ГЛОБАЛЬНЫЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ И КЛИМАТА
GLOBAL AND REGIONAL CHANGES OF NATURE AND CLIMATE

Научная статья / Scientific paper
УДК: 556.12: 551.582: 550.46
DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.144

Вариация изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря (Карадагский заповедник, Крым)

С. В. Токарев[1,2], В. А. Лапченко[3], Ю. В. Дублянский[4]
[1]Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия; [2]Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия; [3]Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», пгт. Курортное, Республика Крым, Россия; [4] Институт геологии Инсбрукского университета, г. Инсбрук, Австрия
e-mail: tokcrimea@list.ru

Аннотация. Понимание закономерностей формирования изотопного состава атмосферных осадков является необходимым условием для применения изотопного метода в региональных гидрологических, гидрогеологических и палеоклиматических исследованиях. В регионах с острым дефицитом водных ресурсов, таких как Крым, проведение режимных изотопно-гидрологических работ представляется актуальной задачей. Целью исследования является выявление закономерностей и контролирующих факторов вариации изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря.

Мониторинг изотопного состава (δ^2H и $\delta^{18}O$) атмосферных осадков проводился на территории Карадагского природного заповедника (юго-восток Крыма) в течении 4 лет (2020–2024 гг.) по методике GNIP. Результаты измерений позволили построить локальную линию метеорных вод (ЛЛМВ) для изучаемого района, описываемую уравнением $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$). Она несколько отличается от полученной ранее ЛЛМВ для центральной части Крыма, что, предположительно, связано с более значительным дефицитом увлажнения изучаемого района. В динамике изотопных характеристик атмосферных осадков выявлена сезонность, выражающаяся в существенном обеднении осадков холодного периода года (ноябрь–март) изотопами ^2H и ^{18}O, а также повышенным показателем избытка дейтерия, по сравнению с теплым периодом (апрель–октябрь). Корреляционный анализ выявил, что наибольшее влияние на изотопный состав атмосферных осадков оказывает температура воздуха ($r \approx 0{,}7$), в то время как связь с количеством осадков не демонстрирует статистической значимости. Лишь показатель избытка дейтерия по коэффициентам корреляции Спирмена демонстрирует умеренную прямую связь с количеством и интенсивностью осадков ($\rho = 0{,}44$ и $\rho = 0{,}43$ соответственно). Изучение обратных траектории движения воздушных масс показало, что в отдельные месяцы ведущим фактором, определяющим изотопный состав атмосферных осадков, становятся источники влаги.

Ключевые слова: атмосферные осадки; мониторинг; дейтерий; кислород-18; сезонная изменчивость; локальная линия метеорных вод; контролирующие факторы; Крым; Черноморский регион.

Для цитирования: Токарев С. В., Лапченко В. А., Дублянский Ю. В. Вариация изотопного состава современных атмосферных осадков на северном побережье Черного моря (Карадагский заповедник, Крым) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 2. С.144–162. DOI: 10.34753/HS.2026.8.2.144.

Variation in the Isotopic Composition of Modern Atmospheric Precipitation on the Northern Coast of the Black Sea (Karadag Nature Reserve, Crimea)

Sergey V. Tokarev[1,2], Vladimir A. Lapchenko[3], Yuri V. Dublyansky[4]
[1]V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia; [2]Water Problems Institute of RAS, Moscow, Russia; [3]T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS, Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Kurortnoye, Republic of Crimea, Russia; [4]Institute of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria
e-mail: tokcrimea@list.ru

Abstract. Understanding the isotopic composition of atmospheric precipitation is essential for applying stable isotope methods in regional hydrological, hydrogeological, and paleoclimatic studies. In water-scarce regions such as Crimea, systematic isotope hydrological research is a critical priority. This study aims to identify the patterns and controlling factors of stable isotope variations in modern precipitation on the northern coast of the Black Sea.
Isotopic monitoring (δ^2H and $\delta^{18}O$) was conducted at the Karadag Nature Reserve (southeastern Crimea) over a four-year period (2020–2024) following GNIP methodology. Our findings established a Local Meteoric Water Line (LMWL) for the study area, defined by the equation $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3.3$ ($R^2 = 0.96$). This line deviates slightly from the previously established LMWL for central Crimea, likely due to the higher aridity of the study site. Strong seasonality was observed in isotopic dynamics: precipitation was significantly depleted in ^2H and ^{18}O during the cold season (November–March) and exhibited higher deuterium excess compared to the warm season (April–October).
Correlation analysis indicates that air temperature is the primary driver of isotopic composition ($r \approx 0.7$), while the relationship with precipitation amount is not statistically significant. Only deuterium excess, as measured by the Spearman correlation coefficients, showed a moderate positive relation with precipitation amount and intensity ($\rho = 0.44$ and $\rho = 0.43$, respectively). Back-trajectory analysis of air masses revealed that in specific months, the moisture sources become the dominant factor determining the isotopic signature of precipitation.
Keywords: atmospheric precipitation; monitoring; deuterium; oxygen-18; seasonal variability; local meteoric water line; controlling factors; Crimea; Black Sea region.
For citation: Tokarev S. V., Lapchenko V. A., Dublyansky Y. V. Variation in the Isotopic Composition of Modern Atmospheric Precipitation on the Northern Coast of the Black Sea (Karadag Nature Reserve, Crimea). Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 2, pp. 144–162. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.2.144. (In Russian; abstract in English).

Введение

Соотношение δ^2H и $\delta^{18}O$ представляет собой индикатор условий и процессов формирования элементов гидросферы в ходе гидрологического цикла [1]. Соответственно, понимание закономерностей формирования изотопного состава атмосферных осадков является необходимым условием для продуктивного применения изотопного метода в региональных гидрологических и гидрогеологических исследованиях. Глобальный мониторинг изотопного состава атмосферных осадков проводится сетью станций GNIP (программа МАГАТЭ) начиная с 1960-х гг. По результатам глобального мониторинга и отдельных инициативных исследований создаются базы данных для крупных регионов, в том числе целых континентов [2, 3].

Направления применения изотопного метода в гидрологических и гидрогеологических исследованиях весьма разнообразны. Например, метод широко используется при изучении характеристик речного стока [4, 5]. Свойство воды изменять соотношения $^2H/^1H$ и $^{18}O/^{16}O$ при фазовых переходах (фракционирование изотопов) успешно применяется в оценке элементов водного баланса [6, 7]. Данные об изотопном составе современных атмосферных осадков являются основой для палеоклиматических реконструкций [8, 9]. Изотопный метод также эффективен при изучении подземного водообмена, в том числе при оценке ресурсов подземных вод [10, 11, 12].

Водные ресурсы являются одним из главных лимитирующих факторов социально-экономического развития Крыма. С 2014 г. проблема водного дефицита приобрела особую

остроту в связи с прекращением работы Северо-Крымского канала, обеспечивавшего более половины водопотребления полуострова. Сейчас регион может рассчитывать только на внутренние водные ресурсы, формируемые исключительно за счет атмосферных осадков. В последнее десятилетие в Крыму отмечается увеличение частоты неблагоприятных метеорологических явлений, таких как засухи и экстремальные ливни, сопровождающиеся катастрофическими паводками [13, 14]. На фоне происходящих климатических изменений и активного социально-экономического развития Крымского региона проведение долгосрочных режимных гидрологических исследований становится особенно актуальным. При этом изотопный метод является одним из наиболее перспективных методов этих исследований.

δ^2H и $\delta^{18}O$ атмосферных осадков характеризуется пространственной и временной изменчивостью. Последняя контролируется рядом факторов, среди которых основными являются температура образования осадков, их количество, относительная влажность воздуха, источник (место образования) атмосферной влаги и процессы, происходящие на пути ее движения к месту выпадения [1, 15, 16]. Для выявления факторов, контролирующих динамику изотопного состава осадков конкретной территории необходимы многолетние мониторинговые работы.

Ближайшие станции сети GNIP (Одесса, Ростов-на-Дону, Батуми, Синоп) расположены на удалении более 200 км от Крымского полуострова и отделены от него морскими акваториями. Исследования изотопного состава атмосферных осадков Крыма проводилось отдельными инициативными группами. Первое подобное исследование включило определение $\delta^{18}O$ в 34 пробах атмосферных осадков, отобранных на 4 пунктах в Горном Крыму в 1977–1979 гг. [17]. Более систематическое исследование изотопных характеристик атмосферных осадков было проведено на северном склоне центральной части Крымских гор: на плато массива Чатырдаг и в г. Симферополь, в 2010–2014 гг. [18]. Полученные результаты выявили довольно сложный характер сезонной изменчивости изотопного состава осадков. В результате анализа и моделирования атмосферного переноса влаги выяснено, что он контролируется сочетанием факторов, главные из которых – температура воздуха и изменение источников влаги.

Значительное разнообразие климатических условий в пределах Крымского полуострова должно сказываться на изотопных характеристиках атмосферных осадков в различных районах Крыма. Соответственно, проведение режимных изотопно-гидрологических исследований, в особенности в районах, характеризующихся высоким дефицитом увлажнения, представляется актуальной задачей. В настоящей работе приводятся результаты такого исследования, осуществляемого в юго-восточной части Крыма на территории Карадагского природного заповедника с 2020 г. Данный район представляет особый интерес для изотопно-гидрологических исследований, поскольку расположен на границе суша – море, а также на стыке двух физико-географических областей – Горного Крыма и Равнинного Крыма.

Характеристика объекта исследования

Режим атмосферных осадков в Крыму. Основными факторами пространственного распределения и режима атмосферных осадков в Крыму являются атмосферные циркуляционные процессы, рельеф полуострова и влияние окружающих морских акваторий. В атмосферной циркуляции преобладающим (75 % случаев) является западный перенос воздушных масс со стороны Атлантики. Второстепенную роль играют холодный воздух северных широт (10 %), теплый и влажный воздух со Средиземного моря (8 %) и сухой с Азии (7 %) [19]. Как отмечают [20], наибольшее количество осадков связано с западным переносом, особенно зимой (58–68 %). В весенние месяцы осадки часто отмечаются и при южном переносе (48–51 %). Значительно реже выпадают осадки при северном и, особенно, восточном переносе.

Важную роль в распределении атмосферных осадков по территории

полуострова играют Крымские горы. Они усиливают восходящие движения воздуха, что приводит к увеличению выпадения осадков в горных районах Крыма (600–1000 мм в год) по сравнению с равнинной частью полуострова (250–450 мм в год) [19]. Отмечается, что внутренние районы полуострова получают на 100–150 мм осадков в год больше, чем прибрежные районы. Уменьшение количества осадков в последних связано с влиянием моря и наиболее характерно весной и летом, когда холодная поверхность моря препятствует развитию конвекции [21]. В связи с многообразием климатических условий, на территории Крыма выделено 6 мезоклиматических районов (рисунок 1а).

Для Горного Крыма, несмотря на его относительно небольшие площадь и высоты, характерны существенные различия в пространственном и временном распределении осадков. В целом, в восточной части Крымских гор по сравнению с западной выпадает значительно (до двух раз) меньшее количество осадков. Причиной этому являются различия в региональных циркуляционных характеристиках атмосферы и орографии [22].

Циркуляционные процессы, а вместе с ними и режим выпадения осадков, имеют ярко выраженную сезонность. Для восточной части Крымских гор годовой ход осадков относится к полуконтинентальному типу с незначительным превышением сумм осадков весенне-летнего периода над осенне-зимним (соотношение от 1,00 до 1,75). Для западной части района характерен неконтинентальный тип годового хода осадков. Сумма осадков в осенне-зимний период здесь в 1,5–2,0 раза превышает их сумму в весенне-летний период [21].

Исследования источников происхождения атмосферных осадков в Крыму, выполненные с использованием лагранжевой траекторной модели LAGRANTO за период 1976–2017 гг., дали следующие результаты [18, 23]. Около 47 % осадков поставляет окружающая полуостров суша (континентальный «ресайклинг» влаги). Значительно меньшую долю осадков обеспечивает влага, приходящая напрямую со Средиземного моря (15 %), Черного моря и Атлантического океана (по 14 %). Вклад каждого из остальных источников (Азовское, Каспийское и Балтийское моря) не превышает 3 %. Среди сезонных эффектов выявлено увеличение в летнее время доли осадков со стороны суши (до 70 %) с уменьшением доли влаги, поступающей с Атлантики и Средиземного моря практически до нуля. В зимнее время наблюдается обратная картина: преобладают осадки, пришедшие с Атлантики и Средиземного моря (>50 %), а доля осадков с суши уменьшается до 25 %. Следует отметить, что для моделирования и расчетов в указанных работах использовались узловые ячейки, расположенные ближе к центральной части Крыма. Для восточной части полуострова соотношение источников поступления атмосферных осадков может быть несколько иным.

Климатические условия района работ. В физико-географическом плане район исследования имеет пограничное положение. Он находится на восточной окраине Крымских гор, где они довольно резко переходят в равнину (рисунок 1б). Также значимым является приморское местоположение района. Кроме того, он находится у северной границы субтропической зоны северного полушария. Такое географическое положение района обуславливает ряд климатических особенностей, в том числе касающихся режима атмосферных осадков. Здесь наблюдается сочетание черт морского (низкие годовые и суточные амплитуды температур) и континентального (максимум атмосферных осадков в летнее время, высокое количество ясных дней) типов климата.

Климатические условия района можно охарактеризовать по данным многолетних (с 1910 г.) метеорологических наблюдений Карадагской научно-исследовательской геофизической обсерватории (КНИГО). Она расположена у восточного подножья Карадагской горной группы в пгт. Курортное (абсолютная высота 40 м н.у.м.) (рисунок 1 В). Кроме того, в последние десятилетия метеонаблюдения проводятся на Карадагской станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) и Карадагском ландшафтно-экологическом стационаре (КЛЭС).

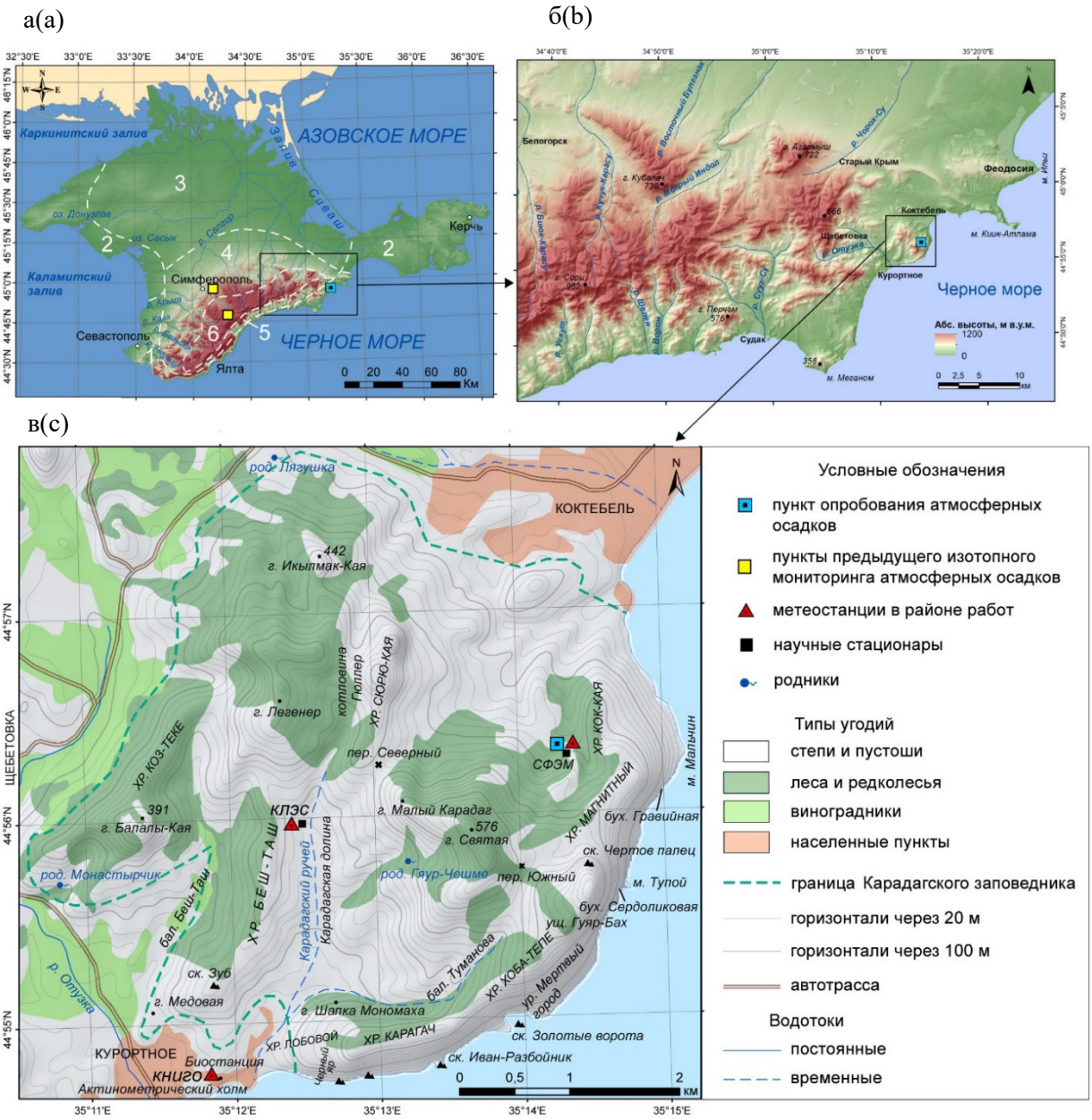


Рисунок 1. Положение пункта опробования атмосферных осадков на карте Крыма (а), среднемасштабной рельефной карте восточной части Крымских гор (б) и крупномасштабной топографической карте Карадагского природного заповедника (в). Белой штриховой линией на панели (а) показаны границы мезоклиматических районов (по [21]): 1 – побережья, 2 – прибрежный, 3 – равнинно-степной, 4 – холмистой равнины, 5 – южного предгорья, 6 – горный. КНИГО – Карадагская научно-исследовательская геофизическая обсерватория; КЛЭС – Карадагский ландшафтно-экологический стационар; СФЭМ – станция фонового экологического мониторинга

Figure 1. Location of the atmospheric precipitation sampling point on the map of Crimea (a), medium-scale relief map of the eastern part of the Crimean Mountains (b) and large-scale topographic map of the Karadag Nature Reserve (c). The white dashed line in panel (a) shows the boundaries of the mesoclimatic regions (according to [21]): 1 – coast, 2 – coastal, 3 – plain-steppe, 4 – hilly plain, 5 – southern foothills, 6 – mountain. КНИГО – Karadag Research Geophysical Observatory; КЛЭС – Karadag Landscape-Ecological Station; СФЭМ – background environmental monitoring station

Согласно данным наблюдений КНИГО, многолетняя среднегодовая температура воздуха – 12,1 °С. Средняя температура наиболее холодного месяца (февраль) составляет 1,5 °С, а наиболее жаркого (июль) – 23,6 °С. Годовая амплитуда температуры воздуха достигает 22,3 °С по среднемесячным температурам и 64 °С по абсолютным значениям [24].

Климат района засушливый. По данным наблюдений КНИГО за период 1920–2006 гг. за год в среднем выпадало 388,5 мм атмосферных осадков. Экстремальные значения годовых сумм осадков составляют 199,5 мм (1949 г.) и 683 мм (1968 г.). С начала нынешнего столетия отмечается некоторое увеличение суммы годовых осадков. За период 2000–2009 гг. она составила 425 мм по данным КНИГО и 495 мм по данным КЛЭС [25].

В течение года ход атмосферных осадков распределен относительно равномерно, однако имеются два нерезких пика: в летний (июнь–июль) и осенне-зимний (ноябрь–декабрь) периоды. В последнее десятилетие отмечается изменчивость распределения осадков по сезонам от года к году. Так, по данным наблюдений СФЭМ за 2014–2018 гг. минимум осадков приходился на летнее время и более значительное их количество выпадало весной и осенью [26]. Только 5 % осадков выпадает в виде снега. Средняя высота снежного покрова на горизонтальных поверхностях – 5 см, максимальная может достигать 35 см [24]. Подавляющая часть выпавших атмосферных осадков (87 %) расходуется на испарение и транспирацию. Годовая величина коэффициента увлажнения Высоцкого–Иванова при этом составляет 0,38 [25].

Материалы и методы исследования

Пункт опробования атмосферных осадков был устроен на базе Карадагской станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ), расположенной на северо-восточном склоне г. Святая (44,9393° с.ш., 35,2364° в.д., 180 м н.у.м.). Участок находится в небольшом горном амфитеатре, обращенном на север и отделенном от морского побережья хребтами Магнитный и Кок-Кая (рисунок 1в).

Отбор проб атмосферных осадков на изотопный анализ проводился с июня 2020 г. по июнь 2024 г. Отбирались кумулятивные месячные пробы. При этом определялось также количество осадков, которое в дальнейшем использовалось для расчета средневзвешенных годовых изотопных характеристик. Для отбора проб использовался специализированный осадкосборник RS-1B («Palmex», Хорватия). На пункте опробования проводились метеорологические наблюдения с 3-часовой периодичностью автоматической станцией «Тропосфера–Н». До отправки в лабораторию пробы хранились при температуре 5 °С.

Измерение изотопного состава воды ($\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) в отобранных пробах проводилось на анализаторе L2140i («Picarro», США) в Институте геологии Инсбрукского университета (Австрия). Для калибровки анализатора использовались лабораторные стандарты VSMOW2, SLAP2 и GISP. Результаты измерений приводятся относительно стандарта V-SMOW. Аналитическая погрешность измерений – ±0,1 ‰ для $\delta^{18}O$ и ±1 ‰ для $\delta^{2}H$.

Полученные соотношения между $\delta^{2}H$ и $\delta^{18}O$, измеренными в осадках, описываются уравнением линейной регрессии вида $\delta^{2}H = a\delta^{18}O + b$, где a и b – константы, зависящие от условий образования атмосферной влаги, ее перемещения и выпадения в виде осадков. Такая линейная аппроксимация зависимости $\delta^{2}H$ от $\delta^{18}O$ в осадках получила название линии метеорных вод [1].

По результатам измерения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ вычислялся показатель избытка дейтерия по формуле D-excess = $\delta^{2}H - 8\delta^{18}O$ [27].

Статистический анализ результатов измерений включал вычисление линейного коэффициента корреляции Пирсона (r) и коэффициента ранговой корреляции Спирмена (ρ) между изотопными характеристиками атмосферных осадков ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$, избыток дейтерия) и потенциальными контролирующими факторами (температура воздуха T, количество и интенсивность осадков, относительная влажность воздуха RH). Для вычисления коэффициента ранговой корреляции Спирмена и уровней его значимости использовался онлайн-калькулятор[1].

С целью выявления источников поступления влаги для месяцев с минимальными и максимальными значениями $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в

[1] Коэффициент ранговой корреляции Спирмена онлайн. Режим доступа: https://math.semestr.ru/corel/spirmen.php (дата обращения 21.04.2025).

атмосферных осадках вычислялись обратные траектории движения воздушных масс. Для этого использовалась модель NOAA HYSPLIT[2].

Результаты

Режим температур и атмосферных осадков. В качестве исходных данных для оценки факторов формирования изотопного состава атмосферных осадков были использованы результаты метеонаблюдений на СФЭМ. За 4-летний срок наблюдений метеорологические показатели отличались высоким разнообразием, что особенно относится к режиму и количеству атмосферных осадков (рисунок 2а).

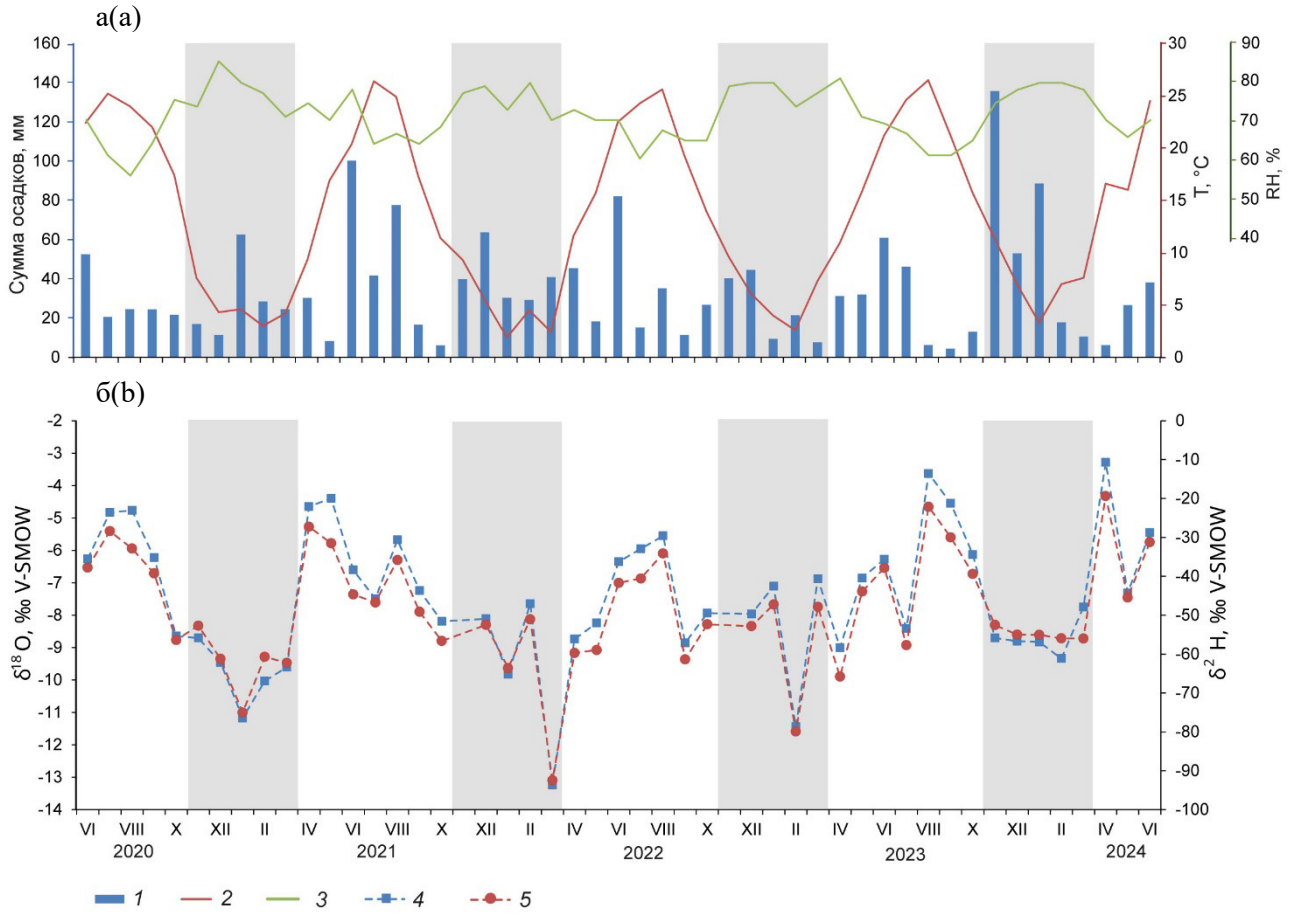


Рисунок 2. Динамика основных метеорологических характеристик (а) и изотопные характеристики атмосферных осадков (б) на Карадагской станции фонового экологического мониторинга с июня 2020 г. по июнь 2024 г. Серым фоном показаны холодные периоды года (ноябрь–март). 1 – месячные суммы осадков; 2 – среднемесячные температуры; 3 – среднемесячная относительная влажность; 4 – $\delta^{18}O$; 5 – $\delta^{2}H$

Figure 2. Dynamics of the main meteorological elements (a) and isotopic composition of atmospheric precipitation (b) at the Karadag background environmental monitoring station from June 2020 to June 2024. Cold periods of the year (November – March) are shown in gray. 1 – monthly precipitation amounts; 2 – average monthly temperatures; 3 – average monthly relative humidity; 4 – $\delta^{18}O$; 5 – $\delta^{2}H$

В течение анализируемого срока среднегодовые температуры варьировали от 12,8 °С в 2021 г. до 14,0 °С в 2023 г. В целом выявленный внутригодовой температурный режим довольно однообразный. Самые низкие среднемесячные значения температур отмечались в январе (2022 и 2024 гг.) и феврале (2021 и 2023 гг.). Наиболее жаркими месяцами были июль (2020 и 2021 гг.) и август (2022 и 2023 гг.).

[2] NOAA HYSPLIT Trajectory Model. Режим доступа: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php (дата обращения 21.04.2025).

Режим атмосферных осадков в течение срока опробования существенно различался по годам. Вторая половина 2020 г. выдалась весьма засушливой со 120 мм выпавших осадков, что составляет 65 % от многолетней нормы. При этом июнь был дождливым: количество выпавших осадков составило 125 % от нормы. 2021 г. оказался наиболее влажным с суммой осадков 502 мм (129 % от нормы). Измеренные в последующие 2022, 2023 гг. и первую половину 2024 г. суммы выпавших осадков оказались более близкими к норме, превышая её на 8–9 %. В первые 3 года мониторинга максимальные месячные суммы осадков отмечались в июне: 52,5 мм в 2020 г., 100,2 мм в 2021 г., 82,0 мм в 2022 г. При этом норма осадков для июня по данным КНИГО – 42 мм [25]. В 2023 г. самым влажным был ноябрь (135,7 мм), в 2024 г. – январь (88,6 мм). В течение срока изотопного мониторинга минимальные суммы осадков фиксировались в различные месяцы. В 2021 г. наиболее засушливым оказался октябрь, в 2022 и 2023 гг. – сентябрь, в 2024 г. – апрель.

Широкая вариация показателей температурно-влажностного режима на пункте изотопного мониторинга, наблюдаемая в течение проводимого опробования атмосферных осадков, говорит о достаточной представительности полученной выборки для данного района.

Локальная линия метеорных вод. В течение характеризуемого срока данные о $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в атмосферных осадках получены за все месяцы, кроме ноября 2022 г. При сравнении полученного распределения соотношения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в отобранных пробах относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) выявлено, что проба за ноябрь 2021 г. имеет существенное отклонение вправо, далеко выходящее за буфер в 1‰ по $\delta^{18}O$. Скорее всего, это связано с испарением во время отбора или хранения пробы. Данная проба была исключена из анализа. Таким образом, пригодными для дальнейшей работы признаны 47 месячных проб атмосферных осадков. Линия метеорных вод для полученной совокупности характеризуется уравнением $\delta^{2}H = 7\delta^{18}O + 3,3$ ($R^2 = 0,96$) (рисунок 3). Средневзвешенные по количеству осадков многолетние значения составили: $\delta^{18}O = –7,40$ ‰ и $\delta^{2}H = –47,83$ ‰.

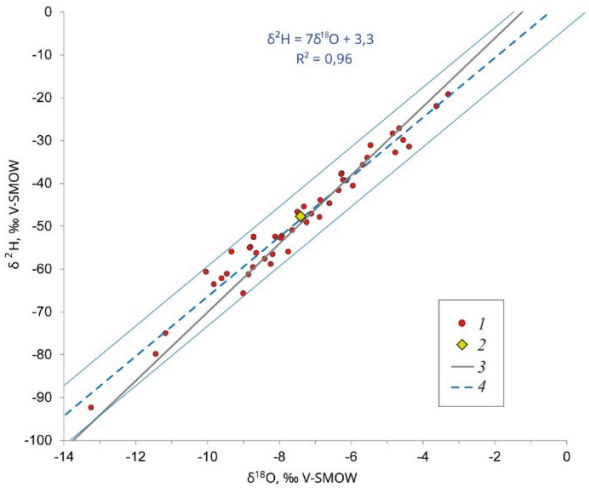


Рисунок 3. Соотношения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в отобранных пробах атмосферных осадков в сравнении с глобальной линией метеорных вод: 1 – измеренные $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в пробах осадков; 2 – средневзвешенное значение $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ по выборке; 3 – глобальная линия метеорных вод (GMWL) согласно [31]; 4 – локальная линия метеорных вод для изучаемого района (тонкими синими линиями показан интервал ±1 ‰ $\delta^{18}O$, соответствующий характерной вариабельности анализов атмосферных осадков)

Figure 3. $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ ratios in the collected precipitation samples compared to the global meteoric water line: 1 – measured $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ in the precipitation samples; 2 – weighted average $\delta^{18}O$ and $\delta^{2}H$ for the sample; 3 – global meteoric water line (GMWL) according to [31]; 4 – local meteoric water line for the study area (the thin blue lines show the ±1 ‰ $\delta^{18}O$ interval corresponding to the characteristic variability of precipitation analyses)

Динамика изотопного состава атмосферных осадков. На рисунке 2б показана динамика изменения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в месячных суммах атмосферных осадков за срок мониторинга. Как видно, изменение изотопного состава осадков имеет некоторую связь с сезонами года.

Следует отметить, что все изотопные характеристики весьма контрастно различаются по периодам лет (таблица 1). Так, в теплые периоды во всех случаях средние $\delta^{18}O$ выше –7,4 ‰, а в холодные – ниже –8,5 ‰. Аналогичная картина наблюдается и для $\delta^{2}H$: в теплые периоды диапазон его средних значений составляет от –38,9 ‰ до –49,9 ‰, а в холодные – от –55,6 ‰ до –65,0 ‰. Показатель избытка дейтерия напротив имеет меньшие значения в теплые периоды (8,8–10,8) и более высокие в холодные сезоны (12,2–15,7).

Таблица 1. Средние значения $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избытка дейтерия со стандартными отклонениями по холодному (ноябрь-март) и теплому (апрель-октябрь) периодам лет (все изотопные характеристики даны в ‰ V-SMOW)

Table 1. Mean $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and deuterium excess with standard deviation for the cold (November-March) and warm (April-October) periods of the years (all isotopic characteristics given in ‰ V-SMOW)

Год	Теплый период			Холодный период		
	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	Избыток D	$\delta^{18}O$	$\delta^{2}H$	Избыток D
2020	-6,14 ± 0,83	-38,9 ± 4,9	10,2 ± 3,0	-9,08 ± 0,46	-57,0 ± 4,3	15,7 ± 2,1
2021	-6,32 ± 1,46	-41,7 ± 10,5	9,0 ± 2,9	-9,73 ± 1,27	-62,6 ± 9,3	15,2 ± 3,0
2022	-7,37 ± 1,39	-49,8 ± 11,0	9,2 ± 1,6	-9,67 ± 2,57	-65,0 ± 19,1	13,4 ± 2,2
2023	-6,41 ± 1,92	-42,4 ± 15,2	8,9 ± 2,4	-8,59 ± 1,83	-56,5 ± 13,5	12,2 ± 4,1
2024	-5,35 ± 2,02	-32,0 ± 13,1	10,8 ± 3,4	-8,64 ± 0,81	-55,7 ± 0,5	13,8 ± 6,63
Среднее	-6,32 ± 0,72	-41,0 ± 6,4	9,6 ± 0,8	-9,14 ± 0,54	-59,4 ± 4,2	14,1 ± 1,4

При помесячном осреднении полученных изотопных характеристик также хорошо прослеживается сезонная изменчивость. Например, осредненные значения $\delta^{18}O$ по месяцам холодного периода года близки к –9 ‰, в то время, как для месяцев теплого периода средние значения $\delta^{18}O$>–7 ‰ (рисунок 4). Наибольший размах $\delta^{18}O$ (разница между минимальным и максимальным значением) характерен для марта и апреля: около 6 ‰.

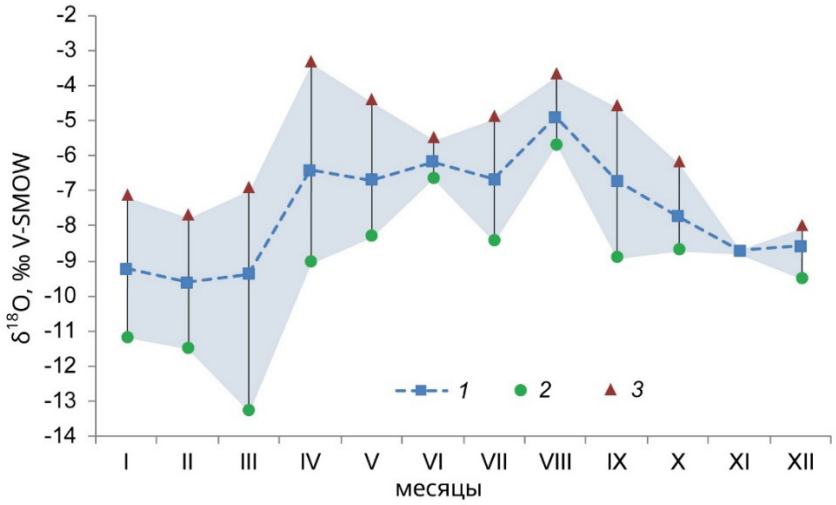


Рисунок 4. Распределение средних (1), минимальных (2), максимальных (3) значений $\delta^{18}O$ в пробах атмосферных осадков по месяцам года за период опробования.

Figure 4. Distribution of mean (1), minimum (2), maximum (3) $\delta^{18}O$ values in atmospheric precipitation samples by month of the year for the sampling period.

Корреляционный анализ. Корреляционный анализ проводился с целью установления связи с факторами, которые могут влиять на изотопные характеристики атмосферных осадков в течение года. К таким факторам можно отнести T и RH воздуха, количество осадков и интенсивность их выпадения. Последний показатель определялся как отношение суммы осадков за месяц к числу дней с осадками. Вычисленные линейные коэффициенты корреляции Пирсона r и коэффициента ранговой корреляции Спирмена ρ представлены в таблицах 2 и 3. При r >0,8 связь считается очень сильной, при r = 0,6–0,8 – сильной, при r = 0,4–0,6 – умеренной, при r <0,4 – слабой и очень слабой [28]. Вычисленные коэффициенты корреляции сравнивались с критическими значениями, соответствующими уровням значимости α = 0,05 и α = 0,01.

Таблица 2. Коэффициенты корреляции Пирсона r между изотопными ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избыток дейтерия) и метеорологическими (средние T, сумма осадков P, интенсивность выпадения осадков $P_{инт}$ и абсолютная влажность RH) характеристиками ($P_{инт}$ вычислялась как сумма осадков за месяц, разделенная на число дней с осадками в данном месяце. Жирным шрифтом показаны статистически значимые показатели r выше $r_{крит}$ для α=0,01. n = 47. Для α=0,05 $r_{крит}$ = 0,29; для α=0,01 $r_{крит}$ = 0,37)
Table 2. Pearson correlation coefficients r between isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and deuterium excess) and meteorological (mean T, total precipitation P, precipitation intensity $P_{инт}$ and RH) characteristics ($P_{инт}$ was calculated as the total monthly precipitation divided by the number of days with precipitation in a month. Statistically significant r values above $r_{крит}$ for α=0.01 are shown in bold. n = 47. For α=0.05 $r_{крит}$ = 0.29; for α=0.01 $r_{крит}$ = 0.37)

Характеристика	**T, °C**	**P, мм**	**$P_{инт}$, мм**	**RH, %**
$\delta^{18}O$	**0,70**	-0,17	0,12	**-0,50**
$\delta^{2}H$	**0,67**	-0,11	0,20	**-0,46**
Избыток D	**-0,46**	0,34	0,26	**0,40**

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Спирмена ρ между изотопными ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и избыток дейтерия) и метеорологическими (средние T, сумма осадков P, интенсивность выпадения осадков $P_{инт}$ и RH) характеристиками (жирным шрифтом показаны статистически значимые показатели ρ выше $\rho_{крит}$ (α=0,01). n = 47)
Table 3. Spearman correlation coefficients ρ between isotopic ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ and excess deuterium) and meteorological (mean T, precipitation total P, precipitation intensity $P_{инт}$ and RH) characteristics (statistically significant ρ values above $\rho_{крит}$ (α=0.01) are shown in bold. n = 47)

Характеристика	**T, °C**	**P, мм**	**$P_{инт}$, мм**	**RH, %**
$\delta^{18}O$	**0,72**	-0,23	-0,02	**-0,54**
$\delta^{2}H$	**0,68**	-0,12	0,14	**-0,50**
Избыток D	**-0,45**	**0,44**	**0,43**	0,36

Как видно из вычисленных коэффициентов корреляции, $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в атмосферных осадках демонстрируют сильную прямую связь с режимом температуры воздуха, а также умеренную обратную связь с относительной влажностью воздуха. Последняя, так же, как и температура воздуха, имеет хорошо выраженную сезонность. Между температурой и относительной влажностью воздуха существует сильная обратная связь: коэффициент корреляции Пирсона за срок мониторинга составил r = –0,75. Из графиков на рисунке 2а видно, что на относительную влажность воздуха в отдельные периоды оказывает влияние и количество осадков, однако связь между этими показателями неустойчивая (r = 0,24). Отметим также, что значения $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ в осадках не демонстрируют значимой связи с их количеством и интенсивностью.

Показатель избытка дейтерия по полученным коэффициентам корреляции Пирсона имеет умеренную связь с температурой (обратная) и относительной влажностью воздуха (прямая). Кроме того, вычисленные коэффициенты корреляции Спирмена показывают значимую прямую связь избытка дейтерия с количеством и интенсивностью осадков. Также отметим, что значения $\delta^{18}O$ и избытка дейтерия умеренно коррелируют друг с другом ($r = -0{,}59$).

На более коротких промежутках времени корреляционные зависимости между изотопными и метеорологическими характеристиками демонстрируют сильную неустойчивость. На рисунке 5 представлены результаты расчета коэффициента корреляции Пирсона для пар «$\delta^{18}O$ – T», «$\delta^{18}O$ – RH», «избыток D – T», «избыток D – RH», полученные методом «скользящего окна» для 6-месячных периодов. Можно увидеть, что даже между такими хорошо коррелируемыми показателями как $\delta^{18}O$ и температура воздуха в отдельные периоды связь теряет статистическую значимость (конец 2022 г. – начало 2023 г.), а иногда и меняет знак с прямого на обратный (середина 2021 г.). Корреляция между $\delta^{18}O$ и RH также меняется с устойчивой отрицательной на положительную и обратно. При этом динамика коэффициентов корреляции в парах «$\delta^{18}O$ – T» и «$\delta^{18}O$ – RH» характеризуется некоторой симметричностью в противофазе друг к другу. Похожая картина наблюдается и в парах «избыток D – T» и «избыток D – RH».

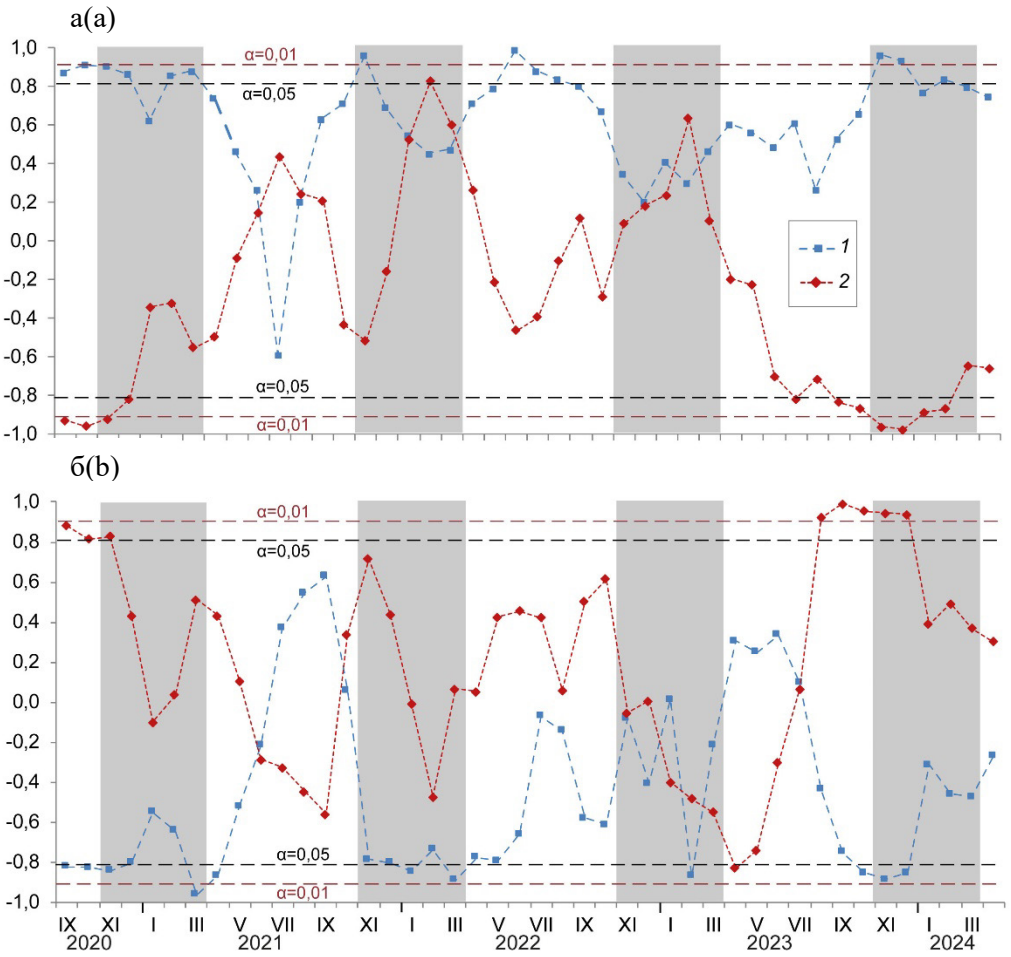


Рисунок 5. Изменение коэффициента корреляции Пирсона *r*, полученного «скользящим окном» по 6-месячным периодам, для следующих характеристик: а – $\delta^{18}O$ – T (1) и RH (2); б – избыток дейтерия – T (1) и RH (2). Серым фоном показаны холодные периоды (ноябрь – март).

Figure 5. Variations in the Pearson correlation coefficient *r*, obtained using a sliding window over 6-month periods, for the following characteristics: a – $\delta^{18}O$ – T (1) and RH (2); b – deuterium excess – T (1) and RH (2). Cold periods (November – March) are shown in gray.

Источники атмосферной влаги. Для месяцев, характеризующихся минимальными и максимальными значениями $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$, были построены обратные траектории движения воздушных масс (рисунок 6).

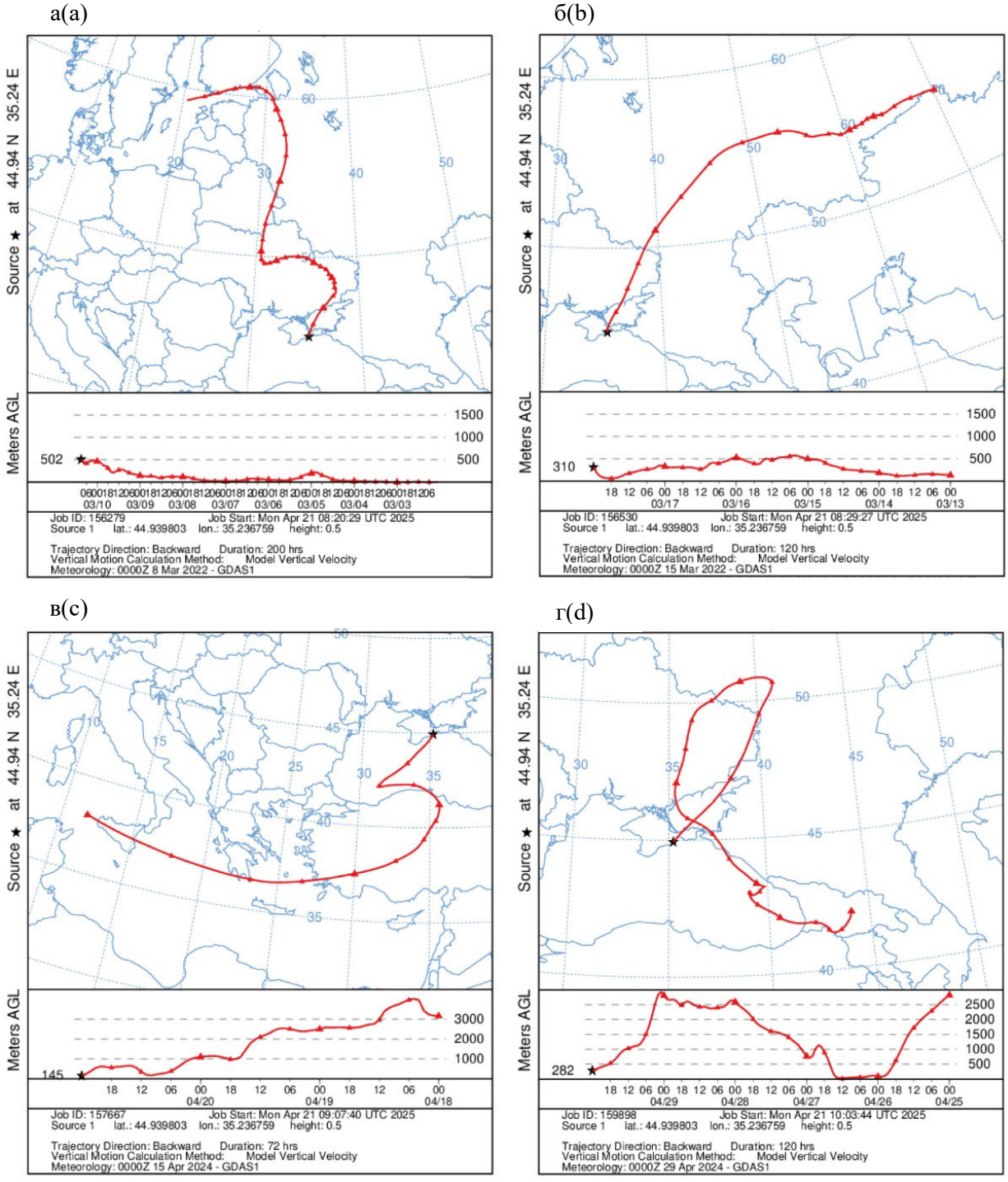


Рисунок 6. Обратные траектории движения воздушных масс, принесших атмосферные осадки: а – 10 марта 2022 г.; б – 18 марта 2022 г; в – 21 апреля 2024 г.; г – 30 апреля 2024 г. Траектории рассчитаны с помощью модели NOAA HYSPLIT[2].

Figure 6. Backward trajectories of air masses that brought atmospheric precipitation: a – March 10, 2022; b – March 18, 2022; c – April 21, 2024; d – April 30, 2024. The trajectories were calculated using the NOAA HYSPLIT model[2].

Наиболее «легкий» изотопный состав осадков наблюдался в марте 2022 г. В целом данный месяц характеризовался пониженной температурой воздуха (в среднем 2,4 °С) в сравнении с нормой (4,4 °С). Подавляющий объем месячных осадков выпал в виде снега в ходе двух событий: 10–12 и 17–18 марта. Произведенные обратные траектории показали, что в первом событии источником поступления влаги могли быть территории к северу от Крыма, вплоть до Балтийского моря (рисунок 6а). Во втором событии воздушные массы могли поступать с северо-востока, со стороны Западно-Сибирской равнины (рисунок 6б).

Наиболее «тяжелый» изотопный состав осадков за срок мониторинга отмечен в апреле 2024 г. Количество осадков в этом месяце (6,2 мм) было существенно ниже нормы (24 мм), а средняя температура воздуха (16,6 °С) – существенно выше нормы (9,7 °С). Зафиксировано два события выпадения дождя: 20–21 и 30 апреля. В первом событии воздушные массы пришли со стороны Средиземного моря через Малую Азию и акваторию Черного моря (рисунок 6в). Во втором событии траектория воздушных масс начинается с юго-восточной части акватории Черного моря с заходом на сушу к северо-востоку от Крыма и обратно через акваторию Азовского моря (рисунок 6г).

Обсуждение

Локальная линия метеорных вод. Полученное для изучаемого района уравнение ЛЛМВ $\delta^2H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$) (рисунок 3) несколько отличается от такового, полученного для северного склона центральной части Крымских гор ($\delta^2H = 7{,}3\delta^{18}O + 4{,}8$; $R^2 = 0{,}97$; [18]), а также от глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ; $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10$ [29]). Некоторое уменьшение углового коэффициента по сравнению с ГЛМВ указывает на эффект вторичного испарения дождевых капель при их движении сквозь сухой воздух. Значение $\delta^2H/\delta^{18}O < 8$ характерно для аридных регионов, где обычно оно составляет 5–6 [30]. Таким образом, эффект вторичного испарения дождевых капель в юго-восточной части Крымского полуострова проявляется несколько сильнее, чем в центральной части, что, очевидно, связано с более засушливым климатом.

Константа *b* в уравнении ЛЛМВ указывает на условия испарения влаги с водной поверхности (источника атмосферной влаги). При быстром испарении в условиях низкой влажности воздуха эта константа имеет тенденцию к увеличению. Так, для Средиземноморского региона по данным [31] она в среднем составляет $b = 22$, а уравнение ЛЛМВ имеет вид $\delta^2H = 8\delta^{18}O + 22$. Это указывает на интенсивный процесс испарения морской воды сухим континентальным воздухом. Установлено, что по мере продвижения влаги со стороны Атлантики вглубь Евроазиатского континента константа *b* на каждые 100 км уменьшается примерно на 0,7 ‰ [1]. Низкое значение данной константы для юго-восточного Крыма может быть следствием данной закономерности, поскольку источники поступающей к нему влаги зачастую достаточно удалены.

Сезонность изотопного состава атмосферных осадков. Предшествующим исследованием [18] выявлено, что изменение изотопного состава атмосферных осадков Крыма в течение года характеризуется сезонностью. Она проявляется в том, что содержание тяжелых изотопов в осадках теплого периода обычно значительно выше, чем в осадках холодного периода. Однако, в отдельные годы отмечается нарушение этого правила. Например, в 2013 г. на массиве Чатырдаг в центральной части Крымских гор выпавшие в теплый период атмосферные осадки в среднем имели более «лёгкий» изотопный состав, чем в холодный период (на 0,5 ‰ для $\delta^{18}O$ и на 3,7 ‰ для δ^2H).

Результаты настоящего исследования также показывают хорошо выраженную сезонность во внутригодовом распределении изотопных характеристик атмосферных осадков в течение всего 4-летнего срока мониторинга. Это относится как к $\delta^{18}O$ и δ^2H, так и к показателю избытка дейтерия. Разница $\delta^{18}O$ между теплым и холодным периодами была довольно стабильной (2,0–3,5‰; таблица 1). При помесячном осреднении $\delta^{18}O$ и δ^2H обособляются месяцы теплого (апрель-октябрь) и холодного (ноябрь-март) периодов (рисунок 4).

Избыток дейтерия в осадках также проявляет выраженную сезонность: в холодные периоды его величина существенно (в среднем на 4,5 ‰) больше, чем в теплые (таблица 1). Аналогичная закономерность выявлена и для центральной части Крымских гор [18].

Контролирующие факторы. Основными факторами, контролирующими изотопный состав атмосферных осадков, являются температура воздуха и количество осадков [32]. Для станций, расположенных в умеренно-континентальных условиях, ведущим фактором обычно является температура. Для станций тропического пояса, где температура воздуха имеет небольшие сезонные различия, на первое место выходит динамика интенсивности атмосферных осадков (количественный эффект). В отдельных случаях отмечается статистически значимая связь изотопных характеристик атмосферных осадков с динамикой относительной влажности воздуха [15]. При отсутствии единого доминирующего источника поступления атмосферной влаги, что характерно для Крыма, обнаруживается некоторая корреляция изотопного состава осадков с долей отдельных источников [18].

Выявленная неустойчивость корреляционных связей между метеорологическими параметрами и изотопным составом атмосферных осадков на коротких временных отрезках (рисунок 5), очевидно, связана с сильными колебаниями изотопных характеристик осадков в отдельные периоды. Причина этому видится в быстрой смене источников поступления влаги. Это наиболее характерно для весенних (март, апрель) и осенних (сентябрь) месяцев, когда в Крыму происходит перестройка процессов атмосферной циркуляции с резкой сменой направления движения воздушных масс (рисунок 6). Можно предположить, что этим обусловлена высокая вариация изотопного состава атмосферных осадков, отмечаемая в эти месяцы (рисунок 4), в том числе, минимумы и максимумы значений $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$.

Изменчивость корреляционной связи между метеорологическими и изотопными характеристиками осадков (рисунок 5) показывает, что температурный эффект объясняет около 30 % данных (при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Большинство из них приходится на холодные периоды года (за исключением 2022 г.). Влиянием относительной влажности воздуха объясняется около 20 % проб осадков. Следует отметить, что интерпретация зависимости изотопного состава от температуры и влажности осложнена их мультиколлинеарностью, затрудняющей выделение вклада каждого параметра.

Таким образом, ведущим фактором, определяющим внутригодовую динамику изотопного состава атмосферных осадков, является режим температуры воздуха. Вторым по значимости контролирующим фактором, как и в других районах Крыма [18], очевидно, является смена источников атмосферной влаги, формирующей осадки.

Наиболее полно связь между изотопным составом атмосферных осадков и температурой воздуха выражается логарифмической функцией. На примере $\delta^{18}O$ она описывается уравнением $\delta^{18}O = 1,95\ln(T) - 12,2$ (R^2=0,52) (рисунок 7). Установленная связь может применяться при палеоклиматических исследованиях в юго-восточной части Крыма, выполняемых на основе изотопных анализов карбонатных отложений (например, спелеотем карстовых полостей).

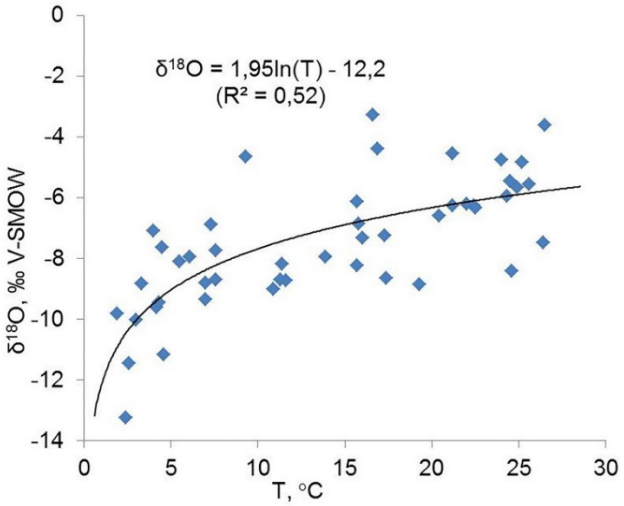


Рисунок 7. Аппроксимация связи между $\delta^{18}O$ атмосферных осадков юго-восточного Крыма и температурой воздуха посредством логарифмической функции.

Figure 7. Approximation of the relationship between $\delta^{18}O$ of atmospheric precipitation in southeastern Crimea and air temperature using a logarithmic function.

Заключение

Мониторинг изотопного состава ($\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$) атмосферных осадков проводился на территории Карадагского природного заповедника в течение 4-х лет (с июня 2020 г. по июнь 2024 г.) по методике GNIP. Наблюдавшиеся в течение срока мониторинга вариации показателей температурно-влажностного режима позволяют считать полученную выборку проб атмосферных осадков представительной для данного района.

Построенная по результатам мониторинга локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) описывается уравнением $\delta^{2}H = 7\delta^{18}O + 3{,}3$ ($R^2 = 0{,}96$), которое несколько отличается от полученной ранее ЛЛМВ для центральной части Крымского полуострова. Последнее объясняется значительным дефицитом увлажнения изучаемого района.

Внутригодовая динамика изотопных характеристик атмосферных осадков имеет четкую сезонность. Осадки холодного периода (ноябрь–март) характеризуются пониженными $\delta^{18}O$ и $\delta^{2}H$ и повышенным показателем избытка дейтерия, по сравнению с осадками теплого периода (апрель–октябрь). Наибольшие вариации изотопного состава характерны для осадков весенних месяцев, что может быть объяснено перестройкой атмосферно-циркуляционных процессов в это время.

Корреляционный анализ выявил сильную прямую связь изотопных характеристик атмосферных осадков с температурой воздуха и умеренную обратную связь с относительной влажностью воздуха. Статистически значимая связь изотопных характеристик с количеством осадков отсутствует, однако показатель избытка дейтерия демонстрирует умеренную прямую корреляцию с количеством и интенсивностью осадков.

Для отдельных месяцев, характеризовавшихся экстремальными характеристиками изотопного состава, построены обратные траектории движения воздушных масс, принесших влагу. Было обнаружено, что изотопно-легкие атмосферные осадки вызваны поступлением воздушных масс с северной и центральной частей континента, а изотопно-тяжелые осадки поставляются со стороны Средиземного и Черного морей. Таким образом, в определенные месяцы, источники влаги становятся ведущим фактором, определяющим изотопный состав атмосферных осадков.

Полученные результаты предоставляют базовую информацию для дальнейших региональных гидрологических, гидрологических, климатических исследований с использованием метода стабильных изотопов воды.

Благодарности

В.А. Лапченко принимал участие в исследовании в рамках выполнения темы государственного задания № 124030100098 – 0. Авторы выражают благодарность инженерам Карадагской станции фонового экологического мониторинга Давидовичу Д. Н., Родионову А. Н., Столярову Л. А., Медведеву В. Г. за помощь в опробовании атмосферных осадков.

Acknowledgements

V.A. Lapchenko took part in the study within the framework of the state assignment № 124030100098 – 0. The authors thank the engineers of the Karadag environmental monitoring station Davidovich D. N., Rodionov A. N., Stolyarov L. A., Medvedev V. G. for their assistance in sampling atmospheric precipitation.

Литература / References

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. Isotopy of the Earth hydrosphere. M.: Scientific World, 2009. 632 p. (In Russian; abstract in English).
2. Chen L., Wang Q., Zhu G., Lin X., Qiu D., Jiao Y., Lu S., Li R., Meng G., Wang Y. Dataset of stable isotopes of precipitation in the Eurasian continent. Earth Syst. Sci. Data. 2024, vol. 16, pp. 1543–1557. DOI: 10.5194/essd-16-1543-2024.

3. Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A.J., Akbarov F., Esenaman uulu M., Kalashnikova O., Kapitsa V., Kasatkin N., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Semakova E., Severskiy I., Petrov M., Umirzakov G., Usubaliev R. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions. Atmos. Chem. Phys. 2024, vol. 24, pp. 12203–12224. DOI: 10.5194/acp-24-12203-2024.

4. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Изменчивость изотопно-кислородного состава реки Яузы в пределах города Москвы в 2019-2021 гг. под влиянием снеготаяния и сильных дождей // Водные ресурсы. 2024. Т.51. № 2. С. 170–178. DOI: 10.31857/S0321059624020033.
Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Variations of the oxygen isotopic composition of the Yauza river within the city of Moscow in 2019–2021 under the effect of snow melting and heavy rains. Water Resources. 2024, vol. 51, no. 2, pp. 127-134. DOI: 10.1134/S0097807823700689.

5. Папина Т.С., Эйрих А.Н., Эйрих С.С. Использование характеристик изотопного состава воды для оценки вклада зимних и летних атмосферных осадков в сток Верхней Оби в период открытого русла // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 4. С. 445–455. DOI: 10.31857/S0321059624040062.
Papina T.S., Eirikh A.N., Eirikh S.S. The use of the characteristics of water isotopic composition for assessing the contribution of winter and summer precipitation to the Upper Ob runoff during the open-water period. Water Resources. 2024, vol. 51., no. 4, pp. 418-427. DOI: 10.1134/S0097807824700866.

6. Токарев И.В., Амеличев Г.Н. Оценка испарения по данным об изотопном составе воды (2H, 18O) // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Том 6 (72). № 2. С. 294–319.
Tokarev I.V., Amelichev G.N. The evaluation of evaporation by use of data on the isotopic composition of water (2H, 18O). Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2020, vol. 6 (72), no. 2, pp. 294–319. (In Russian; abstract in English).

7. Gázquez F., Quindós L., Rábago D., Fuente I., Celaya S., Sainz C. The role of cave ventilation in the triple oxygen and hydrogen isotope composition of condensation waters in Altamira Cave, northern Spain // Journal of Hydrology. 2022. V. 606. 127416. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127416.

8. Bernal-Wormull J.L., Moreno A., Bartolomé M., Arriolabengoa M., Pérez-Mejías C., Iriarte E., Osácar C., Spötl C., Stoll H., Cacho I., Edwards R.L., Cheng H. New insights into the climate of northern Iberia during the Younger Dryas and Holocene: The Mendukilo multi-speleothem record // Quaternary Science Reviews. 2023. V. 305. 108006. DOI: 10.1016/j.quascirev.2023.108006.

9. Chizhova J.N., Mikhalenko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Lipenkov V.Ya., Kozachek A.V. Causes of Uncertainties in Paleoclimatic Reconstructions Based on the Oxygen Isotope Composition of Glacier Ice on Elbrus (Western Plateau) // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2024. V. 60 (Suppl 2). P. S214–S226. DOI: 10.1134/S0001433824701202.

10. Амеличев Г.Н., Токарев И.В., Токарев С.В., Крайнюкова И.А., Бурлакова Н.С. Комплексная оценка возраста и установление условий формирования минеральных вод «Бишули» (Равнинный Крым) на основе изотопно-геохимических данных // Учёные записки Крымского Федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 3 (69). № 2. 2017. С. 130–150.
Amelichev G.N., Tokarev I.V., Tokarev S.V., Kraynyukova I.A., Burlakova N.S. The "Bishuli" mineral waters (the Crimean Plains): comprehensive evaluation of its age and conditions of formation on the base of isotope-geochemical data. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2017, vol. 3 (69), no. 2, pp. 130–150. (In Russian; abstract in English).

11. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. О формировании химического и изотопного состава подземных вод иренского горизонта (на примере Кунгурской ледяной пещеры) // Вестник Пермского Университета. Геология. 2022. Т. 21. № 4. С. 326–340. DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.326.

Kazantseva A.S, Kadebskaya O.I., Dublyansky Y.V., Kataev V.N. On the formation of the chemical and isotopic composition of groundwater of the irenskiy aquifer (on the example of the Kungur ice cave). Bulletin of Perm University. Geology. 2022, vol. 21, no. 4, pp. 326–340. (In Russian; abstract in English).

12. Токарев И.В., Исаков В.А., Исакова Т.Н. Использование изотопных методов для оценки условий формирования ресурсов и запасов подземных вод // Разведка и охрана недр. 2024. № 1. С. 74–82. DOI: 10.53085/0034-026X_2024_1_74.
Tokarev I.V., Isakov V.A., Isakova T.N. Use of isotope methods for estimating resources and pastures of underground water deposits. Razvedka i ohrana nedr. 2024, no. 1, pp. 74–82. (In Russian; abstract in English).
13. Ермакова Г.С., Горелиц О.В., Жбаков К.К., Землянов И.В., Милютина И.Ю. Экстремальные паводки на реках Крыма в 2021 году // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 4. С. 460–473. DOI: 10.31857/S0321059622040046.
Ermakova G.S., Gorelits O.V., Zhbakov K.K., Zemlyanov I.V., Milyutina I.Yu. Extreme floods in Crimean rivers in 2021. Water Resources. 2022, vol. 49, no. 4, pp. 616-629. DOI: 10.1134/S0097807822040042.
14. Лубков А.С., Вышкваркова Е.В., Воскресенская Е.Н., Щодро А.Е. К вопросу о прогнозировании катастрофических паводков на территории Крыма // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 6. С. 831–840. DOI: 10.31857/S0321059624060092.
Lubkov A.S., Vyshkvarkova E.V., Voskresenskaya E.N., Shchodro A.E. Forecasting catastrophic floods in Crimean territory. Water Resources. 2024, vol. 51, no 6, pp. 960–967. DOI: 10.1134/S0097807824701197.
15. Giménez R., Bartolomé M., Gázquez F., Iglesias M., Moreno A. Underlying Climate Controls in Triple Oxygen (16O, 17O, 18O) and Hydrogen (1H, 2H) Isotopes Composition of Rainfall (Central Pyrenees) // Front. Earth Sci. 2021. V. 9. 633698. DOI: 10.3389/feart.2021.633698.
16. Shi Y., Jin Z., Wu A., Li G., Li F. Stable isotopic characteristics of precipitation related to the environmental controlling factors in Ningbo, East China // Environmental Science and Pollution Research. 2021. V. 28. P. 10696–10706. DOI: 10.1007/s11356-020-11332-8.
17. Селецкий Ю.Б., Приблуда В.Д., Поляков В.А., Исаев Н.В., Якубовский А.В. Использование концентраций тяжелого изотопа кислорода при изучении подземных вод закарстованных карбонатных массивов Горного Крыма // Водные ресурсы. 1982. Вып. 4. С. 83–90.
Seletsky, Y.B., Pribluda, V.D., Poliakov, V.A., Isaev, N.V., Yakubovsky, A.V. Using concentrations of heavy isotope of oxygen in studies of ground waters in karstified carbonate massifs of the Crimean Mountains. Water Resources. 1982, iss. 4, pp. 83–90. (In Russian; abstract in English).
18. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // Journal of Hydrology. 2018. V. 565. P. 61–73. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.08.006.
19. Ведь И.П. Климатический атлас Крыма / Приложение к научно-практическому дискуссионному аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». Симферополь: Таврия-Плюс, 2000. 120 с.
20. Золоторева А.П., Осокина И.А., Хусид С.В. Особенности циркуляционных процессов и характеристика ветра при выпадении осадков в зимний и переходные периоды в Крыму // Труды УкрНИГМИ. 1991. Вып. 242. С. 56–59.
21. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма / Под. ред. К.Т. Логвиновой, М.Б. Барабаш. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 315 с.
22. Ведь И.П. Климат и облесение крымских нагорий. Симферополь: ТНУ, 2007. 136 с.

23. Langhamer L., Dublyansky Y., Schneider C. Spatial and temporal planetary boundary layer moisture-source variability of Crimean peninsula precipitation // Earth and Space Science. 2021. V. 8. e2021EA001727. DOI: 10.1029/2021EA001727.

24. Костенко Н.С., Кукушкин О.В., Зуев К.А. Климат // Заповедный Карадаг: Очерк-путеводитель / Под общ. ред. А.Л. Морозовой. Симферополь: СОНАТ, 2007. С. 42–51.

25. Костенко Н.С., Кукушкин О.В., Зуев А.В. Климат // Карадаг заповедный: научно-популярные очерки / Под ред. А.Л. Морозовой. Симферополь: Н. Орианда, 2011. С. 29–39.

26. Никифорова М.П., Лапченко В.А. Анализ метеорологических условий на Карадаге в 2014–2018 гг. // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Том 5 (71). № 2. С. 293–307.
Nikiforova M.P., Lapchenko V.A. Analysis of meteorological conditions on Karadag in 2014-2018. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2019, vol. 5 (71), no. 2, pp. 293–307. (In Russian; abstract in English).

27. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. P. 436–468.

28. Evans J.D. Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences, Pacific Grove. CA: Brooks/Cole Publishing, 1996.

29. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.1702

30. Gat J.R. The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation / Fritz P., Fontes G. eds., Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 1980. P. 21–47.

31. Gat J.R., Carmi I. Evolution of the isotopic composition of atmospheric waters in the Mediterranean Sea area. // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 3039–3048.

32. Gat J.R., Mook W.G., Meijer H.A.J. Atmospheric water (Volume II) / Mook W.G. ed., Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Applications. Paris: UNESCO/IAEA, 2001.

Поступила в редакцию / Received 12.05.2026
Принята к публикации / Accepted 12.08.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Токарев Сергей Викторович, кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии и геоморфологии Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, научный сотрудник Южного филиала Института водных проблем РАН, г. Симферополь, Республика Крым, Россия; SPIN-код: 2531-0505, ORCID: 0000-0001-6088-2621, ResearcherID G-9354-2012, Author ID Scopus: 57203409106; e-mail: tokcrimea@list.ru.

Лапченко Владимир Александрович, научный сотрудник отдела Изучения биоразнообразия и экологического мониторинга, Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского - природный заповедник РАН, филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», пгт. Курортное, Республика Крым, Россия; SPIN-код: 7551-1174, ORCID: 0000-0002-6441-710X, Scopus Author ID: 46761212200; e-mail: ozon.karadag@gmail.com.

Дублянский Юрий Викторович, доктор геологических наук, главный научный сотрудник Института геологии Инсбрукского университет им. Леопольда Франца, Инсбрук, Австрия; SPIN-код: 5699-8208, ORCID: 0000-0003-1433-9999, Scopus Author ID: 55975505300; e-mail: yuri.dublyansky@uibk.ac.at.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Tokarev, Ph. D. (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Geomorphology of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, researcher of the Southern Branch of Water Problems Institute RAS, Simferopol, Republic of Crimea, Russia; SPIN-code: 2531-0505, ORCID: 0000-0001-6088-2621, ResearcherID G-9354-2012, Author ID Scopus: 57203409106; e-mail: tokcrimea@list.ru.

Vladimir A. Lapchenko, Researcher of the Department of Biodiversity Studies and Environmental Monitoring, T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS, Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Kurortnoye, Republic of Crimea, Russia; SPIN-code: 7551-1174, ORCID: 0000-0002-6441-710X, Scopus Author ID: 46761212200; e-mail: ozon.karadag@gmail.com.

Yuri V. Dublyansky, D. Sc. (Geology), Principal Researcher of Institute of Geology, University of Innsbruck, Innsbruck, Austria; SPIN-code: 5699-8208, ORCID: 0000-0003-1433-9999, Scopus Author ID: 55975505300; e-mail: yuri.dublyansky@uibk.ac.at.