

УДК 551.322

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, δD) ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЁР МОРЕННО-ЛЕДНИКОВОГО КОМПЛЕКСА АДЫГЕНЕ, СЕВЕРНЫЙ ТЯНЬ-ШАНЬ

© 2026 г. Л. А. Лямина^{1,2,*}, С. А. Ерохин^{3,4}, А. В. Ермаков^{1,2}, А. В. Гусев¹,
Г. К. Оморова³, Л. Э. Оролбаева⁴, В. С. Капаклы¹, Е. А. Филимонова¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Геологический институт РАН, Москва, Россия

³Институт водных проблем и гидроэнергетики, Национальная академия наук Кыргызской Республики,
Бишкек, Кыргызстан

⁴Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан

*e-mail: lyamina-96@list.ru

Поступила 17.10.2025 г.

После доработки 30.11.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

Исследован изотопный состав высокогорных озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене, расположенных на территории северного склона хр. Киргизский Ала-Тоо бассейна р. Ала-Арча. В ходе проведённого исследования удалось выделить три группы ледниковых озёр. Для озёр внутриморенной депрессии характерен облегчённый изотопный состав: от -11.29 до -12.17‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от -71.63 до -78.14‰ по δD , где основной источник питания – это талые ледниковые воды ледника Адыгене. Изотопный состав термокарстовых озёр определяется несколькими факторами: временем их формирования в теле основной морены, характеристиками источников питания и периодом водообмена. Изотопный состав старых термокарстовых озёр более тяжёлый по сравнению с молодыми термокарстовыми озёрами: $\delta^{18}\text{O}$ меняется от -5.86 до -7.78‰ для старых озёр, и от -8.74 до -10.16‰ для молодых; δD от -37.95 до -51.34‰ для старых озёр и от -56.73 до -63.44‰ для молодых озёр соответственно. D-excess для старых озёр также отличается низкими значениями – от 9.0 до 10.2‰ по сравнению с диапазоном 14.2 до 18.0‰ для молодых озёр. Для старых термокарстовых озёр более вероятно закрытая система с единым источником питания в виде атмосферных осадков, в то время как для молодых термокарстовых озёр предполагается смешанный тип питания и открытая сообщающаяся система. Коэффициент регрессии λ линии $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$ и $\Delta^{17}\text{O}$, построенной для озёр, подтверждает отсутствие значимого влияния испарения на изотопный состав исследуемых озёр.

Ключевые слова: стабильные изотопы кислорода и водорода, ледниковые озёра, Адыгене, Кыргызстан

DOI: 10.7868/S2412376526020047

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных климатических изменений и продолжающейся деградации горно-долинного оледенения Тянь-Шаня особую актуальность приобретают гидрогеологические и гидрологические исследования высокогорных районов современного оледенения. Актуальность данного исследования определена несколькими важными научно-практическими

задачами: во-первых, необходимостью оценки водного баланса потенциально прорывоопасных озёр (Загинаев, 2018). Повышение температуры активизирует термокарстовые процессы, которые ослабляют устойчивость плотин высокогорных озёр. Активизация термокарстовых процессов наблюдается на плотинах практически всех высокогорных озёр северного склона Кыргызского хребта. Во-вторых, большой практический интерес вызывает прогноз возможных измене-

ний стока горных рек и ручьёв, которые ниже по течению используются для питьевого водоснабжения и орошения, а также служат источником формирования месторождений пресных подземных вод. Для решения подобных задач параллельно с гидрологическими и гидрогеологическими работами используются изотопные методы анализа по определению стабильных изотопов воды (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{17}O$) и их соотношения — одни из наиболее применяемых в науке о Земле; они дают возможность оценить вклад различных компонентов в питание исследуемого объекта (льды, реки, озёра, подземные воды, атмосферные осадки).

Рассматриваемая система озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене большинством инженеров и гидрогеологов исследуется с точки зрения прорывоопасности и возможности схо-

да селевых потоков по долине реки Ала-Арча. При этом остаётся без должного внимания непосредственное исследование источников пополнения озёр. На данном этапе исследования цель работы состоит в том, чтобы разобраться в особенностях формирования водного баланса озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене с помощью данных изотопов воды (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{17}O$).

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Моренно-ледниковый комплекс Адыгене, расположенный на северном склоне хребта Кыргызский Ала-Тоо в бассейне реки Ала-Арча (Государственный природный парк “Ала-Арча”) (рис. 1), представляет собой ключевой объект для изучения гидрологических и гидрогеологических процессов высокогорных территорий Тянь-Шаня ввиду его доступности с апреля

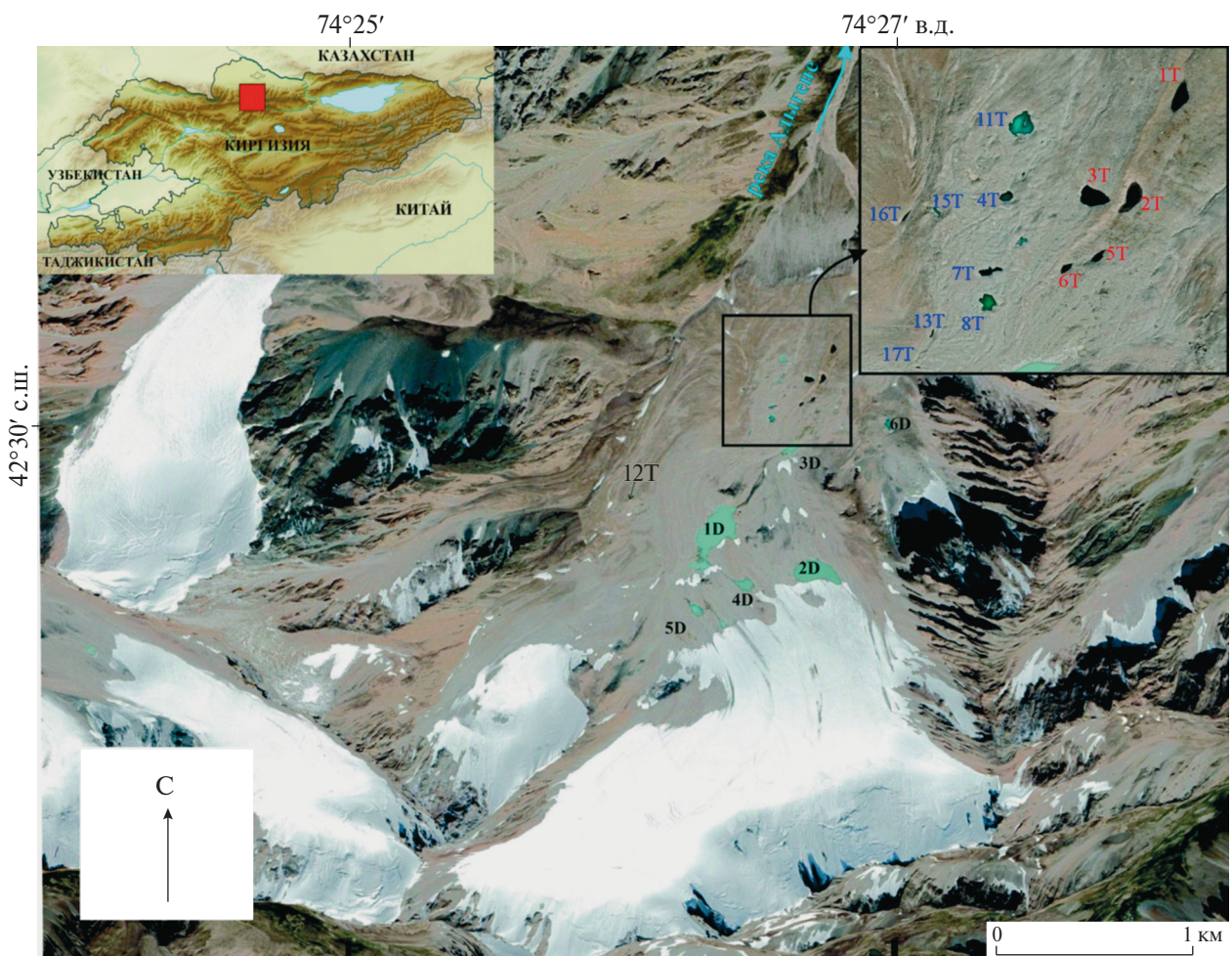


Рис. 1. Моренно-ледниковый комплекс Адыгене. Красным цветом отмечены термокарстовые озёра, которые существовали с момента начала мониторинга (с 1977 г.). Синим цветом отмечены молодые озёра
Fig.1. The Adygene moraine-glacial complex. Thermokarst lakes that have existed since the start of monitoring (since 1977) are marked in red. Modern lakes are marked in blue

по ноябрь для исследования озёр, очень длительной истории наблюдений за развитием озёр, а также расположения нескольких типов озёр на моренно-ледниковом комплексе и вероятности прорыва озёра 1D (озеро Большое Адыгене). Актуальность его исследования определяется совокупностью факторов, связанных с климатическими изменениями, деградацией ледников и трансформацией водного баланса ледниковых озёр.

Исследуемый регион характеризуется интенсивными изменениями гляциогидрологических условий, обусловленными глобальным потеплением (Загинаев и др., 2019). В последние десятилетия в пределах рассматриваемой территории фиксируется сокращение площади и объёма ледников, сопровождающееся формированием новых озёр и изменением гидродинамических характеристик существующих водоёмов (Загинаев и др., 2019). Изучение этих процессов имеет важное значение для понимания тенденций динамики гидрологического режима высокогорных районов.

Кроме того, исследование изотопного состава (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$) воды озёр данного комплекса позволяет получить количественные оценки источников питания и механизмов водообмена, что является необходимым условием для построения прогностических моделей водного баланса и динамики изменения озёрных систем. Данные аспекты особенно актуальны в связи с риском разрушения моренных плотин и возможностью формирования селевых потоков, представляющих потенциальную опасность для жителей.

Дополнительно отмечена недостаточная изученность гидрологических и гидрогеологических характеристик комплекса Адыгене. Несмотря на проводимый мониторинг, направленный преимущественно на оценку прорывоопасности озёр, вопросы, связанные с источниками их питания, циркуляцией и трансформацией водных масс, остаются недостаточно изученными. Применение изотопных методов в данном исследовании позволит восполнить существующий пробел и получить новые данные, имеющие как фундаментальное, так и прикладное значение для оценки гидрологических рисков.

Таким образом, выбор моренно-ледникового комплекса Адыгене в качестве объекта исследо-

вания обусловлен его высокой научной значимостью, актуальностью проблемы изменения водного баланса ледниковых озёр, а также необходимостью получения новых данных для оценки гидрологических рисков.

Объект исследования – озёра моренно-ледникового комплекса Адыгене. Значительную роль в формировании и распределении поверхностного и подземного стока исследуемого района играет оледенение, начавшееся в позднем плейстоцене. Оно может быть названо “киргизским”, как по наглядности проявления в Киргизском Ала-Тоо, так и по его распространению в киргизской части Тянь-Шаня (Геология СССР, 1972).

На поверхности моренно-ледникового комплекса Адыгене сформировалось почти два десятка озёр моренно-ледникового типа (Ерохин, 2020). Озёра рассматриваемого типа по условиям образования и питания разделяются на два подтипа: озёра внутриморенных депрессий (см. рис. 1, индекс “D”); озёра термокарстовых воронок (см. рис. 1, индекс “T”). За последние 46 лет на территории моренно-ледникового комплекса Адыгене появилось 16 новых моренно-ледниковых озёр. Из них три озёра подтипа внутриморенных депрессий: 2D, 4D и 5D, одно озеро 6D подтипа присклоновых депрессий. Ещё девять озёр принадлежат к термокарстовому подтипу, что указывает на активное развитие термокарстовых процессов, вызванных деградацией подстилающего ледникового льда.

На карте (см. рис. 1) термокарстовые озёра, существующие с момента начала мониторинга, отмечены красным цветом, а молодые озёра, сформировавшиеся за последние десятилетия – синим цветом. Формирование озёр на моренно-ледниковом комплексе Адыгене тесно связано с деградацией ледникового покрова и изменением гидрологических условий региона. Долговременные наблюдения показывают, что процесс отступления ледника Адыгене сопровождается образованием новых водоёмов различного генезиса.

За последние 60 лет ледник Адыгене значительно сократился: его фронт отступил примерно на 900 метров, что в среднем составляет 15.8 м в год (Falatkova et al., 2019). Интенсивное таяние ледников и деградация подстилающего льда способствуют активному развитию термокарстовых процессов, которые оказывают непосредствен-

ное влияние на устойчивость моренных плотин (Загинаев и др., 2019). Термокарстовые процессы способны вызывать просадки плотинных образований, что приводит к изменению характера стока озёр и увеличивает риск их прорыва. Разрушение плотины может спровоцировать внезапный сход селей и наводнений, представляя потенциальную угрозу для гидрологического режима реки Ала-Арча и прилегающих территорий (рис. 2).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе полевых исследований было собрано 19 проб воды. Из озёр термокарстовых воронок отобрано 15 проб, одна проба талой ледниковой воды с ледника Адыгене и три пробы из озёр внутриморенных депрессий. Во время полевых работ пробы отбирались в герметичные пробирки ёмкостью 50 мл. Некоторые озёра (например,



Рис. 2. Общий вид комплекса гляциальной морены ледника Адыгене с ригеля, 2024 г. (фото Л.А. Ляминой, 2024 г.) (а); озёро 2D с ледника Адыгене (фото С.А. Ерохина, 2024 г.) (б); термокарстовое озеро 2Т (фото С.А. Ерохина, 2024 г.) (в)
Fig. 2. General view of the Adygen moraine-glacial complex from the rigel (photo L.A. Lyamina, 2024) (a); lake 2D from glacier Adygene (photo S.A. Erokhin, 2024) (b); thermokarst lake 2T (photo S.A. Erokhin, 2024) (c)

9Т, 14Т и 18Т) на период проведения опробования (август 2024 г.) были не доступны по разным причинам (отсутствие воды в котловине, невозможность подхода к точке опробования).

Анализ изотопных характеристик (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$) проводился в Лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН на лазерном анализаторе Picarro L2140i. В лаборатории используются стандарты USGS-46, USGS-47, USGS-48, а также внутренние лабораторные стандарты БРЗ-21 ($\delta\text{D} = -133.21\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = -18.27\text{‰}$), Ф-21 ($\delta\text{D} = -41.9\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = -6.36\text{‰}$) и М-21 ($\delta\text{D} = 1.5\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = 0.49\text{‰}$), что в совокупности позволяет определять изотопные отношения в диапазоне -235.8 – 1.5‰ для δD и -29.8 – 0.49‰ для $\delta^{18}\text{O}$ относительно VSMOW-2. Точность измерений составляет до 0.05‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и до 0.2‰ для δD .

В изотопной гидрологии наиболее известно соотношение между δD и $\delta^{18}\text{O}$, которое в целом хорошо аппроксимируется прямой линией (Craig, 1961), называемой глобальной линией метеорных вод – ГЛМВ или GMWL, которая имеет вид:

$$\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10. \quad (1)$$

Наклон глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ или GMWL) (Craig, 1961) – это эмпирическое значение (8), которое объединяет равновесный и кинетический (Gonfiantini et al., 2018) процессы и устанавливает систему отсчёта, исходя из которой определяется D-excess (Dansgaard, 1964):

$$\text{D-excess} = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}. \quad (2)$$

В последнее время $\delta^{17}\text{O}$ и $\Delta^{17}\text{O}$ используются как изотопно-кислородный индикатор разных гидрологических процессов в гидрологии и климатологии. Однако в настоящее время систематические глобальные измерения содержания $\delta^{17}\text{O}$ в осадках по-прежнему отсутствуют. Для определения уравнения связи $\delta^{17}\text{O}/\delta^{18}\text{O}$ глобальной линии метеорных вод были взяты данные из IAEA Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) с 66 станций (Terzer-Wasmuth, 2023) и представлены в следующем виде:

$$\delta^{17}\text{O} = 0.528 \pm 0.0002\delta^{18}\text{O} + 0.153 \pm 0.0013. \quad (3)$$

Аналогично D-excess, для изотопов кислорода существует параметр, который менее чувстви-

телен к температуре, чем D-excess (но больше зависит от влажности) и определяет процессы равновесного и кинетического фракционирования – $\Delta^{17}\text{O}$ (Barkan & Luz, 2007):

$$\Delta^{17}\text{O} = \delta^{17}\text{O} - 0.528\delta^{18}\text{O}. \quad (3)$$

Параметр $\Delta^{17}\text{O}$ выгодно отличает от величины D-excess постоянство его значений по мере формирования и выпадения осадков. Так, $\Delta^{17}\text{O}$ ледяных кернов активно используется для реконструкции условий формирования влаги над поверхностью океанов прошлого (Екайкин, 2016). Для определения $\Delta^{17}\text{O}$ требуется определить δ' (Hulston & Thode, 1965; Miller, 2002):

$$\delta' = 1000 \ln \left(\frac{\delta}{1000} + 1 \right). \quad (4)$$

Логарифмическая зависимость для определения кислородного эксцесса необходима, поскольку зависящие от массы отклонения от эталонного соотношения трёх изотопов кислорода очень малы, и более удобно рассчитывать из системы отсчёта, которая является точно линейной (Aron et al., 2021).

Эмпирически определённый наклон линии на графике соотношения трёх изотопов кислорода равен 0.528 (Meijer, Li, 1998; Luz, Barkan, 2010). Равновесное изотопное фракционирование отражает $\theta_{\text{eq}} = 0.529$ (Barkan, Luz, 2005), а кинетическое при $\theta_{\text{diff}} = 0.518$ (Barkan, Luz, 2007). Опубликованные значения эмпирического коэффициента λ (угол наклона TFL) находятся в диапазоне от 0.515 до 0.5305.

Локальная линия метеорных вод для Центральной Азии была рассчитана на основании собранных в 2019–2021 гг. проб осадков с использованием метода наименьших квадратов (OLSR – Ordinary Least Squares Regression) (Saidaliyeva, 2023).

$$\delta\text{D} = (7.56 \pm 0.05)\delta^{18}\text{O} + (8.65 \pm 0.54), R^2 = 0.96. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведённых исследований изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, δD) отобранных проб удалось выделить три группы озёр. Первая группа – это термокарстовые озёра, сформировавшиеся во второй половине XX столетия (1Т, 2Т, 3Т, 5Т и 6Т) в теле основной морены. Изотопный состав более тяжёлый по сравнению

с молодыми термокарстовыми озёрами, расположенными на той же основной морене, и составляет от -5.86 до -7.78‰ для $\delta^{18}\text{O}$ при среднем значении -6.93‰ ; от -37.95 до -51.34‰ для δD при среднем значении -45.19‰ (рис. 3; табл. 1). D-excess для данной группы озёр также отличается – от 8.95‰ для 1Т до 11.07‰ для 3Т.

Группа молодых термокарстовых озёр (4Т, 7Т, 8Т, 10Т, 11Т, 13Т, 15Т, 16Т и 17Т) обладает облегчённым изотопным составом воды: от -8.74 до -10.16‰ для $\delta^{18}\text{O}$; от -56.73 до -63.44‰ для δD (см. рис. 3). Значения D-excess для данной группы озёр также отличаются и изменяются в интервале от 14.16 до 17.96‰ . Группа озёр внутриморенных депрессий (1D, 2D, 4D) и тер-

мокарстовое озеро 12Т формируют отдельную группу по изотопному составу. Для этой группы отмечается самый лёгкий изотопный состав: от -11.29 до -12.17‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от -71.63 до -78.14‰ по δD для озёр 2D и 4D соответственно (см. рис. 3). D-excess для этих озёр составляет от 18.21‰ .

Все озёра локализованы в пределах моренно-ледникового комплекса, где перепад высот составляет первые сотни метров, таким образом, предположение о разнице в изотопном составе озёр никак не может быть связано с разным изотопным составом осадков, выпадающих в верхней и нижней зонах исследуемой области (не подвержены высотному эффекту).

Представляется вполне логичным, что образцы воды из озёр обычно более обогащены тяжёлыми изотопами в конце сезона снеготаяния и абляции ледника по сравнению с началом сезона в результате изотопного фракционирования воды при испарении, а также из-за смешения с летними дождевыми осадками и сокращением доли талой снеговой воды. Сезон таяния для данной территории исследования приходится на май–июнь, и с этого момента доминирующим компонентом в водном балансе становятся талые ледниковые воды, дождевые осадки, а также не исключается влияние испарения и погребённых льдов. Не вызывает сомнений, что основным источником питания для озёр внутриморенной депрессии (и термокарстового озера 12Т) являются талые ледниковые воды ледника Адыгене, что отражается на графике зависимости $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ (см. рис. 3) и по значениям D-excess. Наклон линии регрессии для озёр внутриморенных депрессий и молодых термокарстовых озёр составляет 6.9 . Полученные значения наклона линии регрессии отличаются от глобальной линии метеорных вод (8), но в то же время идентичны данным (Kreutz, 2003) для проб льда с ледника Иньльчек (6.9). Среднее значение D-excess для озёр внутриморенной депрессии составляет 19.15‰ , которое сходно с данными для ледника Ит-Тиш на Тянь-Шане (Васильчук, 2000) и составляет от 18.6‰ (для голоценового льда) до 14.7‰ (для позднеплейстоценового льда). Изменения изотопного состава озера Адыгене на июль 2017 г. и август 2024 г., а именно сдвиг по δD , скорее всего связаны с разными этапами абляции ледника и поступлением талых ледниковых вод. Небольшой объём данных изотопного состава озера Адыгене на момент отбора проб безусловно ограничивает информацию для интерпретации полученных данных.

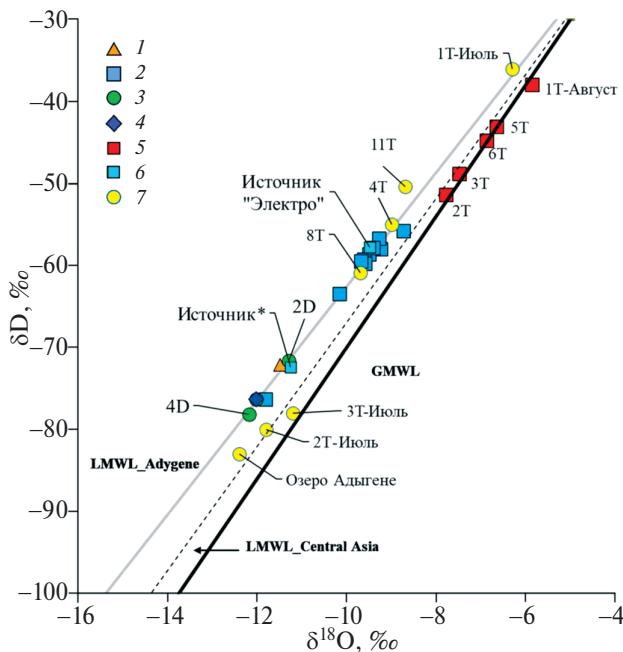


Рис. 3. Распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в пробах озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене на август 2024 г.: 1 – поверхностный сток с ледника Адыгене на конец сезона абляции; 2 – современные термокарстовые озёра; 3 – группа внутриморенных депрессионных озёр (2D, 4D); 4 – озеро Адыгене на 29–30 августа 2024 г.; 5 – группа термокарстовых озёр, сформировавшихся в течение второй половины XX столетия; 6 – источники, выходящие из под тела конечной морены; 7 – пробы, отобранные в 2017 г. (Falatkova et al., 2020)

Fig. 3. Isotopic composition of water in the glacial lakes at the Adygene moraine-glacial complex, August 2024.: 1 – ravine from the Adygene glacier at the end of the ablation season; 2 – modern thermokarst lakes; 3 – moraine-depression lakes (2D, 4D); 4 – Lake Adygene, August 29–30, 2024; 5 – old thermokarst lakes formed during the second half of the 20th century; 6 – Sources emerging from under the body of the terminal moraine; 7 – samples collected in 2017 (Falatkova et al., 2020)

Таблица 1. Изотопный состав озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене

Table 1. Isotopic signature of glacial lakes at Adygene glacier complex

Типы генераций воды	Номер озера на схеме	Параметры изотопного состава воды, ‰				
		$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	δD	D-excess	$\Delta^{17}\text{O}$
Талая вода приледниковых озёр	1D	-6.33	-12.01	-76.33	19.79	33.67
	2D	-5.93	-11.29	-71.63	18.68	48.45
	4D	-6.40	-12.17	-78.14	19.26	49.52
	12T	-6.22	-11.81	-76.31	18.21	39.86
		от -5.93 до -6.40	от -11.29 до -12.17	от -71.63 до -78.14	от 18.68 до 19.79	от 33.67 до 49.52
	Среднее по типу	-6.22	-11.82	-75.60	18.99	42.88
Молодые термокарстовые озёра	15T	-5.04	-9.59	-59.75	16.94	37.04
	16T	-5.09	-9.68	-59.48	17.96	29.10
	6D	-5.35	-10.16	-63.44	17.84	27.41
	4T	-4.86	-9.24	-57.96	15.98	30.45
	7T	-5.00	-9.50	-58.64	17.33	23.21
	8T	-5.07	-9.62	-59.24	17.69	23.16
	11T	-4.60	-8.74	-55.75	14.16	24.17
	17T	-4.95	-9.41	-57.85	17.42	27.47
	13T	-4.88	-9.28	-56.73	17.47	27.98
		от -4.60 до -6.22	от -8.74 до -10.16	от -55.75 до -63.44	от 14.16 до 17.96	от 23.16 до 39.86
Среднее по типу	-4.98	-9.47	-58.76	16.98	27.78	
Старые термокарстовые озёра	1T	-3.06	-5.86	-37.95	8.95	41.69
	2T	-4.09	-7.78	-51.34	10.93	31.38
	3T	-3.93	-7.49	-48.81	11.07	31.32
	5T	-3.49	-6.66	-43.09	10.15	26.07
	6T	-3.60	-6.87	-44.74	10.22	29.28
		от -3.06 до -4.09	от -5.86 до -7.78	от -37.95 до -51.34	от 8.95 до 11.07	от 26.07 до 41.69
	Среднее по типу	-3.63	-6.93	-45.19	10.27	31.95

В то же самое время сделать однозначные выводы по поводу источников питания термокарстовых озёр основной морены пока затруднительно. На данном этапе исследования предполагается, что основным источником питания старых термокарстовых озёр служат атмосферные осадки, на что указывает расположение точек опробования вдоль локальной линии метеорных вод для Центральной Азии (LMWL_Central Asia) и глобальной линии метеорных вод (GWML). Избыток дейтерия колеблется в пределах 9–11‰, что указывает на значительный вклад рециркулируемой влаги в осадках (Koster et al., 1993; Bershaw, 2018) и наблюдается во всех водосборных бассейнах Центральной Азии весной и осенью – в начале зимы с появлением сезона дождей. В водосборном бассейне Ала-Арчи значения D-excess более 10‰ наблюдаются в течение всего холодного сезона (Saidaliyeva, 2023). При сравнении результатов изотопного анализа на начало сезона абляции (Falatkova et al., 2020) и его завершения достаточно отчётливо просматриваются изменения в изотопном составе озёр 2Т (от –11.8 до –7.8‰ $\delta^{18}\text{O}$, от –80 до –51.3‰ δD) и 3Т (от –11.2 до –7.5‰ $\delta^{18}\text{O}$, от –78 до –48.8‰ δD) (см. рис. 3) в зависимости от времени опробования. Такие вариации в изотопном составе могут быть объяснены несколькими причинами: во-первых, предположительно влияние осадков в виде снега (что в принципе нормально для таких высот и в этот период времени), однако это бы сказалось одновременно и на изотопном составе озера 1Т, что противоречит полученным результатам; во-вторых, вполне реально говорить об эффекте испарения, но, как будет показано ниже, испарение не главный фактор, который влияет на изотопный состав всех без исключения озёр; в-третьих, это период водообмена озера. Амплитуда сезонных колебаний содержания изотопов зависит от времени пребывания воды в озере. Возможно, такое быстрое изменение изотопного состава воды в озёрах 2Т и 3Т обусловлено очень коротким периодом водообмена. Это косвенно можно подтвердить периодическими спусками воды из озера 2Т через подземные каналы в теле морены и последующим наполнением озера. Поскольку озёра 2Т и 3Т связаны между собой как сообщающиеся сосуды, то и их изотопные составы аналогичны друг другу.

Параллельно с этим, сравнивая результаты опробования 2017 г. (–6.3‰ $\delta^{18}\text{O}$, –36.0‰ δD) и 2024 г. (–5.9‰ $\delta^{18}\text{O}$, –37.9‰ δD) по озеру 1Т, отмечено, что его изотопный состав достаточно стабилен в течение 7 лет. Вода в озере 1Т, веро-

ятно, находится в гидрологическом и изотопном равновесии или приближается к нему. Такое озеро будет трудно вывести из устойчивого состояния без изменения климатических факторов, поэтому в ближайшие годы за этим озером будет интересно наблюдать.

Молодые термокарстовые озёра, по-видимому, имеют смешанное питание, судя по изотопному составу. Точки наблюдения на графике $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ занимают промежуточное положение между озёрами внутриморенной депрессии и старыми термокарстовыми озёрами. Отсутствие поверхностного притока и оттока может означать, что эти озёра пополняются в основном только благодаря талым подземным водам, образующимся при таянии погребённых льдов. Различия в мутности между молодыми и старыми термокарстовыми озёрами подтверждают (рис. 4), что основным источником питания данной группы озёр являются погребённые льды конечной морены (Falatkova et al., 2019).

В целом, изотопный состав озёрных вод близок к LMWL (для Центральной Азии) (см. рис. 3), и изотопное обогащение в результате испарения незначительно. Это не означает, что на поверхности этих озёр не происходит испарение. Вероятно, испарение не вызвало каких-либо существенных изменений в изотопном составе потому, что большинство озёр имеют очень короткий период водообмена и в течение длительного периода времени находятся под ледяным покровом. Обе эти особенности способствуют минимизации эффекта испарения.

Для лучшего понимания процессов формирования изотопного состава ледниковых озёр построен ряд зависимостей. Во многих исследованиях одновременно с определением D-excess и построением ряда зависимостей также определяется $\delta^{17}\text{O}$ и рассчитывается $\Delta^{17}\text{O}$. Значения $\Delta^{17}\text{O}$ для старых термокарстовых озёр располагаются в диапазоне от 26.07‰ для 5Т до 41.69‰ для 1Т; для молодых термокарстовых озёр эксцесс составляет от 23.16 до 37.04‰.

Согласно концептуальной модели испарения в стационарных, и в нестационарных условиях, если кинетическое фракционирование, связанное с испарением, является главным фактором, то наклоны $\delta^{18}\text{O}-\delta^{17}\text{O}$ между 0.5183 и 0.5265. Коэффициент регрессии λ $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$ (рис. 5) для озёр составляет 0.5292. Полученное значе-



Рис. 4. Разновозрастные термокарстовые озёра моренно-ледникового комплекса Адыгене. Озёра имеют разную степень мутности, что указывает на разные источники пополнения озёр: в случае озёр 8Т (а) и 11Т (б) основной источник – это погребённые льды; для озёр 1Т (в) и 6Т (г) – это атмосферные осадки

Fig.4. The different-ages thermokarst lakes of the Adygene moraine-glacial complex. Lakes have different degrees of turbidity, which indicates different sources of lake recharge: in the case of lakes 8T (a) and 11T (б), the main source is from melting buried ice; for lakes 1T (в) and 6T (г), it is precipitation

ние $\lambda \delta^{17}\text{O} - \delta^{18}\text{O}$ – результат эффектов равновесного фракционирования между жидкостью и паром. Полученные соотношения позволяют на данном этапе исследования исключить вероятность значительного влияния кинетических эффектов, таких как, например, испарение или диффузия, на изотопный состав исследуемых озёр.

ВЫВОДЫ

Обследованные озёра делятся на несколько групп: термокарстовые озёра (старые и молодые) и озёра внутриморенных депрессий. Каждая

группа имеет свой характерный изотопный состав (δD , $\delta^{18}\text{O}$, D-excess), что позволяет выделить их как отдельные типы водоёмов.

Основным источником питания озёр внутриморенной депрессии служат талые ледниковые воды, что подтверждается соответствием их изотопного состава данным ледника Адыгене. Молодые термокарстовые озёра имеют смешанное питание (погребённые льды и атмосферные осадки), что подтверждается их промежуточным изотопным составом, в то время как старые термокарстовые озёра питаются в основном атмосферными осадками.

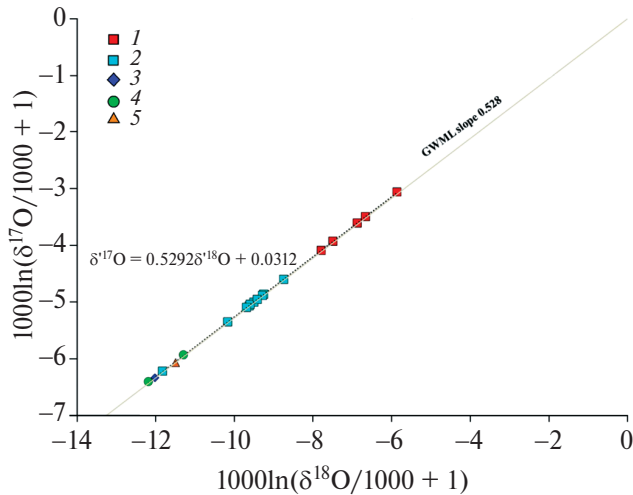


Рис. 5. Соотношение $\delta^{18}\text{O}-\delta^{17}\text{O}$ для трёх групп озёр моренно-ледникового комплекса Адыгене на август 2024 г.: 1 – старые термокарстовые озёра; 2 – современные термокарстовые озёра; 3 – озеро Адыгене; 4 – группа внутриморенных депрессионных озёр (2D, 4D); 5 – талая ледниковая вода с ледника Адыгене

Fig. 5. $\delta^{18}\text{O}-\delta^{17}\text{O}$ ratio for three groups of moraine-glacier complex Adygene, August 2024: 1 – old thermokarst lakes; 2 – modern thermokarst lakes; 3 – Lake Adygene; 4 – moraine-depression lakes (2D, 4D); 5 – ravine from the Adygene Glacier

Старые термокарстовые озёра 1Т, 2Т и 3Т характеризуются разным периодом водообмена, что сказывается на изотопном составе озёр. На конец сезона абляции все старые озёра и озёра внутриморенных депрессий имеют более тяжёлый изотопный состав, в то время как молодые термокарстовые озёра имеют облегчённый состав, который не изменяется в течение сезона абляции, что говорит о едином и постоянном источнике их питания в виде погребённых льдов. При этом на изотопном составе всех озёр не сказывается эффект испарения, что подтверждается зависимостью $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке тем госзадания МГУ им М.В. Ломоносова № АААА-А16-116033010122-4 “Модели и методы исследований гидрогеологических процессов для рационального использования подземных вод в условиях техногенеза”.

Acknowledgments. The study was supported as part of a government-funded project at Lomonosov Moscow State University No АААА-А16-116033010122-4 “Models and methods of hydrogeological processes study for the management of groundwater in technogenesis”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геоэкологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
- Геология СССР. Т. 25. Киргизская ССР. Часть 1. Геологическое описание. Книга 1: Недра. Москва, 1972. 280 с.
- Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Методическое пособие. СПб.: ААНИИ, 2016. 64 с.
- Ерохин С.А., Загинаев В.В. Тенденции прорывоопасности в развитии горных озёр Кыргызстана. В сб.: Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Тр. 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан). Таджикистан, 2020. Т. 1. С. 194–207.
- Загинаев В.В., Ерохин С.А., Маматканов Д.М. Влияние изменения температуры воды моренно-ледниковых озёр на их прорывоопасность // Изв. вузов Кыргызстана. 2018. № 11. С. 26–30.
- Загинаев В.В., Ерохин С.А., Кубанычбек уулу Н., Чонтоев Д.Т. Мониторинг высокогорных озёр северного склона Киргизского хребта с целью определения прорывоопасного периода. Бишкек: Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2019. № 4. С. 139–142.
- Aron P.G., Levin N.E., Beverly E.J., Huth T.E., Passey B.H., Pelletier E.M., Poulsen C.J., Winkelstern I.Z., Yarian D.A. Triple oxygen isotopes in the water cycle // *Chemical Geology*. 2021. № 565. 120026. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.120026>
- Barkan E., Luz B. High precision measurements of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in H_2O // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2005. V. 19. № 24. P. 3737–3742. <https://doi.org/10.1002/rcm.2250>
- Barkan E., Luz B. Diffusivity fractionations of $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{17}\text{O}$ and $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$ in air and their implications for isotope hydrology // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2007. V. 21. P. 2999–3005. <https://doi.org/10.1002/rcm.3180>
- Bershaw J. Controls on deuterium excess across Asia // *Geoscience*. 2018. V. 8. № 7. P. 257. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070257>.
- Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters // *Science*. 1961. V. 133. P. 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // *Tellus*. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>
- Falatkova K., Šobr M., Slavík M., Bruthans J., Janský B. Hydrological characterization and connectivity of proglacial lakes to a stream, Adygine ice-debris complex, northern Tien Shan // *Hydrological Sciences Journal*. 2020. V. 65. № 4. P. 610–623. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1711913>

- Falatkova K., Šobr M., Neureiter A., Schöner W., Jansky B., Häusler H., Engel Z., Benes V. Development of proglacial lakes and evaluation of related outburst susceptibility at the Adygene ice-debris complex, northern Tien-Shan // *Earth Surface Dynamics*. 2019. V. 7. P. 301–320.
https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1711913
- Gonfiantini R., Wassenaar L.I., Araguas-Araguas L., Aggarwal P.K. A unified Craig-Gordon isotope model of stable hydrogen and oxygen isotope fractionation during fresh or saltwater evaporation // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018. V. 235. P. 224–236.
https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.05.020
- Hulston J.R., Thode H.G. Variations in the S33, S34, and S36 contents of meteorites and their relation to chemical and nuclear effects // *Journ. of Geophys. Research*. 1965. V. 70. № 14. P. 3475–3484.
- Koster R.D., de Valpine D.P., Jouzel J. Continental water recycling and H_2^{18}O concentrations // *Geophys. Research Letters*. 1993. V. 20. P. 2215–2218.
https://doi.org/10.1029/93GL01781
- Kreutz K.J., Wake C.P., Aizen V.B., Cecil L.D., Synal H.A. Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: Influence of moisture transport and recycling in Central Asia // *Geophys. Research Letters*. 2003. V. 30. № 18. P. 1922.
https://doi.org/10.1029/2003GL017896
- Luz B., Barkan E. Variations of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in meteoric waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. V. 74. № 22. P. 6276–6286.
https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.08.016
- Meijer H.A.J., Li W.J. The use of electrolysis for accurate $\delta^{17}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope measurements in water // *Isotopes in Environmental Health Studies*. 1998. V. 34. № 4. P. 349–369.
https://doi.org/10.1080/10256019808234072
- Miller M.F. Isotopic fractionation and the quantification of ^{17}O anomalies in the oxygen three-isotope system: An appraisal and geochemical significance // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002. V. 66. № 11. P. 1881–1889. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703702008323>
- 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., Usabaliev R. Precipitation in the mountains of Central Asia: isotopic composition and source regions // *Atmos. Chem. Phys*. 2023. V. 24. P. 12203–12224.
https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2030
- Terzer-Wassmuth S., Araguas-Araguas L.J., Wassenaar L.I., Stumpp C. Global and local meteoric water lines for $\delta^{17}\text{O}/\delta^{18}\text{O}$ and the spatiotemporal distribution of $\Delta^{17}\text{O}$ in Earth's precipitation // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. 19056.
https://doi.org/10.1038/s41598-023-45920-8

Citation: Lyamina L.A., Erokhin S.A., Ermakov A.V., Gusev A.V., Omorova G.K., Orolbaeva L.E., Kapakly V.S., Filimonova E.A. Isotopic Signature ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, δD) of Glacial Lakes at Adygene Glacier Ice-Debris Complex, Northern Tien Shan. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 269–281. [In Russian].
doi: 10.7868/S2412376526020047

Isotopic Signature ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{17}\text{O}$, δD) of Glacial Lakes at Adygene Glacier Ice-Debris Complex, Northern Tien Shan

© 2026 L. A. Lyamina^{a,b,*}, S. A. Erokhin^{c,d}, A. V. Ermakov^{a,b}, A. V. Gusev^a,
G. K. Omorova^c, L. E. Orolbaeva^d, V. S. Kapakly^a, E. A. Filimonova^a

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bGeological Institute RAS, Moscow, Russia

^cInstitute of Water Problems and Hydropower of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic,
Bishkek, Kyrgyzstan

^dKyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan

*e-mail: lyamina-96@list.ru

Received October 17, 2025; revised November 30, 2025; accepted March 23, 2026

Research on the isotopic composition of glacial lakes is extremely limited in Kyrgyzstan. To fill this gap, the isotopic signatures of high-mountain lakes of the Adygene moraine-glacial complex were studied. We identified three groups of lakes. Lakes of the depression are characterized by a light isotopic composition of -11.29 to -12.17‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -71.6 to -78.1‰ for δD , where the main source of recharge is glacier-derived melt water from the Adygene Glacier. The isotopic composition of thermokarst lakes is determined by several factors: the time of their formation in the body of the main moraine, the sources of recharge

water balance and the period of water exchange. The old thermokarst lakes have a heavier isotopic composition than modern thermokarst lakes: for old thermokarst lakes $\delta^{18}\text{O}$ values range from -5.86 to -7.78‰ , for modern lakes $\delta^{18}\text{O}$ — from 8.74 to -10.16‰ ; for old thermokarst lakes δD values range from -37.95 to -51.34‰ and from -56.73 to -63.44‰ for modern lakes respectively. D-excess for lakes is also characterized by low numerical values — from 9.0 to 10.2‰ for old lakes. At the same time, the modern lakes have D-excess very close to the values of the lakes inside the moraine depression, ranging from 14.2 to 18.0‰ . For old thermokarst lakes, a closed system with a single source, atmospheric precipitation is more likely, while for modern thermokarst lakes, a mixed type of recharge and an open communicating system are assumed. The regression coefficient λ of the $\delta^{17}\text{O}-\delta^{18}\text{O}$ and $\Delta^{17}\text{O}$ lines constructed for glacier lakes confirms the lack of a strong influence of kinetic effects on the isotopic composition of the studied lakes, such as, for instance, evaporation or diffusion.

Keywords: stable isotopes of oxygen and hydrogen, glacial lakes, Adygene, Kyrgyzstan

REFERENCES

- Vasil'chuk Yu.K., Kotlyakov V.M. Osnovy izotopnoj geokriologii i glyciologii. Fundamentals of Isotopic Geocryology and Glaciology. Moscow: Moscow University Press, 2000: 616 p. [In Russian].*
- Geologiya SSSR. Geology of the USSR. Volume 25. Kyrgyz SSR. Part 1. Geological description. Book 1: Nedra, Moscow. 1972: 280 p. [In Russian].*
- Ekaykin A.A. Stabil'nye izotopy vody v glyciologii i paleogeografii. Metodicheskoe posobie. Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. Guidance manual. Saint Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2016: 64 p. [In Russian].*
- Erokhin S.A., Zaginaev V.V. Tendencii proryvoopasnosti v razviti gornyh ozyor Kyrgyzstana. Trends in the development of mountain lakes in Kyrgyzstan, in the collection: Mudflows: Catastrophes, Risk, Forecasting, and Protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Tadjikistan, 2020, 1: 194–207. [In Russian].*
- Zaginaev V.V., Erokhin S.A., Mamatkanov D.M. The influence of a change in water temperature in moraine-glacial lakes on their breakthrough. Izv. vuzov Kyrgyzstana. Izvestia of universities of Kyrgyzstan. 2018, 11: 26–30. [In Russian].*
- Zaginaev V.V., Erokhin S.A., Kubanychbek U.N., Chontoev D.T. Monitoring vysokogornyh ozer severnogo sklona Kirgizskogo hrebta s cel'yu opredeleniya proryvoopasnogo perioda. Monitoring of the high mountain lakes of the northern slopes of the Kyrgyz range to determine the potential dangerous period. Bishkek: Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan. 2019, 4: 139–142. [In Russian].*
- Aron P.G., Levin N.E., Beverly E.J., Huth T.E., Passey B.H., Pelletier E.M., Poulsen C.J., Winkelstern I.Z., Yarian D.A. Triple oxygen isotopes in the water cycle. Chemical Geology. 2021, 565: 120026. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.120026>*
- Barkan E., Luz B. High precision measurements of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in H_2O . Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2005, 19 (24): 3737–3742. <https://doi.org/10.1002/rcm.2250>*
- Barkan E., Luz B. Diffusivity fractionations of $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{17}\text{O}$ and $\text{H}_2^{16}\text{O}/\text{H}_2^{18}\text{O}$ in air and their implications for isotope hydrology. Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2007, 21: 2999–3005. <https://doi.org/10.1002/rcm.3180>*
- Bershaw J. Controls on deuterium excess across Asia. Geosci. 2018, 8 (7): 257. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070257>*
- Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters. Science. 1961, 133: 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>*
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. Tellus. 1964, 16 (4): 436–468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>*
- Falatkova K., Šobr M., Slavík M., Bruthans J., Janský B. Hydrological characterization and connectivity of proglacial lakes to a stream, Adygine ice-debris complex, northern Tien Shan. Hydrological Sciences Journal. 2020, 65 (4): 610–623. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1711913>*
- Falatkova K., Šobr M., Neureiter A., Schöner W., Jansky B., Häusler H., Engel Z., Benes V. Development of proglacial lakes and evaluation of related outburst susceptibility at the Adygine ice-debris complex, northern Tien-Shan. Earth Surface Dynamics. 2019, 7: 301–320. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1711913>*
- Gonfiantini R., Wassenaar L.I., Araguas-Araguas L., Aggarwal P.K. A unified Craig-Gordon isotope model of stable hydrogen and oxygen isotope fractionation during fresh or saltwater evaporation. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018, 235: 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.05.020>*
- Hulston J.R., Thode H.G. Variations in the S33, S34, and S36 contents of meteorites and their relation to chemical and nuclear effects. Journal of Geophysical Research. 1965, 70 (14): 3475–3484.*

- Koster R.D., de Valpine D.P., Jouzel J.* Continental water recycling and H_2^{18}O concentrations. *Geophys. Research Letters*. 1993, 20: 2215–2218.
<https://doi.org/10.1029/93GL01781>
- Kreutz K.J., Wake C.P., Aizen V.B., Cecil L.D., Synal H.A.* Seasonal deuterium excess in a Tien Shan ice core: Influence of moisture transport and recycling in Central Asia. *Geophys. Research Letters*. 2003, 30 (18): 1922.
<https://doi.org/10.1029/2003GL017896>
- Luz B., Barkan E.* Variations of $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in meteoric waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010, 74 (22): 6276–6286.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.08.016>
- Meijer H.A.J., Li W.J.* The use of electrolysis for accurate $\delta^{17}\text{O}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotope measurements in water. *Isotopes in Environmental Health Studies*. 1998, 34 (4): 349–369.
<https://doi.org/10.1080/10256019808234072>
- Miller M.F.* Isotopic fractionation and the quantification of ^{17}O anomalies in the oxygen three-isotope system: An appraisal and geochemical significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2002, 66 (11): 1881–1889.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703702008323>
- 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. *Atmosphere Chemistry Physics*. 2023, 24: 12203–12224.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2030>
- Terzer-Wassmuth S., Araguas-Araguas L.J., Wassenaar L.I., Stumpp C.* Global and local meteoric water lines for $\delta^{17}\text{O}/\delta^{18}\text{O}$ and the spatiotemporal distribution of $\Delta^{17}\text{O}$ in Earth's precipitation. *Scientific Reports*. 2023, 13: 19056.
<http://doi.org/10.1038/s41598-023-45920-8>