
ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.324

ИЗОТОПНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТОКА Р. МИЖИРГИ (КАВКАЗ): ЧЕТЫРЁХКОМПОНЕНТНОЕ РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА

© 2025 г. Ю. Н. Чижова^{1,2,*}, А. Д. Крекова³, С. С. Кутузов⁴, В. Н. Михаленко²,
И. И. Лаврентьев², М. А. Воробьев², М. В. Виноградова²

¹Институт геологии рудных месторождений, петрологии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

²Институт географии РАН, Москва, Россия

³Высшая школа экономики, Москва, Россия

⁴Школа наук о Земле, Университет штата Огайо, Колумбус, США

*e-mail: eacentr@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2024 г.

После доработки 01.03.2025 г.

Принята к публикации 18.04.2025 г.

Изучены изотопные параметры стока в бассейне ледника Мижирги в середине периода абляции, установлены изотопные и гидрохимические характеристики компонент стока — тающего льда на языке ледника, снега лавинных снежников, ледникового льда и снежного покрова в области питания. Выполненное четырёхкомпонентное расчленение стока по двум изотопным ($\delta^{18}\text{O}$, d-exc) маркерам и величине минерализации показало возможность изучения структуры таяния в высокогорном ледниковом бассейне. Эта возможность обусловлена отличием величин дейтериевого эксцесса снежного покрова, формирующегося в зимний и летний сезоны в области аккумуляции ледников Безенгийского узла оледенения.

Ключевые слова: изотопный состав кислорода, дейтериевый эксцесс, речной сток, ледники, Кавказ

DOI: 10.31857/S2076673425020037, EDN: FPRMPO

ВВЕДЕНИЕ

Талый ледниковый сток — основной компонент питания многих горных рек, изменяющийся в характерные фазы водного режима в сезонном и межгодовом масштабах. Наблюдения за изменениями вклада талого ледникового стока приобретают особую важность, поскольку позволяют судить о реакции ледников на климатические изменения. Задача установления вклада основных компонент питания реки в гидрологии чаще всего решается методом расчленения гидрографа. Графическое разделение гидрографа применяется в гидрологической практике более 60 лет и базируется на разделении быстрых и медленных компонент, часто приравниваемых соответственно к поверхностному стоку и грунтовым водам. Использование стабильных изотопов в качестве инструмента для разделения гидрографа стока на компоненты в конце 1960-х годов стало прорывом в гидрологии рек. В отличие от

графических методов, метод изотопного расчленения является измеримым, объективным и основывается на компонентах самой воды (Klaus, McDonnell, 2013). Впервые этот метод был применён в работе (Hubert et al., 1969), где расчленение гидрографа выполнялось с помощью трития. Впоследствии, с 1970-х годов метод стал применяться с использованием стабильных изотопов кислорода и водорода (Behrens et al., 1978; Sklash, Farvolden, 1979). Изотопные трассеры в сочетании с гидрохимическими (электропроводность воды, растворённый углерод и др.) применяют для выявления особенностей гидрологических процессов в пределах небольших водосборов, особенно в периоды выпадения дождей и таяния снега. Изотопное расчленение стока горных рек с ледниковым питанием позволяет исследовать гидрологические особенности ледниковых бассейнов и, более того, оценивать структуру таяния. Эти оценки возможны ввиду того, что

снежный покров в области аккумуляции отличается по своим изотопным и геохимическим параметрам от льда в области абляции и эти различия обуславливают корректность установления вклада отдельных компонент в сток на основе масс-балансовых уравнений.

На данный момент прямых наблюдений за поведением изотопных и гидрохимических характеристик речного стока в высокогорных бассейнах в России крайне мало, и изотопные методы применяются скорее эпизодически для количественных расчётов, как это было сделано для Кавказа (Васильчук и др., 2016; Rets et al., 2024) и Алтая (Банцев и др., 2018). Выполненное недавно исследование количественного вклада талых вод снега и ледников с разных по площади водосборов, а также осадков в сток р. Баксана охватывает два летних периода 2020 и 2021 годов (Rets et al., 2024).

Цель работы — анализ формирования талого стока в высокогорном ледниковом бассейне с применением методов геохимии стабильных изотопов. Для достижения этой цели установлены изотопные и гидрохимические характеристики компонент, участвующих в формировании речного стока, и выполнено изотопное расчленение гидрографа стока р. Мижирги.

Река Мижирги, вытекающая из-под одноимённого ледника на высоте 2640 м, является притоком р. Черек Безенгийский, относится к горно-долинному типу рек. Водный режим определяется в основном таянием ледников и высокогорных снегов (Панов, 1973). Максимальный расход воды отмечается в июне—июле, минимальный — в январе—феврале. Из-за небольших размеров реки на ней нет постоянного гидропоста и отсутствуют регулярные наблюдения. С 2000-х годов р. Мижирги была объектом нескольких гидролого-гидрохимических работ (Газаев и др., 2012; Керимов и др., 2014; Шарпова и др., 2018; Кучменова, 2021), в частности, связанных с оценкой содержания в воде микроэлементов и тяжёлых металлов (Reutova et al., 2018; Керимов, Курашева, 2022).

МЕТОДЫ

Район исследований. Ледник Мижирги (43.06° с.ш., 43.17° в.д.) расположен на северо-западном склоне Бокового хребта Большого Кавказа (рис. 1) в Безенгийской горной долине. Ледник Мижирги относится к морфологическому типу сложных долинных ледников. Он берёт своё

начало в цирке, образованном северными стенами Коштантау и вершиной Кундюм-Мижирги (4526 м), являющимися частью Северного массива. Зоной питания ледника служит группа горных вершин Дыхтау-Коштантау. Согласно каталогу ледников России (Хромова и др., 2021), по данным на 2018 год площадь ледника Мижирги составляла 12.44 км², длина — 9.17 км. Отметка высшей точки ледника — 5150 м, низшей — 2640 м.

Характерная особенность ледника Мижирги — сильно заморенная поверхность языка практически на всём его протяжении, что может влиять на интенсивность таяния льда. Продолжительность периода аккумуляции на ледниках бассейна изменяется в широких пределах: от 150 дней на концах языков до 365 дней на высотах более 4500 м. Основными источниками питания ледников служат твёрдые атмосферные осадки, метелевый перенос и лавины. Общее количество твёрдых атмосферных осадков на ледниках 600–1000 мм, что составляет 48–100% общей величины питания ледников. Сложные долинные и некоторые карово-долинные ледники имеют дополнительное питание за счёт обвалов льда всяких ледников. Продолжительность периода таяния изменяется от 100–220 дней на языках ледников до нескольких дней в областях питания. В широком диапазоне изменяются и величины таяния по высотным зонам, составляя 68 м на высотах около 2100 м и до 0.1 м на высоте 4200 м. Для оценки изотопно-геохимических параметров льда в области питания ледников Безенгийского узла оледенения летом 2021 г. было выполнено керновое бурение ледника Безенги.

Полевые методы. Отбор проб воды для изучения вариаций изотопного состава стока р. Мижирги проводился в период с 6 по 16 июля 2022 г. Регулярные гидрохимические измерения выполняли на территории альплагеря «Безенги» на левом рукаве реки Мижирги, ~750 м выше её слияния с рекой Черек Безенгийский (см. рис. 1). Площадь бассейна к створу отбора проб составляет около 43 км².

Отбор речной воды на гидропосте производили трижды в сутки — в 7:30 утра, около 15 часов дня и в 19–20 часов вечера каждый день. Все пробы отбирали единообразно в метре от берега на глубине ~10 см. Вместе с отбором проб измеряли температуру воды, мутность, электропроводность (минерализацию), pH. Уровень и температуру воды фиксировали каждую минуту установленным на гидропосте датчиком-логгером Keller DCX-18. Расходы воды рассчитывали по эмпирической зависимости расходов от

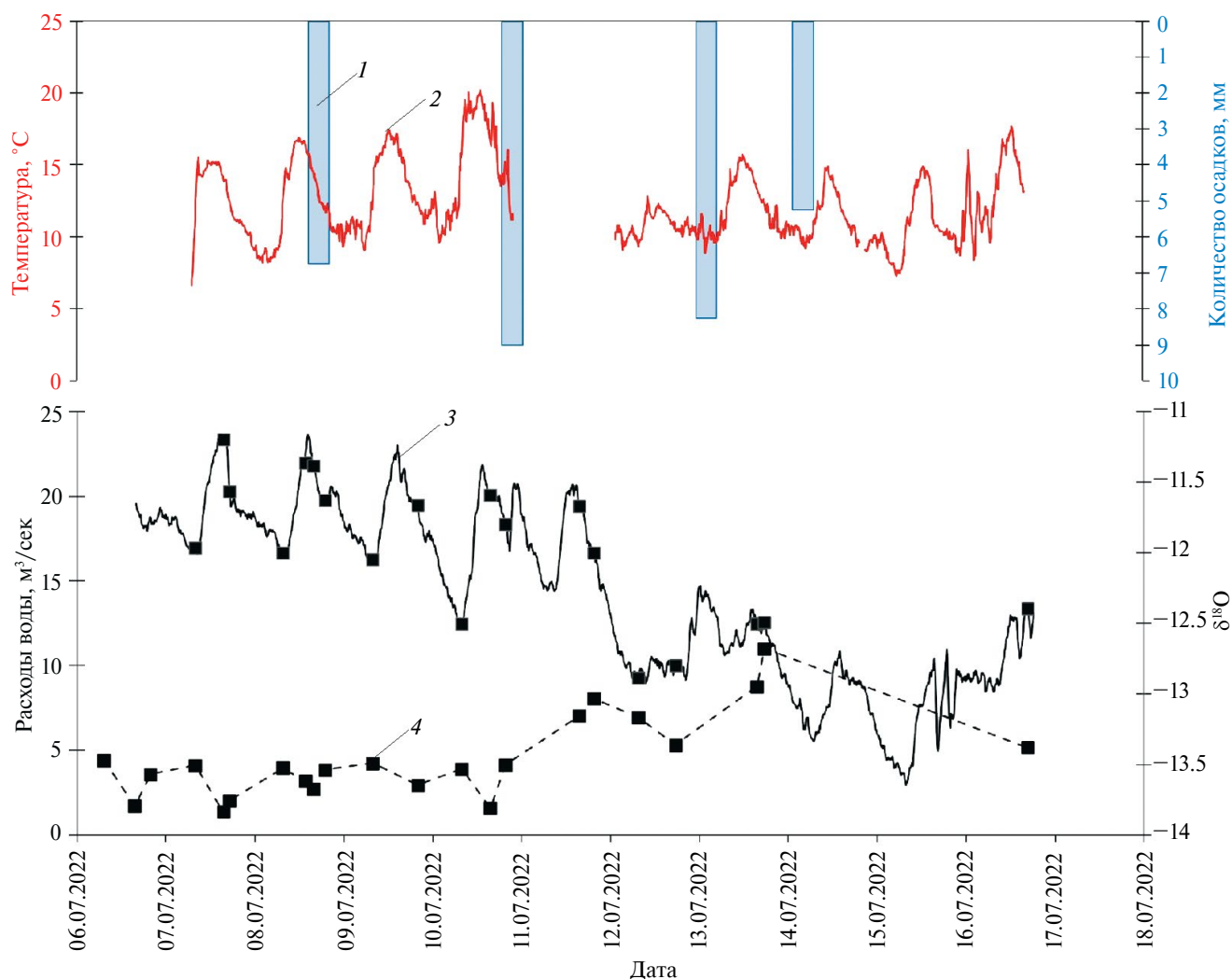


Рис. 2. Количество осадков (1), среднесуточная температура (2), расходы воды р. Мижирги (3) и значения $\delta^{18}\text{O}$ воды (4) 6–16 июля 2022 г.

Fig. 2. Precipitation amount (1), mean daily temperature (2), discharge of the Mizhirgi River (3) and $\delta^{18}\text{O}$ values of water (4) on July 6–16, 2022

составлял около $18.5 \text{ м}^3/\text{с}$, а в последующие дни $9.4 \text{ м}^3/\text{с}$. Слой стока с 6 по 12 июля составлял около 37 мм в сутки, в последующие дни — около 18 мм. Суточные колебания расходов составляли порядка $4\text{--}5 \text{ м}^3/\text{с}$, максимальные отмечались в дневное и вечернее время, что связано с активным таянием на леднике и поступлением талых вод в сток, минимальные — в ночное и утреннее время. За период с 6 по 16 июля 2022 г. значения $\delta^{18}\text{O}$ воды в р. Мижирги варьировали от -12.68 до -13.83‰ , значения δD — от -82.6 до -92.35‰ (табл. 1). На протяжении периода наблюдений в бассейне р. Мижирги (с 6 по 16 июля) прослеживается незначительное общее увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ речной воды (см. рис. 2). После

каждого события выпадения дождя отмечалось повышение значений $\delta^{18}\text{O}$ стока.

Кора таяния на языке ледника Мижирги характеризовалась значением $\delta^{18}\text{O} = -17.22\text{‰}$ (см. табл. 1). В области аккумуляции ледника Мижирги не удалось выполнить отбор образцов, однако в области питания соседнего ледника Безенги были получены значения $\delta^{18}\text{O}$ фирна и льда, которые могут быть использованы в качестве референтных для данной работы.

Изотопный и химический состав льда в области аккумуляции ледника Безенги. В верхних 14 м ледникового керна, соответствующих 6 м водного эквивалента, были определены значения $\delta^{18}\text{O}$, δD , концентрации основных ионов. По глубине

Таблица 1. Изотопные параметры и минерализация снега, льда, стока и атмосферных осадков в бассейне ледника Мижирги

Состав образца	Дата	Q, м³/с	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	δD , ‰	d-exc, ‰	Минерализация, мг/л
р. Мижирги	06.07.22	19.4	–13.47	–89.17	18.6	31.0
	06.07.22	19.8	–13.79	–91.99	18.3	20.7
	06.07.22	18.8	–13.57	–90.77	17.8	24.8
	07.07.22	16.9	–13.50	–90.01	18.0	31.1
	07.07.22	23.3	–13.83	–92.35	18.3	20.0
	07.07.22	20.3	–13.75	–91.85	18.2	21.8
	08.07.22	16.7	–13.52	–90.33	17.8	29.0
	08.07.22	22.0	–13.62	–91.25	17.7	–
	08.07.22	21.8	–13.67	–91.70	17.7	20.0
	08.07.22	19.8	–13.54	–90.37	17.9	23.1
	09.07.22	16.3	–13.49	–89.76	18.1	27.0
	09.07.22	19.5	–13.64	–90.33	18.8	22.0
	10.07.22	12.5	–13.53	–89.21	19.0	30.1
	10.07.22	20.1	–13.81	–91.35	19.1	20.0
	10.07.22	18.3	–13.50	–90.10	17.9	22.0
	11.07.22	19.4	–13.16	–87.08	18.2	–
	11.07.22	16.7	–13.03	–86.39	17.9	–
	12.07.22	9.3	–13.17	–85.75	19.6	25.0
	12.07.22	10.0	–13.36	–87.94	18.9	20.0
	13.07.22	12.5	–12.95	–83.56	20.0	–
	13.07.22	12.6	–12.68	–82.64	18.8	–
	16.07.22	13.4	–13.38	–87.86	19.2	20.0
Лёд на языке – кора таяния			–17.22	–118.18	19.60	2.0
Снег из лавинного снежника в верхней части языка ледника Мижирги			–16.15	–110.92	18.29	–
Ручей на поверхности языка ледника Мижирги			–14.04	–93.14	19.21	–
Дождь			–0.68	2.13	7.59	–
Дождь			–1.28	0.41	10.61	–
Родник 1			–12.11	–80.69	16.20	–
Родник 2			–12.02	–80.50	15.65	74.7
Ручей под склоном в кармане орографически левой береговой морены ледника Мижирги			–11.79	–78.82	15.48	–

керны значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD ледникового льда изменяются от –4.9 до –22.8 и от –12.2 до –170.0‰ соответственно (рис. 3, а). Величины дейтериевого эксцесса варьируют от 12.2 до 31‰. Сумма катионов и анионов, которую условно можно

принять за общую минерализацию льда, варьирует от 0.4 до 11 мг/л (см. рис. 3, б). В распределении значений $\delta^{18}\text{O}$ по глубине проявляется сезонность, выраженная в понижении значений в зимний период и повышении – в летний.

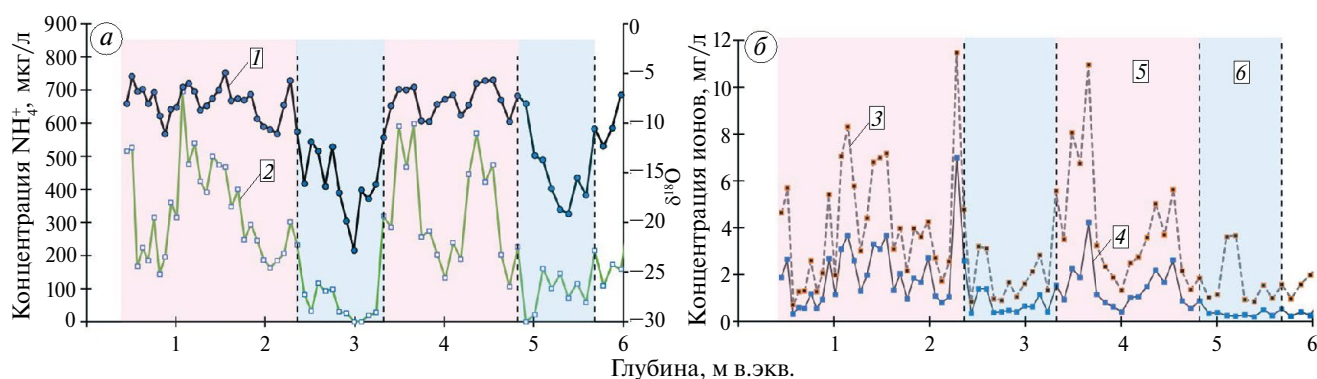


Рис. 3. Величина $\delta^{18}\text{O}$ (1) льда, содержание иона аммония (2), катионов (3) и анионов (4) в верхних 6 м в.экв. керна ледника Безенги в летних (5) и зимних (6) горизонтах

Fig. 3. The $\delta^{18}\text{O}$ values of ice (1), ammonium ion (2), cation (3) and anion (4) concentrations in the upper 6 m w.e. of the Bezengi ice core in summer (5) and winter (6) horizons

Величины d-экс также немного изменяются по сезонам — для летних значения выше, в отдельных случаях достигают 25–30‰, в то время как в зимние сезоны, как правило, d-экс составляет от 14 до 20‰. Высокие величины дейтериевого эксцесса для снега и льда на Кавказе обусловлены происхождением осадков из районов Средиземного и Чёрного морей (Чижова и др., 2023), а в летний сезон дополнительным вкладом повторно испаряющейся влаги.

Ярче всего сезонность проявляется в концентрациях иона аммония, что позволяет использовать их для разделения сезонов в ледяном керне (Mikhaleenko et al., 2024). Такая выраженная сезонная изменчивость обусловлена преимущественно двумя факторами (Maupetit et al., 1995). Во-первых, основным источником NH_4^+ в снеге и, соответственно, в ледниковом льду в европейском регионе служит сельскохозяйственная деятельность, которая практически отсутствует в зимний период. Во-вторых, ион аммония может попадать на большие высоты с потоками хорошо развитой горно-долинной циркуляции, которая также в большинстве случаев характерна для тёплой половины года. Таким образом, содержание NH_4^+ от 0 до 100 мкг/л маркирует холодные сезоны, а в горизонтах тёплых сезонов возрастает до 1000–1500 мкг/л.

С помощью содержания NH_4^+ были чётко установлены границы летнего сезона, что дало возможность оценить изотопные параметры горизонтов льда, сформированных летними осадками. С учётом допущения, что все летние осадки, выпадающие в области аккумуляции ледника Безенги, переходят в лёд и что общая картина формирования изотопного состава

снега повторяется из года в год, можно говорить о том, что летний снег в области аккумуляции Безенгийского узла оледенения для двух летних сезонов, предшествующих отбору проб речной воды, имеет средние значения $\delta^{18}\text{O} = -7.9 \pm 1.6\text{‰}$, $\delta\text{D} = -41.9 \pm 15.2\text{‰}$ и d-экс = $21.3 \pm 3.9\text{‰}$, а среднее значение общей минерализации летних горизонтов составило 4 ± 2.5 мг/л. Для зимних горизонтов средние значения $\delta^{18}\text{O}$, δD и d-экс составили -16.3 ± 2.8 , -113.8 ± 24 и $16.9 \pm 2.7\text{‰}$ соответственно. Средняя величина общей минерализации составила 1.8 ± 1 мг/л. Интересно, что среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ льда зимних горизонтов в области питания ледника Безенги практически совпадает со значением $\delta^{18}\text{O}$, полученным для лавинного снежника (см. табл. 1), который был сформирован, очевидно, зимним снегом. Лёд, отобранный на языке ледника Мижирги, представляющий кору таяния, имеет чуть более низкое значение $\delta^{18}\text{O}$, чем среднее для зимних горизонтов в области аккумуляции, вероятно, на языке вскрывается более старый лёд. Очевидно, что на языке ледника с поверхности можно встретить разный по изотопному составу лёд из-за неравномерности таяния и разного возраста льда, однако для величины общей минерализации мы получили близкие значения для современного льда в области аккумуляции (1.8 мг/л) и льда в области абляции на леднике (2 мг/л).

Предположено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации летних горизонтов керна Безенги в целом описывают летний снег и вблизи границы питания, где в течение летнего сезона он активно тает. Поэтому эти значения использованы в качестве параметров летнего снега для расчёта гидрографа.

Расчленение гидрографа. На изотопной диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ – δD (рис. 4) точки, соответствующие воде ручьёв, лежат на линии, которая отражает процессы смешения тающего льда и дождевой воды. Эта линия смешения описывается уравнением $\delta\text{D} = 7.4 \delta^{18}\text{O} + 8.7$. Все точки, относящиеся к пробам воды р. Мижирги, в целом, соответствуют этой линии смешения, однако расположены чуть выше, и это, вероятно, говорит о том, что в речном стоке присутствуют не два основных компонента — талая ледниковая и дождевая вода, но и третий компонент — летний снежный покров вблизи границы питания.

Это обстоятельство особенно заметно, если рассмотреть все эти значения в координатах $\delta^{18}\text{O}$ – d-exs (см. рис. 4, б). Дейтериевый эксцесс служит показателем второго порядка и рассчитывается из формулы линии Крейга как $\text{d-exs} = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ (Dansgaard, 1964), которая в глобальном масштабе описывает распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD атмосферных осадков (линия метеорных вод). Использование дейтериевого эксцесса здесь корректно, поскольку все полученные значения, кроме дождевой воды, не соответствуют линии метеорных вод, и, следовательно, дейтериевый эксцесс является самостоятельным изотопным трассером.

Воды ручьёв, точки которых на изотопной диаграмме (см. рис. 4, а–б) лежат на линии

смешения, являются смесью талых и дождевых вод. Пробы из ручьёв отбирались на склоне вблизи лавинных снежников, скорее всего их воды в наибольшей степени связаны с таянием этих перелетовывающих снежников и фильтрацией дождевой воды. Дождевые воды могут попадать в речной сток напрямую, а могут, смешиваясь и фильтруясь через рыхлые отложения. При этом происходит обогащение фильтрующейся воды основными ионами, и в результате воды ручьёв заметно отличаются по величине минерализации (см. рис. 4, в).

Использование дейтериевого эксцесса как второго самостоятельного изотопного трассера и величины минерализации позволяет решить систему уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\begin{cases} f_1 + f_2 + f_3 + f_4 = 1, \\ \delta^{18}\text{O}_1 f_1 + \delta^{18}\text{O}_2 f_2 + \delta^{18}\text{O}_3 f_3 + \delta^{18}\text{O}_4 f_4 = \delta^{18}\text{O}_{\text{стока}}, \\ d_1 f_1 + d_2 f_2 + d_3 f_3 + d_4 f_4 = d_{\text{стока}}, \\ M_1 f_1 + M_2 f_2 + M_3 f_3 + M_4 f_4 = M_{\text{стока}}, \end{cases} \quad (1)$$

где f_i — доли отдельных компонент в формировании общего стока (льда ледника, снежного покрова вблизи границы питания, дождевой воды и воды ручьёв соответственно), $\delta^{18}\text{O}_i$ — изотопный состав кислорода каждой компоненты, d_i — дейтериевый эксцесс каждой компоненты, M_i — минерализация воды каждой компоненты.

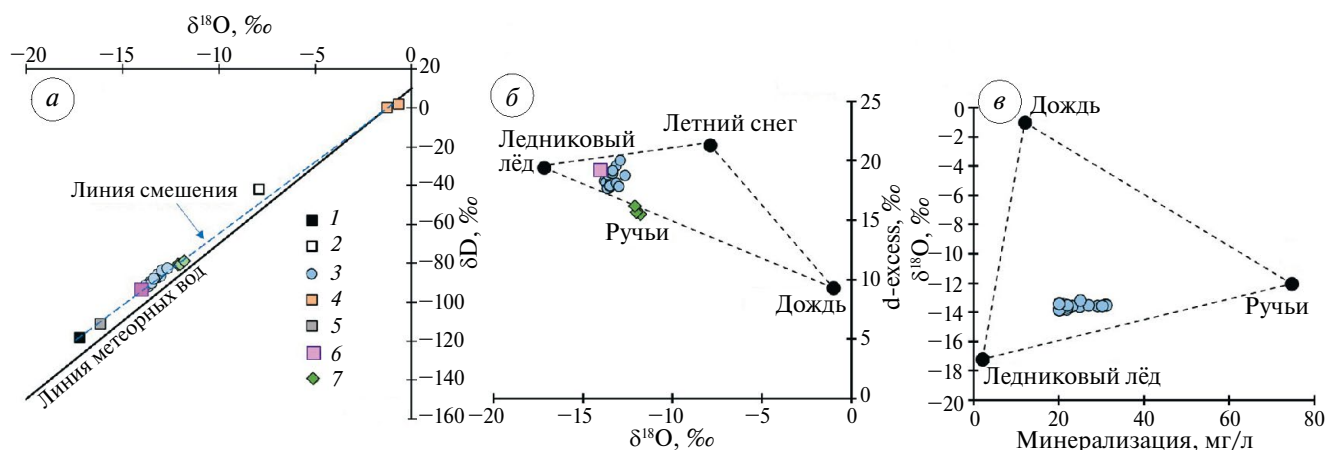


Рис. 4. Изотопные параметры речных вод и опробованных компонент таяния: соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – δD в компонентах стока и в воде р. Мижирги (а), соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – d-exs (б), $\delta^{18}\text{O}$ –минерализация (в). Прерывистая линия показывает границы процессов смешения: 1 — лёд на языке ледника Мижирги (кора таяния), 2 — летний снег по данным осреднения керна ледника Безенги, 3 — вода р. Мижирги, 4 — дождевая вода, 5 — лавинный снежник на борту долины, 6 — ручей на поверхности языка ледника Мижирги, 7 — ручьи в долине

Fig. 4. Isotopic parameters of river waters and runoff components: the $\delta^{18}\text{O}$ – δD plot for runoff components and the water of the Mizhirgi River (a), relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and d-exs values (b), between $\delta^{18}\text{O}$ values and mineralization (v). The dashed line shows the boundaries of mixing processes: 1 — ice on the Mizhirgi Glacier terminus (melting crust), 2 — summer snow according to averaging data of the Bezengi ice core, 3 — water of the Mizhirgi River, 4 — rainwater, 5 — avalanche snow-pack on the valley side, 6 — stream on the surface of the Mizhirgi glacier terminus, 7 — streams in the valley

В качестве основных параметров компонент стока были выбраны значения, усреднённые по отобранным пробам (табл. 2). Поскольку измерения минерализации дождевой воды провести не удалось, её значения были взяты из работы (Васильчук и др., 2016) как характерные для Кавказа в летнее время.

Расчёт по системе уравнений (1) выполнялся начиная с 8 июля, поскольку до этого дня если осадки в водосборе и выпадали, они не были отобраны. Поэтому с 6 по 8 июля расчёт проводили по системе уравнений, исключаяющей уравнение баланса по дейтериевому эксцессу, и полагали, что составляющая дождевого питания равна нулю. Система (1) совместна и имеет единственное решение, поскольку ранг расширенной матрицы равен рангу матрицы системы, а также числу неизвестных.

Выполненный расчёт показал, что доля ледниковой составляющей в стоке р. Мижирги варьирует от 43 до 59%, вклад таяния летнего снежного покрова составляет от 8 до 28%, воды ручьёв — от 23 до 40%. Прямое участие дождей составляет первые проценты, в наибольшей степени было проявлено для 8 июля, когда оно достигло 10% в стоке реки в середине дня, а также 10 июля вклад дождя составил 8%. Таким образом, гидрограф разделён на четыре составляющие: сток, образованный за счёт таяния льда на леднике Мижирги, таяния снежного покрова вблизи области аккумуляции, жидкие атмосферные осадки и воды ручьёв.

Учитывая, что ручьи формируются двумя источниками — дождевыми водами и талыми водами снежников, т.е. смешение оказывается двухкомпонентным, то по уравнению баланса:

$$\delta^{18}O_1 f_1 + \delta^{18}O_2 (1 - f_1) = \delta^{18}O_{\text{стока}}, \quad (2)$$

где $\delta^{18}O_i$ — изотопный состав кислорода, можно рассчитать компонент смешения и показать, что воды ручьёв на 68% состоят из талых вод

снежника и на 32% — из дождей. На рис. 5 представлено четырёхкомпонентное расчленение гидрографа р. Мижирги.

Наименьшие расходы воды и доли ледниковой составляющей стока отмечаются в утреннее время, тогда как максимальные значения обоих показателей, как правило, приходится на дневное время. Для утренних часов характерно повышение доли подземной составляющей (ручьи), поскольку ночью отсутствует прямое таяние льда. В дневное время доля ледниковой составляющей стока повышается, так как таяние на леднике достигает максимального уровня.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Задача решения системы линейных алгебраических уравнений корректна, если существующее решение единственно и непрерывно зависит от исходных данных, то есть малым изменениям исходных данных соответствуют малые изменения решения задачи. Наибольшая неопределённость изотопных параметров, принятых в расчленении гидрографа, характерна для величин $\delta^{18}O$ и дейтериевого эксцесса летнего снега. Стандартное отклонение величины $\delta^{18}O$ от среднего значения для летних горизонтов составляет 1.6‰. Мы использовали эту величину для оценки устойчивости системы линейных уравнений. При изменении входящего сигнала летних осадков на эту величину (+1.6‰), которая характеризует изменение коэффициента на 20%, результаты расчёта показывают увеличение доли ледникового льда на 4% (с 48 до 52%) и уменьшение доли таяния летнего снега с 23 до 20%. Относительное уменьшение долей талого льда и летнего снега, таким образом, составило 8 и 13%, при этом тенденции в соотношении долей компонент и изменении их во времени сохранились. Таким образом, можно сказать, что система воспроизводит результаты при изменении входных параметров.

Таблица 2. Параметры основных компонент, принятые для расчёта

Компоненты стока	n	Параметры		
		$\delta^{18}O$	d-excess	Минерализация
«Летний» снег	48	−7.9	21.3	4
Лёд на языке — кора таяния	1	−17.2	19.4	2
Дождевая вода	2	−1	9.1	12
Ручьи	3	−12	15.8	74.7

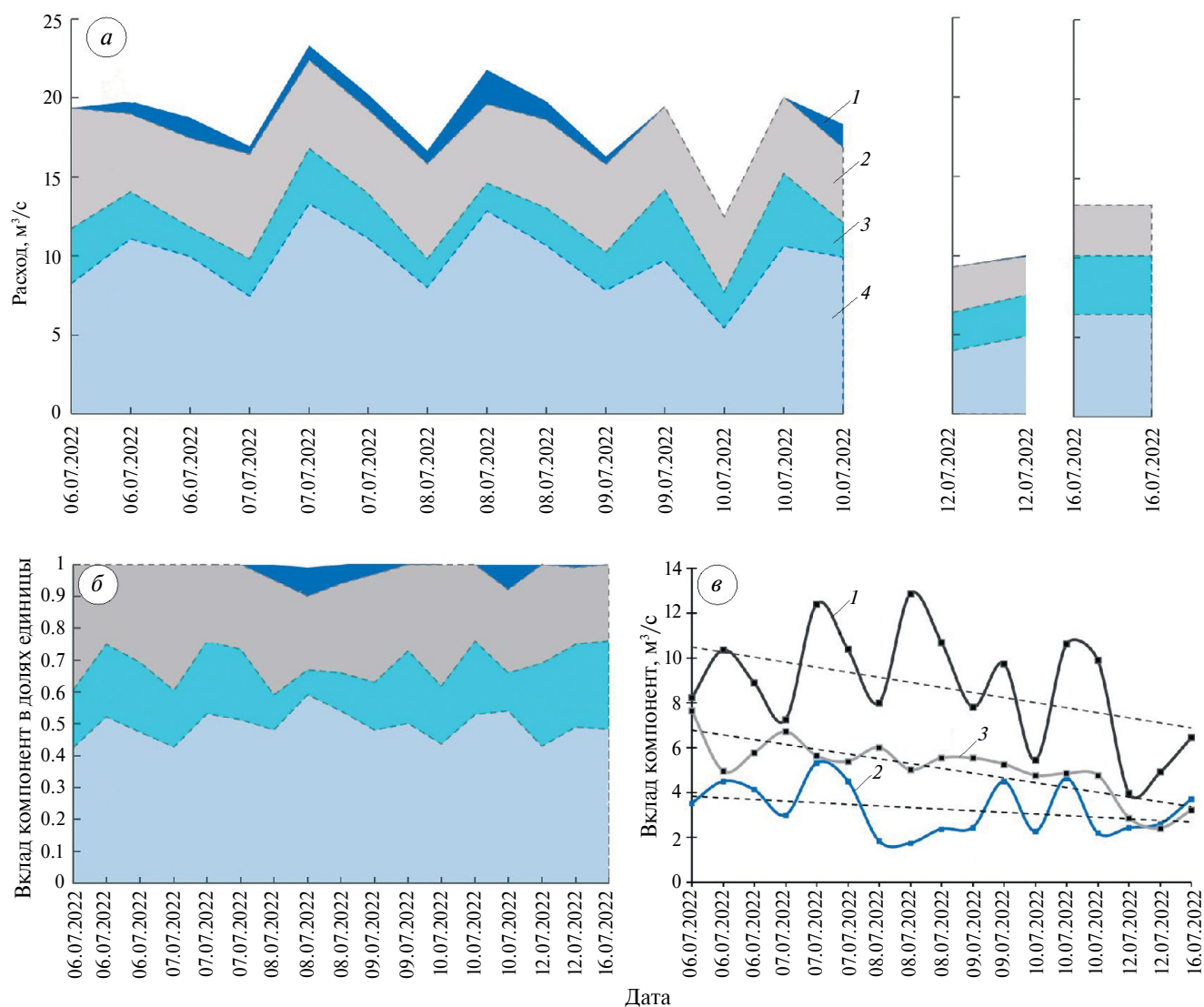


Рис. 5. Расчленение гидрографа р. Мижирги (а), соотношение вклада основных компонент в речной сток (б) и тенденции изменений вклада льда ледника, ручьёв и талого летнего снега (в): 1 – вклад таяния ледникового льда, 2 – летнего снежного покрова, 3 – ручьёв, 4 – дождей

Fig. 5. The isotope hydrograph separation of the Mizhirgi River (а), the ratio of the main components input to river runoff (б) and trends in the contribution of glacial ice, streams and melted summer snow (в): 1 – contribution of glacial ice melting, 2 – snow cover melting, 3 – springs, 4 – rainfall

В нашем исследовании для решения балансовых уравнений в качестве параметров компонент таяния были использованы усреднённые значения $\delta^{18}\text{O}$, однако в горно-ледниковом бассейне каждая из компонент обладает достаточно широким диапазоном вариаций $\delta^{18}\text{O}$ и d-экс. Наибольшие показатели можно ожидать для выпадающих атмосферных осадков и ледникового льда в разных частях ледника. Очевидно, что не только в области аккумуляции, но и на языке ледника пространственная неоднородность изотопных характеристик очень велика

и принятые нами значения нельзя отождествлять с истинными средними значениями снежного покрова и льда ледника Мижирги. Короткое время наблюдений в данном случае служит некоторым условием достоверности полученных результатов, поскольку этот период является временным срезом, характеризующим таяние «здесь и сейчас». Мы приняли допущение, что летние и зимние горизонты в ледниковом керне, полученном у Безенгийской стены, отражают изотопные параметры твёрдых атмосферных осадков в области аккумуляции ледника

Мижирги, которые значительно варьируют в сезонном и межгодовом масштабах.

Формирование изотопных характеристик ледникового льда в области аккумуляции Безенгийского узла оледенения. В верхних 6 м ледяного керна мы выделили два летних и два зимних сезона, полный диапазон вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ составил 17.9‰ (от -4.9 до -22.8 ‰), а для среднесезонных величин (осреднённых значений внутри выделенных сезонов) — 8.4‰. Внутри летнего сезона значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -4.9 до -11.4 ‰, с разбросом значений относительно среднего в 1.6‰ (st.dv.). Для двух горизонтов зимних сезонов $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -11.9 до -22.8 ‰, с разбросом значений относительно среднего в 2.8‰. Горизонты льда, отнесённые к летним сезонам, значительно превосходят по мощности слои льда, отнесённые к зимним сезонам — средняя мощность двух летних слоёв 1.75 м водного эквивалента (в.э.), средняя мощность зимних слоёв 0.78 м в.э., при этом годовой слой аккумуляции составил в 2021 г. 2.8 м в.э., и в 2020 г. 2.3 м в.э. Значительное накопление осадков на плато обусловлено разгрузкой влажных воздушных масс и, вероятно, нахождением точки бурения на высоте 4700 м. Величина снегонакопления в высокогорье, несмотря на общую тенденцию увеличения количества выпадающих осадков от долины к вершинам, зависит от условий рельефа. Так, для южного склона Эльбруса считается, что максимальное снегонакопление приурочено к выровненным плато на высоте около 4000 м на леднике Гарабаши (Бажев и др., 1995) и Западному плато Эльбруса (Лаврентьев и др., 2022). Ранее были получены величины аккумуляции и значений $\delta^{18}\text{O}$ сезонных и годовых слоёв для нескольких кернов на Западном плато Эльбруса на высоте 5115 м над ур. моря. (Козачек и др., 2014; Чижова и др., 2023а), осреднённые значения слоя аккумуляции для летних горизонтов составили около 1 м в.экв. и около 0.8 м в.экв. для горизонтов, отнесённых к зимним периодам (Чижова и др., 2023а). По величинам слоя аккумуляции в керне на плато у Безенгийской стены хорошо заметно, что увеличенное снегонакопление здесь связано именно с летними сезонами. Это отражается и в значениях $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d-ехс ледникового льда (рис. 6).

Сопоставляя средние сезонные значения $\delta^{18}\text{O}$, полученные для ледниковых кернов с Западным плато Эльбруса (Чижова и др., 2023а), и для атмосферных осадков, выпадавших на станции Азау у подножия Эльбруса (Чижова и др., 2023б), можно заметить, что среднесезонные величины

$\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда Безенги не соответствуют общему тренду падения значений $\delta^{18}\text{O}$ с высотой (тренд описывает высотный изотопный эффект в -0.2 ‰ $\delta^{18}\text{O}/100$ м). Это отклонение связано, по нашему мнению, с преобладанием летнего снегонакопления и соответствующим сдвигом величины $\delta^{18}\text{O}$ в область более высоких значений. Высокие значения дейтериевого эксцесса в летних горизонтах ледникового льда Безенги в целом характерны для высокогорья Центрального Кавказа. Увеличенное снегонакопление в летние сезоны, приводящее к преобладанию в керне изотопного сигнала летних осадков, отражается и в положении значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD относительно глобальной линии метеорных вод (см. рис. 6, б). Заметно, что в целом, при относительно высоких значениях d-ехс, связанных в значительной мере с источником влаги для осадков Кавказа, для слоёв льда, относящихся к летним сезонам, характерно увеличение дейтериевого эксцесса, в связи с чем уравнение линии аппроксимации имеет вид $\delta\text{D} = 8.57 \times \delta^{18}\text{O} + 26$. Полученные изотопные параметры ледникового льда в области аккумуляции Безенгийского узла оледенения могут характеризовать как региональные особенности, так и высокую межгодовую изменчивость, поскольку рассматривались только два годовых слоя. Дальнейшее изучение ледникового керна, вероятно, позволит рассмотреть эти аспекты более подробно. Тем не менее, именно выраженное отличие в величинах дейтериевого эксцесса между зимними и летними горизонтами льда, а, следовательно, и осадками в области аккумуляции, позволяет использовать этот параметр как дополнительный изотопный маркер для изучения процессов таяния в ледниковом бассейне.

Динамика и структура таяния в бассейне ледника Мижирги за время наблюдений. Как правило, для рек в высокогорье в значениях $\delta^{18}\text{O}$ стока проявляется заметный суточный ход. В данной работе суточные колебания изотопного состава кислорода невелики. Скорее всего, это связано с особенностями ледника Мижирги, возможно, с наличием подлёдного резервуара (состоящего из трещин, каверн, полостей), куда днём попадает основной сток воды с поверхности ледника, из-за чего попадание талой воды в реку растянуто во времени. Уменьшение доли талого ледникового льда и снежного покрова в ночные часы компенсируется вкладом ручьёв, которые приносят изотопный сигнал талых вод снежников с некоторым запаздыванием (см. рис. 5, б).

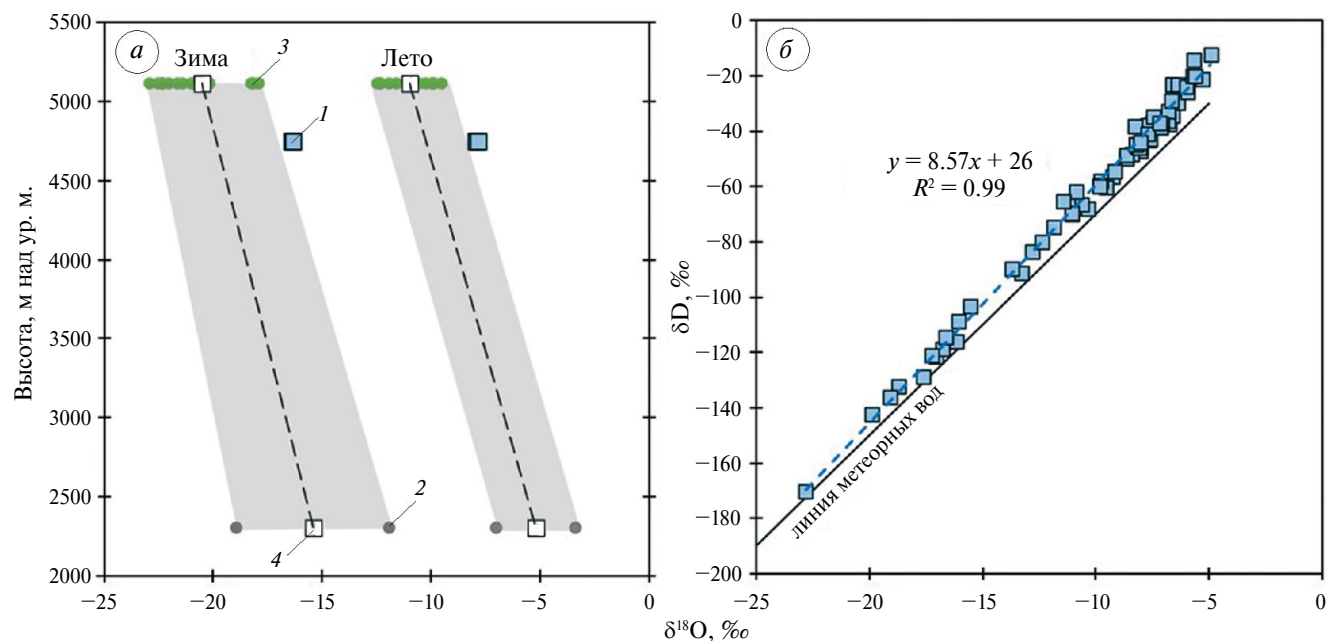


Рис. 6. Значения $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда в зоне аккумуляции Безенгийского узла оледенения по сравнению с величинами $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков и ледникового льда Эльбруса (а) и относительно линии метеорных вод (б): 1 – средние сезонные величины $\delta^{18}\text{O}$ зимних и летних горизонтов льда в керне Безенги, 2 – средние величины $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков зимних и летних периодов на станции Азау (Чижова и др., 2023а), 3 – средние сезонные величины $\delta^{18}\text{O}$ зимних и летних горизонтов льда в кернах с Западного плато Эльбруса (Чижова и др., 2023а), 4 – высотный изотопный эффект на основе средних значений $\delta^{18}\text{O}$ сезонов

Fig. 6. The $\delta^{18}\text{O}$ values of glacial ice in the accumulation zone of the Bezengi glacier basin relative to the isotope signature of precipitation and glacial ice of Mt. Elbrus (a) and relative to the meteoric water line (b): 1 – avg. seasonal $\delta^{18}\text{O}$ values of winter and summer ice horizons in the Bezengi ice core, 2 – average $\delta^{18}\text{O}$ values of precipitation in winter and summer periods at the Azau station (Chizhova et al., 2023a), 3 – average seasonal $\delta^{18}\text{O}$ values of winter and summer ice horizons in cores from the Elbrus Western Plateau (Chizhova et al., 2023a), 4 – altitudinal isotope effect based on average $\delta^{18}\text{O}$ values of seasons

За время наблюдений произошло общее падение расходов р. Мижирги (см. рис. 2), что связано с уменьшением таяния на леднике. Несмотря на то, что температуры воздуха за этот период были довольно стабильными, менялись условия облачности. Если с 6 по 10 июля отмечалась ясная погода с высоким уровнем инсоляции, то с 11 июля усилилась облачность, и прямого солнца в течение дня не наблюдалось. Вероятно, с этим связано не только падение расходов реки из-за уменьшения таяния на леднике, но и изменение в пропорции “талый лёд – талый летний снег”. При расчленении гидрографа мы использовали значение $\delta^{18}\text{O}$ коры таяния, отобранной в центральной части ледника, где моренный материал на поверхности практически отсутствует, но ниже этой точки он представлен тонким чехлом. Вероятнее всего, для таяния ледникового льда важным фактором служит прямая солнечная радиация, которая приводит к эффективному таянию на языке ледника, покрытом маломощным слоем моренного материала.

При этом доля таяния летнего снежного покрова практически не изменилась (см. рис. 5). Это может быть связано, во-первых, с тем, что в таянии снега доминирующую роль играет температура воздуха, а во-вторых, с тем, что выпадение дождей на снежную поверхность также может приводить к интенсификации таяния. Интересно, что доля ручьёв уменьшалась вслед за уменьшением доли ледникового льда (см. рис. 5, в), и это может указывать на то, что подземный резервуар в значительной степени контролируется поступлением талых ледниковых вод. Быстрая реакция уменьшения вклада ручьёв вслед за уменьшением вклада талых ледниковых вод говорит о небольшом объёме подземного резервуара, скорее всего, это система трещин и полостей в пределах горно-ледникового бассейна. Таким образом, в воде ручьёв могут присутствовать не только талые воды лавинных снежников, но и талые ледниковые воды.

Вклад подземной компоненты в речном стоке варьирует от 23 до 40%, в среднем за период

наблюдений он составил 29%. Зная соотношение в воде ручьёв талой и дождевой составляющих (согласно уравнению 2), которые составляют 68 и 32%, и допуская, что ручьи представляют не разгрузку грунтовых вод, а некий резервуар инфильтрации талых вод, можно предположить, что большая часть дождевой воды, выпадающая в водосборе, поступает в речной сток, фильтруясь сквозь рыхлые отложения долины. Поступление дождевой воды, как, впрочем, и талой, посредством инфильтрации, может говорить о высоких рисках образования селей непосредственно вблизи ледника. Исследования показывают, что в последние десятилетия происходит активизация склоновых процессов в Безенгийском ущелье, в результате чего увеличиваются частота проявлений и мощность селевых потоков (Батчаев, 2021). Так, 14.08.2022 оползень на боковой морене ледника Мижирги спровоцировал мощный селя, разрушивший мост через р. Мижирги и подтопивший альплагерь «Безенги».

Для долинных ледников с крупными языками в середине сезона абляции характерно отсутствие снега на языках, что сказывается на формировании изотопных характеристик стока и соотношении «талый лёд — талый снег». Так, например, на ледниках Алтая было установлено, что в питании водотоков, берущих своё начало у ледников северного макросклона массива Табын-Богдо-Ола, в середине сезона абляции большую роль играет таяние снега с поверхности ледников тех морфологических типов, которые благоприятны для снегонакопления (Банцев и др., 2018). Соотношение снежной и ледяной составляющих в ледниковом стоке меняется в зависимости от размера и типа ледника. Долинные ледники на западе (№ 11 и 14) в середине сезона абляции 2015 г. были более открыты от снега по сравнению с ледниками центральной части массива, их длинные и пологие языки быстро освобождались от снега в начале сезона абляции. В общий объём талой воды у краёв этих крупных ледников больший вклад вносят изотопно более лёгкие талые воды многолетнего льда, доля которых составляла 73 и 85% соответственно, а снеговые воды — 27 и 15% (Банцев и др., 2018). Для высокогорных водосборов вклад талых снеговых вод предсказуемо зависит и от размеров ледников, и от площадей водосборов, на которых формируется снежный покров. Например, на одном из крупнейших ледников Гималаев Ганготри — истоке р. Бхагиратхи (начало р. Ганг) изотопное расчленение по системе двух- и трёхкомпонентного смешения показало, что доля талого снега

в стоке очень высока и закономерно уменьшается с 91% в мае до 42.9% в июле (Rai et al., 2019). Четырёхкомпонентное расчленение — довольно редкий случай в изотопной гидрологии, основная проблема заключается в поиске независимых изотопных или гидрохимических трассеров с выраженными отличиями между основными компонентами в модели смешения. В случае р. Мижирги и Безенгийского узла оледенения удачным инструментом стала величина дейтериевого эксцесса, которая заметно различается в зимних и летних горизонтах снега и фирна в области аккумуляции. Подобным примером использования d-ехс как дополнительного изотопного трассера служит работа, выполненная для бассейна верхнего Ганга, также в ледниковой группе Ганготри, где величины d-ехс различаются для ледникового льда, летнего снега и грунтовых вод (Shaifullah, Sen, 2024). Количественная оценка вклада дождевой воды, талого льда ледника, талого снега и грунтовых вод в реке была выполнена с использованием четырёхкомпонентной модели смешивания на основе трассеров $\delta^{18}\text{O}$, d-ехс и концентрации ионов Cl. Среднегодовые доли талого льда ледника, талого снега, дождевой воды и подземных вод в течение периода исследования 2018–2019 гг. составили 29 ± 10 , 26 ± 13 , 39 ± 17 и $6 \pm 3\%$ соответственно (Shaifullah, Sen, 2024).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено изучение изотопных и гидрохимических характеристик стока в долине ледника Мижирги. Исследование основано на отборе проб речной воды р. Мижирги, вытекающей из-под одноимённого ледника в 2400 м выше гидропоста, и отборе проб льда ледника. В середине периода абляции, когда снежный покров на окружающих склонах полностью растаял, в питании реки принимают участие талые воды от таяния снежного покрова вблизи снеговой линии, ледникового льда на языке, лавинных снежников на бортах долины и выпадающие атмосферные осадки. Для установления изотопных и гидрохимических характеристик ледникового льда были привлечены данные по новому ледниковому керну, полученному в области питания соседнего ледника Безенги. В верхних 14 м керна было выделено два года аккумуляции, т.е. два летних и два зимних сезона. Для летних горизонтов льда средние значения $\delta^{18}\text{O}$, δD и d-ехс составили -7.9 ± 1.6 , -41.9 ± 15.2 и $21.3 \pm 3.9\%$ соответственно, а среднее значение общей минерализации летних горизонтов — 4 ± 2.5 мг/л. Для зимних

горизонтов средние значения $\delta^{18}\text{O}$, δD и d -exs составили -16.3 ± 2.8 , -113.8 ± 24 и $16.9 \pm 2.7\text{‰}$ соответственно, средняя величина общей минерализации составила 1.8 ± 1 мг/л. Интересно, что среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ льда зимних горизонтов в области питания ледника Безенги практически совпадает со значением $\delta^{18}\text{O}$, полученным для лавинного снежника (-16.15‰), а минерализация зимних горизонтов — со значением, полученным для ледникового льда на языке (2 мг/л). Изотопные и гидрохимические характеристики ледникового льда в области питания ледника Безенги были приняты нами в качестве параметров летнего снега, залегающего вблизи границы питания на леднике, таяние которого также влияет на формирование изотопной метки стока р. Мижирги.

Полученные изотопные характеристики речной воды, талых вод и компонент стока на изотопной диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ — δD формируют линию смешения, отличную от глобальной линии метеорных вод, что позволяет использовать дейтериевый эксцесс как второй изотопный маркер. На основе значений $\delta^{18}\text{O}$, d -exs и общей минерализации было выполнено четырёхкомпонентное расчленение стока р. Мижирги. Доля ледниковой составляющей в стоке р. Мижирги варьирует от 43 до 59%, вклад таяния летнего снежного покрова составляет от 8 до 28%, воды ручьёв — от 23 до 40%. Прямое участие дождей составляет первые проценты, в наибольшей степени было проявлено только для 8 июля, когда оно составило 10% в стоке реки. Воды ручьёв представляют собой смесь атмосферных осадков и талых вод лавинного снежника, в пропорции 32 и 68% соответственно. Таким образом, большая часть атмосферных осадков поступает в речное русло не с быстрым стоком, а фильтруясь через рыхлые отложения долины. За время наблюдений произошло общее падение уровней р. Мижирги, связанное с уменьшением таяния ледникового льда на языке; примечательно, что также уменьшился вклад воды ручьёв, а вклад от таяния летнего снега практически не изменился. Эти тенденции были вызваны изменениями метеорологических условий — усилением облачности. Вероятно, отсутствие прямой солнечной радиации значительно сокращает таяние на леднике; возможно, этот эффект связан с присутствием моренного материала на языке. Отмеченные тенденции в изменении структуры таяния в ледниковом бассейне требуют более подробного изучения и более продолжительных наблюдений, однако уже сейчас можно сказать, что применение двойной

изотопной системы воды (О и Н) для ледников Кавказа является перспективным методом решения подобных задач.

Благодарности. Работа поддержана грантом 075-15-2024-554 в виде субсидии крупного научного проекта Минобрнауки России (проект «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации»).

Acknowledgements. This work was supported by grant 075-15-2024-554 as a subsidy of a major scientific project of the Ministry of Education and Science of Russia (project “Global climate challenges in Russia: retrospective analysis, forecast and adaptation mechanisms”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банцев Д.В., Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Екайкин А.А., Токарев И.В., Волков И.В. Особенности формирования ледникового стока на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола по изотопным данным // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 333–342. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-333-342>
- Батчаев И.И., Анаев М.Т. Исследования селевых потоков в Безенгийском ущелье (Центральный Кавказ, Кабардино-Балкарская Республика): динамика, последствия // Природообустройство. 2021. № 1. С. 107–110. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-107-111>
- Васильчук Ю.К., Рец Е.П., Чижова Ю.Н., Токарев И.В., Фролова Н.Л., Буданцева Н.А., Киреева М.Б., Лошакова Н.А. Расчленение гидрографа реки Джанкуат, Центральный Кавказ, с помощью изотопных методов // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 6. С. 579–594. <https://doi.org/10.7868/S0321059616060080>
- Воробьёв М.А., Кутузов С.С., Виноградова М.М., Хайрединова А.Г., Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н. Исследование структуры и химического состава неглубокого ледяного керна вулкана Ушковский // Лёд и Снег. 2024. Т. 64. № 4. В печати.
- Газаев Х.М., Жинжакова Л.З., Атабиева Ф.А., Газаев М.М., Иттиев А.Б. Содержание микроэлементов в ледниковых водах рек высокогорной зоны Кабардино-Балкарской Республики // Изв. Кабардино-Балкарского гос. аграрного университета им. В.М. Кокова. 2015. № 1. С. 105–108.
- Керимов А.М., Керимов А.А., Хутуев А.М. Динамика языковых частей долинных ледников Безенги и Мижирги с конца XX века // Изв. Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2014. Вып. 4. С. 29–34.

- Керимов А.М., Курашева О.А. Тяжёлые металлы в ледниках и речных водах бассейна реки Черек Безенгийский при интенсивной деградации оледенения // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 3. С. 97–118.
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2022.3.5>
- Кучменова И.И. Гидролого-гидрохимические исследования высокогорных рек Чегем, Черек Балкарский и Черек Безенгийский // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. М.: Ин-т истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, 2021. С. 393–397.
- Панов В.Д. Каталог ледников СССР. Т. 8. Вып. 20. Ч. 6–7. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 95 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаврентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Лаврентьев И.И., Липенков В.Я., Козачек А.В. Причины неопределённости в палеоклиматических реконструкциях по изотопному составу кислорода ледникового льда Эльбруса (Западное плато) // Лёд и Снег. 2023а. Т. 63. № 4. С. 473–488.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423040051>
- Чижова Ю.Н., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Шукуров К.А., Козачек А.В. Изотопные характеристики атмосферных осадков в Приэльбрусье // Лёд и Снег. 2023б. Т. 63. № 1. С. 33–47.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423010052>
- Шарапова Е.О., Ефимова Л.Е., Ломов В.А., Льюмменс Л. Гидролого-гидрохимические исследования водных объектов Кабардино-Балкарского высокогорного заповедника // Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии. СПб., 2018. С. 483–487.
- Behrens H., Moser H., Oerter H., Rauert W., Stichler W., Ambach W. Models for the runoff from a glaciated catchment area using measurements of environmental isotope contents // Isotope Hydrology. 1978. V. 11. P. 829–846.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. V. 16. № 4. P. 436–468.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive P., Siwertz E. Aspects Hydrologique, Geochemie et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du Septembre 22, 1968 // Archives des Sciences. 1969. V. 22. № 1. P. 581–604.
- Klaus J., McDonnell J. Hydrograph Separation Using Stable Isotopes: Review and Evaluation // Journ. of Hydrology. 2013. V. 505. P. 47–64.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.006>
- Maupetit F., Wagenbach D., Weddeling P., Delmas R. Seasonal fluxes of major ions to a high altitude cold alpine glacier // Atmospheric Environment. 1995. V. 29. P. 1–9. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00222-7](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00222-7)
- Mikhaleenko V., Kutuzov S., Toropov P., Legrand M., Sokratov S., Chernyakov G., Lavrentiev I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobyev M., Khairidinova A., Lipenkov V. Accumulation rates over the past 260 years archived in Elbrus ice core, Caucasus // Climate of the Past. 2024. V. 20. № 1. P. 237–255.
<https://doi.org/10.5194/cp-20-237-2024>
- Rai S.P., Singh D., Noble J., Rawat Y., Kumar B., Arora M. Identifying contribution of snowmelt and glacier melt to the Bhagirathi River (Upper Ganga) near snout of the Gangotri Glacier using environmental isotopes // Catena. 2019. V. 173. P. 339–351.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.031>
- Rets E., Khomiakova V., Kornilova E., Ekaykin A., Kozachek A., Mikhaleenko V. How and when glacial runoff is important: Tracing dynamics of meltwater and rainfall contribution to river runoff from headwaters to lowland in the Caucasus Mountains // Science of The Total Environment. 2024. V. 927. 172201.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172201>
- Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M., Kerimov A.A. Features of Aluminum Concentrations in Rivers of the Mountain Zone of the Central Caucasus // Russian Journal of General Chemistry. 2018. V. 88. № 13. P. 2884–2892.
<https://doi.org/10.1134/S1070363218130091>
- Shaifullah, Sen I.S. A four-component mixing model reveals snowpack melting as early as March during the 2019 hydrological year in the Upper Ganga Basin // Journ. of Hydrology. 2024. V. 628. 130437.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130473>
- Sklash M.G., Farvolden R.N. The role of groundwater in storm runoff // Journ. of Hydrology. 1979. V. 43. P. 45–65.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90164-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90164-1)

Citation: Chizhova Yu.N., Krekova A.D., Kutuzov S.S., Mikhaleiko V.N., Lavrentiev I.I., Vorobiev M.A., Vinogradova M.V. Isotopic parameters of the Mizhirgi River (Caucasus): four-component hydrograph separation. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (2): 218–233. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425020037

Isotopic Parameters of the Mizhirgi River (Caucasus): Four-Component Hydrograph Separation

© 2025 Yu. N. Chizhova^{a,b,#}, A. D. Krekova^c, S. S. Kutuzov^d, V. N. Mikhaleiko^b,
I. I. Lavrentiev^b, M. A. Vorobiev^b, M. V. Vinogradova^b

^aInstitute of Geography Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Russian Academy of Science, Moscow, Russia

^bInstitute of Geography, Russian Academy of Science, Moscow, Russia

^cHigher School of Economics, Moscow, Russia

^dSchool of Earth Sciences, The Ohio State University, Columbus, USA

#e-mail: eacentr@yandex.ru

Received December 27, 2024; Revised March 1, 2025; Accepted April 18, 2025

The processes of river flow formation in the glacier basin were studied using stable isotope geochemistry methods. During the ablation period, isotopic and hydrochemical characteristics of the components involved in the formation of river runoff were determined for the Mizhirgi River within the glacial basin, and isotopic dissection of the hydrograph was performed. The study was performed for a short observation period at a hydrological post in the middle of the ablation season from July 6th to July 16th of 2021. Samples of Mizhirgi River water at gorge in 750 m from the glacier tongue were collected as well as precipitation and glacial ice samples on the tongue. Samples of glacial ice were also collected near the Katyn-Tau summit at an altitude of 4750 m in the upper part of the Bezengi Wall, obtained by ice core drilling. The use of two isotopic and one hydrochemical tracer showed the promise of using these methods to study glacier melt patterns. The share of glacial ice melt ranged from 39 to 59%, the share of snow melt water near the feeding boundary varied from 8 to 27%, and an insignificant contribution was made by direct precipitation, which entered the river flow mainly by infiltration through the ground.

Keywords: oxygen isotopic composition, deuterium excess, river runoff, glaciers, Caucasus

REFERENCES

- Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Ekaykin A.A., Tokarev I.V., Volkov I.V. Formation of glacier runoff on the northern slope of Tavan Bogd mountain massif based on stable isotopes data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (3): 333–342 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-674-2018-3-333-342>
- Batchaev I.I., Anaev M.T. Studies of mudflows in the Bezengi gorge (Central Caucasus, Kabardino-Balkar Republic): dynamics, consequences. *Prirodooobustrojstvo. Environmental management*. 2021, 1: 107–110 [In Russian]. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-107-111>
- Vasil'chuk Yu.K., Rets E.P., Chizhova Ju.N., Tokarev I.V., Frolova N.L., Budantseva N.A., Kireeva M.B., Loshakova N.A. Hydrograph separation of the Dzhanikuat river, North Caucasus, with the use of isotope methods. *Water Resources*. 2016, 43 (6): 579–594. <https://doi.org/10.7868/S0321059616060080>
- Vorobyev M.A., Kutuzov S.S., Vinogradova M.M., Khairedinova A.G., Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N. Investigation of the structure and chemical composition of a shallow ice core from Ushkovsky volcano. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (4): in print.
- Gazaev H.M., Jinjakova L.Z., Atabieva F.A., Gazaev M.M., Ittiev A.B. Contents of trace elements in the glacial waters of the rivers of the alpine zone of Kabardino-Balkarian Republic. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta imeni M.V. Kokova*. News of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov. 2015, 1: 105–108 [In Russian].
- Kerimov A.M., Kerimov A.A., Khutuyev A.M. Dynamics of the protruding parts of the trough (valley) glaciers

- Bezengi and Mizhirgi from the end of XXth century. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Nauchnogo Centra RAN*. News of Kabardin-Balkar Scientific Center RAS. 2014, 4: 29–34 [In Russian].
- Kerimov A.M., Kurasheva O.A. Heavy metals in glaciers and river water of the basin of the Bezengi Cherek river during intense glaciation degradation. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*. Science. Innovations. Technologies. 2022, (3): 97–118 [In Russian].
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2022.3.5>
- Kuchmenova I.I. Hydrological and hydrochemical studies of the high-mountain rivers Chegem, Cherek Balkarsky and Cherek Bezengiysky. *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza*. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Moscow: Institute of the History of Natural History and Technology named after S.I. Vavilov, Russian Academy of Sciences, 2021: 393–397 [In Russian].
- Panov V.D. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 8. Is. 20. Pt. 6–7. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 95 p. [In Russian].
- Rets E., Khomiakova V., Kornilova E., Ekaykin A., Kozachek A., Mikhaleiko V. How and when glacial runoff is important: Tracing dynamics of meltwater and rainfall contribution to river runoff from headwaters to lowland in the Caucasus Mountains. *Science of The Total Environment*. 2024, 927: 172201.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172201>
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Ya., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I. New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2021, 61 (3): 341–358 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Chizhova J.N., Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Lavrentiev I.I., Lipenkov V.Y., Kozachek A.V. Causes of Uncertainties in Paleoclimatic Reconstructions Based on the Oxygen Isotope Composition of Glacier Ice on Elbrus (Western Plateau). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023a, 63 (4): 473–488 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673423040051>
- Chizhova J.N., Mikhaleiko V.N., Kutuzov S.S., Shukurov K.A., Kozachek A.V. Isotopic signature of precipitation in the Elbrus region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023b, 63 (1): 33–47 [In Russian].
<https://doi.org/10.31857/S2076673423010052>
- Sharapova E.O., Efimova L.E., Lomov V.A., Lummens L. Hydrological and hydrochemical studies of water bodies of the Kabardino-Balkarian high mountain reserve. *Tretiye Vinogradovskiye chteniya. Grany gidrologii*. Third Vinogradovskie Readings. Frontiers of hydrology. St. Petersburg, 2018: 483–487.
- Behrens H., Moser H., Oerter H., Rauert W., Stichler W., Ambach W. Models for the runoff from a glaciated catchment area using measurements of environmental isotope contents. *Isotope Hydrology*. 1978, 11: 829–846.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*. 1964, 16 (4): 436–468.
- Hubert P., Marin E., Meybeck M., Olive P., Siwertz E. Aspects Hydrologique, Geochimique et Sedimentologique de la Crue Exceptionnelle de la Dranse du Chablais du Septembre 22, 1968. *Archives des Sciences*. 1969, 22 (1): 581–604.
- Klaus J., McDonnell J. Hydrograph Separation Using Stable Isotopes: Review and Evaluation. *Journ. of Hydrology*. 2013, 505: 47–64.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.006>
- Maupetit F., Wagenbach D., Weddeling P., Delmas R. Seasonal fluxes of major ions to a high altitude cold alpine glacier. *Atmospheric Environment*. 1995, 29: 1–9.
[https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00222-7](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00222-7)
- Mikhaleiko V., Kutuzov S., Toropov P., Legrand M., Sokratov S., Chernyakov G., Lavrentiev I., Preunkert S., Kozachek A., Vorobyev M., Khairidinova A., Lipenkov V. Accumulation rates over the past 260 years archived in Elbrus ice core, Caucasus. *Climate of the Past*. 2024, 20 (1): 237–255.
<https://doi.org/10.5194/cp-20-237-2024>
- Rai S.P., Singh D., Noble J., Rawat Y., Kumar B., Arora M. Identifying contribution of snowmelt and glacier melt to the Bhagirathi River (Upper Ganga) near snout of the Gangotri Glacier using environmental isotopes. *Catena*. 2019, 173: 339–351.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.031>
- Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M., Kerimov A.A. Features of Aluminum Concentrations in Rivers of the Mountain Zone of the Central Caucasus. *Russian Journ. of General Chemistry*. 2018, 88 (13): 2884–2892.
<https://doi.org/10.1134/S1070363218130091>
- Shaifullah, Sen I.S. A four-component mixing model reveals snowpack melting as early as March during the 2019 hydrological year in the Upper Ganga Basin. *Journ. of Hydrology*. 2024, 628: 130437.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130437>
- Sklash M.G., Farvolden R.N. The role of groundwater in storm runoff. *Journ. of Hydrology*. 1979, 43: 45–65.
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90164-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90164-1)