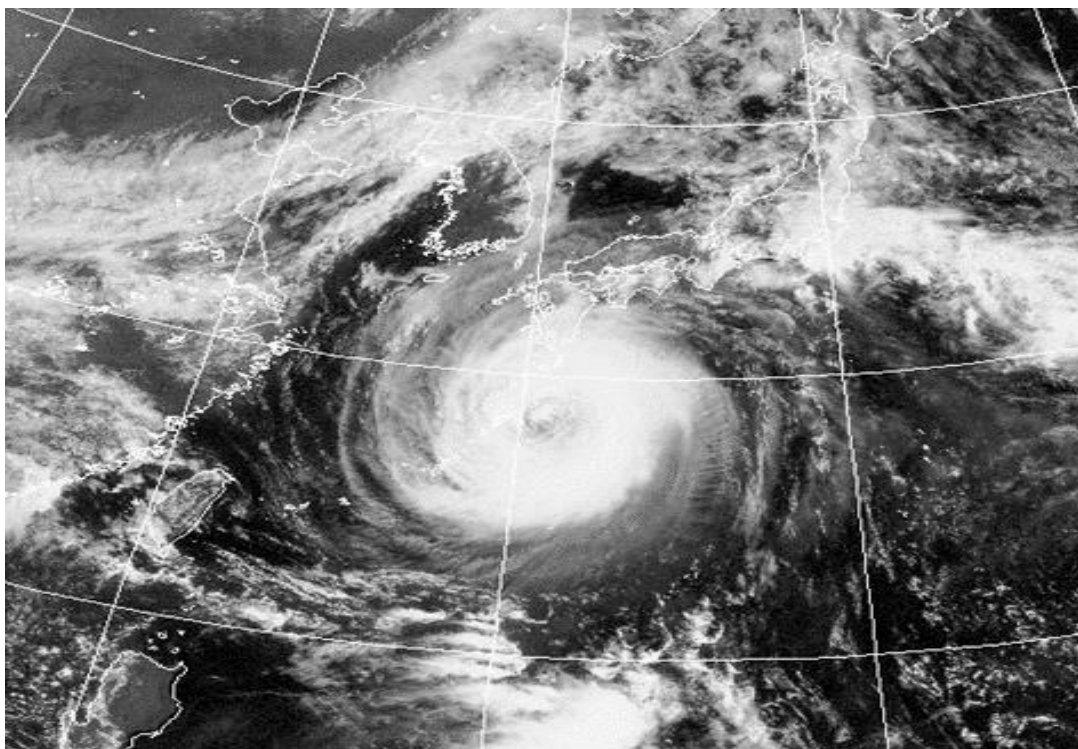


Рисунок 1.5. Тропический циклон у берегов Японии 29 августа 2004 г. (спутниковый снимок облачности).

В зависимости от района образования тропические циклоны носят следующие названия: в тропической зоне Тихого океана – тайфуны, в Атлантике – ураганы, в Австралии – вилли-вилли. По сравнению с внетропическими вихрями, тропические циклоны имеют меньшие размеры (десятки и сотни километров), но обладают значительно большими энергетическими ресурсами. В северном полушарии тропические циклоны образуются преимущественно во- второй половине лета и осенью, в южном полушарии – чаще в декабре-марте. Давление в центре тропического циклона в среднем составляет 960-970 мб, но зафиксированы значения до 900 мб и ниже (Пачулия, Экба 2022).

Интересной особенностью тропических циклонов является глаз бури – зона в центре, имеющая круглую форму, диаметром до нескольких десятков километров (до 60 км).

В этой зоне наблюдаются мощные нисходящие движения воздуха,

значительно повышающие температуру воздуха, отсутствие облачности и осадков, слабые ветры. В межгодовом распределении циклонов в последнее десятилетие отмечается снижение частоты проявления циклонической деятельности, особенно в летнее время, по -видимому, это связано с перестройкой циркуляционных процессов под влиянием глобального потепления (рисунок 1.6).

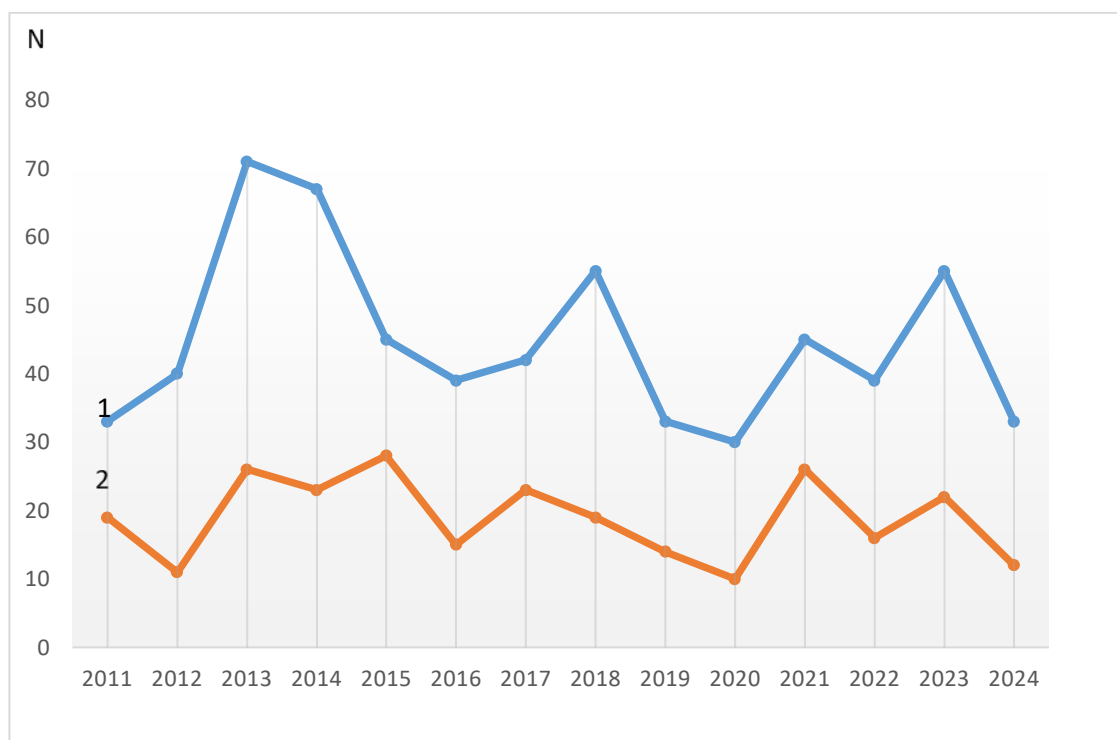


Рисунок 1.6. Распределение циклонов и антициклонов по годам за последние 14 лет (1 – циклон, 2 – антициклон).

Прохождение холодных фронтов сопровождается шквалами, грозами и выпадением ливневых осадков. Значительной шквалистостью обладают фронты, имеющие перед собой тёплый тропический воздух. Градиент давления в тропическом циклоне достигает 20-40 гПа на 100 км, иногда 40-60 гПа на 100 км. Тогда как в самых крупных внетропических циклонах градиенты редко превышают 5-10 гПа на 100 км.

При прохождении тропического циклона возникают скорости ветра, не поддающиеся измерениям. О них судят по разрушениям, остающимся после прохождения тропического циклона. Осадки тропических циклонов можно

сравнить с водопадами, низвергающимися с неба. Тропические циклоны наносят огромный материальный ущерб и уносят немало человеческих жизней.

Субтропические антициклоны возникают над океанами по обе стороны от 30-35 параллели. На климатических картах выделяют перманентные субтропические антициклоны в северном полушарии: северотихоокеанский максимум в Тихом океане, азорский антициклон – в Атлантике, в южном полушарии: южно-атлантический, южно-тихоокеанский.

Первые попытки представления об атмосферных вихрях – циклонах и антициклонах – оформились в середине 19 века, когда было замечено, что внетропические циклоны и антициклоны играют особо важную роль в изменении погоды на больших пространствах (Алексеев 1988).

Обычно с прохождением циклона связывают ненастную погоду с дождями и сильными ветрами. Но циклон состоит из нескольких разнородных воздушных масс, различающихся по характеристикам погоды. В циклоне может быть и ненастная и солнечная погода – в зависимости от свойств воздушных масс в передней и тыловой его частях.

С антициклонами связывают ясную солнечную погоду без осадков со слабыми ветрами. Но встречаются антициклоны и со сплошной облачностью, осадками, свежими ветрами. Зимой антициклоны приносят с севера морозную погоду с хорошей видимостью. Летом в антициклонах развиваются кучевые и кучево-дождевые облака с ливнями и грозами.

Горизонтальная протяженность циклонов и антициклонов значительно превышает протяженность по вертикали, которая в основном ограничена пределами тропосферы (Лапчева 1996). Диаметр циклонического вихря может достигать 2-3 тысяч километров, диаметр антициклона – 3-4 тысяч километров.

- Циклогенез – условия термобарического поля тропосферы,

благоприятные для возникновения и развития циклонов, антициклогенез – условия термобарического поля тропосферы, благоприятные для возникновения и развития антициклонов

- Если два циклона или антициклона имеют примерно одинаковую интенсивность и ~~очень~~ общей замкнутой изобарой, то их называют *сопряженными*.

- Циклон, возникший на периферии уже существующего, более глубокого, называют вторичным *или частным*.

- Антициклон, возникший на периферии уже существующего, более мощного, называют *вторичным или частным*.

- Барические образования смещаются в соответствии с основным переносом воздушных масс с запада на восток. Но при этом их траектории могут иметь свои особенности. В целом у циклонов преобладают траектории, направленные с юго-запада на северо-восток, у антициклонов – с северо-запада на юго-восток (Алексеев 2019).

- В каждой стадии развития циклон имеет своеобразную трехмерную структуру, и каждая стадия отличается особенностями погоды.

- Обычно с прохождением циклона связывают ненастную погоду с дождями и сильными ветрами. Но циклон состоит из нескольких разнородных воздушных масс, различающихся по характеристикам погоды. В циклоне может быть и ненастная и солнечная погода – в зависимости от свойств воздушных масс в передней и тыловой его частях (Семенченко 2002).

- Дожди, связанные с циклоническими системами, в тёплый период орошают Землю, а зимой снежный покров защищает посевы от вымерзания. С другой стороны, циклоны являются причиной возникновения опасных явлений погоды, которые приносят большие бедствия. Например, штормовые волны, возникающие в результате сильных ветров, опасны для морских судов, разрушают портовые сооружения.

- Сильные ветры приводят к потере скорости, ограничению комфортности условий обитания моряков и рыбаков, создают определённую угрозу безопасности судна и затрудняют проведение производственных операций. Специфическую опасность для проведения морских операций представляет обледенение, вероятность и интенсивность которого увеличивают сильные и штормовые ветры, высокие волны.

Обильные осадки, выпадающие в период созревания зерновых или во время уборки урожая, наносят вред сельскому хозяйству, снежные заносы нарушают нормальную работу всех видов транспорта (Черногубова 2015).

В процессе классического развития циклон из низкого асимметричного барического образования обычно превращается в высокий малоподвижный вихрь с квазивертикальной осью. Продолжительность каждой стадии колеблется от нескольких часов до нескольких суток. Наименее продолжительны начальные стадии развития циклона.

Возникновение волны на квазистационарном фронте (либо на фронте, не имеющем строгой стационарности) сопровождается деформацией термобарического поля тропосферы. Тёплый воздух получает тенденцию движения в сторону холодного, давление у вершины волны начинает понижаться, что способствует развитию здесь циклонической циркуляции.

В тылу волны появляется составляющая ветра, направленная от холодного воздуха к тёплому – этот участок волны становится холодным. Впереди волны формируется термический гребень, в тылу – термическая ложбина. У поверхности Земли появляются замкнутые изобары (Юсупов 2013).

Перестройка термобарического поля сопровождается изменением вертикальных составляющих движений воздуха и, соответственно, преобразованием фронтальной облачной волны. Впереди волны в результате восходящего скольжения тёплого воздуха формируются мощные слоистые

облака Ns-As-Cs.

Если первоначально вдоль главного фронта наблюдалась полоса осадков, связанная с конвергенцией трения или с тем, что фронт не имел строгой стационарности, а был, например, холодным на всем протяжении, то при развитии волны облачная полоса становится шире, осадки активизируются, принимая обложной характер. В тылу волны в результате динамической и термической конвекции формируется кучевообразная облачность. По мере развития циклона деформация фронтальной облачной полосы увеличивается и циклон переходит в следующие стадии – молодого циклона и максимального развития.

Процесс окклюдирования приводит к вытеснению тёплого воздуха, сокращению площади тёплого сектора с постепенным его исчезновением. Облачные полосы основных тёплого и холодного фронтов смыкаются с образованием единой облачной спирали фронта окклюзии.

Циклоны и антициклоны по-разному влияют на погоду:

Циклоны — символ перемен: высока вероятность осадков, сильного ветра, появления густых облаков. Летом это проливные дожди, сильный ветер, ураганы и грозы, зимой — снегопады, штормы, вьюги и другие негативные явления.

Антициклоны, напротив, приносят **устойчивую и приятную погоду**: для них характерен слабый ветер, отсутствие облачности, минимальный уровень осадков либо их полное отсутствие. Незначительный ветер делает летний день более жарким, зато зимний — приятным и тёплым (Евсеева, Ромашова 2011)

Рассмотрим каждый из них по отдельности:

Погода в циклонах

На ранних стадиях циклона можно условно выделить три зоны, различающиеся по своим погодным характеристикам.

1. Передняя часть циклона,
2. Тёплый сектор циклона,
3. Тыловая часть циклона.

Погодные характеристики в разных частях циклона на ранних стадиях развития представлены на рисунке 1.7.

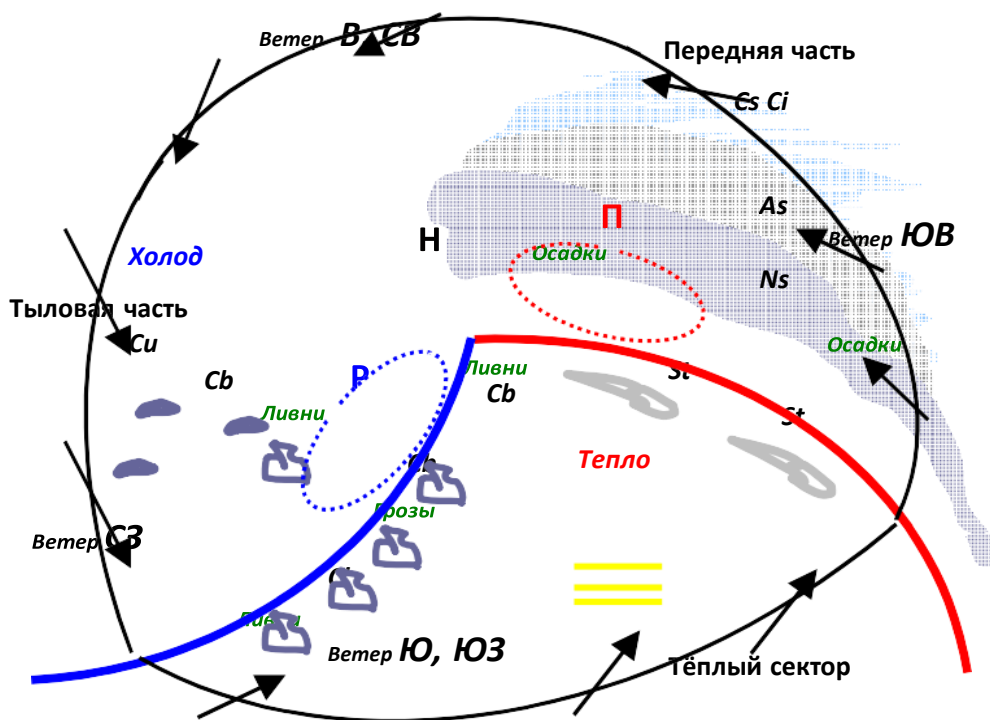


Рисунок 1.7. Погода в различных частях циклона на начальных стадиях развития

Погода в передней части циклона (перед тёплым фронтом) формируется под воздействием тёплого фронта, который является условной тыловой границей данной зоны.

При продвижении типичной облачной системы тёплого фронта (облака восходящего скольжения), которая имеет горизонтальное распространение на тысячи километров, на расстоянии 900-1000 км от линии приземного тёплого фронта наблюдатель фиксирует облачную полосу тонких

прозрачных перистых облаков (*Ci*) вместе с перисто-слоистыми (Заводченков 2020).

Перистые облака характерны для переднего края облачной системы тёплого фронта. Эти облака находятся на высотах 6-8 км. Перистые облака хорошо просвечивают Солнце, Луну, звезды. Имеют вид параллельных нитей, крючкообразно загнутых вверх (*Ci uncinus*). Эти облака состоят из ледяных кристаллов.

Перисто-слоистые облака представляют прозрачную белую однородную пелену, закрывающую все небо, и часто дают явления гало около Солнца или Луны. В передней части циклона отмечается падение давления, все усиливающееся по мере приближения тёплого фронта. Наибольшее падение давления отмечается перед тёплым фронтом. Ветер в передней части циклона, движущегося в целом с запада на восток, имеет преимущественно юго-восточное направление. При скорости тёплого фронта около 30 км/ч продолжительность прохождения системы облаков тёплого фронта через пункт составляет в среднем около суток, в том числе, зоны обложных осадков – около 10 ч. С приближением тёплого фронта на расстоянии около 600 км от него перистые и перисто-слоистые облака сменяются высоко-слоистыми просвечивающими (*As trans.*) и высоко-слоистыми плотными (*As op.*).

Высоко-слоистые просвечивающие облака имеют вид сероватой или синеватой однородной облачной пелены, иногда волокнистого вида, постепенно обволакивающей все небо. Солнце и Луна просвечивают сквозь облачный слой как сквозь матовое стекло. Высоко-слоистые плотные – однородный серый покров, часто неоднородной плотности. Солнце и Луна не просвечивают (Вельтищев, Жупанов, Павлюков 2010).

Эти облака в умеренных широтах наблюдаются на высотах 2-7 км. Их вертикальная мощность достигает нескольких километров. Облачная полоса имеет ширину около 300 км. Состоят из смеси переохлажденных капель и

кристаллов и дают осадки в виде полос падения, которые зимой могут достигать земной поверхности. Летом осадки из *As* не достигают поверхности Земли, испаряясь при движении через тёплые слои воздуха под облаками (псевдоморозящие осадки). Зимой осадки из высоко-слоистых облаков могут достигать поверхности Земли.

Под высоко-слоистыми облаками располагаются плотные слоисто-дождевые облака (*Ns*), вплотную прилегающие к тёплому фронту. *Ns* напоминают по внешнему виду *As*, но более темного цвета. Вблизи центра циклона, где наблюдается наибольшая толщина облаков, система облаков *As-Ns* имеет ширину около 500-600 км (Вильфанд, Ривин, Розинкина 2010).

Обычно слоисто-дождевые облака закрывают все небо без просветов. Зона слоисто-дождевых облаков распространяется в ширину на 300 км. Из них выпадают обложные осадки. Основная часть слоисто-дождевых облаков в умеренных широтах лежит между 2 и 7 км, однако, основание их часто находится ниже 2 км, а верхняя граница может достигать 8 км. Одни слоисто-дождевые облака наблюдаются редко – обычно под ними образуются разорванные дождевые облака (*Fr nb.* – термин *Fr nb.* относится к разорванно-кучевым или разорванно-слоистым облакам, если они наблюдаются под слоем слоисто-дождевых облаков, из которых выпадают осадки).

Если в пограничном слое профиль тёплого фронта пологий, то основная система облаков и зона обложных осадков может быть смещена вперед от линии фронта.

Летом в дневные часы восходящие движения вблизи линии тёплого фронта иногда приобретают характер конвективных и в предфронтальной облачности могут наблюдаться конвективные облака, осадки переходят в ливневые, нередко сопровождающиеся грозами.

При прохождении шквала наблюдается изменение параметров в момент сильного порыва ветра в передней части шквала при общем

понижении давления происходит его резкое повышение (так называемый «шкваловый нос») за несколько минут, а затем идёт опять понижение давления. Из наблюдаемого явления, можно сделать вывод, что после шквала температура заметно понижается (рисунок 1.8).

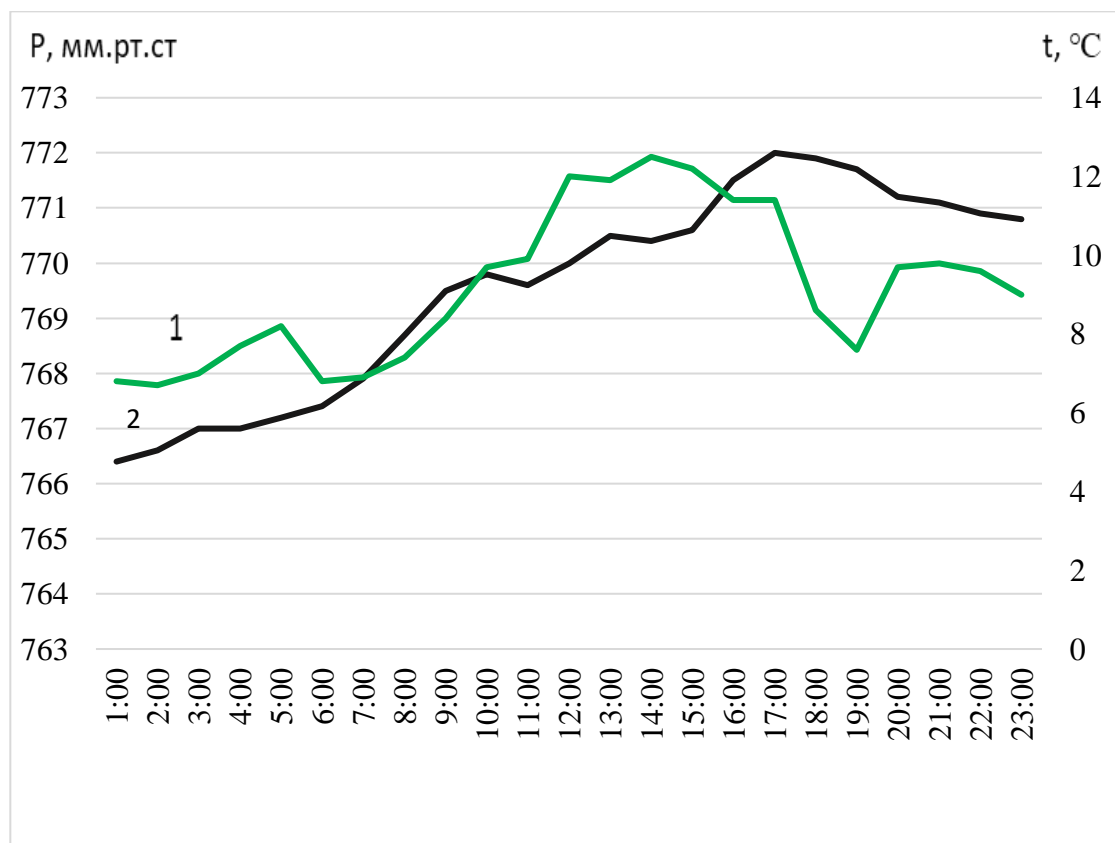


Рисунок 1.8. Распределение температуры и давления в циклонах (1 – температура, 2 – давление).

Погода в антициклонах

Антициклоны могут занимать огромные площади, сравнимые с размерами материков и океанов или их значительных частей. Зимние циркуляционные и термические условия благоприятствуют развитию антициклонов над материками, летние – над обширными океаническими поверхностями.

Обычно с антициклонами связывают спокойную ясную или малооблачную погоду но это очень общее представление, поскольку условия

погоды в антициклоне различаются в зависимости от происхождения и свойств воздушных масс собственно антициклона и соседних с ним, влагосодержания и температуры воздушных масс, особенностей подстилающей поверхности, рельефа местности, а также от стадии развития антициклонического возмущения, интенсивности нисходящих движений в его центральной части, времени года. Например, антициклоны в арктическом воздухе характеризуются преимущественно с ясной погодой, антициклоны с морским полярным воздухом нередко имеют пасмурную погоду с морозящими осадками и адвективными туманами (Юсупов 2013).

Ясная и солнечная погода без осадков со слабыми ветрами в антициклоне летом благоприятствует быстрому созреванию сельскохозяйственных культур, а осенью – сбору урожая. Однако продолжительное стационарирование антициклонов весной и летом в одном районе сопровождается засухой: гибнут посевы, горят леса. Весной на периферии антициклона нередко возникают губительные для посевов суховейные ветры. Зимой в районах антициклонов при низких температурах воздуха и отсутствии снежного покрова вымерзают озимые. Встречаются антициклоны и со сплошной облачностью, туманами, осадками, свежими ветрами (рисунок 1.9). Температура тропосферы растет с возрастом антициклона, особенно при его стабилизации, что объясняется развитием нисходящих движений в антициклоне и динамическим нагреванием воздуха (Пачулия, Экба 2024).

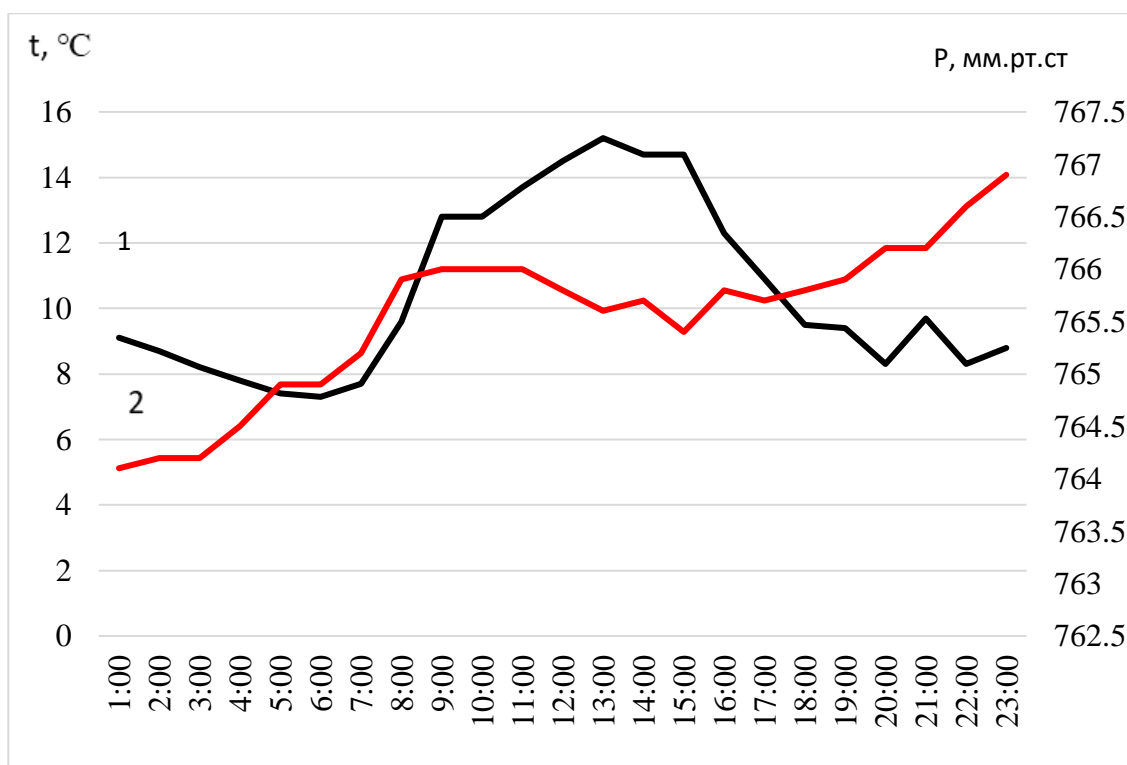


Рисунок 1.9. Распределение температуры и атмосферного давления при антициклонах (1 – температура, 2 – давление).

Вместе с ростом температуры тропосферы, при развитии внетропического антициклона происходит увеличение высоты тропопаузы (до 10-11 км) и понижение температуры стратосферы. В среднем температура воздуха в тропосфере в области антициклона выше, чем в области циклона, в стратосфере, наоборот, ниже. При этом тропопауза над антициклоном лежит выше, чем над циклоном (отметим, что в циклоне тропопауза лежит на высотах 8-9 км).

В субтропических антициклонах температура воздуха на всех высотах в тропосфере выше, чем в антициклонах умеренных широт. Это определяется, во-первых, тем, что воздух в субтропическом антициклоне является тропическим, хотя в нижней тропосфере периодически пополняется вторжениями быстро трансформирующегося полярного воздуха, во-вторых, при стабилизации антициклона воздух оседает и динамически прогревается. Тёплая тропосфера в антициклоне

компенсируется холодной стратосферой, причём, тропопауза лежит на высотах 12-13 км.

Барические градиенты в центральных частях антициклонов небольшие, следовательно, ветры там слабые, но на периферии антициклона, особенно в передних частях, примыкающих к тыловым окраинам циклонов, могут наблюдаться сильные ветры. Ветер в приземном слое в антициклоне, как и в циклоне, направлен под углом к изобарам в сторону низкого давления.

Следовательно, в антициклоне ветер направлен от центральной части к периферии. Расходимость воздушных потоков в слое трения обуславливает конвергенцию ветра в более высоких слоях и развитие нисходящих движений. Нисходящие движения в антициклоне удаляют воздух от состояния насыщения и обуславливают в антициклонических областях общее преобладание ясной погоды. Конденсация в антициклоне может быть вызвана преимущественно охлаждением воздуха от подстилающей поверхности или путем излучения, а также вследствие волновых процессов в атмосфере, поэтому она происходит в виде туманов, слоистых облаков и волнистых облаков под поверхностями инверсий. Летом, при отсутствии инверсий, в антициклонах могут наблюдаться конвективные облака.

Перемещение молодых антициклонов, как и циклонов, на ранних стадиях совпадает по направлению с основным (ведущим) потоком на высотах 3-5 км. Скорость перемещения пропорциональна ведущему потоку и уменьшается по мере развития антициклона. С переходом его в стадию разрушения антициклон становится высоким симметричным барическим образованием, длительно стационарирующем в каком-либо районе (Abdouliev, Lenskaia, Marques 2001).

1.3. Характеристика ветрового режима на территории Абхазии

Главные факторы, определяющие климат на территории Абхазии, - близость Черного моря и защищенность высокой стеной Главного Кавказского хребта от сухих и холодных прикаспийских ветров. При этом со стороны Черного моря на сушу постоянно приносится влага. Горные хребты и речные долины существенно воздействуют на характер и направление ветров (Ахсалба, Пачулия 2019).

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 по скорости ветра значителен в 2020 г. и 2021 г. (15,6 м/с и 14,8 м/с соответственно) (рисунок 1.10)

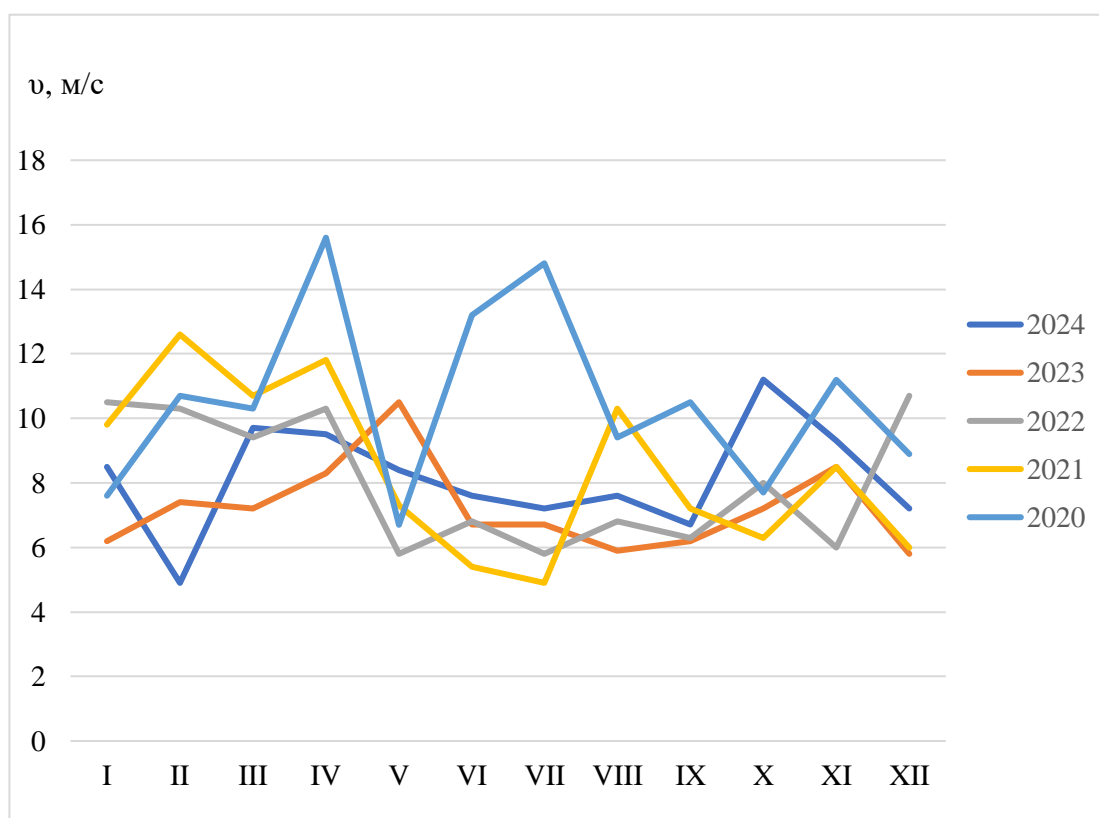


Рисунок 1.10. Среднемесячное распределение приземного ветра в г. Сухум по данным гидрометеостанции «Сухумский Маяк» за последние пять лет

Рассмотрен годовой ход приземного ветра на основе данных метеостанции Сухумский маяк за последние пять лет (рисунок 1.11).

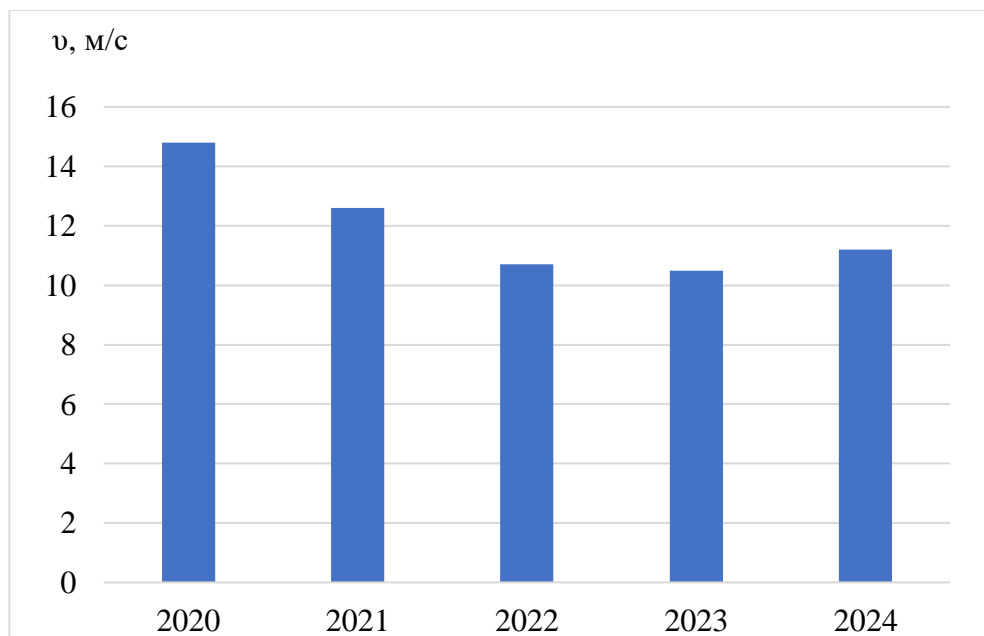


Рисунок 1.11. Годовой ход абсолютных максимальных значений скорости приземного ветра атмосферы в г. Сухум по данным гидрометеостанции «Сухумский Маяк» за последние пять лет.

Наибольшее количество абсолютных максимальных значений ветра наблюдались в 2020, 2021 и 2024 гг. Направление морского бриза - западное и юго-западное, средняя скорость 3- 5 м/с. В холодную половину года, вследствие учащающегося стационарирования антициклонов и хорошей выраженностью Черноморской депрессии, увеличивается повторяемость восточных и юго-восточных ветров. В ноябре-марте повторяемость восточных и юго-восточных ветров составляет 42-49 % от общего числа случаев с ветрами различного направления (Ахсалба, Пачулия 2019).

Наибольшие значения средних месячных скоростей ветра наблюдаются зимой с декабря по март (3,7-3,8 м/с), наименьшие значения приходятся на период с мая по октябрь (2,9-3,1 м/с). В течение всего года

наиболее часто повторяются скорости ветра 1-3 м/с, которые составляют более половины общего числа случаев за год. Сильные ветры (более 12 м/с) отмечаются, главным образом, в холодную часть года (декабрь-апрель) и преимущественно имеют юго-восточное и северо-западное направление.

Для характеристики ветрового режима прибрежной зоны г. Сухума проведена статистическая обработка данных по гидрометеорологической станции «Сухумский маяк» за период с 1999 по 2015 гг. (таблица 1.1).

Таблица 1.1.

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%), 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%).

Наибольшая сезонная повторяемость ветров западного направления наблюдается летом, и составляют 28,6%, наибольшая сезонная повторяемость ветров восточного направления наблюдается зимой (25,4%).

Наибольшими среднегодовыми значениями скоростей характеризуются ветры юго-восточного (3,1 м/с) и западного (2,5 м/с) румбов, а наименьшие значения скорости ветра характерны для ветров северного направления (0,9 м/с) (таблица 1.2) (Пачулия, Экба 2023).

Таблица 1.2. – Среднемесячное значение скорости ветра различных направлений с 1999 по 2024 гг. (м/с)

Месяц/румбы	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
I	1,12	1,64	1,7	3,13	1,31	2,38	2,4	1,65
II	0,85	1,52	2,92	1,98	1,82	1,69	2,54	1,17
III	1,31	1,74	4,34	2,2	2,44	2,22	3,05	2,04
IV	0,61	1,69	2,46	5,61	3,06	2,49	2,23	1,59
V	0,41	1,3	2,16	2,31	2,05	2,34	2,19	1,86
VI	0,78	1,19	1,17	2,61	2,5	2,24	2,87	1,26
VII	0,48	1,39	2,22	3,25	2,68	1,99	2,41	2,24
VIII	1,47	1,47	2,82	4,06	2,68	2,99	2,2	0,85
IX	1,24	1,09	2,62	2,67	2,25	2,37	2,56	2,09
X	1,14	1,59	2,68	3,14	1,67	1,88	2,3	1,33
XI	1,18	1,78	2,83	3,25	1,4	2,08	3,47	1,47
XII	1,07	1,12	2,11	1,48	1,03	1,49	2,19	2,02
Сред.	0,94	1,85	1,43	3,08	2,08	2,16	2,51	1,64

В весенне-летний период у ветров юго-восточного направления наблюдаются максимальные скорости, их среднемесячные значения колеблются в пределах 2,2-5,6м/с. Минимальные скорости у ветров северных румбов наблюдается в весенний период и колеблется в пределах от 0,4м/с до 1,3 м/с.

Отличительная особенность сухумской акватории заключается в том, что наибольшая среднемесячная изменчивость скорости ветра наблюдается в летний сезон, а наименьшая - в зимний период.

На рисунках 1.12 и 1.13 представлены среднемаксимальные и среднемесячные значения скорости ветра по данным гидрометеостанции «Сухумский Маяк» за последние десятилетия (Ахсалба, Пачулия 2017).

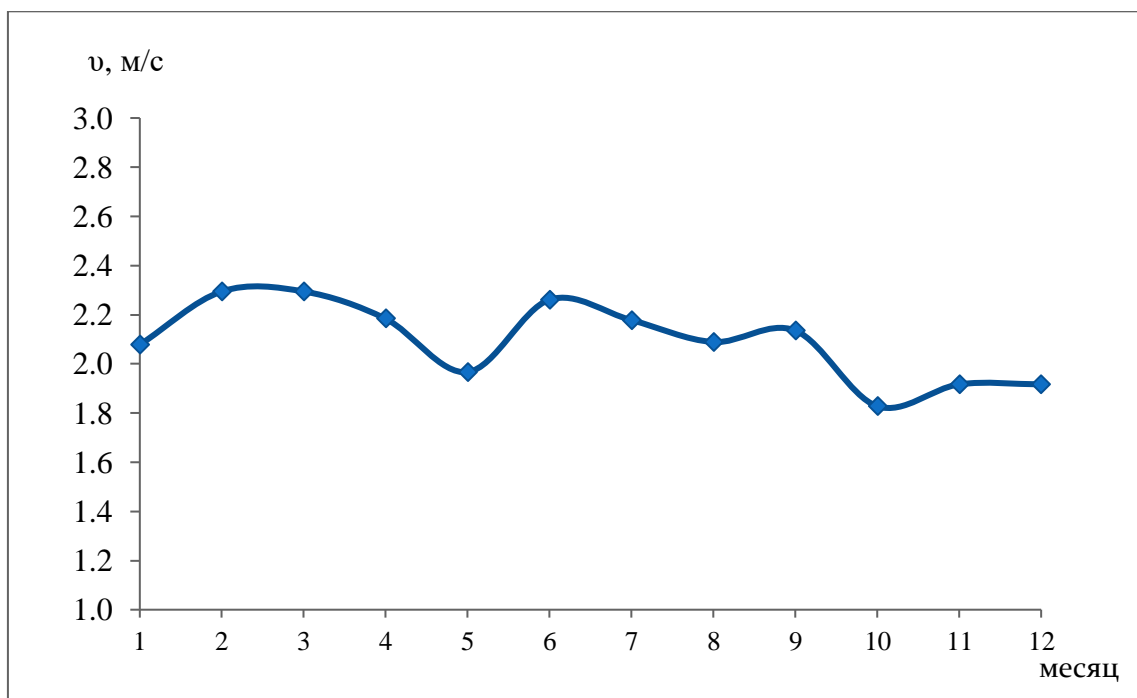


Рисунок 1.12. Годовой ход среднемесячных значений приземного ветра за последние десятилетия в г. Сухум.

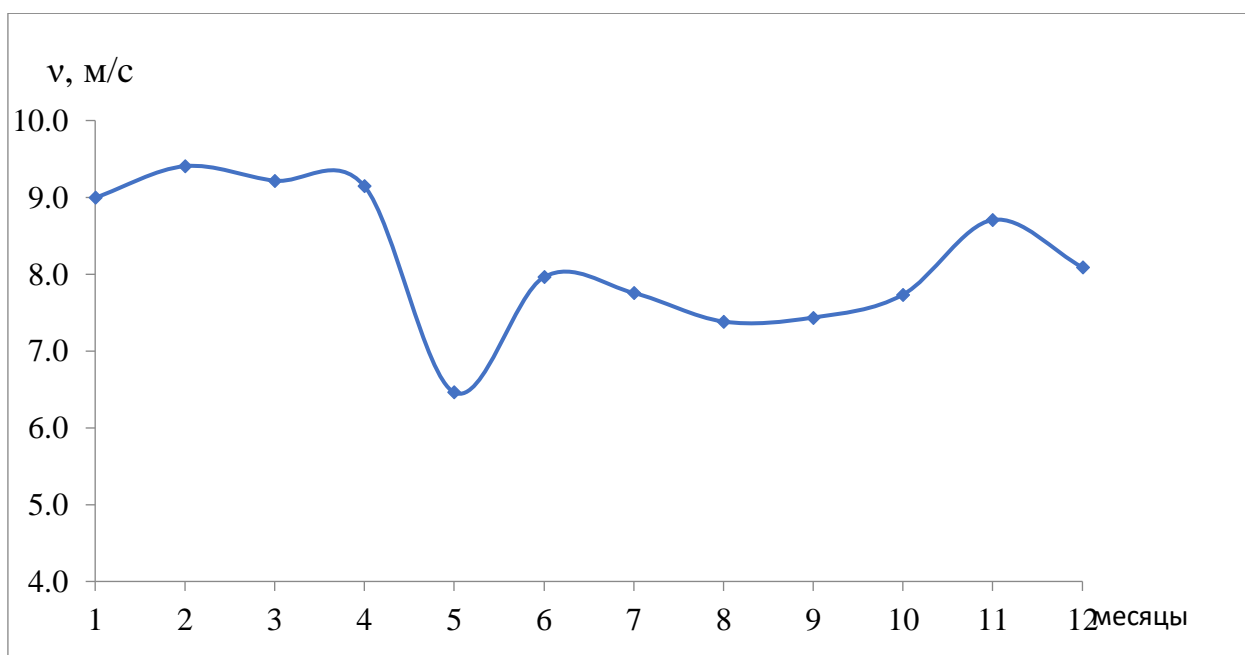


Рисунок 1.13 Годовой ход среднемаксимальных значений приземного ветра за последние десятилетия в г. Сухум.

Из рисунков следует, что максимальные значения ветра для рассматриваемой территории характерны в зимний -осенний периоды.

В результате проведенного исследования на современных данных метеорологических наблюдений рассмотрена пространственно-временная изменчивость ветрового режима на территории Абхазии.

В холодную половину года, вследствие учащающегося стационарирования антициклонов и хорошей выраженностью Черноморской депрессии, увеличивается повторяемость восточных и юго-восточных ветров. В ноябре-марте повторяемость восточных и юго-восточных ветров составляет 42-49 % от общего числа случаев с ветрами различного направления.

В последнее десятилетие участились резкие колебания направления и скорости ветра, именуемые порывами ветра, а особенно сильные из них – шквалами. При шквале ветер в один момент и краткосрочно (пару минут) резко усиливается (нередко до штормового) и потом слабеет. При всем этом, обычно, изменяется и его направление. В подавляющем большинстве

случаев шквалы связаны с атмосферными фронтами и с кучево-дождевой облачностью. Выявлено, что повторяемость сильных ветров имеет положительную тенденцию, с максимумом в мае (97 %) и октябре (95%).

Проведен анализ среднемесячных аномалий модуля скорости ветра на высоте 10 метров от поверхности (относительно сезонного хода) сглаженных однолетним и восьмилетним скользящими осреднениями в регионе Абхазии, выявлено, что продолжительность экстремальных явлений с положительными аномалиями модуля скорости ветра растет.

Изучены работы Алексеева А.А. 2014 г, для прогноза сильных ветров, Лосева В.М., 2010 г., для моделей прогноза, Киктева Д.Б. 2019 г., для опасных явлений, Юсупова Ю.И. для периода 2020 - 2021 гг., для применения термодинамических параметров и ряда других авторов. Приведено обоснование выбора темы и периода исследований.

Выводы к главе 1

1. Гидродинамическая теория возникновения и развития циклонов и антициклонов в достаточной мере разработана, хотя ошибки в предвычислении поля давления с использованием быстродействующих электронных машин имеют место, следовательно – есть неопределенности, которые не известны или плохо учитываются. В системе общей циркуляции атмосферы большую роль играют внетропические циклоны и антициклоны, имеющие различную вертикальную протяженность.

2. 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.

3. Образование фронтальных волн на малоподвижных фронтах происходит достаточно часто, так как при противоположном направлении движения воздушных потоков по обе стороны фронта происходит деформация фронтальной поверхности, что и является волнообразованием. Однако, такие волны сравнительно редко развиваются в глубокие циклоны, так как термобарическое поле не всегда имеет строение, способствующее понижению давления в зоне возникшей волны.

Глава 2. Физические условия образования и прогноз шквалов

2.1. Физические условия образования шквалов

Шквал — кратковременное увеличение скорости ветра до значений, намного превышающих скорость градиентного ветра. Он представляет собой одно из проявлений интенсивной конвективной деятельности. Шквалы являются особо опасными явлениями погоды. *Во-первых*, они связаны с кучево-дождевой облачностью. *Во-вторых*, шквалы сопровождаются интенсивными ливневыми осадками и градом. Скорость ветра при шквале достигает разрушительной силы.

До настоящего времени нет надежных методов прогноза, позволяющих с высоким качеством прогнозировать такие явления. Не решена данная проблема и за рубежом, несмотря на значительные успехи в развитии мезомасштабных моделей, разрешение которых по горизонтали достигает 3–0,5 км. Поэтому исследования, посвященные изучению особенностей возникновения сильных шквалов, их диагнозу и прогнозу, в том числе и представляемые в данной статье, актуальны до настоящего времени. Кроме того, они практически значимы, так как позволяют совершенствовать подходы к диагнозу и прогнозу шквалов, что позволит с достаточным запасом по времени принять превентивные меры защиты (Юсупов 2008).

Анализируемая выборка состоит из 58 случаев, 29 случаев из которых со шквалами (3, 10, 12 и 4 случаев со скоростью, соответственно, в градациях 15–19; 20–24; 25–29 и ≥ 30 м/с), фактически зарегистрированных в летний сезон метеостанциями России. Сведения о них выбраны из журнала донесений об опасных явлениях погоды. Остальные 29 случаев – без шквалов. Причем такое количество случаев без явления взято для того, чтобы статистическая значимость ситуаций с явлением и без явления была одинаковой. В качестве случаев без шквала выбирались только такие дни и районы, которые существенно отличались от дней и районов с вероятными

шквалами. Использованный в данном исследовании подход формирования выборки для столь редкого природного явления, как шквал, не исключает и другого соотношения числа случаев с наличием и отсутствием исследуемого явления. Данная выборка охватывает территорию возникновения шквалов по долготе 25–60° в. д. и широте 44–58° с.ш. (Шакина 1985).

В мощных кучево-дождевых облаках (Cb), с которыми связано образование таких опасных явлений, как шквалы, существуют интенсивные вертикальные конвективные потоки, которые переносят большое количество влаги в верхние слои, где она накапливается. Зона аккумуляции обычно располагается чуть выше середины облака, на высоте 5–7 км.

Скопившаяся в зоне аккумуляции огромная масса влаги (тыс. тонн) в виде снега, переохлажденных капель и града поддерживается восходящими потоками до тех пор, пока скорость падения капель меньше или равна скорости восходящих потоков. Когда облако достигает своего максимального развития, скорость вертикальных потоков уменьшается и уже не может удерживать влагу на высотах – формируется мощный нисходящий поток. Поскольку в нисходящем потоке воздух насыщен, его температура при опускании повышается по влажно-адиабатическому закону, т. е. медленнее, чем в окружающем воздухе, в котором температурный градиент обычно больше влажно-адиабатического. Следовательно, опускаясь, он будет все более охлажденным относительно окружающего воздуха, и скорость устремления вниз будет возрастать (Черногубова, Санникова 2012).

Чем больше путь нисходящего потока в зоне осадков в конвективном облаке и под ним, и чем неустойчивее стратификация окружающего воздуха, тем больше скорость опускания потока у земли. Достигнув поверхности земли, холодный воздух растекается в горизонтальном направлении, вызывая внезапное и резкое усиление ветра и изменение его направления, т. е. шквал.

Более сильные шквалы, образующиеся на холодных фронтах, возникают в результате опускания воздуха, складывающегося помимо опускания конвективного масштаба, с более интенсивным мезомасштабным опусканием вала холодного воздуха, обгоняющего линию фронта у Земли. Этот «обвал» вторгающегося холодного воздуха и формирует специфические формы облачности – «шкваловый ворот». Возникающие на фронтах линии шквалов значительно длиннее, чем при шквалах внутримассовых процессов, так как масштаб перетекающих через фронт холодных потоков существенно больше масштаба конвективной ячейки.

Известно, что энергия шквала создается за счет кинетической энергии не только нисходящего потока конвективного масштаба, но и энергии горизонтального переноса слоя тропосферы, расположенного ниже уровня зарождения нисходящего потока. Частицы воздуха в нисходящем потоке под действием ветра приобретают и горизонтальную скорость движения. Поэтому чем сильнее ветер в средних и нижних слоях тропосферы, тем скорость шквала будет больше «прирастать» к скорости растекания у поверхности Земли, т. е. скорость ветра при шквале увеличивается. При малой мощности кучево-дождевых облаков (Cb) вклад энергии неустойчивости за счет конвекции в формирование шквала незначителен и сильный шквал возможен только в результате переноса нисходящим потоком достаточно большого количества горизонтального движения нижней половины тропосферы (Севастьянова 2006).

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.

В рамках данного исследования рассматриваются ветровые параметры атмосферы, увеличивающие энергетику шквалов. Учитывалось

влияние на возникновение сильных шквалов таких ветровых характеристик атмосферы, как модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа (V_{V75}), средняя скалярная скорость ветра в слое 700–500 гПа (V_{S75}) и модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа (V_{85}).

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 – ($V_{V75} = 11$ м/с, $V_{S75} = 17$ м/с, $V_{85} = 11$ м/с); для основного периода – ($V_{V75} = 7$ м/с, $V_{S75} = 12,5$ м/с, $V_{85} = 7$ м/с); для конца лета – ($V_{V75} = 9$ м/с, $V_{S75} = 15$ м/с, $V_{85} = 9$ м/с); для поздней осени – ($V_{V75} = 11$ м/с, $V_{S75} = 17$ м/с, $V_{85} = 11$ м/с).

Самым информативным предиктором для прогноза шквалов, из рассмотренных характеристик ветра, является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа (расстояние Махаланобиса $D_M = 0,39$). 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 ($D_M = 0,37$). Наименьшее же значение D_M оказалось у скорости ветра на поверхности 850 гПа ($D_M = 0,3$).

Относительно других рассмотренных параметров атмосферы, как и следовало ожидать, наибольшее расстояние Махаланобиса оказалось для максимальной конвективной скорости ($D_M = 1,6$), затем – для лапласиана приземного давления ($D_M = 1,0$). Полученные результаты оценки информативности предикторов подтверждают рассмотренную и

представленную ниже их визуальную оценку на основе графического и табличного материала (Песков, Шишкин 1971).

Гистограммы распределения параметров атмосферы для случаев со шквалами и без шквалов представлены на рис. 2.1 и 2.2.

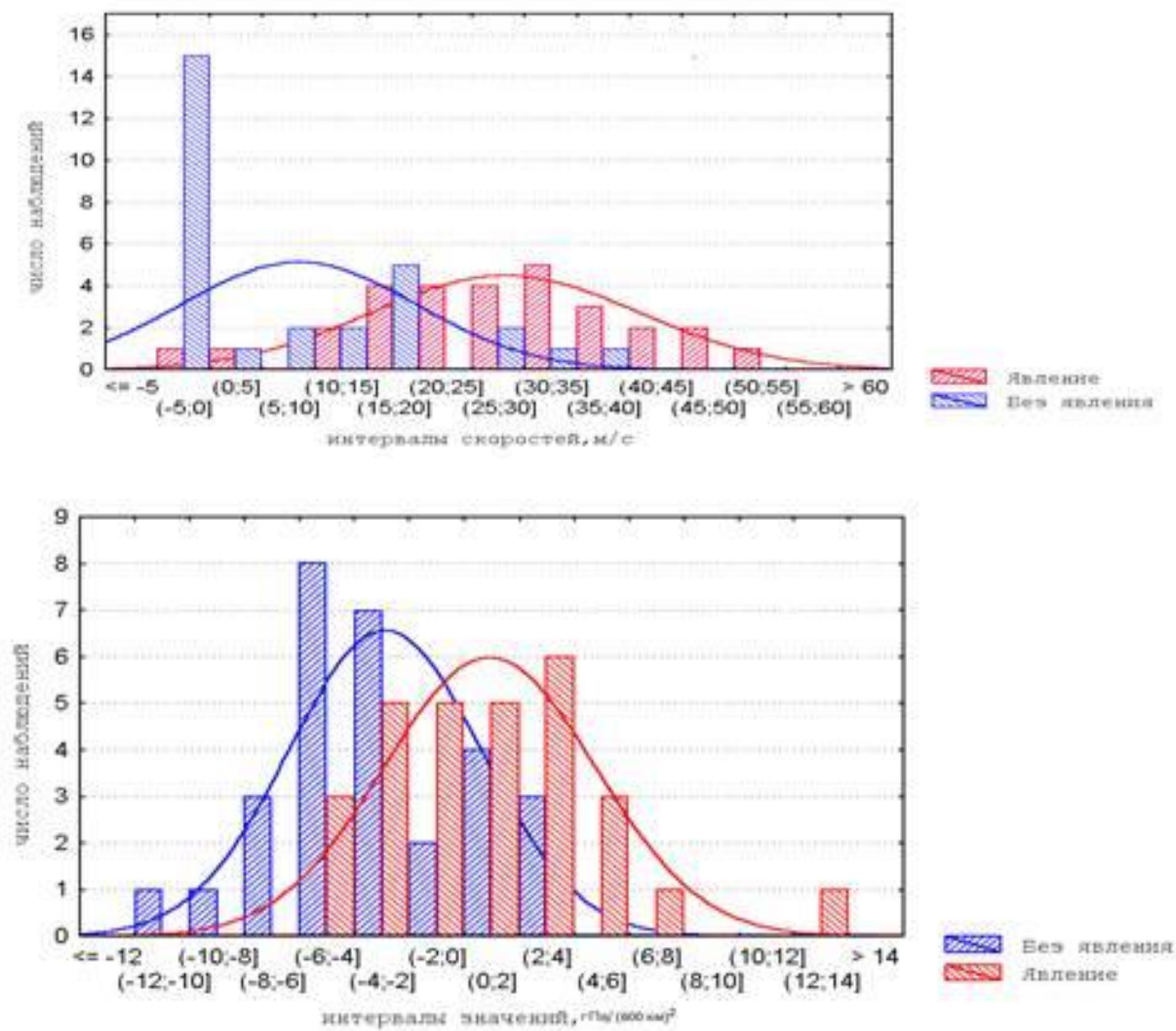


Рис. 2.1. Гистограммы и их огибающие (в случаях со шквалами и без шквалов) для распределений вертикальной конвективной скорости (а) и лапласиана приземного давления (б)

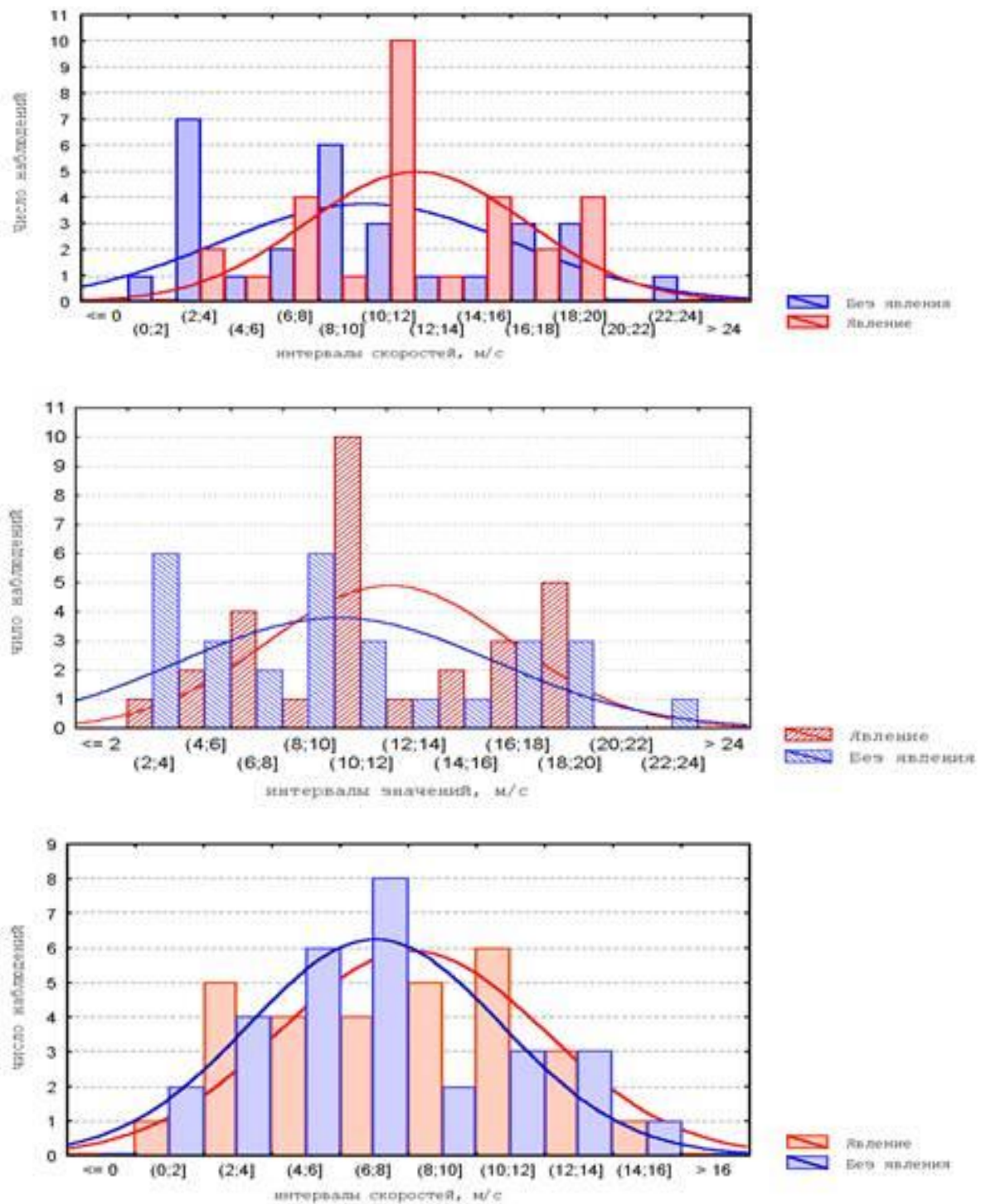


Рис. 2.2. Гистограммы и их огибающие (в случаях со шквалами и без шквалов) для распределений модуля средней векторной скорости в слое 700–500 гПа (а), средней скалярной скорости в слое 700–500 гПа (б) и модуля скорости ветра на поверхности 850 гПа (в).

Анализ гистограмм распределения показал следующее.

* Максимальная конвективная скорость W_m , является наиболее информативным предиктором при прогнозе шквалов по сравнению с другими рассмотренными параметрами атмосферы (лапласианом приземного давления и ветровыми характеристиками средней и нижней тропосферы), поскольку для W_m имеет место наибольшее расхождение кривых распределения для случаев с явлением и без явления и, как указывалось выше, наибольшее значение расстояния Махаланобиса.

* Лапласиан приземного давления, отражающий циклоничность у Земли и, как следствие, конвергенцию горизонтальных приземных потоков воздуха, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками (что следует из уравнения неразрывности), является вторым (после максимальной конвективной скорости) по важности предиктором при прогнозе шквалов. Этот параметр важен еще и потому, что позволяет выделять зону полного отсутствия шквалов. Наглядно отмечается сдвиг кривой распределения для случаев со шквалами от кривой их отсутствия.

Большее количество случаев без шквалов находится в диапазоне значений лапласиана приземного давления $-6 - -4$ гПа/(600 км)², для случаев со шквалами – в диапазоне $0-4$ гПа/(600 км)². Это вполне объяснимо, поскольку при лапласиане $\gg 5$ гПа/(600 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 $\ll -10$ гПа/(600 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 (Евсеева, Ромашова 2011).

Появление шквалов при небольших отрицательных значениях лапласиана приземного давления объясняется тем, что при небольшой антициклоничности поля давления иногда образуются небольшие ложбины, которые можно заметить на приземных картах погоды при проведении изобар через 1 гПа. Наиболее благоприятная синоптическая ситуация создается при значениях лапласиана приземного давления в диапазоне $1-3 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, поскольку образующиеся линии шквалов или неустойчивости создают конвергенцию потоков при безоблачной в первой половине дня погоде. Случаи без шквалов при небольшом положительном лапласиане от 2 до 4 $\text{гПа}/(600 \text{ км})^2$ обязаны так называемым «сухим фронтам» с сухим и слабо неустойчивым воздухом. Эти случаи хорошо отражаются таким предиктором, как максимальная конвективная скорость (W_m). Поэтому использование сочетания этих предикторов (максимальной конвективной скорости и лапласиана приземного давления) для прогноза шквалов в большей степени уменьшает недостатки использования их по отдельности (Песков, Снитковский 1968).

*При сравнении рассмотренных в исследовании ветровых характеристик очевидно, что скалярная и векторная скорости в слое 700–500 гПа, рассчитанные на основе региональной гидродинамической модели, более информативны при прогнозе шквалов, чем скорость ветра на поверхности 850 гПа (больше расхождение кривых распределения).

*В отличие от других исследуемых предикторов, таких как максимальная конвективная скорость и лапласиан приземного давления, по ветровым предикторам невозможно выделить зоны со 100%-ной вероятностью наличия или отсутствия шквалов, т. е. эти предикторы выступают не как основные, а скорее как дополнительные, уточняющие или выделяющие шквалы с большими скоростями ветра из общего числа шквалов.

*Четко выделяется максимум повторяемости шквалов в случае рассмотрения средней скалярной и векторной скоростей ветра в слое 700–500

гПа при значениях, равных 10–12 м/с, в то время как на графике, где предиктором является скорость ветра на поверхности 850 гПа, такого максимума не отмечается (Поморцева, Калинин 2016).

*Роль ветра заключается в переносе в кучево-дождевых облаках сверху вниз большого количества горизонтального движения и тем самым в увеличении «силы» шквала, а также в увеличении приземной конвергенции ветров у Земли, росте W_m и резонансного раскручивания циркуляции. Последнее утверждение имеет место даже при первоначально слабых ветрах ($> 2-4$ м/с в прогнозе, > 7 м/с в диагнозе) усиливающихся затем на появляющихся перед Сб псевдопотенциальных фронтах порывистости, или шкваловых воротах (Песков, Снитковсий 1968).

Кучево-дождевые облака образуются в результате реализации больших запасов энергии неустойчивости атмосферы. *В начальной стадии* развития формируются преимущественно восходящие потоки воздуха, которые в процессе развития кучево-дождевых облаков усиливаются за счет дополнительного тепла, выделяющегося в облачном воздухе в процессе конденсации и кристаллизации водяного пара. Когда в облаках накапливается достаточное количество влаги и происходит укрупнение облачных элементов, некоторые объемы облачного воздуха начинают опускаться вниз под действием массы накопленной в облаке капельножидкой влаги, кристаллов и града. Накопление влаги происходит наиболее интенсивно на высотах, где температура воздуха составляет -10 °С и ниже, а восходящие потоки воздуха достигают максимальных скоростей.

В процессе опускания объемов облачного воздуха вниз влага в них испаряется, что, в свою очередь, вызывает более ускоренное движение вниз. Наиболее интенсивные потоки достигают поверхности земли и, преобразовываясь в горизонтальный поток, создают резкое усиление ветра. Это первое условие, вызывающее возникновение шквала. Вторым условием является возникновение мелкомасштабных волн падения и роста давления,

что обуславливает очень большие барические градиенты давления. Причиной такого процесса являются мощные восходящие конвективные потоки в передней части облака и нисходящие в центральной и тыловой частях облака. Восходящие потоки создают дефицит массы воздуха, что сопровождается резким падением давления, а нисходящие потоки определяют рост давления (рисунок 2.3).

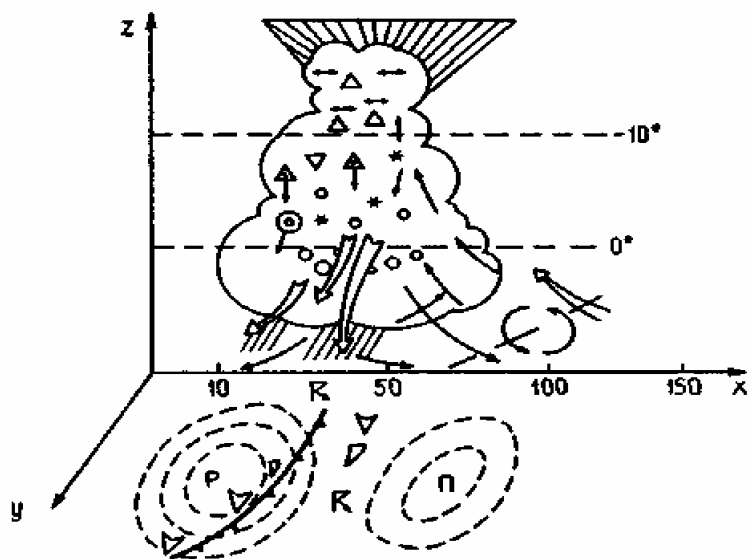


Рисунок 2.3. Схема циркуляции в кучево-дождевом облаке при шквале

Наличие вертикальных потоков разного знака способствует образованию шквального вихря с горизонтальной осью впереди кучево-дождевого облака (рис. 2.1). Горизонтальная ось располагается в среднемна высоте 500—600 м впереди Сб за 1—2 км до сплошной завесы дождя (Поморцева, Калинин 2016).

Шквалы, как правило, сопровождаются осадками в виде ливневого дождя и града. Время начала ливневого дождя и время начала шквала довольно близки. Особенно сильные шквалы наблюдаются в зоне ливневого дождя спустя 5—10 мин после его начала, если же шквал начинается до начала дождя, то он имеет умеренную интенсивность. Это обуславливается тем, что в этом случае нисходящий поток обгоняет ливень и теряет свою энергию.

2.2. Основные статистические характеристики параметров атмосферы при шквалах

В таблице 2.1 видны различия в значениях средних, максимальных, минимальных и других статистических характеристик параметров атмосферы в случаях со шквалом и без них. Очевидна физичность каждого параметра. Например, для максимальной конвективной скорости (W_m) среднее значение при шквалах равно 28,2 м/с.

Для шквалов на исследуемой выборке более чем в 120 тыс. случаев получено среднее значение W_m , равное 27,7 м/с. И в этих исследованиях максимальная конвективная скорость оказалась также наиболее информативным предиктором из рассмотренных 73 предикторов, критерий Фишера равен 347,7. Только при такой мощной восходящей струе ($W_m = 28$ м/с) может накопиться достаточно влаги, которая затем, обрушиваясь вниз, создает мощные нисходящие движения. В то же время $W_m = 8,5$ м/с недостаточна для этого, так как нисходящая струя гораздо слабее и не доходит до Земли (Экба, Ахсалба 2016).

Таблица 2.1. – Результаты статистического анализа параметров атмосферы для случаев со шквалами и без шквалов

Параметры атмосферы	Значения параметров, соответствующие уровням распределений				
	мин.	25%	средн.	75%	макс.
При наличии шквала					
Максимальная конвективная скорость, м/с	0	19,60	28,18	38,00	54,80
Лапласиан приземного давления, гПа/(600 км) ²	-5,20	-2,20	0,92	3,60	12,40
Модуль средней векторной скорости ветра в слое 700-500 гПа, м/с	3,80	9,60	12,06	15,80	19,90
Модуль средней скалярной скорости ветра в слое 700-500 гПа, м/с	3,90	9,60	12,11	16,20	19,90

Модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа, м/с	1,80	4,80	8,11	10,60	16,00
При отсутствии шквала					
Максимальная конвективная скорость, м/с	0	0	8,48	15,60	37,40
Лапласиан приземного давления, гПа/(600 км) ²	-10,40	-4,60	-2,88	-0,20	3,40
Модуль средней векторной скорости ветра в слое 700-500 гПа, м/с	1,20	3,90	9,96	14,80	22,20
Модуль средней скалярной скорости ветра в слое 700-500 гПа, м/с	2,20	4,40	10,10	14,90	22,20
Модуль скорости ветра на поверхности 850 гПа, м/с	1,20	4,40	7,03	9,20	14,70

Для лапласиана приземного давления среднее значение при шквале составляет $0,9 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, что оптимально для его возникновения. Без шквала среднее значение лапласиана равно $-2,9 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$. Это еще раз подтверждает тот факт, что при дивергенции горизонтальных потоков нет достаточной «подпитки» для восходящих движений, а одной только вертикальной неустойчивости недостаточно для создания мощных запасов влаги в Сб. Что же касается ветровых характеристик, то средние значения для них распределились следующим образом: для ветра в слое 700– 500 гПа скорость 12 м/с обеспечивает шквалы, в то время как скорость 10 м/с является недостаточной; ветер на поверхности 850 гПа – 8 и 7 м/с соответственно. В [4, 5] подтверждена аналогичная значимость предикторов для прогноза шквалов. Так, для лапласиана приземного давления критерий Фишера равен 172,4, а для ветровых предикторов – от 22,1 до 33,4 (Киктев, Муравьев, Смирнов 2019).

Скорее всего, малое различие в значениях ветровых параметров между классами явлений не столько показывает физику процесса, сколько отражает сглаживание региональной гидродинамической моделью прогностических значений ветра, уничтожающее важные мезоструи, особенно в слое 925–850 гПа. Возможно, что к такому эффекту привел и известный факт

несущественной разницы направлений ветра при предшквальной ситуации. Минимальное значение ветра в слое 700–500 гПа и на поверхности 850 гПа при шквалах составляет 3,8 и 1,8 м/с соответственно, что все же больше, чем при их отсутствии. Этот факт является очень важным, так как он еще раз подчеркивает, что какими бы ни были значения W_m и лапласиана приземного давления, шквал не будет развиваться при значениях скоростей ветра в тропосфере меньших, чем 3,8 м/с в слое 700–500 гПа и 1,8 м/с на поверхности 850 гПа, поскольку нет резонансного раскручивания мощных конвективных восходящих и нисходящих струй при недостаточной горизонтальной составляющей этой циркуляции.

* 25 % и 75 % точки. Представляют интерес пределы предикторов, между которыми располагается половина случаев с явлением и без явления (25 % и 75 % точки). Видны существенные смещения основного количества случаев с явлением относительно случаев без явления. Для численных расчетов именно эти параметры являются оптимальными: $W_m = 19,6–38$ м/с (т. е. при $W_m \geq 19,6$ м/с прогноз шквала оправдан, а свыше 38 м/с (до 55 м/с) имеет оправдываемость 100 %); лапласиан приземного давления Δp от -2,2 до 3,6 гПа/(600 км)² (т. е. прогноз оптимален при $\Delta p \geq -2,2$ и имеет оправдываемость 100% при $3,6 \leq \Delta p \leq 12,4$ для случаев с явлением); V_{V75} (модуль средней векторной скорости в слое 700–500 гПа) = 9,6–15,8 м/с (т. е. прогноз оптимален при $V_{V75} \geq 9,6$ м/с; критерий для оправдываемости 100 % для случаев со шквалом выделить сложно, однако с оправдываемостью 100 % прогнозируется отсутствие шквалов при $V_{V75} \leq 3,5$ м/с) (Калинин 2015).

2.3. Анализ различных сочетаний предикторов для прогноза шквала

Представляет интерес изучение совместного влияния предикторов на факт наличия или отсутствия шквала. Для наглядности были построены

категоризованные диаграммы рассеяния для различных пар параметров, пример которых представлен на рисунках 2.4–2.5.

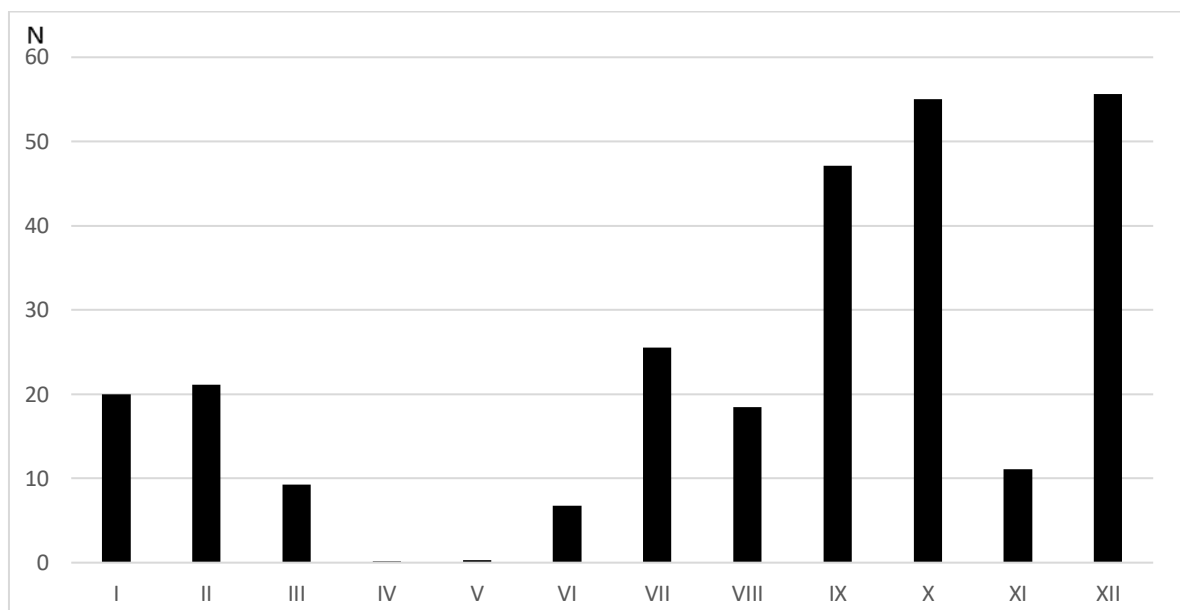


Рисунок 2.4 Лапласиан приземного давления за период 2024 г. по месяцам для городов Афон и Гудаута.

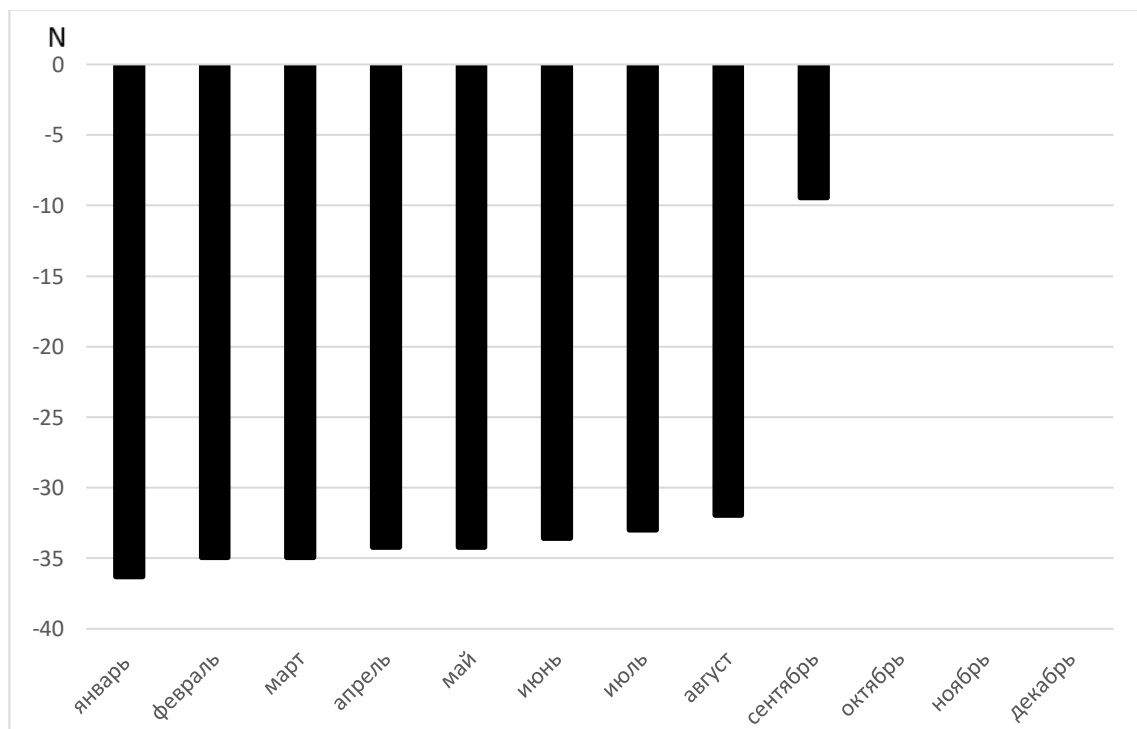


Рисунок 2.5 Лапласиан приземного давления за период 2024 г. по месяцам для городов Очамчыра и Ткуарчал.

На рисунках 2.4 и 2.5 приведен график зависимости шквалов (наличия или отсутствия) от максимальной конвективной скорости W_m и лапласиана Δp . Как было показано выше, эти параметры имеют Δp приземного давления. Как было показано выше, эти параметры имеют наибольшее расстояние Махаланобиса и расхождение кривых распределения, в том числе и коэффициент множественной корреляции при совместном использовании предикторов. Это и понятно, поскольку они учитывают энергию вертикальной неустойчивости и синоптическую ситуацию (барическое поле). На графике довольно четко проводятся линии, выделяющие зоны со 100%-ной вероятностью шквалов (случаев без шквалов в этой зоне нет), с 40%-ной вероятностью шквалов (здесь наблюдаются, как случаи со шквалами, так и без них) и, наконец, зону отсутствия шквалов (случаев со шквалом не отмечается) (Пачулия, Эмба 2024).

В зоне со 100%-ной вероятностью наблюдается 62 % всех исследуемых шквалов, т. е. используя хотя бы эту зону для прогноза можно получить их предупреденность 62 % при 100%-ной оправдываемости (лишних прогнозов не будет). Эта зона ограничивается линией с характерными значениями $W_m \geq 17$ м/с при положительном лапласиане, $W_m \geq 20$ м/с при небольшом отрицательном лапласиане (от 0 до -2 гПа/ $(600 \text{ км})^2$) и $W_m \geq 30$ м/с при лапласиане ≥ -3 гПа/ $(600 \text{ км})^2$. В промежуточной зоне много случаев как отсутствия, так и наличия явления, увеличение же вероятности шквалов происходит с ростом W_m или Δp . При $W_m \leq 0-18$ м/с и $\Delta p < -4$ гПа/ $(600 \text{ км})^2$ выделяется небольшая зона полного отсутствия шквалов.

Так как на самом деле случаев отсутствия шквалов гораздо больше, чем было взято для данной выборки, то повышать предупреденность шквалов за счет «смягчения» порогов нельзя без повышения ложных тревог.

Из анализа видно, что независимо от градации ветровых характеристик максимальная конвективная скорость существенно различается при явлении и

без явления, в среднем на 10–20 м/с, а на краях распределений на 5–30 м/с. Поэтому довольно легко выделяются зоны, где вероятность шквалов составляет 100 %, а также зоны, где вероятность развития шквалов равна нулю (Засоба 2009).

В зоне 100%-ного наличия шквалов находится 66 % от общего числа случаев со шквалами. В зоне же полного отсутствия шквалов видно, что наибольшее количество (48 % от общего числа случаев без шквалов) выделяется по модулю векторной скорости в слое 700–500 гПа (V_{V75}). Если же рассматривать такую зону по скорости ветра на поверхности 850 гПа (V_{85}), то в ней находится уже только 41 % случаев. Такой результат получен из-за случая со шквалом, который наблюдался при $W_m = 0$, но при $V_{V75} = 20$ м/с. Это случай шквала, который образуется не столько за счет энергии вертикальной неустойчивости, сколько за счет энергии горизонтальных потоков, роль которых была доказана в ранних работах Б.Е. Пескова (Песков 2020).

Следует отметить, что вероятность шквалов увеличивается с ростом скорости ветра в средней тропосфере. Даже при $W_m > 35$ м/с нет случаев со шквалами, если скорость высотных ветров меньше 4 м/с.

В зонах с различной вероятностью шквалов хорошо видно влияние высотных ветров и циклоничности (хорошо известной небольшой конвергенции приземных потоков как триггера, запускающего мощную конвекцию). Средний векторный и скалярный ветры в слое 700–500 гПа, как и ветер на поверхности 850 гПа, определяют возникновение шквалов с вероятностью 100 % примерно одинаково (в 32 % случаев). Отсутствие же шквалов (в зоне с вероятностью 100 %) – в 41 % и 34 % случаев, соответственно.

Можно также отметить, что при скорости высотных ветров > 20 м/с случаи со шквалами встречаются крайне редко, что скорее всего объясняется тем, что слишком сильные ветры диссонируют кучево-дождевое облако (усиливают вовлечение и его разнос). Отсутствие Δp надежнее, чем Δp шквала

выделяется по лапласиану приземного давления по максимальной конвективной скорости W_m , так как в данной работе не рассматриваются случаи $W_m \ll 0$ (условие большой отрицательной энергии неустойчивости, т. е. большой устойчивости). Появляется и зона Δp 100%-ной вероятности такого шквала при $\Delta p > 4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$. В этой зоне находится 33 % случаев опасных шквалов, они выделяются со 100%-ной оправдываемостью, т. е. без ложных тревог. Таким образом, в зонах с различной вероятностью шквалов хорошо видно влияние рассмотренных факторов, хотя, главное, лапласиан для случаев со шквалами должен изменяться от 0 до $-4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, а скорость высотных ветров должна превышать 2–4 м/с (Заводченков 2005).

Результаты, полученные в рамках данного исследования, подтверждают заметную роль скорости горизонтального переноса средней тропосферы в возникновении сильных шквалов. Показано ее влияние на увеличение (примерно на 4–4,5 м/с) максимальной скорости ветра при шквале, хотя ее вклад примерно в 4 раза меньше вклада от вертикальных конвективных скоростей и в 2–2,5 раза меньше вклада от лапласиана приземного давления. Такая добавка к скорости ветра при шквале может привести к образованию шквала в градации опасного явления, а неучет ее может дать ошибочный прогноз.

Кроме того, в случаях слабой антициклоничности, когда энергии конвективной неустойчивости недостаточно для образования сильного шквала, скорость горизонтального переноса в средней тропосфере может являться одним из основных факторов его возникновения.

Шквалы и сильные ветра возникают благодаря развитию глубокой влажной конвекции. При этом перепады атмосферного давления составляют десятки мб в течении короткого времени. Температурные перепады составляют более 5-7°C в направлении понижения. Прогнозы шквалов и интенсивных осадков являются одними из главных задач в численной метеорологии, поскольку, при определенных условиях, эти явления могут

развиться до уровней неблагоприятных (НПЯ) или даже до опасных явлений погоды (ОЯ) и представлять угрозу безопасности населения и нанести значительный ущерб различным отраслям экономики (Дядюченко, Павлюков 2014).

При очевидном многообразии динамики метеоэлементов, сопровождающих возникновение сильных шквалистых ветров, всё же отмечаются общие закономерности хода основных параметров атмосферного процесса. Атмосферное давление в начале процесса формирования шквала имеет минимальное значение, а затем непрерывно возрастает до момента реализации максимальных значений скорости ветра. Скорость воздушного потока меняется практически синхронно с атмосферным давлением и в противофазе с температурой окружающего воздуха.

Выводы к главе 2

1. 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 начале лета, когда поверхности воды и земли прогреваются, и у холодных потоков воздуха больше шансов вклиниться в тёплые. Шквалы чаще всего возникают в тёплых регионах, а также на больших открытых территориях, где могут встретиться очень контрастные по температуре воздушные массы из разных областей.

2. Самым информативным предиктором для прогноза шквалов является модуль средней векторной скорости ветра в слое 700–500 гПа. Учёт этого параметра позволяет оценить степень перемешивания воздуха в облаке. Сильное перемешивание выравнивает не только скорость ветра, но и его направление. Лапласиан для случаев со шквалами должен изменяться от 0 до $-4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, 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%.

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

Глава 3. Метод прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы

3.1. Разработка метода прогноза шквалов

Термодинамические характеристики атмосферы с успехом используются в численном моделировании конвективных процессов, являющихся необходимым условием возникновения гроз, града и шквала. Использование термодинамических индексов состояния атмосферы позволяет оценивать вероятность развития опасных явлений погоды, связанных с конвекцией.

Откорректированный метод определения плотности разрядов молнии в землю по спутниковым данным позволяет рассчитать значения плотности разрядов молнии на единицу площади при отсутствии наземных инструментальных наблюдений (Данилов, Пилеич 2010).

Закономерности изменчивости ряда индексов, характеризующих конвекцию в зависимости от широты, долготы, высоты над уровнем моря и времени ее развития позволяют создать основу для ее параметризации.

При развитии конвекции, преодоление пороговых значений ряда термодинамических индексов является свидетельством развития опасных конвективных явлений.

Полученные пороговые значения термодинамических характеристик атмосферы, при достижении которых образуются опасные конвективные явления с определенной степенью вероятности, могут быть использованы в альтернативных прогнозах грозы над исследуемыми территориями, в том числе при анализе результатов зондирования атмосферы.

Для прогноза опасных явлений погоды, связанных с развитием конвекции, используются различные методы: метод Н.И. Глушковой и В.Ф. Лапчевой, методы Н.В. Лебедевой, Бейли, Вайтинга, Фауста, Г.Д. Решетова, И.А. Славина, Кокса, Р.А. Ягудина (Вильфанд, Ривин, Розинкна 2010).

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 (Багров, Быков, Гордин 2018).

В частности, для вычисления V_{\max} (м/с) может быть применена формула (3.1):

$$V_{\max} = 5 + 2,5\Delta T \quad (3.1)$$

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 которых возникает шквал. 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 (Бочарников, Брылев, Песков 1988).

3.2. Оценка эффективности использования предикторов и качества прогноза шквалов

В настоящее время для прогноза опасных явлений, связанных с конвекцией, широко применяются термодинамические характеристики атмосферы (индексы неустойчивости атмосферы или термодинамические индексы), рассчитанные на основе данных радиозондирования и позволяющие определить соответствие количественных значений индексов той или иной степени развития конвекции. Индексы широко используются в прогностических моделях погоды, для прогноза развития грозы, града, шквала и других опасных явлений погоды.

Термодинамические индексы характеризуют конвекцию по ряду признаков: по стратификации температуры, по влагосодержанию нижних

слоев атмосферы, по ее энергетическому потенциалу и по резким изменениям характеристик ветра с высотой и т.д. При расчете наиболее часто встречающихся индексов в основном используются следующие параметры: T_{850} , T_{700} , T_{500} – температуры воздуха на уровнях 850, 700 и 500 гПа, соответственно; Td_{850} , Td_{700} – температуры точки росы на уровнях 850 и 700 гПа, соответственно; температура поднимающейся частицы и сдвиги ветра между различными уровнями. Отсюда видно, что основными предикторами для методов прогноза гроз, града, шквала и смерча, как и параметрами, используемыми для расчета основных термодинамических характеристик атмосферы, являются температурно-влажностные характеристики слоя атмосферы до уровня 500 гПа (Брылев, Огуряев 1976).

Рассмотрим индексы, описывающие нестабильность атмосферы: Showalter index (SHOW) и Lifted index (LIFT). Вторую группу индексов представляют индексы, в которых кроме стратификации температуры, присутствуют характеристики влажности: k index, TOTL index. Третья группа индексов оценивает энергию конвективного потенциала атмосферы (CAPE), а четвертая – совокупность температурновлажностных и ветровых характеристик (SWEAT). Индекс EQLV оценивает высоту верхней границы, до которой развивается конвекция, LFCT – высоту нижней границы развития конвекции. Значения индексов используются для прогноза конвективных явлений с заблаговременностью 24 часа и более. Использование значений индексов для оценки вероятности развития опасного конвективного явления над конкретной территорией в мезомасштабе невозможно без процедуры параметризации конвекции.

По динамике значений индексов оценивается перспектива развития опасных явлений, обусловленных конвекцией, определяются пределы значений индексов, благоприятствующие развитию того или иного опасного конвективного явления. Попытка перенести конечные результаты зарубежных

исследований на наш регион не имела успеха, поскольку термодинамические характеристики атмосферы различны (Алексеева, Песков 2001).

Интересующей нас группой индексов является 4, она принадлежит «суровости погоды» (SWEAT – Severe WEATHER Threat index), который оценивает совокупность температурно-влажностных и ветровых характеристик. Индекс SWEAT оценивает вероятность развития неблагоприятных явлений погоды, объединяя несколько параметров в одном индексе: и толщину влажно-неустойчивого слоя, и неустойчивость как следствие стратификации температуры и скорость ветра на уровнях 850 и 500 гПа. Таким образом, это попытка объединить кинематическую и термодинамическую информацию в одном индексе, индекс рассчитывается по формуле (3.2)

$$\text{SWEAT} = 12\text{TD}_{8510} + 20(\text{TOTL} - 49) + 2\text{SKT}_{850} + \text{SKT}_{500} + \text{SHEAR} \quad (3.2)$$

где TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа (°C); SKT_{850} – скорость ветра в узлах на уровне 850 гПа, SKT_{500} – скорость ветра в узлах на уровне 500 гПа, SHEAR – сдвиг ветра между уровнями 500 и 850 гПа. Чем больше значения индекса SWEAT, тем более вероятно развитие опасных явлений погоды, обусловленных конвекцией. Считается, что атмосфере присуща слабая неустойчивость, если значения SWEAT изменяются в пределах от 0 до 100. Если значения SWEAT принимают значения в пределах от 100 до 200, то атмосфера неустойчива. Значения индекса SWEAT от 300 до 400 соответствуют сильно неустойчивой атмосфере. Свидетельством крайне неустойчивого состояния атмосферы служат значения SWEAT более 400 единиц (Алексеева, Лосев, Песков, Васильев, Никифорова 2010).

Среди параметров, используемых при расчете термодинамических характеристик, можно выделить основные, наиболее часто встречающиеся, параметры, используемые для их расчета (табл. 3.1). К ним относятся: T_{850} ,

T_{700} , T_{500} – температуры воздуха на уровнях 850, 700 и 500 гПа, соответственно; Td_{850} , Td_{700} – температуры точки росы на уровнях 850 и 700 гПа, соответственно; температуры поднимающейся частицы и окружающей среды на разных уровнях; сдвиги ветра между уровнями 850 и 500 гПа и между уровнями 500 и 6000 м.

Таблица 3.1. – Основные параметры термодинамических характеристик атмосферы

Параметры	Термодинамические характеристики атмосферы							
	SHOW	LIFT	KIND	TOTL	CAPE	BRCH	CINS	SWEAT
T_{500}	+	+	+	+				+
T_{700}			+					
T_{850}			+	+				+
Td_{700}			+					
Td_{850}				+	+			+
Гр	+	+			+	+	+	
Ге					+	+	+	
Сдвиг ветра						+		+

По интервалам значений индексов, приведенных в литературе, нами произведена классификация состояний атмосферы (таблица 3.2). Степень развития неустойчивости качественно поделена на ряд этапов: слабо неустойчивая (наличие ливней), неустойчивая (наличие ливней и отдельных гроз), сильно неустойчива (на всей территории регистрируются грозы), крайне неустойчивая (гроза, град), крайне неустойчивая (гроза, град, шквал, смерч).

Таблица 3.2. – Интервалы значений индексов для различных состояний атмосферы

Состояние атмосферы	Индексы					
	SHOW	LIFT	SWEAT	KIND	TOTL	CAPE
слабо неустойчива	0÷3	-3÷0	100÷200	25÷30	40÷45	0÷1000
неустойчива	-3÷0	-6÷-3	200÷300	30÷35	45÷50	1000÷2000
сильно неустойчива	-6÷-3	-9÷-6	300÷400	35÷40	50÷55	2000÷2500
крайне неустойчива	<-6	<-9	>400	>40	>55	>2500

Средние значения параметров, характеризующих разницу температур окружающей среды и поднимающейся частицы (SHOW и LIFT), в дни с градом принимают меньшие значения, чем в дни с грозой, что соответствует физической картине развития грозовых и градовых облаков.

Значения влажности атмосферы как в слое 700-850 гПа, так и на уровне 850 гПа в дни с грозой и градом имеют статистически значимые различия. Средние значения KIND и TOTL в дни с градом больше значений этих же характеристик в дни с грозой (Алексеева 2019).

Средние значения характеристики, включающей в себя информацию о наличии сдвигов ветра (SWEAT), принимают наибольшие значения при шквалах, несколько меньшие значения в дни с градом и наименьшие значения – в дни с грозой.

Индекс SWEAT в дни с градом, грозой и ливневыми осадками изменяются приблизительно от 20 до 180 единиц, чем больше значение, тем опаснее конвективное явление.

3.3. Реализация метода прогноза шквалов и его применение на практике

Рассмотрим некоторые наиболее популярные и часто используемые методы прогнозирования шквала, для которых используются специальные математические расчеты:

- Метод Б. Е. Пескова и А. И. Снятковского.

Данный можно использовать для прогнозирования шквалов, где скорость ветра превышает 21 м/с. В качестве предикторов берутся мощность облака, средняя скорость ветра в слое земля-500 гПа, а также толщина облака между уровнем конденсации и уровнем изотермы -10 С. Учитывается также синоптическая ситуация для определения благоприятной условий для развития шквала, то есть прохождение холодного фронта и фронта окклюзии.

- Метод П. Г. Пантелеева

В данном методе смысл заключается в установлении зависимости повторяемости шквалов от степени конвективной устойчивости, барических тенденций и разности температур на фронте. Для того, чтобы выполнить прогноз шквала нужно построить прогностические кривые стратификации температуры и точки росы, по которым можно узнать максимальную температуру воздуха и точки росы. Добавляется кривая состояния для расчета максимальной скорости конвективного потока Н.И. Глушковой. Далее составляем прогноз, используя специальный график. На графике отложены конвективная скорость, максимальная температура.

- Метод Фобуша – Миллера

Этот метод был разработан для прогноза внутримассовых шквалов. Используем следующие характеристики: нулевая температура смоченного термометра и максимальная дневная температура. Метод основан на том, что скорость ветра считается пропорциональной разности этих двух

характеристик, то есть вычитаем из максимальной температуры нулевую температуру смоченного термометра.

- Этот метод был дополнен *Р.А. Ягудиным*.

Он принял допущение, что в зоне осадков воздушные частицы опускаются влажноадиабатически. И его предложение уменьшить наклон линии регрессии имело смысл. Он предложил заменить нулевую температуру смоченного термометра на температуру, определяемую по влажной адиабате до уровня земли. Также его заслугой было то, что он описал условия отсутствия шквала:

- устойчивый слой восточного переноса в нижнем слое атмосферы;
- максимальная температура у земной поверхности не выше 19°C , дефицит точки росы меньше 7°C или больше 17°C ;
- уровень конденсации выше 780 гПа;
- атмосферное давление на уровне станции выше 1010 гПа;
- грозовой очаг проходит до наступления максимального развития конвекции.

- Метод *Е. В. Васильева*

Для представленного метода исследуются следующие предикторы характеристики: максимальная конвективная скорость, лапласиан приземного давления, разность температур кривой стратификации и состояния на уровнях 500 и 1500 гПа, разность температур воздуха на поверхностях 850 и 700 гПа, а также скорость ветра на земле при шквале.

- Метод *Э. В. Переходцевой*

Этот метод помогает делать прогноз шквала за 12, 24, 36 часов до явления. Предикторы: значение скорости ветра на уровне 700 гПа, уровень нулевой изотермы, разность между значением влажной адиабаты и кривой стратификации на уровне 500 гПа, значение максимальной температуры на 39 уровне земли, максимальная разность между температурой на фронте на уровне земли в радиусе 250 км от пункта прогноза (Переходцева 2010).

Существует предположение, что развитие шквала зависит от баланса между величиной вертикального сдвига ветра и массы холодного воздуха, который опускается к поверхности земли нисходящим потоком. Таким образом, этот баланс и обуславливает время жизни шквала. А сдвиг ветра важен в организации конвективного шторма.

Практически все методы прогноза шквалов связаны с прогнозом конвекции и подразделяются на статистические (обработка и анализ временных рядов); физико-статистические (физические основы развития конвекции); синоптические (стратификация атмосферы и возможность формирования шквалов). Так как кучево-дождевые облака являются конвективными, для их образования должны выполняться не менее трех условий: динамическое вынуждение, в результате которого происходит подъем воздушных частиц до уровня свободной конвекции; неустойчивость в насыщенном воздухе; наличие достаточной влажности в приземном слое.

Чтобы определить конвективность используются индексы неустойчивости.

Индекс Вайтинга:

$$K = T850 - T500 + Td850 - D700, \quad (3.3)$$

где $T850$, $T500$ – температура воздуха на уровнях 850 и 500 гПа, $Td850$ – температура точки росы на уровне 850 гПа, $D700$ – 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.

$$TT = T850 + Td850 - 2T500, \quad (3.4)$$

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

Индекс Шуолтера:

$$SI = T500 - Trm500, \quad (3.5)$$

где $Trm500$ – 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):

$$EPI = \theta_{e,500} - \theta_{e,850}, \quad (3.6)$$

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 (Алексеева 2017).

Метод ДМРЛ для обнаружения шквала.

Шквалистое усиление ветра может обнаруживаться с помощью метеорологического доплеровского локатора. Есть метод, при котором шквал распознается некогерентным радиолокатором, основанный на измерении высоты верхней границы облака, скорости перемещения радиоэха и его максимальной отражаемости. Такой метод работает в 85% случаев. Но есть недостаток в том, что может быть сделана оценка скорости ветра в шквале, а также примерное будущее местоположение шквала, но метод подвержен влиянию экранировки облаков другими облаками и осадками. Если отслеживать шквал доплеровским локатором, то шквал можно обнаружить и в осадках, и в безоблачной атмосфере. В первом случае задача достаточно проста, так как отраженный сигнал велик и можно проводить надежные измерения скорости ветра. Шквал индицируется по резкому градиенту радиальной скорости в приземном слое. Шквал может обнаруживаться доплеровским радиолокатором и вне облака. Формируясь в облаке, шквал приводит к интенсивному нисходящему движению воздуха, которое регистрируется по конвергенции воздуха в облаке на малых высотах. Иногда области конвергенции на радиолокационных дисплеях прослеживаются в виде полосы, что служит указателем наличия протяженной линии шквалов. Доплеровский локатор может отследить шквал

даже в безоблачной атмосфере на большом расстоянии от области радиоэха. Это объясняется повышением чувствительности радиолокационного приема за счет когерентного накопления сигнала. Наличие отраженного сигнала от шквала в ясном небе может объясняться как резкой неоднородностью воздуха, так и наличием в шквале пыли или насекомых. Можно обнаружить доплеровским радиолокатором даже микрошквал — нисходящие порывы воздуха из основания облака, скорость которых может достигать более 17 м /с. На мониторе его можно определить как замкнутые контуры высоких скоростей, сосредоточенных в малом объеме. Как показывает мировая практика, доплеровская станция является эффективным средством предупреждения о шквалах. Вероятность их обнаружения достигает 94—96 % (Алексеева, Лосев, Песков, Багров 2012).

Наиболее приемлемый метод прогнозирования зависит от конкретной задачи, доступных данных и требуемой точности. В общем случае, количественные методы (статистические, моделирование) подходят для ситуаций с достаточным объемом исторических данных, в то время как качественные методы используются, когда данных мало или требуется учитывать субъективные факторы.

Количественные методы:

- **Статистические методы:**

Включают в себя анализ временных рядов (экстраполяция, автокорреляционный анализ, анализ тенденций, сезонности), регрессионный анализ, методы прогнозирования на основе распределений вероятностей. Подходят для прогнозирования показателей, имеющих четкую тенденцию или сезонность.

- **Моделирование:**

Включают в себя создание математических и имитационных моделей для описания поведения системы и прогнозирования ее

развития. Позволяют учитывать сложные взаимосвязи между переменными и проводить анализ сценариев.

Качественные методы:

- **Экспертные оценки:**

Основаны на мнениях специалистов и экспертов. Метод Дельфи, например, позволяет собрать мнения экспертов в несколько раундов, чтобы прийти к согласованному прогнозу.

- **Метод сценариев:**

Разрабатываются несколько возможных сценариев развития событий и оценивается вероятность их реализации. Позволяет учесть неопределенность и возможные риски.

Выбор метода:

Анализ данных:

Оценить наличие и качество исторических данных. Если данных достаточно, можно использовать количественные методы. Если данных мало или они нерепрезентативны, стоит обратиться к качественным методам.

Требуемая точность:

Определить, насколько точный прогноз нужен. Количественные методы обычно обеспечивают более высокую точность при наличии достаточного количества данных.

Ресурсы:

Учесть затраты времени и ресурсов на применение каждого метода. Количественные методы могут потребовать больше времени и ресурсов на сбор и анализ данных.

Специфика задачи:

Некоторые методы лучше подходят для определенных типов задач. Например, для прогнозирования спроса на продукт могут быть

полезны как количественные методы анализа временных рядов, так и экспертные оценки.

Наиболее приемлемый метод прогнозирования определяется индивидуально для каждой задачи. Часто лучший результат достигается путем комбинирования различных методов и использования как количественных, так и качественных подходов (Ахсалба, Евстигнеев, Эмба 2019).

Выводы к главе 3

1. 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 поверхности земли. Широко применяются методы прогноза шквалов на основе выходной продукции разрешающих конвекцию гидродинамических моделей из семейства WRF: ARW, ARW Glob и NMM. Установлено, что все эти модели достаточно хорошо воспроизводят мезомасштабные конвективные системы и связанные с ними области сильных осадков и ветра, но имеют общие недостатки: переоценивают количество и площадь сильных осадков и недооценивают скорость сильного ветра.

2. По большинству вариантов прогноза предупрежденность сильных шквалов близка к 100%, то есть практически нет «пропущенных» случаев с такими шквалами. Все варианты прогноза завышают количество случаев с сильными шквалами по сравнению с фактически зафиксированными явлениями. Фактические шквалы отмечаются у оси (± 75 км) более широкой прогнозируемой зоны. Среди всех разработанных вариантов выделяются способы, основанные на разделении выборки по значениям максимальной конвективной скорости. Количество прогнозируемых «лишних» шквалов

меньше, чем в других вариантах прогноза, но в то же время в этих случаях несколько ниже предупрежденность явления.

3. 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.

Глава 4. Физико-статистические модели климатических изменений

4.1. Общая схема моделирования и методы декомпозиции сложного процесса

Исследование прогноза шквалов с применением термодинамических параметров атмосферы представляет собой важную область метеорологии и климатологии. В условиях современных изменений климата и все более нестабильных погодных условий, точный прогноз ветровых явлений, включая сильные шквалы, является ключевым фактором для обеспечения безопасности и эффективности множества отраслей, включая транспорт, сельское хозяйство, энергетику и строительство.

Эффективный прогноз шквалов требует комплексного анализа атмосферных параметров. В этом контексте, термодинамические параметры атмосферы, такие как температура, влажность и давление, играют важную роль в формировании и интенсивности ветровых явлений. Взаимодействие этих параметров под воздействием географических, гидродинамических и топографических факторов формирует сложные метеорологические условия, включая образование и развитие шквалов (Пачулия, Экба 2023).

Цель данной главы состоит в анализе и разработке методики прогноза шквалов, основанной на термодинамических параметрах атмосферы. Путем интеграции данных, полученных с метеорологических наблюдений и численных моделей, предпринимается попытка улучшить точность и достоверность прогнозов ветровых явлений.

В этой главе будут 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.

В современной метеорологии и климатологии применение математических моделей является неотъемлемой частью анализа и прогнозирования атмосферных явлений. Математическое моделирование позволяет представить сложные физические и динамические процессы, происходящие в атмосфере, в виде уравнений и алгоритмов, что позволяет улучшить точность прогнозов и понимание метеорологических явлений. Применение математического моделирования с учетом термодинамических параметров атмосферы в прогнозировании шквалов представляет собой важнейший этап в современной метеорологической науке. 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 повреждения оборудования при сильных ветрах.

Реализация метода прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы включает несколько ключевых этапов, это: **сбор и анализ метеорологических данных:** сбор данных о температуре, влажности, давлении атмосферы и других параметрах в различных точках региона (Воробьёв 1991).

Выбор математической модели и ее адаптация:

Определение подходящей математической модели, способной учесть термодинамические параметры атмосферы и их влияние на формирование шквалов.

Пример применения: Использование уравнений Навье-Стокса и законов сохранения массы, импульса и энергии для создания трехмерной численной модели атмосферы.

Интеграция данных в модель:

Внедрение данных о термодинамических параметрах в математическую модель для проведения численных расчетов.

Пример применения: В модель внедряются данные о температуре, влажности и давлении атмосферы на разных высотах.

Расчеты и прогнозы:

Проведение численных расчетов с использованием математической модели для прогнозирования возможных шквалов.

Пример применения: Модель позволяет предсказать вероятность возникновения сильных ветровых явлений в определенном временном и пространственном интервале.

Валидация и коррекция прогнозов:

Проверка полученных прогнозов на соответствие реальным наблюдениям и коррекция модели при необходимости.

Пример применения: после прогнозирования шквалов, полученные данные сравниваются с фактическими измерениями, и, при необходимости, корректируются.

Мониторинг и анализ результатов:

Систематический мониторинг прогнозов и анализ их точности для постоянного улучшения методики.

Пример применения: Ежедневный мониторинг прогнозов и сравнение с фактическими событиями помогают выявить и устранить возможные ошибки в методике.

Таким образом, применение математического моделирования с учетом термодинамических параметров атмосферы в прогнозировании шквалов представляет собой область крайней актуальности, имеющую прямое влияние на безопасность, экономику и эффективность многих отраслей человеческой деятельности (Пачулия, Экба 2023).

4.2. Алгоритм построения общей статистической модели пространственно-временных колебаний

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 (Ягудин 1971).

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 .

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = k_1 y, \\ \frac{dy}{dt} = -k_2 x \end{cases}$$

$\frac{d^2x}{dt^2} = k_1 \frac{dy}{dt} = -k_1 k_2 x$ (1) - уравнение гармонических колебаний.

так как $-k_1 k_2 = \omega_0^2$, то уравнение (1) запишется в следующем виде:

$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x$ 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 $a_0 = 0, b_0 = 0$.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw}{dt} = k_2 \Delta T \\ \frac{d\Delta T}{dt} = -k_1 w \end{array} \right\}$$

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).

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

$$w = w(0) \cdot \cos \omega_0 t + \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \cdot (\Delta T)_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (1)$$

Далее построим для ветра график по формуле (1) (рисунок 4.1).

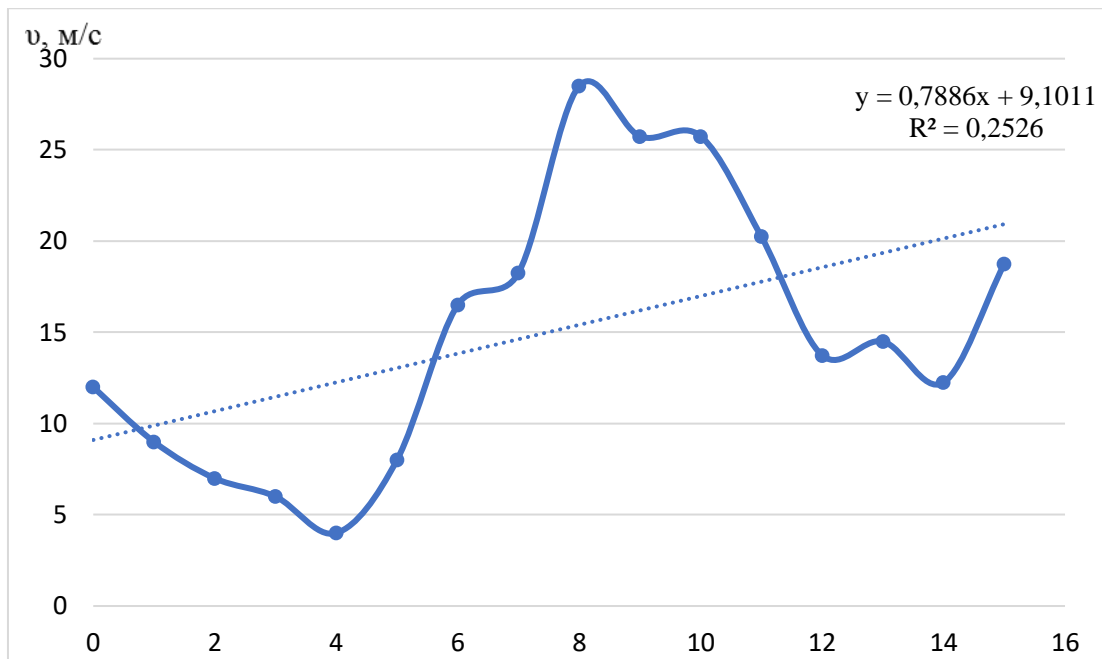


Рисунок 4.1. Распределение скорости ветра более 8 м/с, на основе данных метеорологической станции «Сухумский Маяк».

Прделаем данную работу также для постарения модели для температуры.

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

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

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

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

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

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

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

$$\Delta T = (\Delta T)_0 \cos \omega_0 t - \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \cdot \omega_0 \cdot \sin \omega_0 t \quad (2)$$

По формуле (2) строим график для температуры (рисунок 4.2)

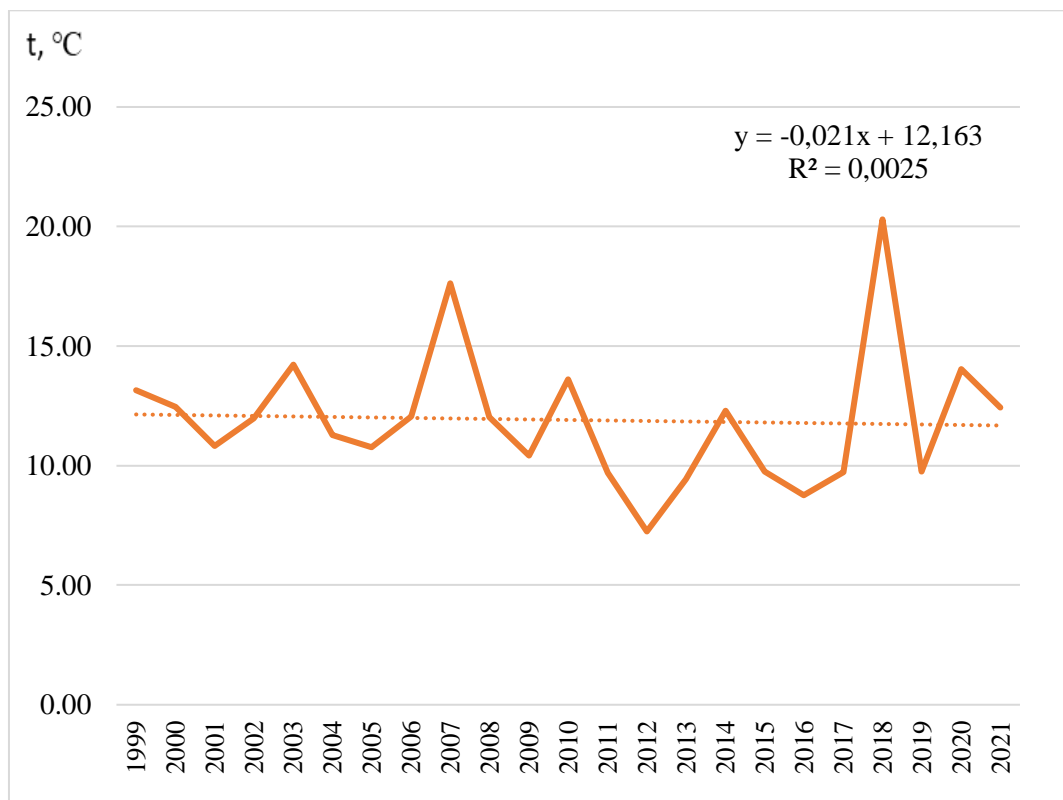


Рисунок 4.2 Распределение температуры на основе данных метеорологической станции «Сухумский Маяк».

После построения графиков по формулам (1) и (2), данные графики необходимо наложить на один график, и тем самым получить график сравнения (рисунок 4.3).

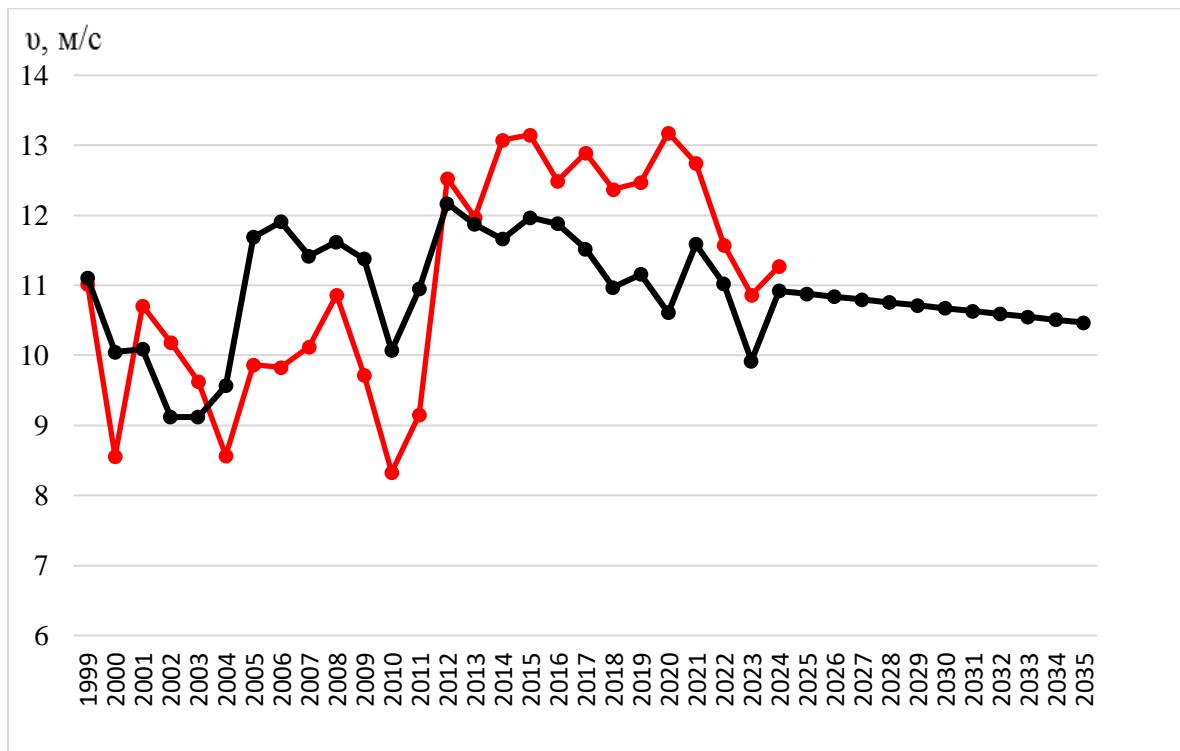


Рисунок 4.3. График сравнения естественного и модельного хода распределения шквалов на основе данных метеорологической станции «Сухумский Маяк» и долгосрочный прогноз шквала.

Фурье анализ.

Проведем анализ Фурье по выведенным формулам. Для этого, создадим, сложную математическую модель для расчета.

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad \frac{dv}{dt} = 0$$

$$\bar{g} - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_s = 0$$

$$\rho = \rho_s + \rho', \quad p = p_s + p'.$$

где ρ_s – статистика плотности, ρ' – возмущение плотности.

p_s – статистика давления, p' возмущения давления.

$$\begin{aligned}
\frac{d\bar{v}}{dt} &= \bar{g} - \frac{1}{\rho_s + \rho'} \nabla(p_s + p') = \bar{g} - \frac{1}{\rho_s \left(1 + \frac{\rho'}{\rho_s}\right)} (\nabla p_s + \nabla p') \\
&= \bar{g} - \frac{1}{\rho_s} \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_s}\right) (\nabla p_s + \nabla p') \\
&= \bar{g} - \frac{1}{\rho_s} \nabla p_s - \frac{1}{\rho_s} \nabla p' + \frac{\rho'}{\rho_s^2} \nabla p_s + \frac{g'}{g_s^2} \nabla p' = -\frac{1}{\rho_s} \nabla p' + \frac{\rho'}{\rho_s^2} \nabla p_s \\
&= -\frac{1}{\rho_s} \nabla p' + \frac{\rho'}{\rho_s} \bar{g}.
\end{aligned}$$

От возмущения плотности и давления мы получим изменения скорости ветра.

$$p = \rho RT$$

$$p_s \cdot p' = R(\rho_s + \rho')(T_s + T') = R(\rho_s T_s + \rho_s T' + \rho' T_s + \rho' T')$$

$$p' = R(\rho_s T' + \rho' T_s)$$

Будем считать, что $p' = 0$, тогда

$$\rho_s T' + \rho' T_s = 0, \quad \rho_s T' = -\rho' T_s, \quad \frac{\rho'}{\rho_s} = -\frac{T'}{T_s}$$

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho_s} \nabla p' - \frac{\bar{g}}{T_s} \cdot T'$$

Дополним нашу модель статистикой:

$$\Delta p = p - p_{\text{ср}}$$

$$Y = \frac{dv}{dt} = k_{21} \Delta T + k_{22} \Delta p$$

$$X = \frac{d\Delta T}{dt} = -k_{11} \Delta v + k_{12} \Delta p$$

$$Z = \frac{d\Delta p}{\Delta T} = k_{31} \Delta T + k_{32} \Delta v$$

найдем тренд: $\hat{T} = a_0 + kt$, где $\Delta \hat{T} = T - \bar{T}$.

X	$\Delta T_2 - \Delta T_1$	$\Delta T_3 - \Delta T_2$...	$\Delta T_{n-1} - \Delta T_n$
t	1	2	...	n

Y	$\Delta v_2 - \Delta v_1$	$\Delta v_3 - \Delta v_2$...	$\Delta v_{n-1} - \Delta v_n$
t	1	2	...	n

Z	$\Delta P_2 - \Delta P_1$	$\Delta P_3 - \Delta P_2$...	$\Delta P_{n-1} - \Delta P_n$
t	1	2	...	n

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Delta\hat{T}}{dt} = k_{11}\Delta\hat{v} + k_{12}\Delta\hat{P} \\ \frac{d\Delta\hat{v}}{dt} = k_{21}\Delta\hat{T} + k_{22}\Delta\hat{P} \\ \frac{d\Delta\hat{P}}{dt} = k_{31}\Delta\hat{T} + k_{32}\Delta\hat{v} \end{array} \right\}$$

Решение ищем в виде:

$$\Delta\hat{T} = A \cdot e^{\lambda t}, \quad \Delta\hat{v} = B \cdot e^{\lambda t}, \quad \Delta\hat{P} = C \cdot e^{\lambda t}.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda A \cdot e^{\lambda t} = k_{11}B e^{\lambda t} + k_{21}C e^{\lambda t} \\ \lambda B \cdot e^{\lambda t} = k_{21}A e^{\lambda t} + k_{22}C e^{\lambda t} \\ \lambda C \cdot e^{\lambda t} = k_{31}A e^{\lambda t} + k_{32}B e^{\lambda t} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda A = k_{11}B + k_{12}C \\ \lambda B = k_{21}A + k_{22}C \\ \lambda C = k_{31}A + k_{32}B \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda A - k_{11}B - k_{12}C = 0 \\ -k_{21}A + \lambda B - k_{22}C = 0 \\ -k_{31}A - k_{32}B + \lambda C = 0 \end{array} \right.$$

Здесь А, В, С – являются столбцами.

Для получения однородного уравнения необходимо, чтобы коэффициент был равен 0.

Воспользовавшись матрицей, вычислим определитель.

$$\begin{aligned} \lambda^3 - k_{11}k_{22}k_{31} - k_{21}k_{32}k_{12} - k_{31}k_{12}\lambda - k_{32}k_{22}\lambda - k_{21}k_{11}\lambda &= 0 \\ \lambda^3 - (k_{31}k_{12} + k_{32}k_{22} + k_{21}k_{11}) \cdot \lambda - (k_{11}k_{22}k_{31} + k_{21}k_{31}k_{12}) &= 0 \\ -k_{31}k_{12} + k_{32}k_{22} + k_{21}k_{11} &= p \\ -k_{11}k_{22}k_{31} + k_{21}k_{32}k_{12} &= q \end{aligned}$$

$$\lambda^3 + p\lambda + q = 0 \quad (1)$$

Решение получим в виде корня.

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2$$

$$\alpha = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}$$

$$\beta = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}$$

$$\lambda_1 = \alpha + \beta$$

$$\lambda_{2,3} = -\frac{\alpha + \beta}{2} \pm i \frac{\alpha - \beta}{2} \sqrt{3} = -\lambda_0 + i\lambda'$$

$$\begin{cases} \Delta \hat{T} = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} + A_3 e^{\lambda_3 t} \\ \Delta \hat{v} = B_1 e^{\lambda_1 t} + B_2 e^{\lambda_2 t} + B_3 e^{\lambda_3 t} \\ \Delta \hat{P} = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t} \end{cases}$$

$$\lambda_{2,3} = -\lambda_0 + i\lambda' \quad (2)$$

$$e^{\lambda_2 t} = e^{-\lambda_0 t + i\lambda' t} = e^{-\lambda_0 t} \cdot e^{i\lambda' t}$$

$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i\sin\alpha$ формула Эйлера.

$$e^{\lambda_2 t} = e^{-\lambda t} (\cos\lambda' t + i\sin\lambda' t).$$

Исследование влияния атмосферной циркуляции на ветровой режим на территории Абхазии выявило четкую взаимосвязь между атмосферными процессами и характеристиками ветровых явлений в регионе. Так как Абхазия находится под действием атмосферной циркуляции умеренных и субтропических широт, условия погоды здесь более неустойчивы, чем в типичной субтропической зоне. Наибольшее значение для Закавказья имеют микропроцессы, находящиеся в значительной зависимости от положения и степени развития азиатского антициклона.

Анализ атмосферной циркуляции позволил выделить основные периоды активности, влияющие на интенсивность и направление ветров. Например, в весенне-летний период преобладают ветры западного направления. Наименьшим значением повторяемости характеризуются ветры северных румбов: наибольшее значение повторяемости северных румбов наблюдается

зимой (3,3%), наименьшее — летом (1,4%). Противоположный характер сезонного хода имеют ветры южного, юго-западного и юго-восточного румбов: в осенне-зимний сезон их повторяемость минимальна (2,9–8%), а в весенне-летний сезон — максимальна (4–9,7%) (Экба, Ахсалба, Хинтуба 2021).

4.3. Опасные явления погоды и их влияние на социально-экономическое развитие Республики Абхазии.

Для территории Республики Абхазия обильное выпадение осадков нередко сопровождается паводками на реках, образованием и сходом селей, оползнями, уничтожением посевов агрокультур и т.п. В связи с этим актуальность исследований сохраняется, в свете протекающих в глобальной климатической системе процессов и связанных с ними рисков увеличения частоты опасных явлений в будущем. Впервые нами проведена статистическая оценка опасных явлений погоды за десятилетний период (Пачулия, Экба 2024).

Исследования явлений природы, отличающихся той или иной частотой или так называемой вероятностью, отличаются разнообразием подходов и возникли достаточно давно. Метеорологическое явление считается опасным (ОЯ), если по своей интенсивности, продолжительности или охватываемой им территории превышает установленные критические пределы, определенные соответствующими Руководящим и Документам и Росгидромета. Под критериями и опасных явлений понимают установленные для определенного региона предельные значения гидрометеорологических величин либо качественные их характеристики (Стойко 1983).

Критерии данных явлений содержатся в следующих научных источниках:

— наставления гидрометеорологическим станциям;

— инструкция гидрометеорологическим станциям по информации об опасных гидрометеорологических явлениях;

— положение о сборе сведений и порядке предупреждений об ОЯ;

— руководящие документы.

К рассматриваемым опасным явлениям на территории Абхазии применялись критерии, принятые и используемые в Северо - Кавказском Территориальном Управлении по Гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Среди рассматриваемых *опасных явлений погоды*:

— *сильные ветры* — приземный ветер со скоростью более 15 м /с;

— *сильные дожди* — обильные осадки с интенсивностью более 30 мм за сутки;

— *град* — атмосферные твердые осадки при диаметре отложений от 5 до 20 мм;

— *шквалы* — горизонтальные вихри при скорости потока более 15 м /с;

— *гололедно - изморзевые явления* — отложения воды и льда на горизонтальной или вертикальной поверхностях при диаметре не менее 20 мм (гололед), не менее 50 мм (изморозь).

Под климатическими рисками будем понимать статистические вероятности наступления тех или иных опасных явлений погоды, рассматриваемых за период времени не менее 30 лет. При этом разнообразие данных явлений, об условленных изменениям и атмосферной циркуляции, определяет соответствующие виды климатических рисков. Например, активизация циклонической деятельности и, как следствие, увеличение приземных барических градиентов способствует повышению риска возникновения сильных и ураганных ветров (Hwang 2015).

В настоящей работе рассмотрены опасные явления погоды (ОЯП), которые проявляются на территории Абхазии.

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. Пример нестационарной оценки суточного количества осадков редкой повторяемости представлен на рисунке 4.4 для станции «Сухумский Маяк».

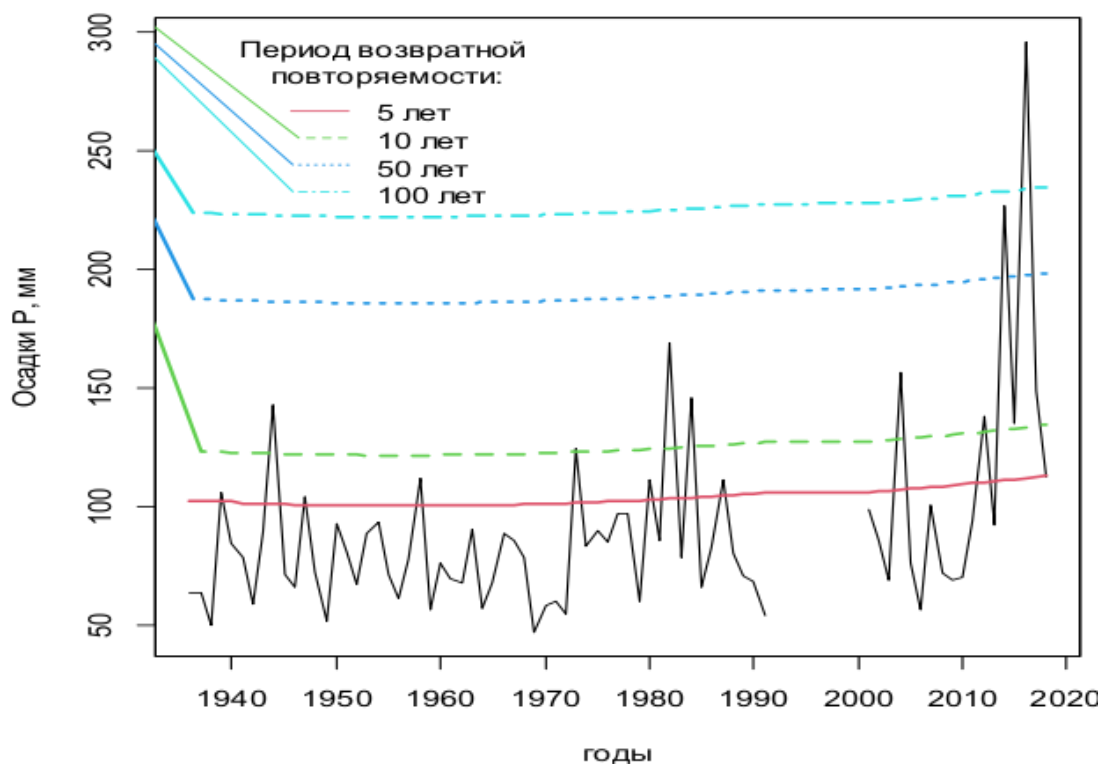


Рисунок 4.4. Распределение максимального суточного количества осадков редкой повторяемости для станций «Сухумский Маяк».

В зависимости от фазы климатического изменения режима увлажнения в регионе, статистические оценки приобретают разные значения. Согласно рисунку 4.4 в современный климатический период следует ожидать больших по величине экстремумов, нежели чем в предыдущий период.

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 (Экба, Ахсалба, Марандиди, Корсантия 2021).

Отметим, что с изменениями глобальных процессов на территории Абхазии участились шквалистые ветра ураганной силой.

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 4.5).

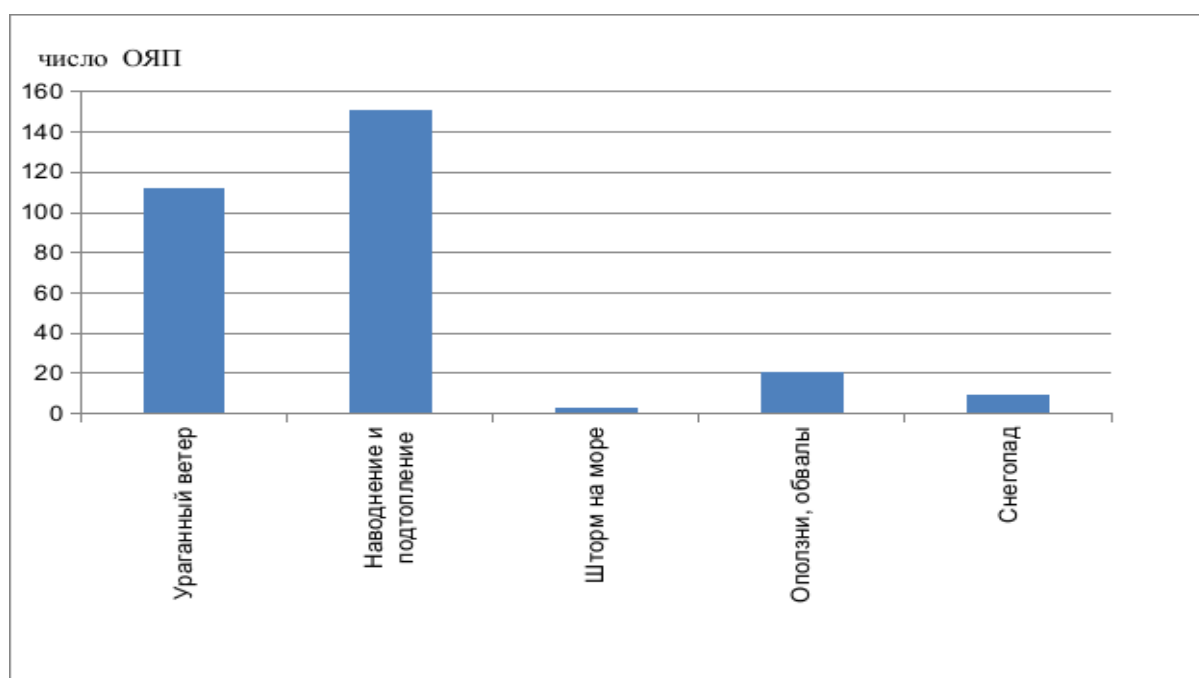


Рисунок 4.5. ОЯП на территории Абхазии по данным МЧС РА за период 2014-2023гг.

Нами также дана оценка распределения ОЯП по районам Абхазии (рисунок 4.6).

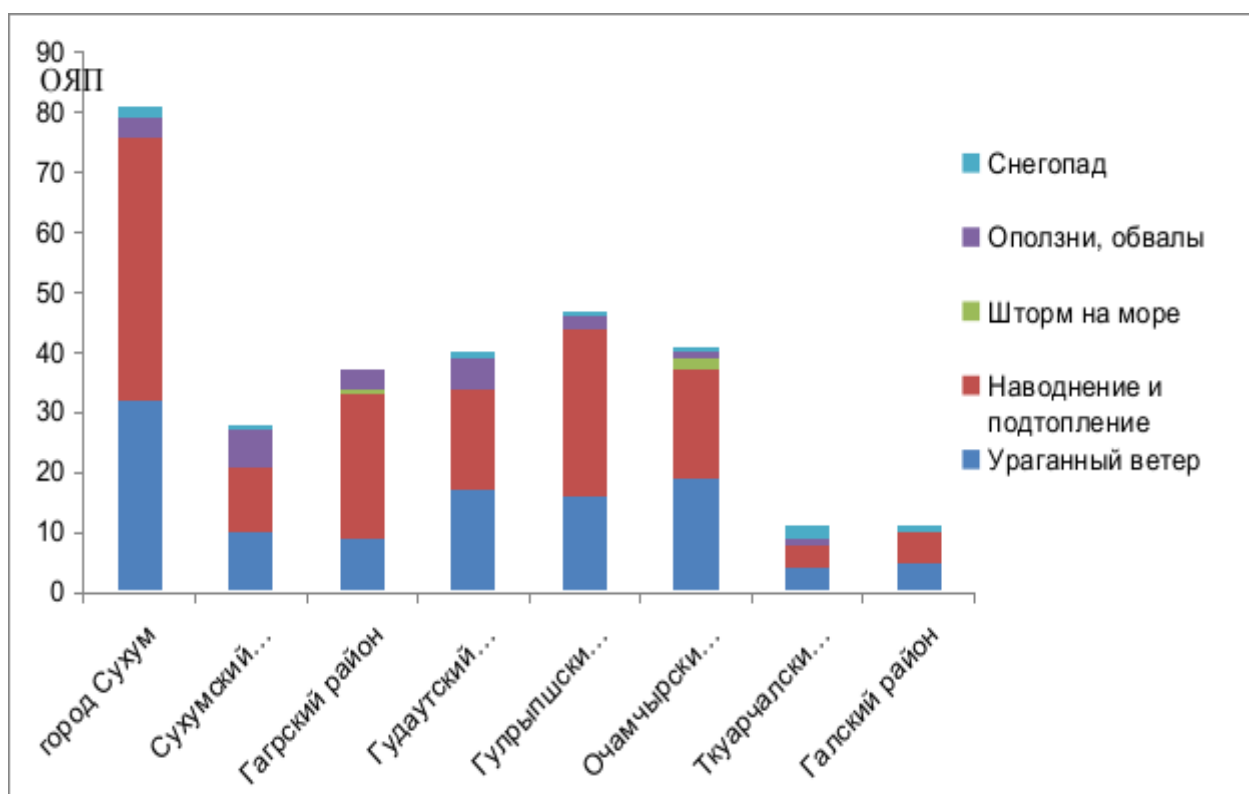


Рисунок 4.6. Динамика ОЯП по районам Абхазии за период 2014-2023гг.

Из рисунка видно, что по проявлению ОЯП за рассматриваемый период доминирует г. Сухум, однако за последние три года частота их проявления преобладает в Гагрском районе (Ахсалба, Кишмария, Пачулия 2024). Не менее опасными стихийными природными явлениями являются лесные пожары, которые каждый год покрывают тысячи гектаров площади в Абхазии (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7. Пожары в селах Очамчырского района, февраль 2024 года.

Причины лесного пожара на территории Абхазии: оставленный в лесу непотушенный костёр и сжигание сухой травы. На рисунке 4.8 и 4.9 приводятся данные по лесным пожарам и площадям возгорания лесных насаждений.

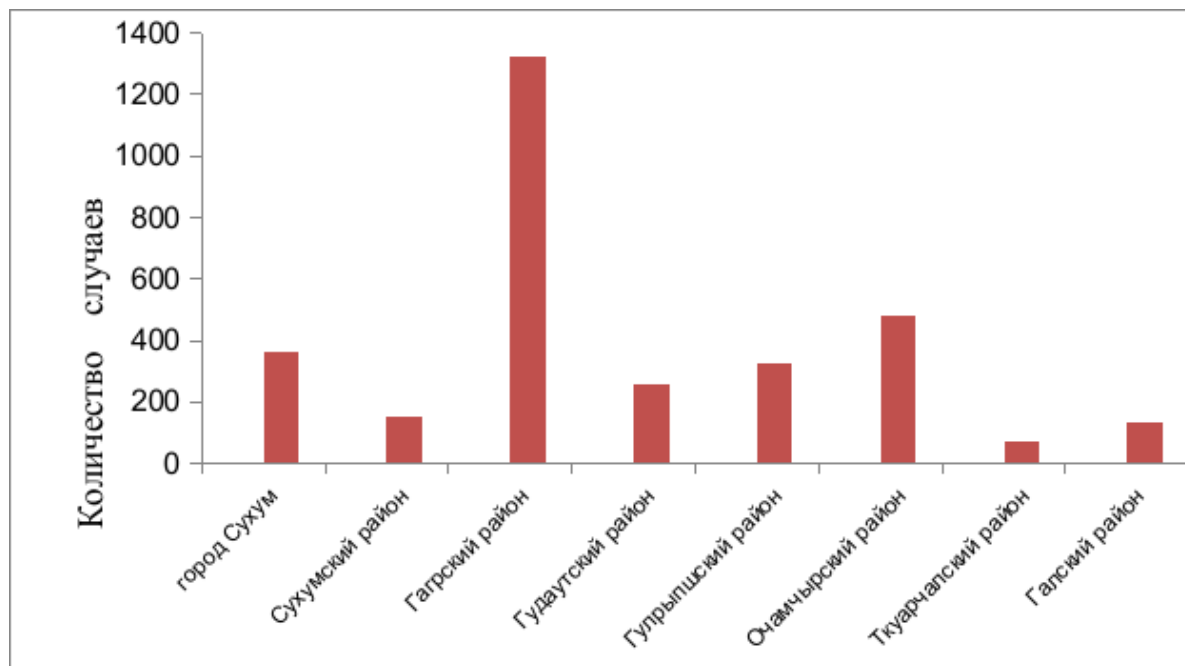


Рисунок 4.8. Лесные пожары на территории Абхазии по данным МЧС РА за период 2014-2023гг.

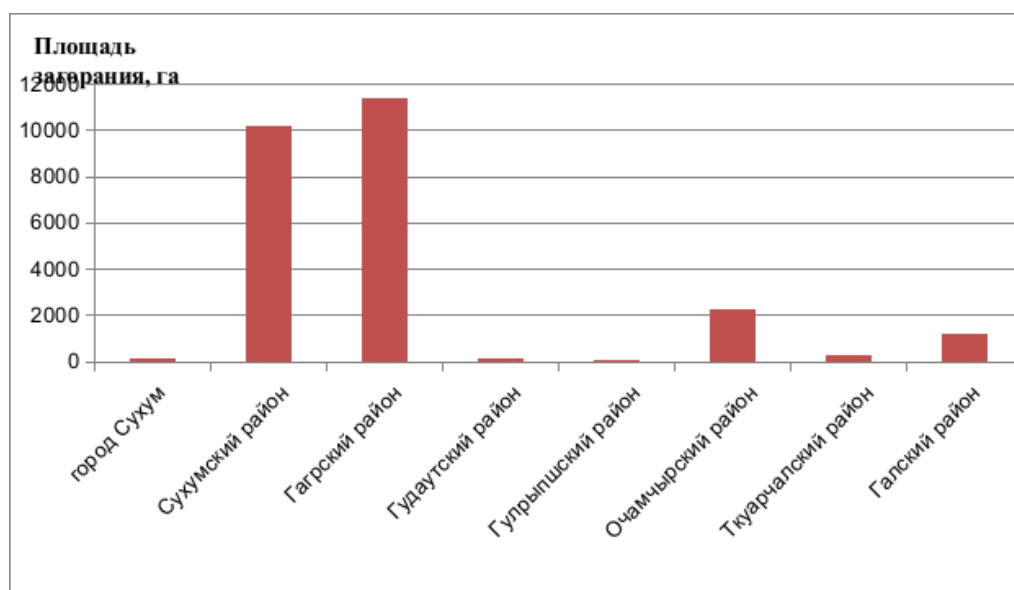


Рисунок 4.9. Площади возгорания по районам Абхазии по данным МЧС РА за период 2014-2023гг.

Наибольшее количество лесных пожаров наблюдается в Гагрском, Сухумском и Очамчирском районах.

Следует отметить, что наблюдается рост материального ущерба от стихийных бедствий. В таблице 4.1. приведены затраты по ликвидации и оказанию материальной помощи гражданам от стихийных бедствий на территории Абхазии (Ахсалба, Кишмария, Пачулия 2024).

Таблица 4.1 – Материальная помощь, оказанная гражданам в результате стихийных погодных явлений за период 2021-2023 гг.

Населенные пункты	Сумма выплат в рублях
Гудаутский	600 000,0
Гагрский	64 424 000,0
Сухум	1 900 000,0
Сухумский	1 789 000,0
Гулрыпшский	1 450 000,0
Очамчырский	1 150 000,0

Таким образом, прогнозирование рисков опасных явлений погоды задача управления их рисками представляет собой необходимость коррекции настоящего экономического развития с учетом вероятностей аномалий и затрат на ликвидацию последствий их возникновения. Или, вообще говоря, целесообразности развития той или иной экономической деятельности в связи со спецификой возникающих развивающихся в данном районе аномалий погоды. Откуда для данной задачи управления рисками определяющими параметрами являются величины затрат на снижение различных видов риска. Решение этой задачи и должно дать ответ на вопрос о том, при каком виде деятельности риск, обусловленный теми или иными аномалиями, является чрезмерным, а какой — приемлемым.

Выводы к главе 4

1. Разработана статистическая модель изменений климата, которая на предстоящие 20 лет описывает климат точнее, чем динамические модели. Выявлено, что от одного естественного климатического периода к другому характер циркуляции на среднем уровне тропосферы изменяется. Разработана модель экстраполяции изменений природно-климатических характеристик предгорной зоны территории, в которой учитываются особенности основных факторов, влияющих на динамику этих характеристик.

2. Основная цель — выявить особенности используемых данных и привести их к виду, позволяющему нивелировать побочные эффекты. С его помощью можно сделать выводы о пространственных закономерностях распределения различных показателей, выявить ключевые факторы, влияющие на значения переменных.

3. 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.

Заключение

Циркуляционные процессы в атмосфере тесно связаны с климатическими условиями. Изменения в циркуляции могут приводить к экстремальным погодным явлениям, таким как засухи, наводнения, волны тепла и холода. Изучение циркуляции атмосферы необходимо для понимания климатических изменений и разработки методов прогнозирования погоды.

Прогнозирование возникновения новых барических образований представляет собой сложную задачу в синоптическом анализе. Это требует глубокого понимания взаимодействия атмосферных фронтов, термических градиентов и вертикальных движений воздуха. Синоптики используют различные методы, включая анализ барической топографии, оценку адвекции тепла и вихря, а также численное моделирование атмосферы.

Точность прогноза зависит от качества исходных данных и адекватности используемых моделей. Несмотря на значительный прогресс в области метеорологии, прогнозирование возникновения новых циклонов и антициклонов остается одной из самых сложных задач, требующих постоянного совершенствования методов анализа и моделирования.

Сильное перемешивание выравнивает не только скорость ветра, но и его направление. Лапласиан для случаев со шквалами должен изменяться от 0 до $-4 \text{ гПа}/(600 \text{ км})^2$, 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%.

Точность прогноза шквала остаётся недостаточной в силу невозможности учёта всего комплекса процессов подсеточного масштаба. В оперативной практике практически отсутствуют методы прогнозирования катастрофических шквалов, скорость ветра при которых превышает 33 м/с.

Исследование влияния атмосферной циркуляции на ветровой режим на территории Абхазии выявило четкую взаимосвязь между атмосферными процессами и характеристиками ветровых явлений в регионе. Анализ атмосферной циркуляции позволил выделить основные периоды активности, влияющие на интенсивность и направление ветров. Климатологический анализ ветрового режима Абхазии выявил характерные черты изменчивости ветровых условий в разные сезоны и периоды года.

Разработанные прогностические модели позволяют с достаточной точностью предсказывать ветровые условия в зависимости от текущей атмосферной циркуляции. на 20 лет и описывает климат точнее, чем динамические модели.

Разработана модель экстраполяции изменений природно-климатических характеристик предгорной зоны территории, в которой учитываются особенности основных факторов, влияющих на динамику этих характеристик.

Полученные результаты могут быть эффективно применены в различных сферах, таких как сельское хозяйство, строительство, энергетика и туризм, для принятия обоснованных решений и планирования деятельности.

Список литературы

1. Алексеев, Н. А. Стихийные явления в природе появление, эффективность защиты / Н. А. Алексеев. - М.: Мысль, 1988. - 256 с.
2. Алексеева А.А. Летние конвективные явления // Гидрометеорологические опасности. М.: КРУК, 2001. С. 127-164.
3. Алексеева А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2014. № 9. С. 5-15.
4. Алексеева А.А. Прогноз ураганных ветров внетропических циклонов на территории России // Метеорология и гидрология. 2017. №1. С. 5-15.
5. Алексеев А.А. Метод прогноза сильных шквалов // Метеорология и гидрология. - №9 – 2014 г.
6. Алексеева А. А. Особенности условий возникновения активной конвекции с сильными шквалами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. №2. – 2019. – С. 41-58.
7. Алексеева А. А. Методы прогноза максимального количества осадков в зонах активной конвекции и альтернативного прогноза сильных ливней и шквалов// Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов - Информационный сборник №34. – 2007. – С. 49 – 69.
8. Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Багров А.Н. Результаты испытания автоматизированного метода прогноза шквалов с детализацией интенсивности в трех градациях (от 20 до 24, от 25 до 32, 33 м/с и более) на основе выходных данных региональной модели с заблаговременностью 12 и 24 ч // Результаты испытания новых и

усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. № 39. С. 61–68.

9. Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру. М.: ТРИАДА ЛТД, 2010. С. 147–159.

10. Алексеева А.А., Песков Б.Е. Шквалово-смерчевые явления 20-21.06.1998 г. в Москве и Подмосковье // Природные опасности России / под общей редакцией В.И. Осипова, С.К. Шойгу. М.: Крук, 2001. Т. 5. С. 159–165.

11. Ахсалба А.К., Евстигнеев В.П., Эмба Я.А. Статистический расчет экстремальных характеристик режима осадков на побережье Абхазии и Краснодарского края // «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий»: Материалы V Междунар. науч.-практ. конф., 20-24 мая 2019 г., Республика Адыгея, г.Майкоп. Часть 1. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019. – С.56-62.

12. Ахсалба А.К., доц. Кишмария Я.Ш., преп. Пачулия Э.В. «Опасные природные явления и их влияние на социально – экономическое развитие республики Абхазия», АГУ.

13. Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Ватиашвили М.Р. Диагноз шквалов по данным МРЛ // Радиолокационная метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 64–67. 18.

14. Бочарников Н.В., Брылев Г.Б., Песков Б.Е. и др. Методические указания по определению шквалов с использованием данных МРЛ. Л.: ГГО, 1988. 23 с. 19.

15. Брылев Г.Б., Огуряев В.С. Радиолокационные критерии шквалов, связанных с кучево-дождевой облачностью// Тр. ГГО. 1976. Вып. 383. С. 67–72. 20

16. . Будилина Е.М., Прох Л.З., Снитковский А.И. Смерчи и шквалы умеренных широт. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 31 с.
17. Багров А. Н., Быков Ф. Л., Гордин В. А. Схема оперативного краткосрочного комплексного прогноза ветра. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 19-28.
18. Борисова В. В., Шакина Н. П. Использование потенциального вихря для расчета высоты и температуры тропопаузы // Тр. ГМЦ СССР. – 1989. – Вып. 305. – С. 98 – 117.
19. Васильев Е.В. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов на европейской территории России: автореф. дис. канд. геогр. наук. М.: Гидрометцентр России, 2009. 25 с.
20. Васильев Е.В., Алексеева А.А., Песков Б.Е. Условия возникновения и кратко-срочный прогноз сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 2009. № 1. С. 5-15.
21. Васильев Е. В., Алексеева А. А., Песков Б. Е. Условия возникновения и краткосрочный прогноз сильных шквалов// Метеорология и гидрология. – 2009. – №.1. – С. 5 – 15.
22. Вильфанд Р. М., Ривин Г. С., Розинкина И. А. Система COSMO-RU негидростатического мезомасштабного краткосрочного прогноза погоды Гидрометцентра России: первый этап реализации и развития. //Метеорология и гидрология. – 2010. – №.8. – С. 5 - 20.
23. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология / В.И. Воробьев. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 616 с.
24. Вельтищев Н. Ф., Жупанов В. Д., Павлюков Ю. Б. Краткосрочный прогноз сильных осадков и ветра с помощью разрешающих конвекцию моделей WRF// Метеорология и гидрология. 2011. № 1. С. 5–18

25. Данилов А. Д., Пилеич А.В. Модели учета тепломассобменных процессов в атмосфере для автоматизированного проектирования технических средств современных метеостанций// Моделирование систем и процессов. 2012. Т. 4. С. 29–33.34.

26. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Математические модели для автоматизированного проектирования метеопрогнозов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. 2010. Т. 6. № 10. С. 118–122.

27. Дашко Н.А. Курс лекций по синоптической метеорологии. Часть 1, раздел 2 – 2005 год.

28. Дядюченко В., Павлюков Ю., Вылегжанин И. Доплеровские радиолокаторы в России // Наука в России. 2014. № 1. С. 23–27.39.

29. Евсеева Н.С., Ромашова Т.В. Опасные метеорологические явления как составная часть природного риска (на примере юга Томской области) // Вестник Том. гос. ун-та. 2011. № 353. С. 199–204.

30. Заводченков А.Ф. «Природа и чрезвычайные ситуации.» Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2005. – 98 с.

31. Засоба В. В. Социальная экология: учеб. пособие. (Ч. 1) / В. В. Засоба; М-во сел. хоз-ва Рос. Федерации, Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. - Новочеркасск: НГМА, 2001. - 252 с.

32. Калинин Н.А.Динамическая метеорология: учеб. пособие / Перм. гос. ун–т. Пермь, 2009. 256 с.42.

33. Калинин Н.А. Мониторинг, моделирование и прогноз состояния атмосферы в умеренных широтах / Перм. гос. ун–т. Пермь, 2015. 308 с.43.

34. Калинин Н.А., Ветров А.Л.Генерация доступной потенциальной энергии вследствие крупномасштабной конденсации в

циклонах умеренных широт // Метеорология и гидрология. 2002. № 4. С. 17–27.

35. Киктев Д. Б., Муравьев А. В., Смирнов А. В. Наука метеорологических параметров и опасных явлений: опыт реализации и перспективы развития. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2019. – № 4. – С. 92-111

36. Критерии и характеристики экстремальных климатических явлений / Под ред. В. Ф. Логинова, Б. И. Сазонова. Л.: Гидрометиздат, 1986. 192 с.

37. Лапчева В.Ф. Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами // Тр. Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 299. С. 32–50.50.

38. Лапчева В.Ф. Условия развития зон активной конвекции со смерчами и сильными шквалами // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 299. С. 39-50.

39. Лапчева В.Ф. Характерные особенности атмосферных процессов различного масштаба при развитии зон активной конвекции со шквалами // Труды Гидрометцентра России. 1996. Вып. 328. С. 124-132.

40. Лосев В.М. Региональная гидродинамическая модель прогноза Гидрометцентра России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 36-58.

41. Опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под ред. К. Т. Логвинова, М. Б. Барабаш. Л.: Гидрометиздат, 1982. 318 с.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. Особенности динамики формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия. Севастополь – 2022 год.

47. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. Прогнозирование и оценка сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия. АГУ – 2023 год.

48. Пачулия Э.В., Эмба 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.

49. Пачулия Э.В., проф. Эмба Я.А. «Условия формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия».

ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки» №12. УДК 551.5. Изд-во «ИП Белкина Е.А.», 2022 г.-С 101

50. Пачулия Э.В., Эмба Я.А «Особенности динамики формирования сильных ветров и шквалов на территории Республики Абхазия». ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки» .УДК 551.5. Изд-во «ИП Белкина Е.А.», 2022

51. Пачулия Э.В., Эмба 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.

52. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. «Роль давления в формировании сильных и шквальных ветров», ВЕСТНИК, АНА, серия «Естественные науки» №12. УДК 551.5. Изд-во «ИП Белкина Е.А.», 2023.

53. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. «Синоптические и термодинамические условия образования шквалов». Вестник. Академия наук Абхазии. Серия «Естественные науки» №14. 2024.

54. Пачулия Э.В., Эмба 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.

55. Пачулия Э.В., Эмба Я.А. «Условие возникновения шквалов на территории Абхазии». Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды». Севастополь 2024 г.

56. Пачулия Э.В., Эмба 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.

57. Песков Б.Е., Снитковский А.И. К вопросу сильных шквалов // Метеорология и гидрология. 1968. № 7. С. 52-57.

58. Песков Б.Е., Шишкин Н.С. К вопросу шквалов // Труды ГГО. 1971. Вып. 262. С. 103-122.

59. Переходцева Э. В. «Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей.» //Труды ГМЦ РФ. – 2010. – Вып. 344. – С. 241 – 253.

60. Поморцева А.А., Калинин Н.А., «Аналитический обзор современного состояния исследований шквалов. Условия и возникновения, методы диагноза и прогноза». 2016 г.

61. Переходцева Э. В. Прогноз сильных шквалов и смерчей в летний период 2009 года на основе статистических моделей. //Труды ГМЦ РФ. – 2010. – Вып. 344. – С. 241 – 253.

62. Песков Б.Е., Снитковский А.И. Термодинамические условия образования шквалов различной силы в центральной части европейской территории СССР // Тр. Гидрометцентра СССР. 1968. Вып. 35. С. 69–79.

63. Решения Центральной методической комиссии по гидрометеорологическим и гелиогеофизическим прогнозам Росгидромета (<http://www.method.meteorf.ru>, дата обращения 25.03.2019 г.).

64. Решетов Г.Д., Чернова Л.Ф. Способ прогноза шквала на 12–24 ч // Метеорология и гидрология. 1976. № 3. С. 15-24.

65. РД 52.27.339-93. Руководство по диагнозу и прогнозу опасных и особо опасных осадков, града и шквалов по данным

метеорологических радиолокаторов и искусственных спутников Земли.
М.: Росгидромет, 1996. 181 с.

66. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. III.
Вып. 2. Л.: Гидрометиздат. 1965. 492 с.

67. Стойко, С. М. Природа-стихия-человек / С. М. Стойко, П.
Р. Третьяк. - Львов 1983. - 120 с.

68. Семенченко Б.А. Физическая метеорология / Б.А.
Семенченко. – М.: Изд-во МГУ, 2002. – 416 с.

69. Севастьянова Л.М. Краткосрочные прогнозы погоды:
учебное пособие / Л.М. Севастьянова. – Томск: Издательский дом
«СКК-Пресс». – 2006. – 168 с.

70. Чайковский В.М. Использование доплеровского
радиолокатора в метеорологии // Вестник Пенз. гос. ун-та. 2015. No 3
(11). С. 143–147.82.

71. Черногубова Ю.Я. Возникновение опасных конвективных
явлений погоды на территории Центрально-Черноземного УГМС и их
прогнозирование // Тр. Гидрометцентра России. 2015. Вып. 357. С. 125–
145.83.

72. Черногубова Ю.Я., Санникова Г.В. Результаты испытания
автоматизированных методов прогноза осадков и шквалов на основе
выходных данных региональной модели Гидрометцентра России с
заблаговременностью 12 и 24 ч по территории ЦЧО // Результаты
испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и
методов гидрометеорологических прогнозов. 2012. No9. С. 91–100.

73. Чечкин С.А. Основы геофизики / С.А. Чечкин. – Л.:
Гидрометео- издат, 1990. – 357 с.

74. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов.
– Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 263 с.

75. Экба Я.А., Ахсалба А.К., «Физическая экология

атмосферы». Сухум: «Академия», 2018, с -431.

76. Экба Я.А., Ахсалба А.К., Марандиди С.И., Корсантия А.З. Трансформация атмосферных осадков на территории Абхазии в связи с региональным потеплением климата. Материалы Всероссийской открытой конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, «Принт Центр» 2021 г. С.460-464.

77. Экба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. Глобальные и региональные (Абхазия) проявления парникового эффекта в атмосфере и на поверхности Земли. Материалы XI всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа». М.: ИИЕТ РАН. Том XI . 2021. С 493-498.

78. Экба Я.А., Пачулия Э.В. «Исследование характеристик и динамики метеорологических образований (циклонов и антициклонов) определяющие климатические условия на территории РА». АГУ 2021 г.

79. Юсупалиев У., Анисимова Е.П., Маслов А.К., Шутеев С.А.К вопросу о формировании и геометрических характеристиках смерча. Ч. I// Прикладная физика. 2001. No 1. С. 56–61. 91.

80. Юсупов Ю.И. Метод прогноза шквалов с использованием термодинамических параметров атмосферы и потенциального вихря Эртеля // Метеорология и гидрология. 2013. No 11. С. 55–63.92.

81. Юсупов Ю.И. К вопросу об оперативном прогнозе шквалов // Тр. ГМНИЦ РФ. 2008. No 342. С. 55–78.

82. Ягудин Р.А. Синоптико-метеорологические и термодинамические условия возникновения шквалов в районе Новосибирска // Тр. НР ГМЦ. Л.: Гидрометеиздат, 1971. Вып. 5. С. 128–142.

83. . Abdoulaev S., Lenskaia O., Marques V.S., et al. Relative Motions in Squall Lines Accompanied by Stratiform Region // Brazilian Journal of Meteorology. 2000. Vol. 15. no. 2. P. 87–102. 95.
84. Braun S.A., Houze R.A.Jr. The heat and potential vorticity budgets of a midlatitude squall line / Sixth Conference on Mesoscale Processes. 1994. Portland, AMS. P. 335–338 .
85. Corfidi S.F. Cold pools and MCS propagation: forecasting the motion of downwind-developing MCSs // Wea. Forecasting. Vol. 18. 2003. P. 997–1017.
86. Doswell C.A., Bosart L.F. Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. A Meteorological Monograph // The American Meteorological Society. 2000. 104 p .
87. Bluestein, H.B. Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes: Volume 1, principles of kinematics and dynamics, –1992.
88. Chagnon J. M., Gray S. L. Horizontal potential vorticity dipoles on the convective storm scale //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography. – 2009. – Vol. 135. – №. 643. – P. 1392-1408.
89. Doswell C. A., Bosart L. F. Extratropical synoptic-scale processes and severe convection //Severe Convective Storms. – American Meteorological Society, Boston, MA, 2001. – P. 27-69.
90. Georgiev C. G. Quantitative relationship between Meteosat WV data and positive potential vorticity anomalies: a case study over the Mediterranean //Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling. – 1999. – Vol. 6. – №.2. – P. 97-109.
91. Halkomb C. and Market P. Forcing, instability and equivalent potential vorticity in a Midwest USA convective snowstorm. Meteorological

Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling.– 2003.– №10.– P. 273 – 280.

92. Hertenstein R. F. A., Schubert W. H. Potential vorticity anomalies associated with squall lines //Monthly weather review. – 1991. – Vol. 119. – №. 7. – P. 1663-1672.

93. Hewson T. D. Objective fronts //Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling. – 1998. – Vol. 5. – №. 1. – P. 37-65.

94. Holton J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. Fourth edition. – Elsevier Academic Press, 2004.

95. Hoskins B. J., Draghici I., Davies H. C. A new look at the ω -equation //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1978. – Vol. 104. – №. 439. – P. 31-38.

96. Hoskins B. J., McIntyre M. E., Robertson A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1985. – Vol. 111. – №. 470. – P. 877-946.

97. Huber-Pock F., Kress C. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products //Meteorology and Atmospheric Physics. – 1989. – Vol. 40. – №. 4. – P. 170-180.

98. Hwang Y. et al. Improved nowcasts by blending extrapolation and model forecasts //Weather and Forecasting. – 2015. – Vol. 30. – №. 5. – P. 1201-1217.

99. Johns R. H., Doswell III C. A. Severe local storms forecasting //Weather and Forecasting. – 1992. – Vol. 7. – №. 4. – P. 588-612.

100. Renard R.J. & Clarke I.C., Experiments in numerical objective frontal analysis. //Mon. Wea. Rev. –1965. –Vol. 93. –P. 547-556.

101. Rotunno R., Klemp J. B., Weisman M. L. A theory for strong, long-lived squall lines //Journal of Atmospheric Sciences. – 1988. – Vol. 45. – №. 3. – P. 463-485.

102. Russell A., Vaughan G. and Norton E. G. Large-scale potential vorticity anomalies and deep convection. //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. –2012. –Vol. 138. –P. 1627 - 1639

Приложение

Защита населения при шквалах, ураганах, бурях, смерчах

По скорости распространения опасности ураганы, бури и смерчи, могут быть отнесены к чрезвычайным событиям с умеренной скоростью распространения, что позволяет осуществлять широкий комплекс предупредительных мероприятий как в период, предшествующий непосредственной угрозе возникновения, так и после их возникновения — до момента прямого воздействия.

Эти мероприятия по времени подразделяются на две группы: заблаговременные (предупредительные) мероприятия и работы; оперативные защитные мероприятия, проводимые после объявления неблагоприятного прогноза, непосредственно перед данным ураганом (бурей, смерчем). Заблаговременные (предупредительные) мероприятия и работы осуществляются с целью предотвращения значительного ущерба задолго до начала воздействия урагана, бури и смерча и могут охватывать продолжительный отрезок времени.

К заблаговременным мероприятиям относятся: ограничение в землепользовании в районах частого прохождения ураганов, бурь и смерчей; ограничение в размещении объектов с опасными производствами; демонтаж некоторых устаревших или непрочных зданий и сооружений; укрепление производственных, жилых и иных зданий, и сооружений; проведение инженерно-технических мероприятий по снижению риска опасных производств в условиях сильного ветра, в т.ч. повышение физической стойкости хранилищ и оборудования с легковоспламеняющимися и другими опасными веществами; создание материально-технических резервов; подготовка населения и персонала спасательных служб. К защитным

мероприятиям, проводимым после получения штормового предупреждения, относят: прогнозирование пути прохождения и времени подхода к различным районам урагана (бури, смерча), а также его последствий; оперативное увеличение размеров материально-технического резерва, необходимого для ликвидации последствий урагана (бури, смерча); частичную эвакуацию населения; подготовку убежищ, подвалов и других заглубленных помещений для защиты населения; перемещение в прочные или заглубленные помещения уникального и особо ценного имущества; подготовку к восстановительным работам и мерам по жизнеобеспечению населения.



г.Сухум (лето 2024 г.)



Г. Сухум (весна 2018 г.)



г.Сухум (лето 2017 г.)



г.Гагра (лето 2023 г.)