

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИИ АКАДЕМИИ НАУК АБХАЗИИ

На правах рукописи

Хинтуба Лолита Вячеславовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ДИНАМИКУ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ
АБХАЗИЯ**

Специальность – 1.6.18 Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сухум – 2025

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

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, Экба Январби Алиевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, Репина Ирина Анатольевна
	кандидат физико-математических наук, Озов Хаути Хабасович
Ведущая организация:	Майкопский государственный технологический университет

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

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

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

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н. /Гицба Я.В./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование факторов, оказывающих влияние на динамику температуры воздуха, имеет высокую актуальность во многих областях, таких как метеорология, климатология, экология и является ключевым показателем климатических изменений. Анализ параметров, влияющих на динамику температуры, помогает уточнить представления о том, какие последствия климатических изменений возможны в будущем, и какие меры можно предпринять для их смягчения. Надёжный прогноз погоды будет являться важным фактором для различных сфер деятельности в Абхазии, таких как сельское хозяйство, энергетика, туризм и авиация.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование факторов, оказывающих влияние на динамику температуры воздуха на территории Республики Абхазия, в частности воздействие вулканических извержений и парникового эффекта.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведение ре-анализа среднегодовых значений температуры приземного слоя воздуха (ПСВ) с применением статистических методов и расчетом отклонений и индексов для оценки воздействия геофизических факторов.
2. Анализ влияние газовых компонент атмосферы (метан, озон, водяной пар и др.) на парниковый эффект с использованием дистанционных данных.
3. Изучение влияния вулканических извержений на температурный режим в Абхазии и на Северном Кавказе.
4. Оценка влияния абсолютной и относительной влажности на режим температуры приземного слоя воздуха и атмосферные осадки.
5. Построение долгосрочного статистического прогноза изменений температуры в г.Сухум.

Научная новизна диссертации состоит в следующем:

- Проведен комплексный анализ временных рядов температуры приземного слоя воздуха в г. Сухум за период 1961–2023 гг.
- Выделены трендовые и циклические компоненты температурных рядов с применением быстрого преобразования Фурье и вейвлет-анализа.
- Установлены связи между температурными аномалиями приземного слоя воздуха и вулканической активностью в причерноморском регионе.
- Обнаружено влияние солнечных циклов на температурные колебания в приземном слое воздуха в причерноморском регионе.
- Установлены количественные зависимости между абсолютной влажностью и температурой ПСВ, а также между относительной влажностью и количеством осадков.

- Проведен анализ роли водяного пара как ключевого парникового газа причерноморском регионе.
- Построен долгосрочный статистический прогноз температурной динамики для г.Сухум.

Научная и практическая значимость. Результаты, полученные в работе, углубляют понимание природы климатических факторов, оказывающих влияние на процессы в приземном слое атмосферы и дополняют уже известные теоретические и экспериментальные результаты. Практическая значимость работы определяется возможностью использования результатов исследования в прогнозировании температуры приземного слоя воздуха на территории Республики Абхазия в г. Сухум.

Достоверность. В работе использованы официальные и проверенные метеорологические данные, предоставленные Институтом экологии (отдел Гидрометеорологического и экологического мониторинга), АИСОРИ (автоматизированная информационная система), а также дистанционные данные национальных и международных климатических служб, включая ERA5 и NASA. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных статистических методов анализа, таких как корреляционный, регрессионный, спектральный и вейвлет-анализ, которые адекватно отражают временные и пространственные вариации температуры приземного слоя воздуха.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что в годы, совпадающие с извержениями вулканов, когда повышаются аэрозольных выбросов и радиационного баланса, наблюдается повышение температуры приземного слоя воздуха в Абхазии и на Северном Кавказе, в то время как в поствулканический период фиксируется ее понижение.
2. Показано, что среднегодовые значения абсолютной влажности изменяются синхронно с температурой приземного слоя воздуха (коэффициент корреляции $r > 0,85$). Выявлено, что относительная влажность оказывает статистически значимое влияние на количество и интенсивность атмосферных осадков (до $r \approx 0,7$, например, в г. Ставрополь). Полученные результаты позволяют уточнить региональные особенности влагооборота в пространственном распределении Причерноморья и сопредельных территорий Кавказа.
3. Установлено, что для Причерноморского региона впервые проведена количественная оценка вклада водяного пара в формирование регионального парникового эффекта. Выявлено, что рост среднегодовой температуры приземного слоя воздуха в Абхазии за период 1990–2023 гг. составил 1,6 °С, из которых около 1,4 °С ($\approx 87\%$) обусловлены изменениями содержания водяного пара, который был рассчитан по формуле. Таким образом, подтверждена ведущая роль водяного пара как основного парникового газа в регионе: его вклад в суммарный радиационный эффект оценивается на уровне до 70%, что

согласуется с глобальными тенденциями, но впервые количественно уточнено для условий Причерноморья.

4. Разработан долгосрочный статистический прогноз изменения температуры приземного слоя воздуха для города Сухум с использованием метода Фурье и модели SARIMA. Согласно результатам прогноза, на период 2025–2035 гг., ожидается относительная стабильность температурного режима с незначительным ростом среднегодовых значений. С вероятностью 95% прогнозируемые среднегодовые температуры будут находиться в диапазоне 14,3–17,0 °С, при средней ожидаемой погрешности прогноза порядка $\pm 1,0$ °С. Дополнительно, долгосрочный прогноз до 2042 г., построенный на основе метода линейной регрессии, свидетельствует о возможном повышении средней температуры на 0,7–1,5 °С относительно современных климатических условий.

Личный вклад соискателя. Самостоятельно проведён анализ среднегодовых температур с использованием современных статистических методов, включая расчёт отклонений от климатической нормы и температурных индексов. Проанализировано влияние геофизических факторов, таких как атмосферные газовые компоненты, влажность воздуха и вулканическая активность, на формирование температурного режима приземного слоя воздуха. Для оценки вклада парниковых газов использованы данные дистанционного зондирования, которые были интерпретированы. Основные выводы и положения диссертационной работы также сформулированы лично автором.

Апробация работы. По теме диссертации опубликована 30 научных статей, из них 7 — в журналах, рекомендованных ВАК АНА, и 2 — в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

Результаты исследований были доложены на следующих конференциях:

1. «Воздействие вулканов на климат». Тезисы докладов (молодежная секция) Луганск: изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2018.
2. Материалы V Международной научно-практической конференции «Влияние стратосферного аэрозоля на температуру приземного слоя воздуха». Часть 2 – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019.
3. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» («ГЕОКАВКАЗ-2022»). 15-19 июня, Махачкала -2022г.(онлайн).
4. Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды. Доклады IV Международной научной конференции. г. Ставрополь. 2022 г. (онлайн).
5. Абхазский Государственный Университет. Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых физико-математического факультета. 11-22 апреля 2022 г. (очная).
6. Научная конференция аспирантов и молодых ученых Абхазии, посвященная 25-летию юбилею

Академии наук Абхазии (2–3 ноября 2022 г.) (очная).

7. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» («ГЕОКАВКАЗ-2023»). Владикавказ -2023 г. (онлайн)
8. Абхазский Государственный Университет. Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых физико-математического факультета. 3-7 апреля, 2023 г. (очная)
9. Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологии» в Майкопском государственном технологическом университете г. Майкоп, 2023 г. (очно).
10. Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды». Тема доклада «Оценка влияния парниковых газов на температуру приповерхностного слоя воздуха в Абхазии». Севастополь 2024г. (онлайн)
11. Второй Абхазский форум молодых ученых Академии наук Абхазии. Тема доклада «Анализ тренда и цикличности температуры ПСВ на территории Республики Абхазия». Сухум 2024г. (очно)
12. Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава. Абхазский Государственный Университет. Апрель 2025г. (очная).
13. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Тема доклада «Анализ температурных тенденций в г. Сухум и использование метода Фурье для среднесрочного прогноза климата». Майкоп 2025. 12-16 мая.
14. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Тема доклада «О влиянии внутренних гравитационных волн на вертикальное распределение водяного пара». Майкоп 2023. 12-16 мая.
15. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Тема доклада «Водяной пар в атмосфере и его роль как парникового газа». Майкоп 2025. 12-16 мая.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 135 страниц, включая 42 рисунка, 13 таблиц. Список литературы содержит 100 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведены результаты обзора научной литературы на тему «Климатическая система Земли и влияние отдельных ее компонент на динамику климата».

Во второй главе. Проведен анализ данных о средних месячных температурах приземного слоя воздуха в городе Сухум за период 1961–2023 гг. Самым тёплым за весь период наблюдений стал 2010 год, когда среднегодовая температура достигла 18,6 °С, именно в этом году были зафиксированы рекордные значения в июне, июле, августе, сентябре и декабре. Самым холодным оказался 1992 год со среднегодовой температурой 12,9 °С, особенно выделяющийся минимальной температурой февраля — 2,2 °С. Среди аномалий отмечаются необычно прохладный июль 2023 года (17,1 °С) и экстремально жаркий август 2010 года (29,7 °С).

С целью анализа динамики климатических изменений были выделены два характерных интервала: 1961–1990 гг. — для оценки наличия устойчивых температурных трендов, и 1991–2020 гг. — для анализа трансформации температурного режима в условиях глобального потепления.

В настоящее время климатические нормы обновляются каждые 30 лет, и текущий базовый период охватывает 1991–2020 гг., в то время как предыдущий период включает 1961–1990 гг. На основе данных среднегодовых температур для г. Сухум проведен анализ изменения климатической нормы и проверка статистической значимости этих изменений.

Таблица 1- Сравнение характеристик среднемноголетнего годового хода температуры за периоды 1961- 1990 гг. и 1991–2020 гг.

	1961–2020 гг.	1961–1990 гг.	1991–2020 гг.
Среднее	14,95	14,40	15,50
Стандартная ошибка	0,13	0,12	0,21
Медиана	14,78	14,36	15,61
Стандартное отклонение	1,03	0,65	1,17
Дисперсия выборки	1,07	0,42	1,37
Эксцесс	-0,32	-0,16	-0,30
Асимметричность	0,22	0,49	0,14
Интервал	5,75	2,99	5,75
Минимум	12,87	13,42	12,87
Максимум	18,62	16,41	18,62

Из таблицы 1 видно, что среднегодовая климатическая норма температуры в городе Сухум увеличилась на 1,1 °С — с 14,4 °С в период 1961–1990 гг. до 15,5 °С в период 1991–2020 гг. Для оценки статистической значимости зафиксированных изменений были сформулированы и проверены соответствующие гипотезы:

- **Нулевая гипотеза (H₀)** – изменение климатической нормы незначительно и случайно; глобальное потепление не наблюдается.
- **Альтернативная гипотеза (H₁)** – изменение климатической нормы статистически значимо, глобальное потепление актуально.

Проверка гипотез показала, что можно говорить о глобальном потеплении климата, наблюдаемом в г. Сухум за период 1961–2020 гг.

Также медиана выросла на 1,25 °С (с 14,36 °С до 15,61 °С). Анализ асимметричности показывает умеренную правостороннюю асимметрию для периода 1961–1990 гг. (0,49), что указывает на тенденцию к более теплым годам в конце этого периода, и слабую правостороннюю асимметрию для периода 1991–2020 гг. (0,14), что свидетельствует о более равномерном распределении температур с общим сдвигом к более высоким значениям. Увеличение дисперсии (с 0,42 до 1,37) и интервала температур во втором периоде указывает на рост изменчивости и экстремальных значений, что может быть связано с климатическими изменениями.

На протяжении всего исследуемого периода в Абхазии наблюдается общая тенденция к повышению температуры приземного слоя воздуха. Особенно ярко эта тенденция проявилась в 1999–2010 гг., когда был зафиксирован локальный максимум среднегодовой температуры — 18,6 °С. (рисунок 1).

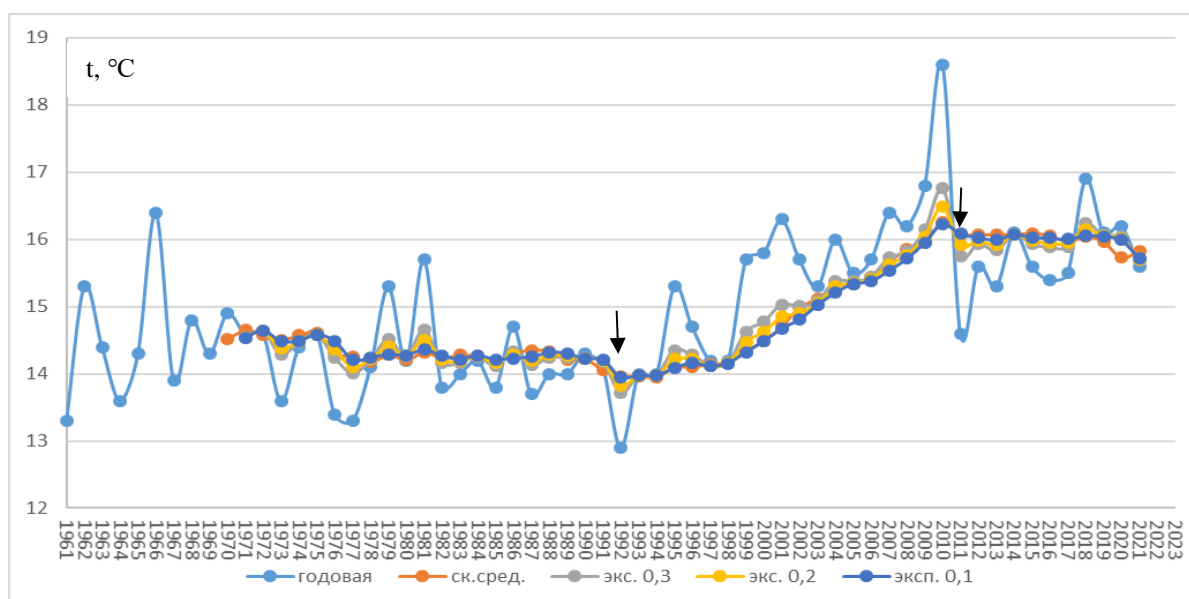


Рисунок 1. Среднегодовая температура и скользящие средние пятилетние температуры приповерхностного воздуха, г. Сухум (ГМС «Сухумский Маяк»)

Из рисунка 1 следует, в году, следующем за вулканическим извержением, на территории Абхазии отмечается заметное снижение температуры приземного слоя воздуха. Так, после извержения вулкана Пинатубо среднегодовая температура снизилась на 1,3 °С по сравнению с годом извержения, а после извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия, 14–19 апреля 2010 года) разница составила около 3,8 °С.

Глобальные температуры тоже реагируют на вулканические извержения, понижения температур составили: вулкан Эль-Чичон, 1982 г. -0,1 °С; Пинатубо, 1991 г., -0,1 °С; Эйяфьядлайёкюдль, 2010 г. -0,2 °С. Но поскольку глобальные температуры являются следствием значительных пространственно-временных осреднений, их амплитуда колебаний существенно меньше региональных. Рассмотрение динамики глобальной температуры приземного слоя воздуха за 1961-2023 гг. позволяет выделить ряд специфических черт. Первое, это ярко выраженная за 1961-2023 гг. тенденция к росту температуры. Второй особенностью можно считать наличие локальных максимумов температуры, наблюдавшиеся в 1940-ых, 1980-ых и в период после 2000-ых годов. Наличие этих трёх максимумов интерпретируется как проявление 60-70-летних климатических циклов. Третья особенность, проявляющаяся на кривой 5-летнего скользящего среднего, состоит в фиксации локальных максимумов температуры с периодичностью, варьирующей от 6 до 11 лет.

Для временного ряда среднегодовых температур было проведено экспоненциальное сглаживание, где можно выделить роль вулканов при рассмотрении экспоненциальных скользящих средних (рисунок 2).

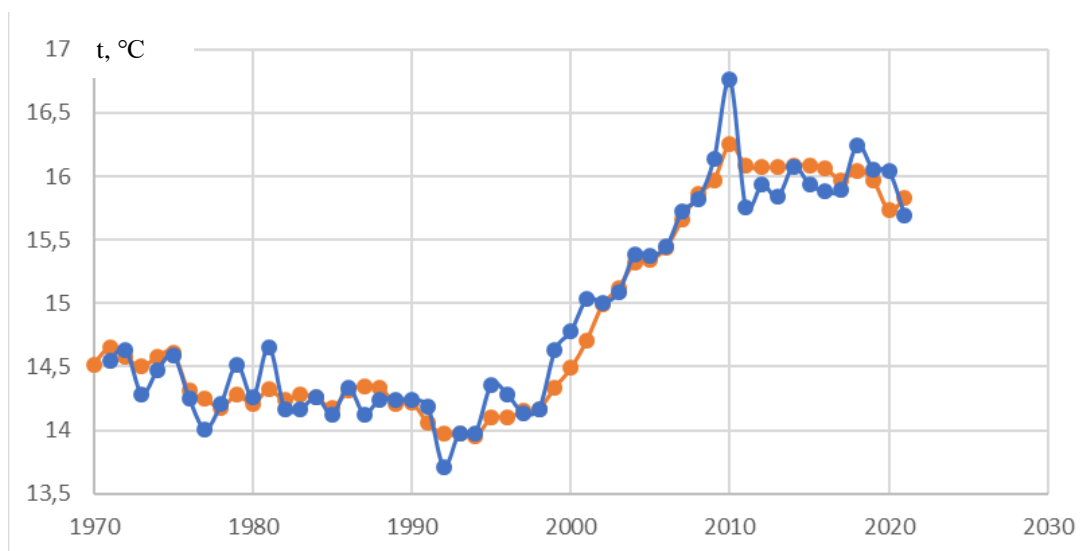


Рисунок 2. Простое и экспоненциальное сглаживание при альфа (α), равном 0,3 (скользящее среднее за 10 лет)

На рисунке 2 хорошо видны «скачки» на графиках, которые не связаны с сезонными факторами. Прежде всего, можно обратить внимание на характер изменения температуры и его скользящих средних в 1990 – 1995 гг. и 2010 – 2012 гг. Это связано с извержениями вулканов Пинатубо (1991 г.) и Эйяфьядлайёкюдль (2010 г.). Кроме того, на графиках экспоненциальной скользящей средней температуры мы видим другие пики, которые также могут быть связаны с извержениями вулканов: 1980 г. – Сент-Хеленс; 1982 г. – Эль-Чичон.

Для выявления более тонких механизмов воздействия вулканической тефры на приземную температуру воздуха нами были исследованы отклонения фактических среднемесячных температур от средних многолетних значений в год извержения и в год, следующий за извержением вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия, 2010). При этом, чтобы выделить сигнал вызванный воздействием вулканической тефры на ТПСВ на фоне меняющейся сезонной температуры, нами были использованы не абсолютные значения температур, а

температурные индексы $I = \frac{\Delta t}{t_{\text{ср}}}$ представляющие собой отношение отклонения температуры от среднего значения Δt к самому значению $t_{\text{ср}}$. Расчёты средних значений параметров за соответствующие периоды и значения температурных индексов представлены на (рисунок 3).

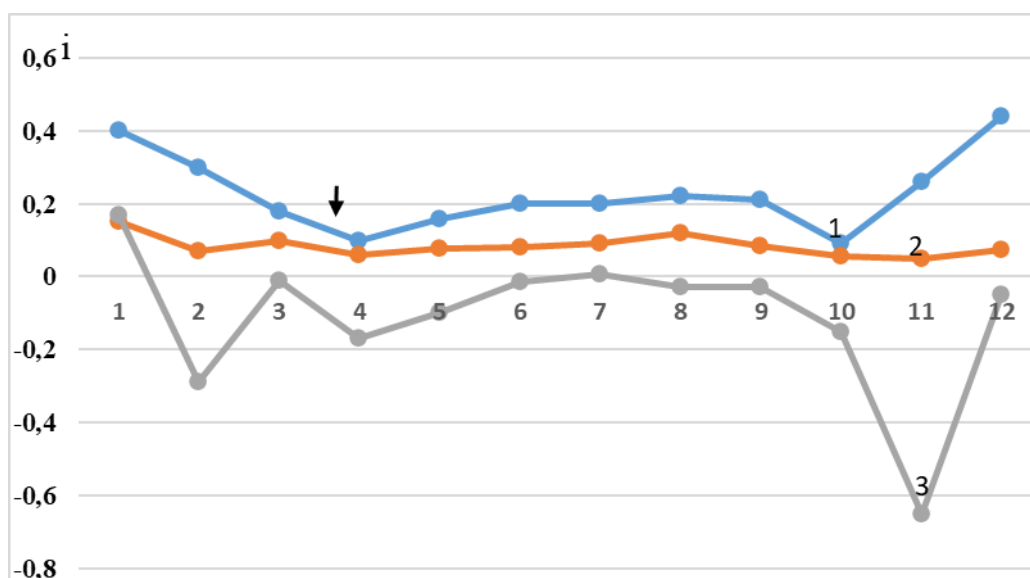


Рисунок 3. Среднемесячное распределение температурных индексов в год извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия, 2010) – 1, индексы средних многолетних значений 1994-2017гг. по отношению к 1961-1990 гг. -2, индексы температур 2011 г. по отношению к средним значениям за период 1994-2017 г.

Графики распределения температурных индексов, изображённых на рисунке 3, показывают существенное отличие хода параметров при извержении вулкана и в последующие годы. После извержения вулкана в течении нескольких месяцев до сентября температура ПСВ повышалась,

несмотря на значительную запылённость атмосферы. Резкое понижение температуры ПСВ в сентябре связано с влиянием стратосферного аэрозоля, который в течение пяти месяцев имел возможность распространиться на значительную часть земной атмосферы и тем самым ослабить солнечную радиацию на значительных площадях земной поверхности.

Анализ временного ряда среднегодовых температур по городам Кавказа, показал, что в общем случае наиболее значимые понижения температур наблюдаются в регионах с континентальным климатом. В прибрежных пунктах наблюдается смягчающее действие морских акваторий. При этом в конце зимы (февраль) и последнего осеннего месяца (ноябрь) в год после извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия, 2010г), температура синхронно во всех пунктах наблюдения резко понижается. В таблице 2 указана тенденция изменения среднегодовых температур приземного слоя воздуха на шести метеостанциях (Сухум, Сочи, Туапсе, Анапа, Краснодар, Владикавказ, Ставрополь).

Таблица 2- Перепады среднегодовых температур ПСВ, под воздействием извержения вулканов

Пункт наблюдения	Эль-Чичон $\Delta t^{\circ}C = t_{83} - t_{82}$	Пинатубо $\Delta t^{\circ}C = t_{92} - t_{91}$	Эйяфьядлайёкюдль $\Delta t^{\circ}C = t_{11} - t_{10}$
<i>Сухум</i>	-0,2	-1,2	-4
<i>Сочи</i>	0,1	-1,2	-3
<i>Краснодар</i>	-1,3	-0,5	-2,6
<i>Ставрополь</i>	-1,3	-1	-3
<i>Владикавказ</i>	-2,1	-0,7	-2,7
<i>Анапа</i>	-0,4	-0,5	-2,7
<i>Туапсе</i>	-0,1	-0,9	-2,9

Несмотря на расположение и различные климатические зоны, города Кавказа имеют практическую синхронность. Коэффициент корреляции равен $r > 0,85$, что указывает на высокую степень зависимости, с уровнем статистической достоверности 1 %. Кроме того, аналогичная синхронность отмечается в резком снижении среднегодовой температуры приземного слоя воздуха в год, следующий за извержением вулкана. В зависимости от удалённости пункта от вулканического очага, особенностей распространения тифы в тропосфере и стратосфере эффект понижения температуры может быть различным. Помимо вулканов, на температуру приземного слоя воздуха влияют и другие факторы. Одним из таких факторов, рассмотренных в данной работе, являются солнечные циклы. Для их анализа применялся вейвлет-анализ — эффективный

метод исследования временных рядов, позволяющий выявлять временные и частотные характеристики климатических процессов.

В результате анализа строится скалограмма — графическое представление распределения энергии сигнала по времени и масштабам (обратным частотам). По горизонтальной оси откладывается время, по вертикальной — период колебаний, а цветовая шкала отражает интенсивность сигнала. На языке Python построена скалограмма для временного ряда, что позволило выявить циклы, в том числе переменные (рисунок 4).

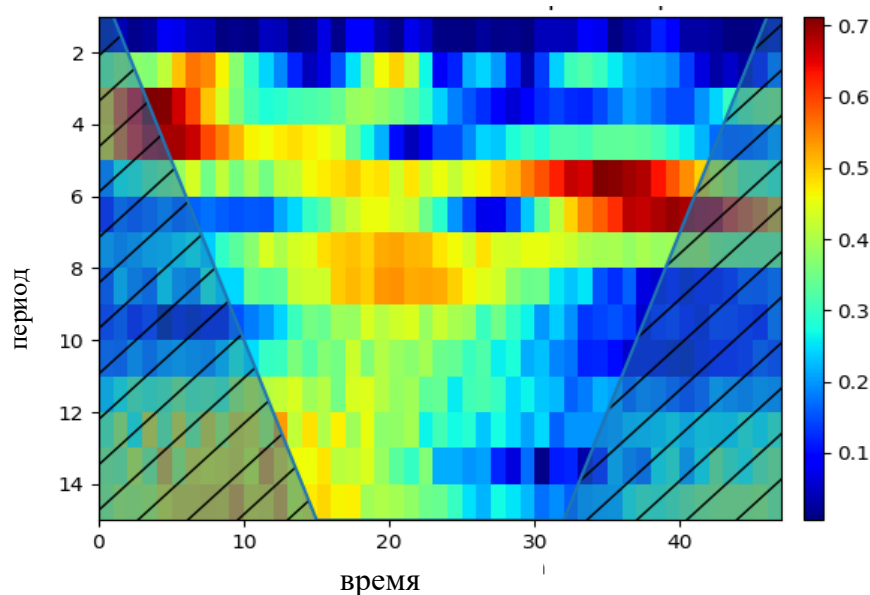


Рисунок 4. Вейвлет-анализ ВР среднегодовых значений температур для г. Сухум (1961 – 2008 гг.)

На рисунке 4 видно, что наблюдаются переменные периоды 4-6 лет и 8-13 лет (второй из них может быть связана с 11-летним циклом, который на самом деле варьируется примерно от 9 до 13 лет), также виден слабый цикл с периодом 2-3 года (возможно, квазидвухлетний). Но, как мы видели из рисунка 1, колебания с периодом в 10 лет могут получиться не за счет солнечных циклов, а в результате сложения двух колебаний с периодами, близкими к годовому.

В третьей главе диссертационной работы проанализировано влияние газовых компонент атмосферы на динамику температуры приземного слоя воздуха на территории Республики Абхазия. Особое внимание уделено воздействию парниковых газов — диоксида углерода, метана, озона и водяного пара, на формирование температурных аномалий.

На рисунке 5 представлен график временных рядов углекислого газа (CO_2) для территории Абхазии за 2010-2017 гг.

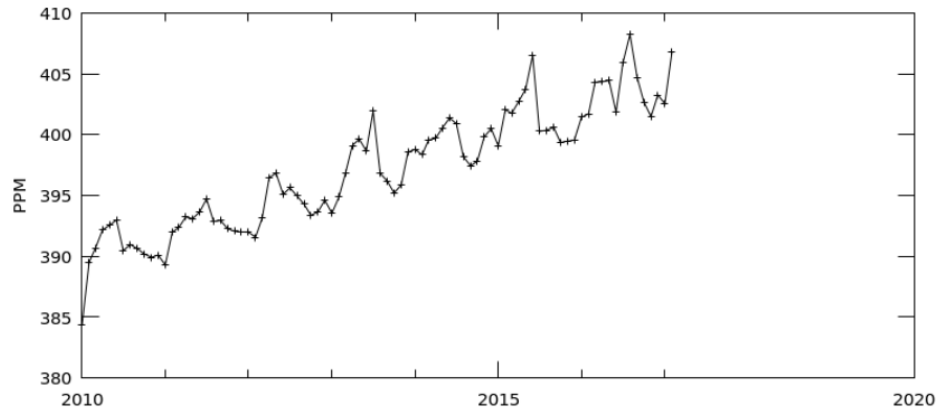


Рисунок 5. Средняя молярная доля CO₂ (ppm) в тропосфере над территорией Абхазии по данным спутниковых ИК-измерений (январь 2010 г. – февраль 2017 г.). NASA GIOVANNI.

Анализ данных, представленных на рисунке 5, показывает, что минимальная концентрация углекислого газа (384 ppm) была зафиксирована в 2010 году, тогда как максимальное значение (408 ppm) наблюдалось в конце 2016 года.

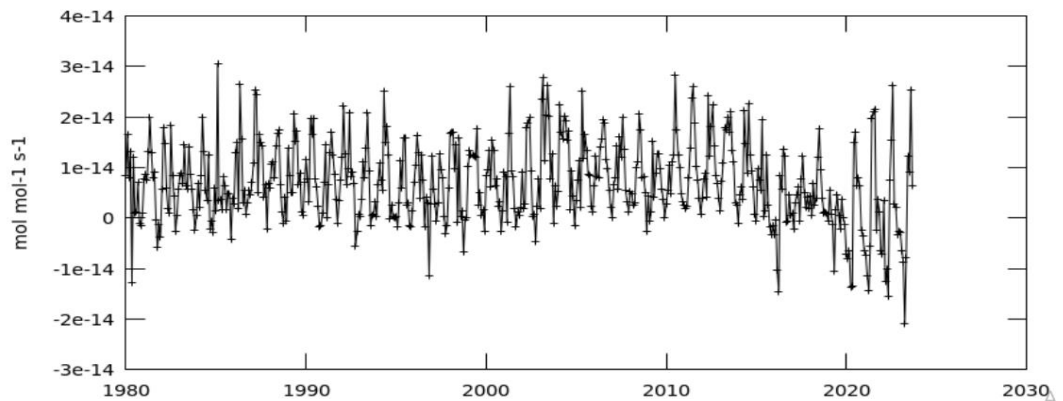


Рисунок 6. Усредненная по площади тенденция анализа общего содержания озона с 1980-2023 гг. на территории Республики Абхазия. NASA GIOVANNI.

Из рисунка 6 следует, что нет явной тенденции к устойчивому увеличению или уменьшению озона.

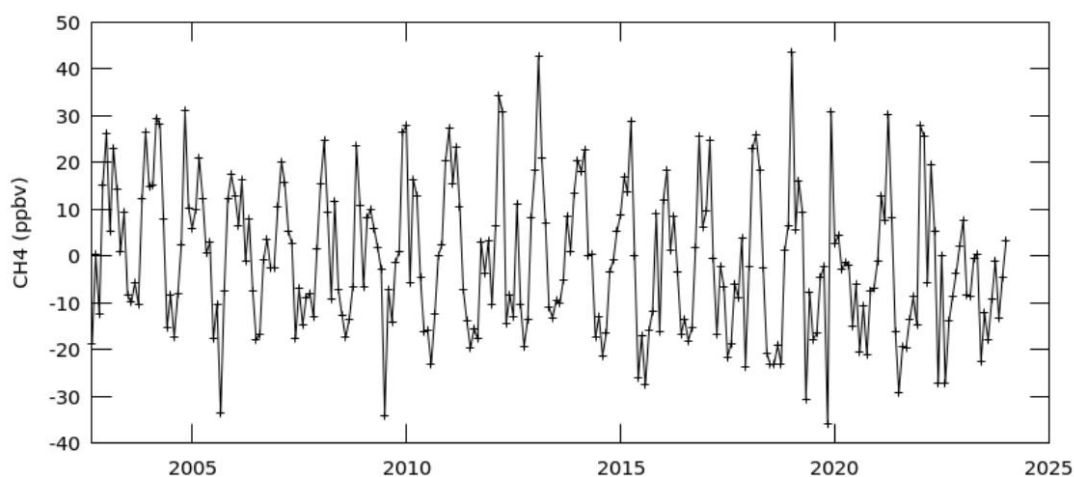


Рисунок 7. Усредненная по площади различия молярной доли метана с 2002-2024 гг. на территории Республики Абхазия. NASA GIOVANNI.

Из рисунка 7 следует, что за последние несколько лет идет тенденция понижения количества метана в атмосфере на территории Республики Абхазия. Максимальная концентрация составила около 41 ppbv в 2019 г.

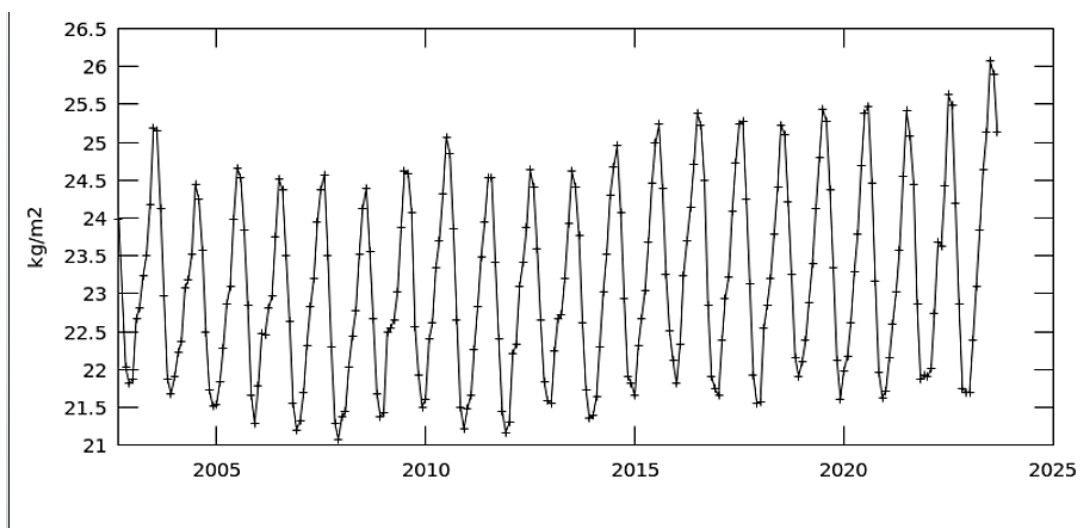


Рисунок 8. Временной ряд, усредненное по площади общее количество водяного пара в столбе (дневное время, по спутниковым данным AIRS – Atmospheric Infrared Sounder) ежемесячно 1 град. кг/м² за период с сентября 2002 г. по сентябрь 2023 г. NASA GIOVANNI.

На рисунке 8 прослеживаются нерегулярные колебания, не связанные с сезонной цикличностью.

Результаты анализа свидетельствуют, что ключевым фактором радиационного потепления в регионе выступает водяной пар, механизм воздействия которого реализуется через положительную обратную связь с температурой приземного слоя воздуха. При этом не выявлено статистически значимой связи между динамикой концентрации CO₂ и изменениями температуры в исследованный период.

В четвертой главе исследована роль влажности атмосферного воздуха в климатической системе. Влажность атмосферного воздуха играет важную роль в климатической системе. Она влияет на формирование и распределение облачности, а также на циркуляцию воздушных масс в атмосфере.

На территории Республики Абхазия влажность испытывает определенные колебания, вызванные, видом подстилающей поверхности, развивающимися здесь атмосферно-циркуляционными процессами и орографической структурой. Высокая абсолютная влажность характерна для всей Абхазии.

Среднегодовая абсолютная влажность воздуха меняется синхронно со среднегодовой температурой воздуха (рисунок 9).

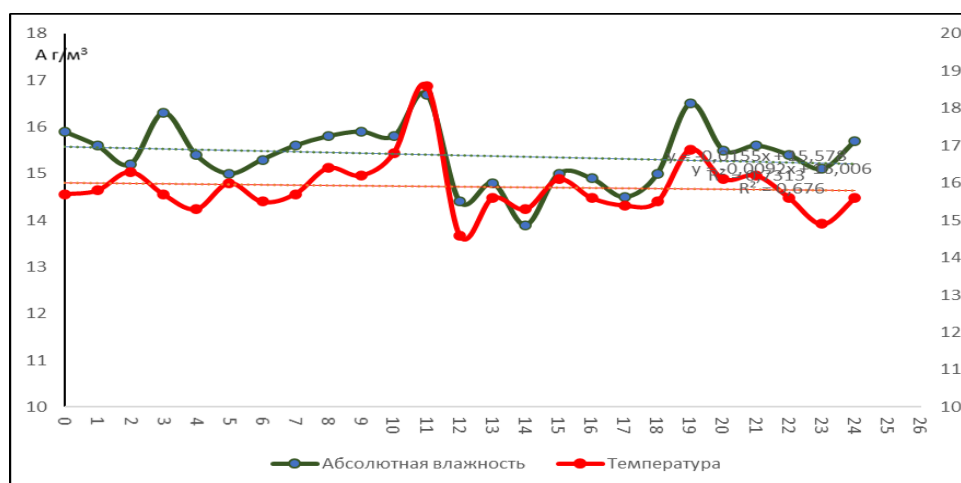


Рисунок 9. Среднегодовая абсолютная влажность и температура ПСВ с 1999-2024 гг. г. Сухум (ГМС «Сухумский Маяк»)

Коэффициент корреляции между двумя рядами данных за последние 25 лет составляет более 0,85.

Эта зависимость становится особенно значимой в контексте анализа влагооборота в регионе. В течение вегетационного периода на абхазском побережье выпадает более 60% годовой нормы осадков. Однако, как показывают наблюдения, такого количества осадков недостаточно для создания благоприятного влажностного баланса. Основными причинами этого являются: повышенный приток солнечной радиации, увеличенное испарение, особенности пространственно-временного распределения осадков.

Важно отметить, что между среднегодовыми значениями относительной влажности и количеством осадков также существует устойчивая корреляционная связь (рисунок 10). Данная связь была проверена в следующих городах: Сухум, Ставрополь, Сочи, Туапсе, Анапа, Владикавказ, Краснодар. Наибольшая связь была обнаружена в городе Ставрополь коэффициент

корреляции ($r \approx 0,7$). Это подтверждает ключевую роль водяного пара в процессах формирования атмосферных осадков.

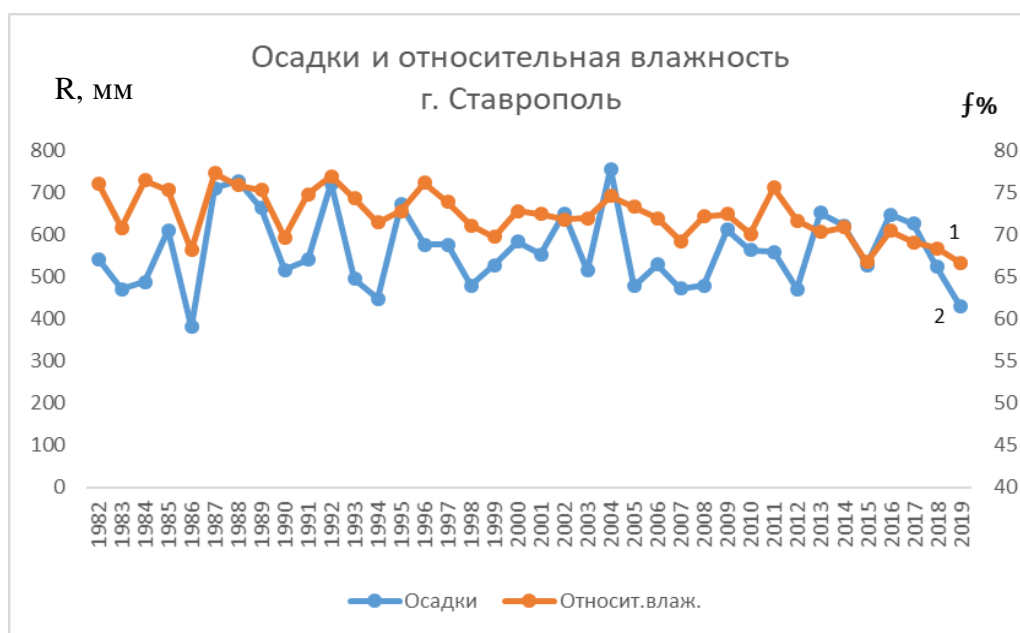


Рисунок 10. Осадки и относительная влажность в г. Ставрополь за 1982-2019 гг.

Примечательно, что тот же водяной пар оказывает существенное влияние и на температурный режим. Анализ данных за 1990-2023 гг. выявил устойчивую тенденцию потепления в Республике Абхазия со средним ростом температуры на 1.6°C , причем приблизительно 1.4°C этого повышения (около 87% общего тренда) непосредственно связано с увеличением концентрации водяного пара в атмосфере.

Расчёт доли H_2O проводился по формуле:

$$\Delta T_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta T_{\text{общ.}} \left(\frac{\Delta W}{\Delta W + \Delta C + \Delta A} \right), \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{общ.}} = 1.6^{\circ}\text{C}$ — общее потепление (1990–2023), ΔW , ΔC , ΔA — вклады водяного пара, CO_2 и аэрозолей соответственно.

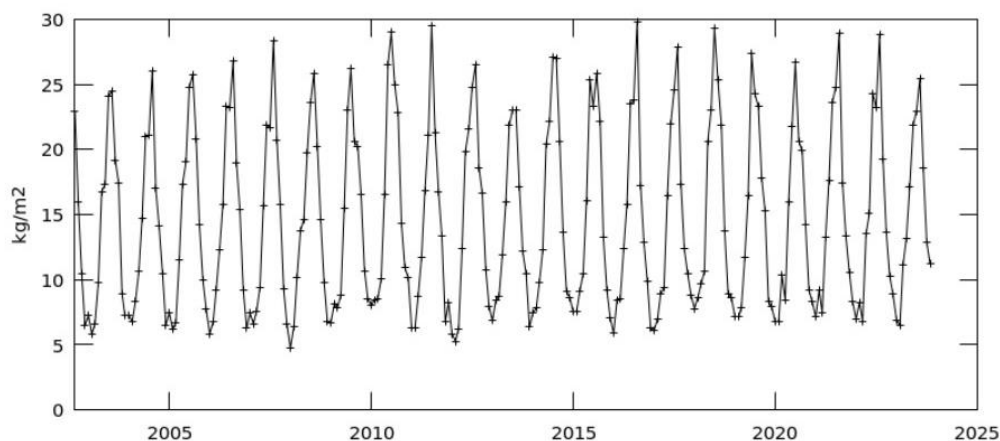


Рисунок 11. Общее количество водяного пара в дневное время по городам Кавказа

Если сравнить тенденцию изменения водяного пара по городам Кавказа и на территории Республики Абхазия, то мы можем увидеть синхронность изменений.

Извержения вулканов оказывают значительное влияние на динамику влажности атмосферы, особенно в тропосфере и стратосфере. Этот эффект можно проследить в долгосрочных временных рядах влажности воздуха.

Построим временной ряд среднегодовой относительной влажности и проверим его на наличие аномалий, связанных с крупными вулканическими извержениями (например, Эль-Чичон (1982), Пинатубо (1991), Хунга-Тонга (2022)) (рисунок 12).



Рисунок 12. Динамика средней годовой относительной влажности г. Сухум (ГМС «Сухумский Маяк»)

На графике 12 видно, что среднегодовая влажность в Сухуме меняется во времени с ключевые вулканические извержения (1982 — Эль-Чичон, 1991 — Пинатубо, 2022 — Хунга-Тонга).

Формула баланса влаги при извержении вулканов может быть представлена следующим образом:

$$\Delta W = W_v - (E + P + D) \quad (2)$$

где: ΔW — изменение содержания водяного пара в атмосфере, кг / м³ воды; W_v — водяной пар, выбрасываемый вулканом, кг/ м³; E — дополнительное испарение воды с поверхности Земли (из-за нагрева вулканическими процессами), кг; P — конденсация и выпадение осадков (увеличенные осадки из-за дополнительных ядер конденсации и охлаждения), кг; D — диффузия и удаление водяного пара из атмосферы (например, его вынос в стратосферу и возможное рассеивание), кг.

Если $W_v > (E+P+D) \rightarrow$ влажность в атмосфере увеличивается.

Если $W_v < (E+P+D) \rightarrow$ влажность снижается, поскольку вулканические аэрозоли могут уменьшать испарение.

Если учесть вулканические аэрозоли, то можно добавить член A , влияющий на радиационный баланс и испарение:

$$\Delta W = W_v - (E + P + D) \quad (3)$$

где A — уменьшение испарения из-за охлаждения, вызванного аэрозолями SO₂. Эта формула может применяться для оценки краткосрочных и долгосрочных последствий извержений на атмосферную влажность.

Исследование современных изменений климата и возрастающей частоты экстремальных погодных явлений, а также их прогноз требуют разработки более эффективных методов анализа климатических данных. С целью более комплексного анализа температурных временных рядов была использована сезонная авторегрессионная интегрированная скользящая модель (SARIMA).

Такой подход позволяет проводить многокомпонентный анализ временного ряда: выделять долгосрочные тенденции, устойчивые циклы и нерегулярные колебания, а также формировать достоверные сценарии среднесрочного климатического прогноза.

Временной ряд раскладывается на сумму синусоидальных функций для выделения среднегодовых колебаний. Формула ряда Фурье:

$$y_t = a_0 + \sum_{k=1}^k \left[a_k \cos \left(\frac{2\pi kt}{P} \right) + b_k \sin \left(\frac{2\pi kt}{P} \right) \right] + \epsilon_t, \quad (4)$$

где t - время (месяц), P – все время наблюдения, a_k и b_k – коэффициенты Фурье, ϵ_t – остаточная ошибка. Коэффициенты рассчитываются как:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y_t, \quad a_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \cos\left(\frac{2\pi kt}{P}\right),$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N y_t \sin\left(\frac{2\pi kt}{P}\right)$$
(5)

При анализе Фурье сложные сигналы разлагаются на более простые синусоидальные компоненты, что позволяет выделить основные периодические составляющие временных рядов. Модель SARIMA использовалась для учета тренда и остаточной автокорреляции, дополняя Фурье-компоненты.

В результате моделирования был построен среднесрочный прогноз среднегодовой температуры приземного слоя воздуха в Абхазии на период 2023–2030 гг. На рисунке 13 представлена динамика температур за весь доступный период наблюдений (1960–2023 гг.) и полученный прогноз на последующие 10 лет.

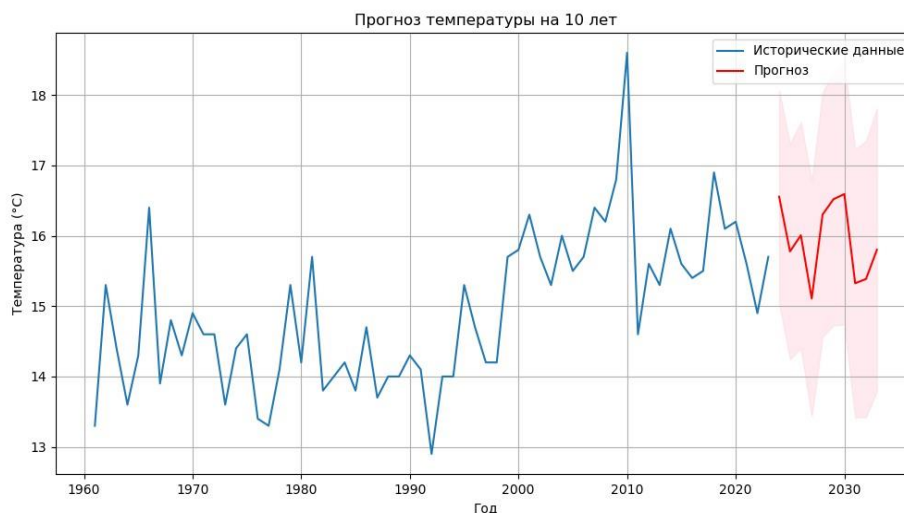


Рисунок 13. Прогноз среднегодовой температуры воздуха с 2025–2035 гг. на основе метода Фурье и модели SARIMA в г. Сухум

На рисунке 13 синим цветом показан исторический ряд данных температур от 1960 года до 2023 года. Красной линией обозначены прогнозные значения, а розовая область указывает на 95% доверительный интервал, отражающий степень неопределенности модели. Эти данные демонстрируют как долгосрочный тренд на повышение температуры, так и выраженные

межгодовые колебания, свидетельствующие о наличии климатической цикличности. Прогноз указывает на относительно стабильную температуру, без резкого роста или падения. Указанная модель (Фурье + SARIMA) хорошо справляется с выявлением цикличности и тренда, но из-за природы климатических процессов сохраняется значительная неопределённость.

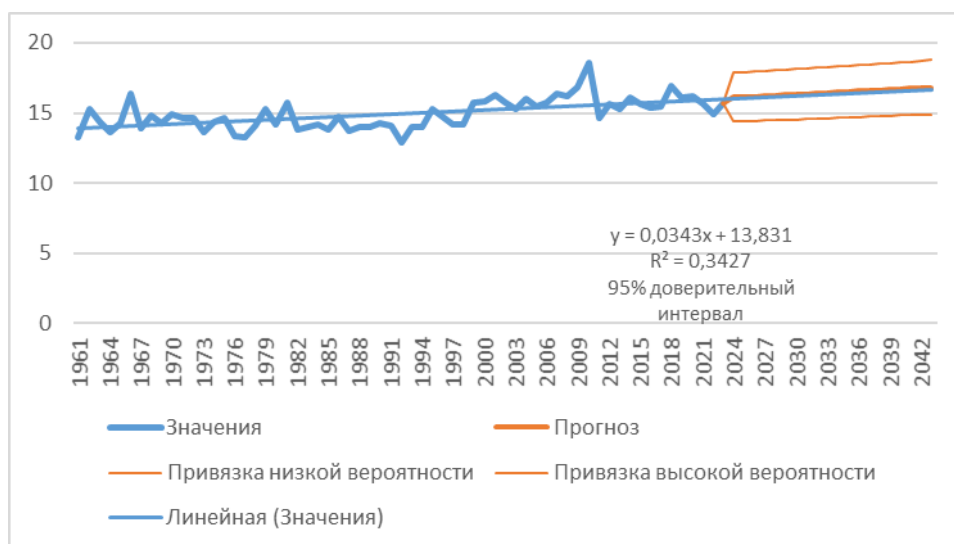


Рисунок 14. Прогноз среднегодовой температуры приземного слоя воздуха на 2023–2042 гг. методом линейной регрессии г. Сухум

Согласно прогнозу, проведенному методом линейной регрессии, температура в регионе будет продолжать расти. К 2042 году средняя температура может повыситься примерно на 0.7–1.5°C относительно текущих значений. Хотя данные имеют некоторый разброс, общий тренд подтверждает тенденцию потепления. Погрешность прогноза по линейной регрессии на 2042 год составляет $\pm 0,5$ °C.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Установлено, что крупные вулканические извержения (например, Пинатубо 1991 г., Эйяфьядлайёкюдль 2010 г.) вызывают краткосрочное (1–3 года) снижение температуры приземного слоя воздуха, особенно в осенне-зимний период. Эти изменения сопровождаются синхронными температурными колебаниями по данным метеостанций региона ($r > 0,85$).
2. Анализ влажности воздуха показал её устойчивую связь с температурой: среднегодовая абсолютная влажность изменяется синхронно с ТПСА.
3. Водяной пар подтверждён как основной парниковый газ с вкладом до 70 % в общий парниковый эффект, играющий ключевую роль в формировании температурных условий приземного слоя воздуха в причерноморской зоне.

4. Математическое моделирование показало, что перенос водяного пара можно описать уравнением диффузии с источником, обусловленным эффективным испарением. Турбулентная диффузия становится значимой при масштабах от нескольких месяцев.
5. С помощью Фурье- и вейвлет-анализа выявлены квазипериодические колебания температур (2, 5–6, 11 лет), соответствующие солнечной активности и другим геофизическим процессам. Эти методы позволили обнаружить температурные аномалии, вызванные извержениями, и оценить их вклад в климатическую изменчивость региона.
6. Прогноз на 2025–2035 гг. указывает на относительную стабильность температуры с умеренными колебаниями в пределах доверительного интервала 95%. Долгосрочный прогноз до 2042 года предполагает рост средней температуры на 0,7–1,5 °С, что согласуется с глобальными и региональными трендами потепления.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК из списка президиума АНА:

1. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В., Начкебия Х.А. Изменчивость основных климатообразующих факторов на территории Абхазии в период глобального потепления // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №10. 2020. С. 172–183.
2. Ахсалба А.К., Эмба Я.А., Марандиди С.И., Хинтуба Л.В. Бюллетень оперативного мониторинга погоды на территории Абхазии за 2020 год. // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №11. 2021. С 136-147.
3. Хинтуба Л.В., Эмба Я.А., Ахсалба А.К. Относительная влажность и атмосферные осадки на территории Абхазии. // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №12. 2022.С. 120-129.
4. Ахсалба А.К., Эмба Я.А., Марандиди С.И., Хинтуба Л.В. Бюллетень оперативного мониторинга погоды на территории Абхазии за 2021 год. // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №12. 2022. С 79-88.
5. Ахсалба А.К., Эмба Я.А., Хинтуба Л.В. Бюллетень оперативного мониторинга погоды на территории Абхазии за 2022 год. // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №13. 2023. С 66-84.
6. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. О соотношении природных и антропогенных факторов изменения климата // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №14. 2024. С. 56–73.
7. Ахсалба А.К., Эмба Я.А., Марандиди С.И., Хинтуба Л.В. Бюллетень оперативного мониторинга погоды на территории Абхазии за 2023 год // *Вестник АНА*, серия «Естественные науки», №14. 2024. С. 74–82.

Публикации Scopus:

8. Ekba Ya. A., Akhsalba A. K., Khintuba L. V. Humidity of the Surface Air Layer as the Main Factor of the Formation of the Basic Climate Forming Elements // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. 2022. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-19012-4>. С. 131–140.
9. Afanasev I. S., Khintuba L. V., Ekba Y. A., Zakinyan R. G. Climatic characteristics of the surface air layer in the region of Abkhazia (Caucasus) // *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, ES0204, 2023. <https://doi.org/10.2205/2023ES02SI04>.

Публикации РИНЦ:

10. Хинтуба Л.В., Экба Я.А. Воздействие вулканов на окружающую среду и климат (на примере вулкана Эль-Чичон, Мексика). Тезисы докладов изд-во Южного федерального университета, 2017. С.180.
11. Хинтуба Л. В., Экба Я. В. Воздействие вулканов на климат. Тезисы докладов (молодежная секция) Луганск: изд-во ЛНУ им. В.Даля, 2018 – С.28.
12. Хинтуба Л. В., Экба Я. А. Влияние стратосферного аэрозоля на температуру приземного слоя воздуха. Материалы V Международной научно-практической конференции. Часть 2 – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2019. С.225.
13. Экба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. «Динамика температуры и влажности приземного слоя воздуха на территории Абхазии за период глобального потепления» Всероссийская научная конференция с международным участием «Экология и климат». Тезисы 25-26 февраля 2020 года Санкт-Петербург.
14. Экба Я. А., Ахсалба А. К., Хинтуба Л. В. «Исследование влияние температуры поверхности Черного моря на обмен углекислым газом с атмосферой». Материалы VI Международной научно-практической конференции. Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Часть 2. – Майкоп: Изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2021. С.187-195.
15. 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.
16. Экба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. «Оценка воздействия мощных вулканов на температуру ПСВ на Кавказе». Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VI Международной научно-практической конференции. 2021. С. 187-195.

17. Хинтуба Л. В., Эмба Я. А., Ахсалба А.К. «Влияние влажности приземного слоя воздуха на формирование атмосферных осадков в различных климатических зонах Кавказа». Геокавказ 2022. Том XII. Махачкала 2022. С 676-683.
18. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. «Влажность приземного слоя воздуха, как главный фактор формирования основных климатообразующих элементов». Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды. Доклады IV Международной научной конференции. г. Ставрополь. 2022г. С 24-31.
19. Хинтуба Л.В., Эмба Я.А., Ахсалба А.К. Признаки похолодания приземного слоя воздуха в Абхазии в последнее десятилетие. Тезисы докладов Международной научно-практической конференции. Севастополь, 08 – 11 ноября 2022 г. – Севастополь: ИП Куликов А.С., 2022.- С.105.
20. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. «Признаки и причины понижения приповерхностной температуры воздуха в Абхазии в 21 столетии». Международная конференция. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023. Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН. 2023. С. 94.
21. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В., Касландзия Н.Д. «Особенности влияния влагосодержания атмосферы на потепление климата». Международная конференция. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования. Климат-2023. Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН. 2023. С.95.
22. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Марандиди С.И., Хинтуба Л.В. «Баланс концентрации углекислого газа в атмосфере и его роль в парниковом эффекте на территории Абхазии». Геокавказ 2023. Том XIII. Махачкала 2023. С 696-703.
23. Афанасьев И.С., Хинтуба Л.В., Эмба Я.А., Закинян Р.Г. «Исследование цикличности и тренда температуры приземного слоя воздуха по данным метеостанции маяк г. Сухум.» Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VII международной научно-практической конференции. Часть 1. – Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко в.о.», 2023.С.16-18.
24. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В. «Вероятность похолодания ПСВ в 21-м столетии в следствие снижения солнечной активности и воздействия вулканов». Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VII международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко в.о.», 2023.С.292-300.

25. Эмба Я.А., Ахсалба А.К., Хинтуба Л.В., Касландзия Н.Д. «Роль водяного пара, как основного парникового газа, в потеплении климата». Материалы VII международной научно-практической конференции. Часть 2. – Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко В.О.», 2023.С.300-312.
26. Эмба Я.А., Хинтуба Л.В. «Анализ тренда и цикличности температуры ПСВ на территории Республики Абхазия». Абхазский государственный университет. Юбилейный сборник научных трудов. Сухум 2024 г. С 261-270. ISBN 978-5-317-07238-4.
27. Эмба Я.А., Хинтуба Л.В. «Оценка влияния парниковых газов на температуру приповерхностного слоя воздуха в Абхазии». Международная научно-практическая конференция «Системы контроля окружающей среды». Севастополь 2024г. С112. ISBN 978-5-6051824-6-7.
28. Хинтуба Л.В., Афанасьев И.С., Ломя Р.Ф., Эмба Я.А., Закинян Р.Г. «Анализ температурных тенденций в г. Сухум и использование метода Фурье для среднесрочного прогноза климата». Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко в.о.», 2025.С.393-396.
29. Хинтуба Л.В., Светличный В.А., Эмба Я.А., Закинян Р.Г. «О влиянии внутренних гравитационных волн на вертикальное распределение водяного пара». Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко в.о.», 2025.С.397-401.
30. Эмба Я.А., Хинтуба Л.В., Закинян Р.Г. «Водяной пар в атмосфере и его роль как парникового газа». Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий. Материалы VIII международной научно-практической конференции. Майкоп: изд-во «ИП Кучеренко в.о.», 2025. С.422.