

УДК 556.5

ИЗОТОПНО-ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В БАССЕЙНЕ Р. ТАЛДУРА (ЮЖНО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛТАЙ)

© 2023 г. Д. В. Банцев^{1,*}, А. А. Овсепян¹, В. А. Распутина¹,
А. В. Козачек^{1,2}, К. Б. Чихачев^{1,2}, Д. А. Ганюшкин¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: bancev-d@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

После доработки 28.08.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

Представлены результаты изотопных исследований в долине р. Талдура. Определены изотопные характеристики льда ледника Некрасова и воды рек и ручьёв в середине сезона абляции. Показано преобладание ледникового питания на всём протяжении р. Талдура. Установлено, что талые воды менее крупного ледника Некрасова оказывают меньшее влияние на питание моренного оз. Таможненное по сравнению с влиянием талых вод ледника Большая Талдура на сток р. Талдура.

Ключевые слова: изотопный состав, приледниковые озёра, ледниковый сток, ледники, Алтай

DOI: 10.31857/S2076673423040038, **EDN:** HJENU

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современных климатических изменений и продолжающейся дегляциации особую актуальность приобретают гидрологические исследования высокогорных районов с развитым современным оледенением. Важными гидрологическими задачами являются оценка водного баланса потенциально прорывоопасных озёр, а также прогноз возможных изменений в стоке горных рек. Для большинства горных районов России, в частности для территории Алтая, задача осложняется очень низкой плотностью гидрологических постов, поэтому существует необходимость в сборе и анализе новой информации, в том числе полученной при проведении экспедиционных исследований. Однако подобные работы на высокогорных территориях Русского Алтая практически не проводились. Ближайшие к Алтаю комплексные изотопно-гидрологические исследования были организованы на территории Китая. С помощью стабильных изотопов был разделён сток р. Урумчи (Sun et al., 2015). Подобные исследования проводились и на Тибетском плато (Zhao et al., 2011; Li et al., 2015; Wang et al., 2016; Fan et al., 2016) и в горных районах юго-западного Китая (Meng et al., 2015). Изотопные исследования на Алтае в первую очередь связаны с глубоким керновым бурением ледников на плато горы Белухи (Aizen et al., 2005) и на территории массива Цамбагарав (Северо-Западная Монголия) (Herren et al., 2013). Для горного Алтая и его предгорий иссле-

дователями из Института водных и экологических проблем СО РАН был организован сбор и изотопный анализ атмосферных осадков, а также проведено сравнение полученных результатов с модельными данными (Папина и др., 2015; Малыгина и др., 2017, 2019).

Ранее авторами настоящей статьи были выполнены изотопно-геохимические исследования на территории горных массивов Таван-Богдо-Ола, Цамбагарав и Монгун-Тайга для получения информации об особенностях формирования ледникового стока (Банцев и др., 2016, 2018; Bantcev et al., 2019). Непосредственно в рассматриваемом районе (долина р. Талдура) изотопные исследования стока не проводились, поэтому приводимые здесь результаты дают новый материал по этому вопросу.

Стабильные изотопы воды (^{18}O и ^2H) – важный трассер, позволяющий оценить вклад различных компонентов в питание рек и озёр. В статье представлены результаты изотопных исследований в бассейне р. Талдура, выполненные в июле 2022 г.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Южно-Чуйский хребет относится к Центральному Алтаю, простирается в широтном направлении с запада на восток на 120 км. Главная вершина Ирбисту имеет высоту 3967 м. Южно-Чуйский хребет – второй на Алтае после Катунского хребта по площади оледенения. Характер рельефа

здесь альпийский, широко распространены ледниковые формы рельефа (Каталог ледников, 1977; Дьякова, Останин, 2015). Высота хребта в осевой части на западном и восточном окончаниях — 3300–3400 м, а в центральной — 3700–3900 м. Ближе всего к району исследования находится действующая метеостанция Кара-Тюрек (расположена на высоте 2596 м над ур. моря, в 100 км к северо-западу от рассматриваемого района). Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции составляет -5.4°C (<http://meteo.ru>).

В Центральном Алтае за год выпадает 400–600 мм осадков. На наветренных склонах может выпадать 800–1000 мм. На апрель–октябрь приходится 70–85% от годовой суммы осадков. Их месячный максимум наблюдается обычно в июне–июле (Ресурсы поверхностных вод..., 1969).

В результате происходящего изменения климата, которое согласно (Третий оценочный доклад..., 2022) на территории Российской Федерации началось с конца 1970-х годов, ледники Южно-Чуйского хребта сокращаются: с 1850 по 2003 г. хребет потерял 60.5 км^2 (или около 23%) льда (Никитин, 2009). В настоящее время площадь оледенения Южно-Чуйского хребта продолжает уменьшаться и составляет 118 км^2 (Ganyushkin et al., 2022).

Гидрологическая изученность Южно-Чуйского хребта крайне недостаточна. В настоящее время на территории всего Горного Алтая большинство гидрологических постов закрыто, на сегодняшний день действуют только четыре поста. Ближе всего к хребту находится пост Кучерла на р. Кучерла, он расположен в 107 км северо-западнее на территории Катунского хребта. На территории Алтая реки ледникового происхождения оказывают большое влияние на хозяйственную деятельность местного населения, поэтому количественная оценка вклада современного оледенения и других источников питания в сток горных рек с применением изотопного метода необходима для оценки возможных изменений водного баланса этой территории в условиях изменяющегося климата и дальнейшей деградации оледенения.

Исследование проводилось в долине р. Талдура, берущей начало на одном из крупнейших ледников Алтая — леднике Большая Талдура. Долина реки находится на северном макросклоне Южно-Чуйского хребта (рис. 1, *a–b*). Согласно данным Каталога ледников России (Хромова и др., 2021), по состоянию на 2017 г. система Большого Талдуринаского ледника имела площадь 20.46 км^2 при максимальной длине 4760 м, вертикальном диапазоне 1240 м и средней высоте фирновой линии 3120 м. Кроме того, на восточном борту долины располагаются ещё три ледника: Малый Талдуринаский (площадь 1.31 км^2 , высота фирновой гра-

ницы 3310 м); ледник Ru10-16.0629 (площадь 0.29 км^2 , высота фирновой границы 3350 м) и ледник Ru10-16.0630 (площадь 0.13 км^2). Оледенение верхнего участка бассейна р. Талдура имеет суммарную площадь 23.66 км^2 . Река Талдура после слияния с р. Чаган образует р. Чаган-Узун — приток Чуи. Таким образом, водосборный бассейн Талдуры относится к верховьям единой Обь-Иртышской речной системы. В целом изотопно-гидрологическими исследованиями верхняя часть бассейна Оби затронута недостаточно. С недавнего времени проводятся исследования изотопного состава вод р. Обь в г. Барнаул для оценки вклада снеготаяния в её питание (Papina et al., 2023). При этом данных об изотопном составе вод малых рек ледникового происхождения в истоках Оби крайне мало, но именно эти реки, несмотря на относительно небольшой вклад в сток р. Обь, наиболее остро реагируют на современные климатические изменения.

В бассейне р. Талдуры первым объектом исследования стала система “ледник Некрасова—оз. Таможенное” (см. рис. 1, *c*). Площадь ледника Некрасова, располагающегося на восточном борту долины р. Талдура, по данным (Хромова и др., 2021) составляет 1.47 км^2 , средняя высота фирновой границы 3100 м. В 900 м от края ледника находится моренное оз. Таможенное, потенциальный прорыв которого может быть причиной крупного паводка, угрожающего людям и инфраструктуре, поскольку в последнее время в долине р. Талдура наблюдается всплеск туристической активности, и даже в непосредственной близости от ледников происходит строительство туристических баз (<https://lednik-camp.ru/>). При исследовании приледниковых озёр важно установить составляющие водного баланса, особенно долю ледникового питания (Коновалов, 2012; Коновалов, Рудиков, 2016).

Вторым объектом исследования являлась р. Талдура (см. рис. 1, *c*). Пробы отбирались по течению реки на разном расстоянии от истока и в разное время для предварительной оценки вклада талых ледниковых вод в её питание. По результатам анализа данных дистанционного зондирования Земли определено, что площадь бассейна р. Талдура равна 500 км^2 , а площадь ледников по данным анализа космических снимков Arcgis Imagery за август 2021 г. составляет 10%.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Всего за время полевых работ было взято 93 пробы воды. Из водотоков отобрано 58 образцов, атмосферных осадков — 14, ледникового льда — 21. Анализ парных изотопных характеристик производился в Лаборатории изменения климата и окружающей среды ААНИИ на газо-

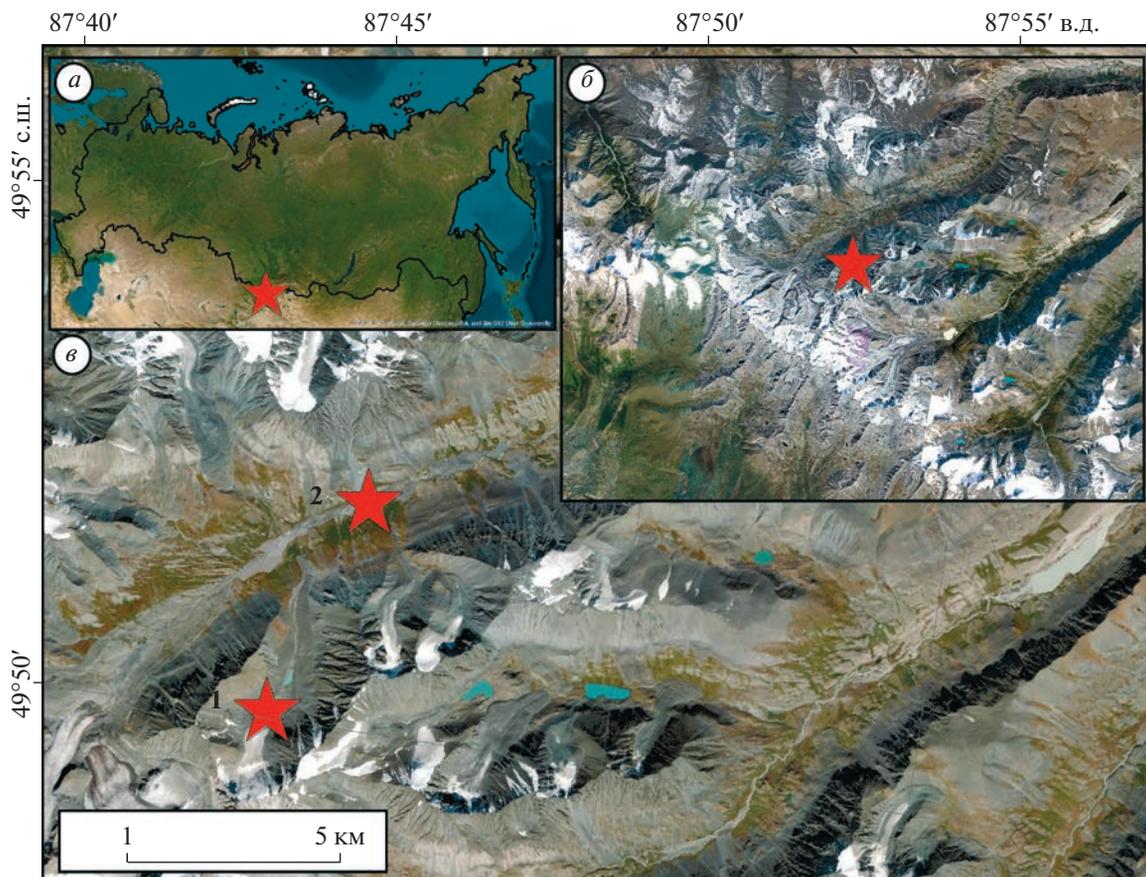


Рис. 1. Географическое положение района исследований. *а* – Южно-Чуйский хребт; *б* – долина р. Талдура; *в* – районы исследования: 1 – система “ледник Некрасова – оз. Таможненное”, 2 – р. Талдура.

Fig. 1. Location of the research area *a* – The Yuzhno-Chuya ridge; *б* – Taldura River valley; *в* – Research areas: 1 – Nekrasov Glacier – Tamozhennoye lake system, 2 – Taldura River.

вом анализаторе Picarro L2120-i. В качестве стандарта использовали дистиллированную водопроводную воду Санкт-Петербурга со следующими характеристиками: -9.79‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и -75.47‰ по $\delta^2\text{H}$ относительно стандарта МАГАТЭ “V-SMOW2”. Точность измерений составляла 0.05‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0.5‰ для $\delta^2\text{H}$, что вполне достаточно для подобного рода исследований. Измерения проводились в соответствии с методикой А.А. Екайкина (Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии, 2016).

Во время полевых работ образцы воды отбирались в герметичные пробирки ёмкостью 50 мл. Объём пробы составлял 40 мл, пробы из водотоков отбирались напрямую в пробирки. Поскольку техническая возможность для кернового бурения отсутствовала, пробы льда отбирали с поверхности в области абляции через относительно равные промежутки, создавая регулярную сеть отбора проб. Данная методика была использована ранее и хорошо зарекомендовала себя при

определении среднего изотопного состава льда (Bantsev et al., 2021).

Ледниковый лёд отбирали в герметичные пластиковые пакеты с поверхности ледника ледорубом. Верхние 5 см льда счищались, затем откалывали кусок льда объёмом 200–300 мл, который далее расплавляли при температуре окружающей среды, а образовавшуюся воду тщательно перемешивали, и затем 40 мл отбирались в пробирки. Атмосферные осадки, как правило, отбирали дважды в сутки (08:00 и 20:00 часов) из портативного осадкомера с фиксацией количества осадков в мм.

Долю каждого компонента определяли с помощью уравнения изотопного баланса вида:

$$R^{18}\text{O}_1 f_1 + R^{18}\text{O}_2 f_2 = R^{18}\text{O}, \quad (1)$$

где $R^{18}\text{O}_1$ – изотопный состав первого компонента; f_1 – доля первого компонента; $R^{18}\text{O}_2$ – изотопный состав второго компонента; f_2 – доля второго компонента; $R^{18}\text{O}$ – результирующий изотопный состав (Чинова и др., 2016).

Таблица 1. Диапазон изменения и среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ по группам образцов в долине ледника Некрасова

Показатели	Количество, шт.	Диапазон $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Среднее $\delta^{18}\text{O}$, ‰
Лёд с ледника	21	от –13.0 до –26.4	–17.3
Сток у края ледника	3	от –14.6 до –17.0	–16.2
Осадки	14 (10 использовано)	от –5.8 до –17.5	–11.2 (средневзвешенное по количеству)
Ручей в озеро	13	от –13.6 до –15.6	–14.5
Ручей из озера	12	от –14.42 до –15.4	–14.9

Температуру воздуха фиксировали с помощью автоматического регистратора EClerk-M-RHT. Количество осадков определяли с помощью портативного осадкомера, представляющего собой тарированную пластиковую колбу с ценой деления 1 мм водного столба. Абляцию на леднике измеряли по 12 деревянным абляционным рейкам раз в сутки в утренние часы. Значения по всем рейкам усреднялись.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Система “ледник Некрасова—оз. Таможенное”.

На рис. 2 показана карта-схема мест отбора проб льда и воды в системе “ледник Некрасова—оз. Таможенное”. Для оценки вклада талых ледниковых вод в питание водотоков и приледниковых озёр необходимо установить среднее значение изотопного состава льда. Для этого в разных частях ледника Некрасова была отобрана 21 поверхностная проба льда (см. рис. 2).

Пробы также отбирали из выпадающего в озеро ручья и из ручья, вытекающего из озера. В табл. 1 приведены средние изотопные характеристики групп образцов, а на рис. 3 показаны парные изотопные характеристики проб ледникового льда и осадков, а также средние арифметические значения $\delta^{18}\text{O}$ для ручьёв, вытекающих из озера и втекающих в него.

Высокий разброс значений $\delta^{18}\text{O}$ для проб ледникового льда объясняется формированием такого льда из осадков разных сезонов, что наблюдается и на других ледниках Алтая. Зависимость $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ имеет вид $\delta^2\text{H} = 7.6 \delta^{18}\text{O} + 7.7$, что близко к зависимости $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ ($\delta^2\text{H} = 7.8 \delta^{18}\text{O} + 7.7$), полученной по 524 образцам фирнового керна на плато Белухи в 2002 г. (Aizen et al., 2005), а также к локальной линии метеорных вод ($\delta^2\text{H} = 7.6 \delta^{18}\text{O} + 8.7$), полученной для других высокогорных районов Центральной Азии (Saidaliyeva et al., 2023). Схожие зависимости получены авторами для проб ледникового льда на территории других центров оледенения Юго-Восточного и Монгольского Алтая: массивах Монгун-Тайга и Цамбагарав (Bantsev et al., 2022).

Пробы осадков гораздо тяжелее. При этом, судя по низким значениям эксцесса дейтерия, часть проб небольшого объёма подвергалась испарению уже после выпадения. Поскольку при испарении фракционирование утяжеляет изотопный состав, эти пробы были исключены из расчётов. Линия метеорных вод для проб осадков без учёта испарявшихся проб имеет вид $\delta^2\text{H} = 7.3 \delta^{18}\text{O} + 3.1$. Ручьи, втекающие и вытекающие из озера, закономерно имеют осреднённый изотопный состав, поскольку в их питание вкладываются как талые ледниковые воды, так и атмосферные осадки. Вытекающий из озера ручей отражает изотопный состав всего озера в целом.

С использованием уравнения изотопного баланса и данных по расходам воды на исследуемых ручьях проведено изотопное разделение гидрографов (рис. 4). В качестве изотопного состава талых ледниковых вод было принято среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда ледника Некрасова (–17.3‰). Поскольку точная оценка скорости добегающих выпадающих осадков представляет отдельную фундаментальную задачу, требующую большего количества отобранных по времени изотопных проб, в качестве $\delta^{18}\text{O}$ второго компонента принимали средневзвешенное по количеству осадков значение $\delta^{18}\text{O}$ за 48 часов до отбора каждой пробы из водотока.

Для ручья, втекающего в озеро (см. рис. 4, в), в зависимости от интенсивности абляции и выпадающих осадков доля ледникового стока изменяется от 67 до 28% (среднее значение 58%). Для ручья, вытекающего из озера (см. рис. 4, в), диапазон изменения доли ледникового стока составляет 42 и 72% соответственно, в среднем 61%. Среднее значение вклада талых ледниковых вод было получено с использованием средних значений $\delta^{18}\text{O}$ ледникового льда, ручьёв и средневзвешенного $\delta^{18}\text{O}$ осадков за весь период наблюдений (–1.2‰).

Минимальные значения доли талых ледниковых вод закономерно совпадают с периодами минимальной абляции, особенно если в этот период выпадали осадки. Изменения в интенсивности абляции и в количестве осадков слабее отражаются в

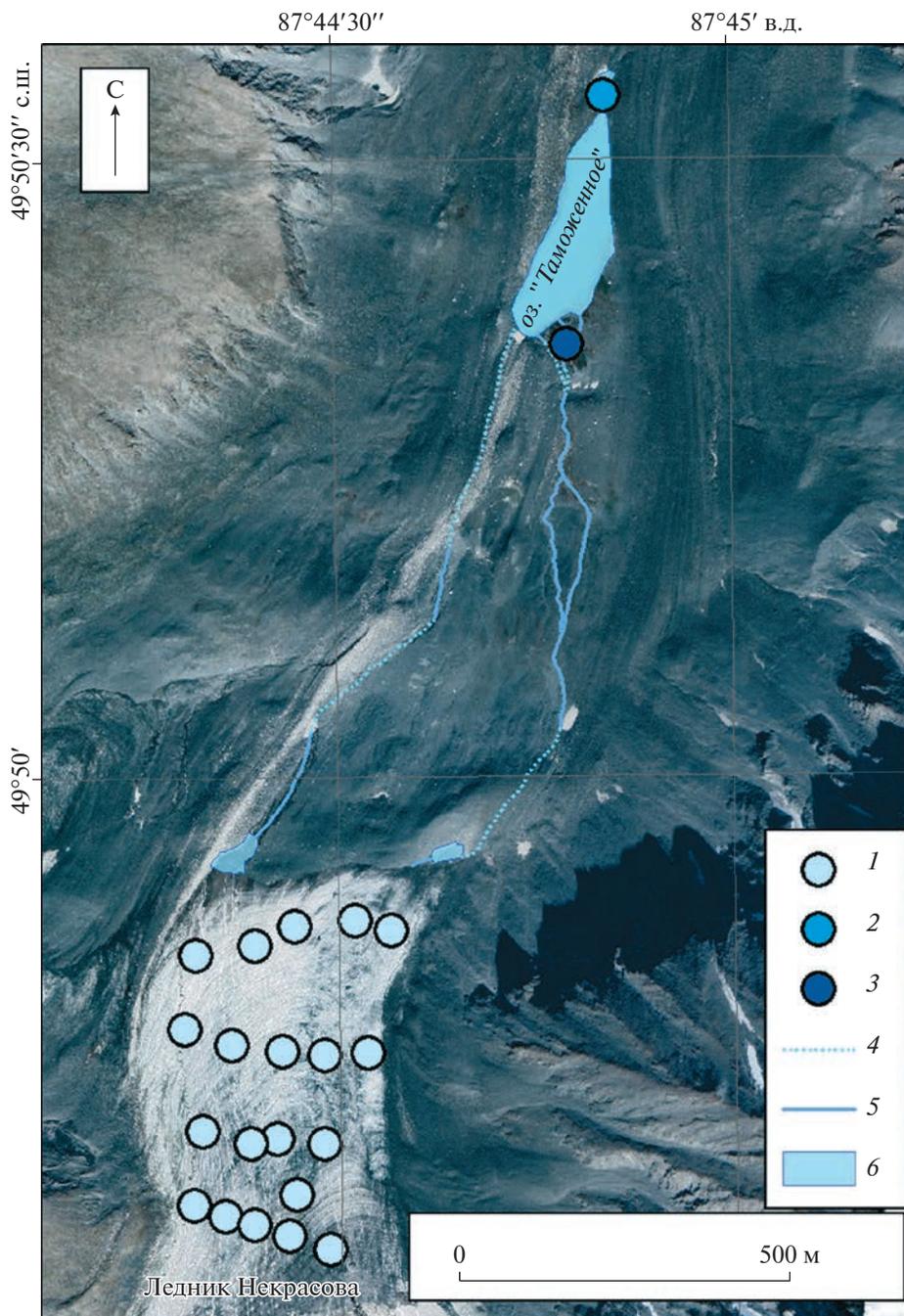


Рис. 2. Карта-схема мест отбора проб в системе ледник Некрасова – оз. Таможенное: 1 – пробы ледникового льда, 2 – ручей, вытекающий из озера, 3 – ручей, втекающий в озеро, 4 – потоки воды, фильтрующиеся через морену, 5 – ручьи на поверхности, 6 – озера.

Fig. 2. Map of the sampling points in the Nekrasov glacier – Tamozhennoye lake system: 1 – samples of glacial ice, 2 – stream flowing out of the lake, 3 – stream flowing into the lake, 4 – streams filtered through the moraine, 5 – surface streams, 6 – lakes.

соотношении компонентов стока в вытекающем из озера ручье, чем в ручье, впадающем в него.

Река Талдура. Исследования изотопного состава воды р. Талдура носили рекогносцировочный характер. Всего было выбрано два способа отбора проб: однократный отбор по течению реки, совмещённый с отбором из наиболее крупных при-

токов, а также многократный отбор в одном пункте после впадения всех крупных притоков ледникового происхождения (рис. 5, а), расположенном в 5 км от края ледника Большая Талдура.

На рис. 5, б видно, что в р. Талдура преобладают изотопно-лёгкие воды ледникового происхождения. По мере удаления от истока значения

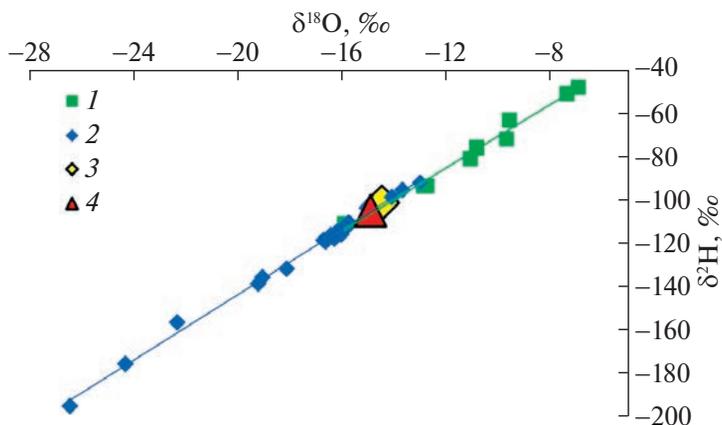


Рис 3. Диаграмма $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ для групп образцов: 1 – атмосферные осадки, 2 – ледниковый лёд, 3 – среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ ручья, вытекающего из озера, 4 – среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ ручья, втекающего в озеро.

Fig. 3. Diagram $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$ for groups of samples: 1 – precipitation, 2 – glacial ice, 3 – mean $\delta^{18}\text{O}$ of the stream flowing into the lake, 4 – mean $\delta^{18}\text{O}$ of the stream flowing out of the lake.

$\delta^{18}\text{O}$ речной воды почти не меняются. Изотопный состав даже становится незначительно легче по мере течения, что связано с влиянием изотопно-лёгких вод ледникового происхождения с Северо-Чуйского хребта.

В 5 км от края ледника Большая Талдура за период с 10 по 30 июля было отобрано 13 изотопных проб. Выявлено (см. рис. 5, ϑ), что изотопный состав воды р. Талдура может претерпевать изменения из-за краткосрочного влияния выпадающих

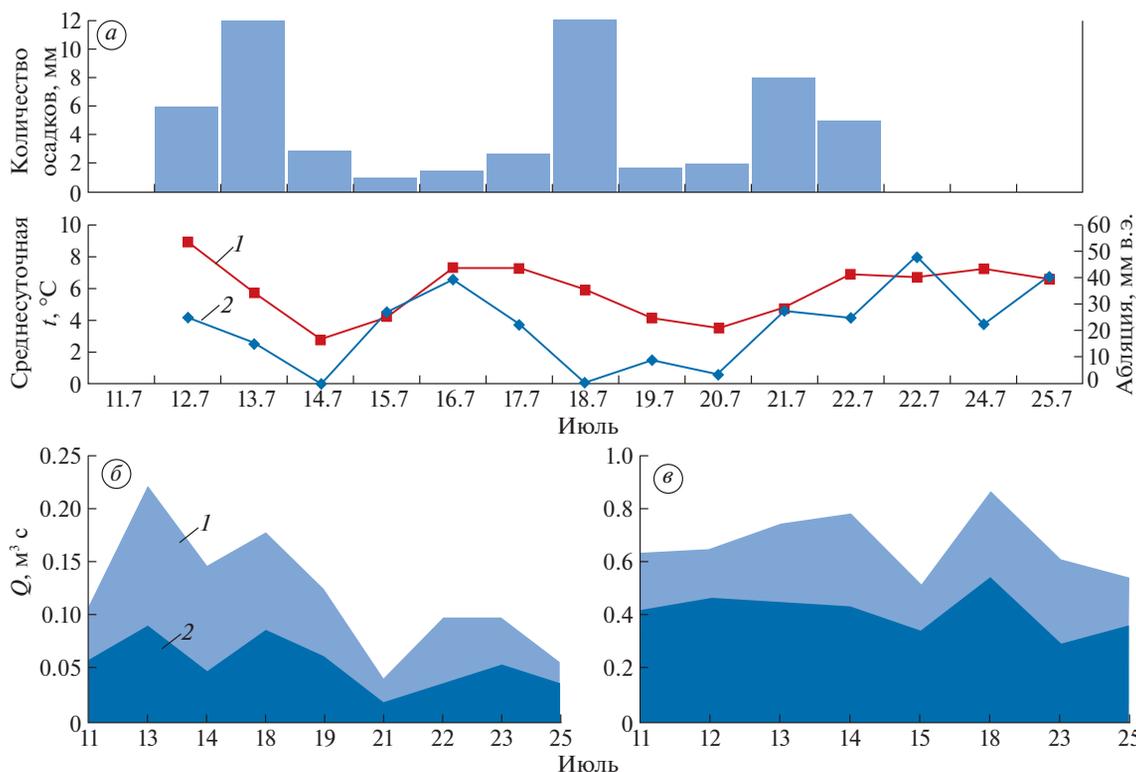


Рис 4. Ход атмосферных осадков, температуры воздуха (1) и абляции (2) на леднике Некрасова за период изотопных наблюдений (а). Результат изотопного разделения гидрографа ручья, впадающего в озеро (б); Результат изотопного разделения гидрографа ручья, вытекающего из озера (в): 1 – атмосферные осадки, 2 – талые ледниковые воды.

Fig. 4. Precipitation, air temperature (1) and ablation (2) on the Nekrasov glacier variation during the period of isotope observations (a); The result of the hydrograph isotopic separation of a stream flowing into a lake (б); The result of the hydrograph isotopic separation of the stream flowing out of the lake (в): 1 – Precipitation, 2 – Meltwater.

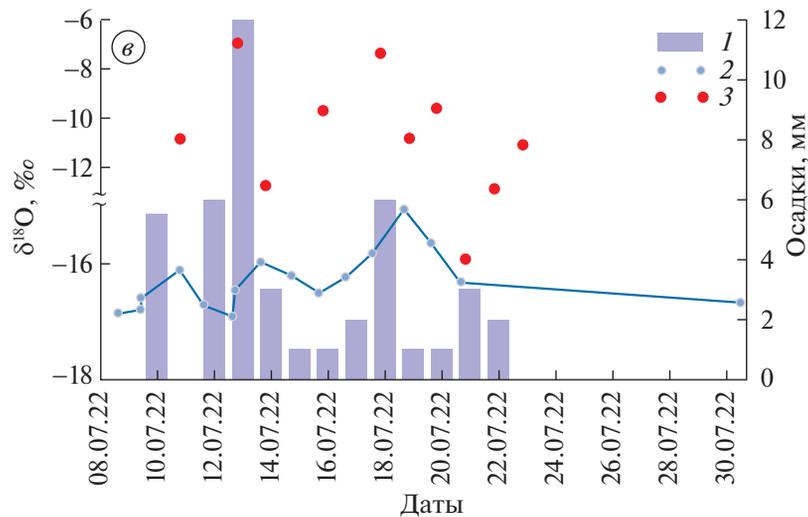
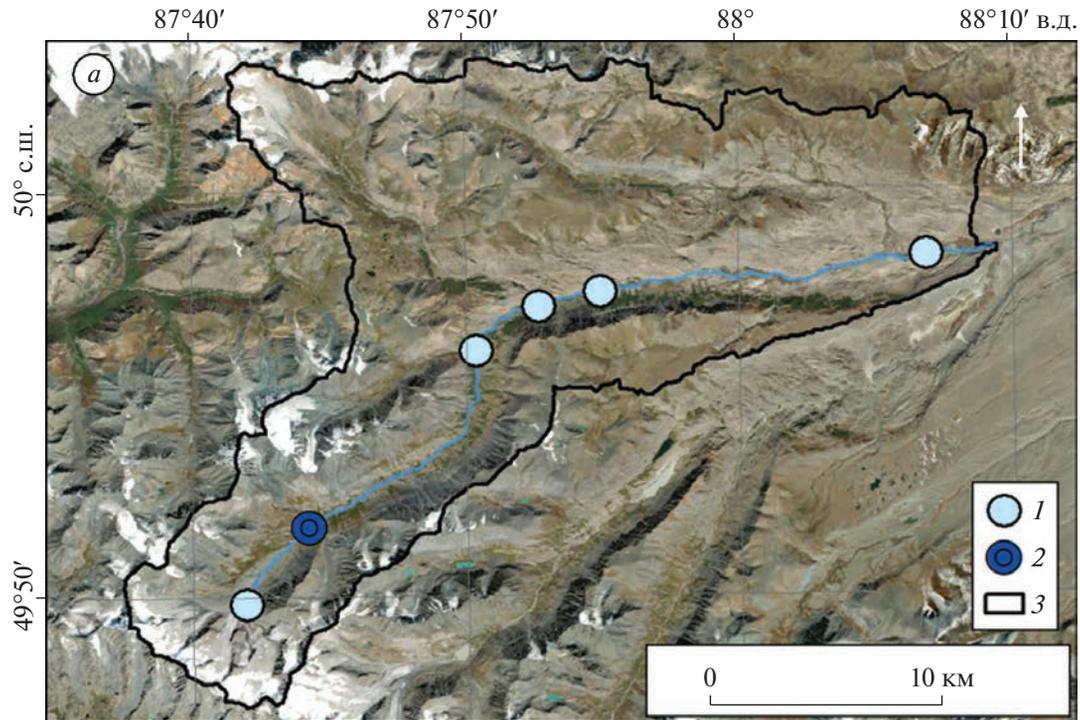


Рис. 5. Схема отбора проб на реке Талдура (а): 1 – места отбора проб вдоль течения, 2 – место отбора проб по времени, 3 – водосборный бассейн р. Талдура; изотопный состав воды по течению р. Талдура (б); изменение изотопного состава воды в р. Талдура в 5 км от ледника (в): 1 – количество осадков, 2 – $\delta^{18}O$ речной воды, 3 – $\delta^{18}O$ осадков.

Fig. 5. Sampling scheme on the Taldura River (а): 1 – sampling sites along the river, 2 – sampling site by time, 3 – Taldura River catchment area; Isotopic composition of water along the Taldura River (б); changes of Taldura River water isotopic composition in the 5 km from the glacier (в): 1 – precipitation amount, 2 – $\delta^{18}O$ of river water, 3 – $\delta^{18}O$ of precipitation.

осадков, что выражается в изменении значений $\delta^{18}\text{O}$ от -16.9 до -15.1‰ . Однако доля атмосферных осадков невелика. Наибольшее значение $\delta^{18}\text{O}$ в р. Талдура наблюдалось 18 июля после выпадения осадков. Изотопное разделение с использованием в качестве изотопного состава компонентов средневзвешенного $\delta^{18}\text{O}$ осадков за 48 часов до отбора пробы и $\delta^{18}\text{O}$ талых вод у края ледника показало, что в этот день доля осадков в питании реки составила 25%. При этом средний вклад осадков за период наблюдений оценивается в 7%.

ОБСУЖДЕНИЕ

Средний изотопный состав ледникового льда ледника Некрасова ($\delta^{18}\text{O} -17.3\text{‰}$) схож с полученными ранее значениями $\delta^{18}\text{O}$ для языков долинных ледников на территории Алтая (Bantsev et al., 2022), но изотопно значительно легче средних значений $\delta^{18}\text{O}$ керн с плато горы Белуха (Aizenn et al., 2005), поскольку на больших высотах на западе Алтая большее влияние на питание ледников оказывает летний снег (Папина и др., 2015).

По результатам изотопного разделения обращают на себя внимание несколько моментов. В системе “ледник Некрасова—оз. Таможенное” в стоке ручья, впадающего в озеро, несмотря на то, что он берёт начало у ледника всего в 800 м от места отбора проб, средняя доля талых ледниковых вод меньше, чем в ручье, вытекающем из озера. Это связано с тем, что большая часть талых ледниковых вод фильтруется в озеро через морену, не образуя поверхностных водотоков. О преобладании фильтрации говорит сопоставление рассчитанных на основе измеренных расходов воды объёма притока к озеру и объёма оттока вытекающей из водоёма воды. На основе рассчитанных объёмов воды был составлен водный баланс озера, который показал, что большая часть поступающей талой ледниковой воды — это распределённый приток, который попадает в водоём путём фильтрации. Поскольку ручей, втекающий в озеро, небольшой (максимальные измеренные расходы не превышают $0.25 \text{ м}^3/\text{с}$), он сильнее реагирует на события осадков и изменения интенсивности абляции. Для ручья, вытекающего из озера, характерно меньшее изменение долей талых вод и атмосферных осадков, связанное с тем, что в озере происходит осреднение изотопных характеристик всех поступающих в него вод.

В целом в питании оз. Таможенное по данным изотопного разделения закономерно преобладают талые ледниковые воды (в среднем 61%). При дальнейшем отступании ледника Некрасова эта доля будет сокращаться, что приведёт к деградации озера. Процесс уменьшения площади или полного исчезновения приледниковых озёр после отступления ледника был выявлен авторами в

Южно-Чуйском хребте на основе дешифрирования спутниковых снимков Landsat 7 (ID снимка: EPP144R025_7F20000722, пространственное разрешение 15 м) и Landsat 8 (ID снимка: LC08_L1TP_144025_20220727_20220802_02_T1, пространственное разрешение 15 м) за разные годы (2000 и 2022 гг.).

Для р. Талдуры характерно полное преобладание ледникового питания. Всего за период наблюдений выпало 38 мм осадков, но существенного влияния на сток реки осадки не оказали: по данным изотопного разделения доля осадков в стоке реке не превышала 25%. Незначительный вклад осадков соотносится с результатами изотопных исследований по другим горным массивам Алтая (Банцев, 2021).

Обращает на себя внимание и то, что в районе ледника Некрасова по данным изотопного разделения доля талых вод в стоке меньше, чем в целом по бассейну р. Талдура. Такое соотношение наблюдается несмотря на то, что по данным анализа космических снимков Arcgis Imagery за август 2021 г. оледенённость в бассейне ледника Некрасова составляет 25% (больше, чем оледенённость всего бассейна Талдуры). Это объясняется тем, что ледник Некрасова находится гораздо выше остальных крупных долинных ледников бассейна. Его край расположен на высоте 2940 м, а край ледника Большая Талдура — на высоте 2560 м. Т.е. влияние на сток р. Талдура в первую очередь оказывают крупные долинных ледники, спускающиеся ниже ледников других морфологических типов. При дальнейшем их отступании, даже при незначительном изменении оледенённости бассейна, доля ледникового стока может сократиться, как мы видим на примере бассейна ледника Некрасова.

Стоит отметить, что данные о вкладе компонентов в сток рек бассейна Талдуры нуждаются в уточнении, так как не оценивалось точное время добегания атмосферных осадков и не учитывалось возможное влияние высотного эффекта на изотопный состав выпадающих осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате отбора изотопных и гидрологических исследований в бассейне р. Талдура получена предварительная оценка вклада талых ледниковых вод в питание р. Талдура и моренного оз. Таможенное в сезон абляции. В питании р. Талдура талые ледниковые воды преобладают на всём протяжении, вклад выпадающих осадков не превышает 25%, что во многом обусловлено наличием крупных долинных ледников, расположенных на более низких отметках высот по сравнению с ледниками других морфологических типов. Дальнейшая деградация оледенения

приведёт к отступанию краёв ледников выше по долине, что даже в условиях потепления приведёт к уменьшению абляции и сокращению доли ледникового стока.

В питании оз. Таможенное также преобладают талые ледниковые воды, но их доля меньше (в среднем 61%) из-за расположения ледника Некрасова высоко в каре, в результате чего даже в середине сезона абляция таяние периодически прекращается. При этом часть талых ледниковых вод фильтруется через морену, так как доля талых вод во втекающем в озеро ручье меньше. Отступление ледника Некрасова приведёт к ещё большему сокращению поступления талых вод и постепенной деградации оз. Таможенное.

Средний изотопный состав ледникового льда ледника Некрасова ($\delta^{18}\text{O} - 17.3\text{‰}$) и изотопный состав воды р. Талдура у края ледника в дни без осадков ($\delta^{18}\text{O} - 16.7\text{‰}$) могут быть использованы в дальнейших более детальных изотопных исследованиях.

Благодарности. Исследования производились при поддержке РНФ и в рамках реализации проекта № 23-27-00173 “Оценка вклада различных источников питания в сток ледниковых рек Юго-Восточного Алтая по данным изотопных индикаторов”.

Acknowledgments. The study was supported by Russian Science Foundation, project No. 23-27-00173 “Estimation of various components contribution to the glacial streams runoff in the Southeastern Altai according to isotope indicators”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банцев Д.В.* Изотопный состав компонентов нивально-гляциальных систем Юго-Восточного Алтая как индикатор их стокоформирующих особенностей: Дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук. СПб.: СПбГУ, 2021. 93 с.
- Банцев Д.В., Ганюшкин Д.А., Екайкин А.А., Чистяков К.В.* Изотопно-геохимические исследования нивально-гляциальных систем горного массива Табын-Богдо-Ола (Западная Монголия) // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 169–176. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-169-176>
- 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>
- Дьякова Г.С., Останин О.В.* Гляциально-мерзлотные каменные образования Алтая: Южно-Чуйский хребет // *География и природопользование Сибири*. 2015. № 19. С. 56–62.
- Екайкин А.А.* Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. Методическое пособие. СПб.: ААНИИ, 2016. 64 с.
- Каталог ледников СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Горный Алтай и верхний Иртыш. Ч. 5. Бассейн р. Аргута. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 8 с.
- Коновалов В.Г.* Наполнение и сброс воды из прорывоопасного озера Мерцбахера (Тянь-Шань) // *Геориск*. 2012. № 4. С. 26–37.
- Коновалов В.Г., Рудаков В.А.* Дистанционное определение резервного объёма прорывоопасных высокогорных озёр // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 235–245. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245>
- Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С.* Изотопный состав атмосферных осадков в предгорьях Алтая: данные наблюдений и интерполяции // *Изв. Томского педагогич. ун-та*. 2019. Т. 330. № 2. С. 44–54. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/2/91>
- Малыгина Н.С., Эйрих А.Н., Курепина Н.Ю., Папина Т.С.* Изотопный состав зимних атмосферных осадков и снежного покрова в предгорьях Алтая // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 57–68. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-57-68>
- Никитин С.А.* Закономерности распределения ледниковых льдов в Русском Алтае, оценка их запасов и динамики // *МГИ*. 2009. № 107. С. 87–96.
- Папина Т.С., Малыгина Н.С., Бляхарчук Т.А., Ненашева Г.И., Рябчинская Н.А., Эйрих А.Н.* Изотопный состав и палиноспектры атмосферных осадков и краевых частей ледника Корумду (Северо-Чуйский хребет, Горный Алтай) // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 1. С. 40–48. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-40-48>
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 1. Верхний Иртыш и Горный Алтай. Часть 1. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 316 с.
- Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. СПб.: Научно-ёмкие технологии, 2022. 124 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.А., 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., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Куреева М.Б.* Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 2. С. 161–168.
- Aizen V., Aizen E., Fujita K., Nikitin S., Kreutz K., Takeuchi L.* Stable-isotope time series and precipitation origin from firn-core and snow samples, Altai glaciers, Siberia // *Journ. of Glaciology*. 2005. V. 51 (175). P. 637–654. <https://doi.org/10.3189/172756505781829034>
- Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Ekaykin A.A., Veres A.N., Tokarev I.V., Shtykova N.B., Andreeva T.A.* The Components of the Glacial Runoff of the Tsambagarav Massif from Stable Water Isotope Data // *Geosciences*. 2019. V. 9. P. 290–308. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070297>

- Bantcev D., Ganyushkin D., Terekhov A., Ekaykin A., Tokarev I., Chistyakov K. Isotopic Composition of Glacier Ice and Meltwater in the Arid Parts of the Altai Mountains (Central Asia) // *Water*. 2022. V. 14. 252. P. 1–11.
- Fan Y., Chen Y., He Q., Li W., Wang Y. Isotopic Characterization of River Waters and Water Source Identification in an Inland River, Central Asia // *Water*. 2016. V. 8 (7). 286. P. 1–14.
<https://doi.org/10.3390/w8070286>
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantcev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V. Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum // *Remote Sens*. 2022. V. 14. 1508. P. 1–29.
- Herren P.A., Eichler A., Machguth H., Papina T., Tobler L., Zapf A., Schwikowski M. The onset of Neoglaciation 6000 years ago in western Mongolia revealed by an ice core from the Tsambagarav mountain range // *Quaternary Science Reviews*. 2013. № 69. P. 59–68.
- Li Z., Feng Q., Liu W., Wang T., Guo X., Li Z., Gao Y., Pan Y., Guo R., Jia B., Song Y., Han C. The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China // *Quaternary International*. 2015. V. 380–381 (4). P. 262–271.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.013>
- Meng Y., Liu G., Li M. Tracing the Sources and Processes of Groundwater in an Alpine Glacierized Region in Southwest China: Evidence from Environmental Isotopes // *Water*. 2015. V. 7 (6). P. 2673–2690.
<https://doi.org/10.3390/w7062673>
- Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T. Impact of Snowmelt Conditions on the Isotopic Composition of the Surface Waters of the Upper Ob River during the Flood Period // *Water*. 2023. V. 15. 2096. P. 1–13.
<https://doi.org/>
- Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A., Akbarov F., Esenaman M., Kapitsa V., Kassatkin N., Kayumova D., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Severskiy I., Petrov M., Usubaliyev R., Umirzakov G. Isotopic composition as a tracer of different source contributions to stream flow in the glacierized catchments of Central Asia // Abstracts EGU General Assembly, 24–28 Apr 2023, Vienna, Austria. EGU23-10181, 2023.
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10181>
- Sun C., Li W., Chen Y., Li X., Yang Y. Isotopic and hydrochemical composition of runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains, China // *Environmental Earth Sciences*. 2015. V. 74 (2). P. 1521–1537.
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4144-x>
- Wang C., Dong Z., Qin X., Zhang J., Du W., Wu J. Glacier meltwater runoff process analysis using δD and $\delta^{18}O$ isotope and chemistry at the remote Laohugou glacier basin in western Qilian Mountains, China // *Journ. of Geographical Sciences*. 2016. V. 26 (6). P. 722–734.
<https://doi.org/10.1007/s11442-016-1295-y>
- Zhao L.J., Yin L., Xiao H.L., Cheng G., Zhou M., Yang Y., Li C., Zhou J. Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin // *Chinese Science Bulletin*. 2011. V. 56 (4). P. 406–415.
- Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные) // Электронный ресурс. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (Дата обращения: 24.08.2023 г.)
- LEDNIK camp // Электронный ресурс. <https://lednik-camp.ru/> (Дата обращения: 24.08.2023 г.)

Citation: Bantcev D.V., Ovsepyan A.A., Rasputina V.A., Kozachek A.V., Tchikhatchev K.B., Ganyushkin D.A. The use of isotope indicators in hydrological studies in the Taldura river basin, Central Altai. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 513–524 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040038

The Use of Isotope Indicators in Hydrological Studies in the Taldura River Basin, Central Altai

D. V. Bantcev^{a, #}, A. A. Ovsepyan^a, V. A. Rasputina^a, A. V. Kozachek^{a, b},
K. B. Tchikhatchev^{a, b}, and D. A. Ganyushkin^a

^a*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

^b*Arctic and Antarctic research institute, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: bantcev-d@yandex.ru*

Received June 29, 2023; revised August 28, 2023; accepted October 2, 2023

Stable isotopes investigation was carried out in the territory of the Yuzhno-Chuya Ridge (Central Altai) during the ablation season of 2022. Samples were taken to determine the contribution of meltwater and precipitation to feeding of water bodies. The main research objects are Nekrasov glacier – Tamozennoye Lake system and Taldura River. In the basin of Lake Tamozennoye, the average ice $\delta^{18}O$ of the Nekrasov glacier (–17.3%) was obtained. Based on the isotopic composition of ice and precipitation, it was estimated that in the stream flowing into Lake Customs, the contribution of glacier meltwater varies from 28 to 67%, on average 54%. For a stream flowing out of a lake, the proportion of meltwater is higher: 48–72, 61% on average. First of all, meltwater enters the lake by filtration through the moraine, and not by surface runoff. Along the

Taldura River, $\delta^{18}\text{O}$ does not change significantly ($\delta^{18}\text{O} -16.58 \dots -16.84\%$) for 38 km before the Taldura River confluence into the Chagan River. This indicates the complete predominance of glacier meltwater in the river feeding in the middle of the ablation season. Repeated sampling of water from the Taldura River 5 km from the edge of the glacier showed, that the effect of precipitation can be traced in the isotopic composition of river water, but it does not exceed 20%.

Keywords: isotopic composition, periglacial lake, glacier runoff, glaciers, Altai

REFERENCES

- Bantsev D.V.* Isotopic composition of glacio-nival systems components as an indicator of their runoff-forming features in South-Eastern Altai: PhD. Saint-Petersburg: St. Petersburg State University, 2020: 91 p.
- Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Ekaykin A.A., Chistyakov K.V.* Isotope-geochemical investigation of glacio-nival systems of the Tabyin-Bogdo-Ola mountain massif (Western Mongolia). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (2): 169–176 <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-169-176> [In Russian].
- 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/10.15356/2076-6734-2018-3-333-342>
- Dyakova G.S., Ostanin O.V.* Glacial-permafrost stone formations of Altai: South-Chuya ridge. *Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri*. Geography and nature management of Siberia. 2015, 19: 56–62 [In Russian].
- Ekaykin A.A.* *Stabil'nye izotopy vody v glyaciologii 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].
- Katalog lednikov SSSR*. Catalog of glaciers of the USSR. V. 15. Altai and Western Siberia. Is. 1. Mountain Altai and Upper Irtysh. Pt. 5. Argut river basin. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 8 [In Russian].
- Konovalov V.G.* Filling-up and release of water from the outburst dangerous Mertzbacher Lake (Tien-Shan). *Georisk*. Georisk. 2012, 4: 26–37 [In Russian].
- Konovalov V.G., Rudakov V.A.* Remote assessment of reserve capacity of outburst alpine lakes. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (2): 235–245 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-2-235-245>
- Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Y., Papina T.S.* Isotopic composition of precipitation in Altai foothills: observation and interpolation data. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2019, 330 (2): 44–54 [In Russian]. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/2/91>
- Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Y., Papina T.S.* Isotope composition of winter precipitation and snow cover in the foothills of the Altai. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (1): 57–68 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-1-57-68>
- Nikitin S.A.* Patterns of distribution of glacial ice in the Russian Altai, assessment of their reserves and dynamics. *Materialy glyaciologicheskikh issledovanij*. Data of glaciological studies. 2009, 107: 87–96 [In Russian].
- Papina T.S., Malygina N.S., Blyakharchuk T.A., Nenasheva G.I., Ryabchinskaya N.A., Eyrikh A.N.* Isotopic composition and pollen spectra of precipitation and ice at the edge part of Korumdu Glacier (North Chu ridge, Altai Mountains). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2015, 55 (1): 40–48 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-40-48>
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR*. Resources of surface waters of the USSR. V. 15. Is. 1. Pt 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: 316 p. [In Russian].
- Tretij ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii: obshchee rezyume. The third assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation: general summary. Saint Petersburg: High technologies, 2022: 124 p. [In Russian].
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., 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 Yu.N., Rec E.P., Vasil'chuk Yu.K., Tokarev I.V., Budanceva N.A., Kireeva M.B.* Two approaches to hydrograph separation of the glacial river runoff using isotopic methods. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (2): 161–168 [In Russian].
- Aizen V., Aizen E., Fujita K., Nikitin S., Kreutz K., Takeuchi L.* Stable-isotope time series and precipitation origin from firn-core and snow samples, Altai glaciers, Siberia. *Journ. of Glaciology*. 2005, 51 (175): 637–654. <https://doi.org/10.3189/172756505781829034>
- Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Ekaykin A.A., Veres A.N., Tokarev I.V., Shtykova N.B., Andreeva T.A.* The Components of the Glacial Runoff of the Tsambagarav Massif from Stable Water Isotope Data. *Geosciences*. 2019, 9: 290–308. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070297>
- Bantsev D., Ganyushkin D., Terekhov A., Ekaykin A., Tokarev I., Chistyakov K.* Isotopic Composition of Glacier Ice and Meltwater in the Arid Parts of the Altai Mountains (Central Asia). *Water*. 2022, 14 (252): 1–11. <https://doi.org/10.3390/w14020252>
- Fan Y., Chen Y., He Q., Li W., Wang Y.* Isotopic Characterization of River Waters and Water Source Identification in an Inland River, Central Asia. *Water*. 2016, 8 (7): 286: 1–14. <https://doi.org/10.3390/w8070286>
- Ganyushkin D., Chistyakov K., Derkach E., Bantsev D., Kunaeva E., Terekhov A., Rasputina V.* Glacier Recession in the Altai Mountains after the LIA Maximum. *Remote Sens*. 2022, 14 (1508): 1–29. <https://doi.org/10.3390/rs14061508>

- Herren P.A., Eichler A., Machguth H., Papina T., Tobler L., Zapf A., Schwikowski M.* The onset of Neoglaciation 6000 years ago in western Mongolia revealed by an ice core from the Tsambagarav mountain range. *Quaternary Science Reviews*. 2013, 69: 59–68.
- Li Z., Feng Q., Liu W., Wang T., Guo X., Li Z., Gao Y., Pan Y., Guo R., Jia B., Song Y., Han C.* The stable isotope evolution in Shiyi glacier system during the ablation period in the north of Tibetan Plateau, China. *Quaternary International*. 2015, 380–381 (4): 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.013>
- Meng Y., Liu G., Li M.* Tracing the Sources and Processes of Groundwater in an Alpine Glacierized Region in Southwest China: Evidence from Environmental Isotopes. *Water*. 2015, 7 (6): 2673–2690. <https://doi.org/10.3390/w7062673>
- Papina T., Eirikh A., Kotovshchikov A., Noskova T.* Impact of Snowmelt Conditions on the Isotopic Composition of the Surface Waters of the Upper Ob River during the Flood Period. *Water*. 2023, 15 (2096): 1–13. <https://doi.org/10.3390/w15112096>
- Saidaliyeva Z., Shahgedanova M., Yapiyev V., Wade A., Akbarov F., Esenaman M., Kapitsa V., Kassatkin N., Kayumova D., Rakhimov I., Satylkanov R., Sayakbaev D., Severskiy I., Petrov M., Usubaliyev R., Umirzakov G.* Isotopic composition as a tracer of different source contributions to stream flow in the glacierized catchments of Central Asia. Abstracts EGU General Assembly, 24–28 Apr 2023, Vienna, Austria. EGU23-10181, 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10181>
- Sun C., Li W., Chen Y., Li X., Yang Y.* Isotopic and hydrochemical composition of runoff in the Urumqi River, Tianshan Mountains, China. *Environmental Earth Sciences*. 2015, 74 (2): 1521–1537. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4144-x>
- Wang C., Dong Z., Qin X., Zhang J., Du W., Wu J.* Glacier meltwater runoff process analysis using δD and $\delta^{18}O$ isotope and chemistry at the remote Laohugou glacier basin in western Qilian Mountains, China. *Journ. of Geographical Sciences*. 2016, 26 (6): 722–734. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1295-y>
- Zhao L.J., Yin L., Xiao H.L., Cheng G., Zhou M., Yang Y., Li C., Zhou J.* Isotopic evidence for the moisture origin and composition of surface runoff in the headwaters of the Heihe River basin. *Chinese Science Bulletin*. 2011, 56 (4): 406–415.
- Air temperature and precipitation (daily data). Retrieved from: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (Last access: 24 august 2023).
- LEDNIK camp Retrieved from: <https://lednik-camp.ru/> (Last access: 24 august 2023).