

Особенности формирования ледникового стока на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола по изотопным данным

© 2018 г. Д.В. Банцев^{1*}, Д.А. Ганюшкин¹, К.В. Чистяков¹, А.А. Екайкин^{1,2},
И.В. Токарев¹, И.В. Волков¹

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

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

*bancev-d@yandex.ru

Formation of glacier runoff on the northern slope of Tavan Bogd mountain massif based on stable isotopes data

D.V. Bantsev¹, D.A. Ganyushkin¹, K.V. Chistyakov¹, A.A. Ekaykin^{1,2}, I.V. Tokarev¹, I.V. Volkov¹

¹Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; ²Arctic and Antarctic research institute, Saint-Petersburg, Russia

*bancev-d@yandex.ru

Received January 25, 2018

Accepted April 4, 2018

Keywords: glaciers, glacier-derived runoff, isotopic content, melting, South-Eastern Altai.

Summary

This investigation is based on measurements of stable isotopes concentrations (δD and $\delta^{18}O$) in water, snow and ice samples. Glaciers are composed of ice, snow, and firn of atmospheric origin. The isotopic composition of these components is different, so when melting they form the melted glacial water with different isotope characteristics. Summer precipitation contains the heaviest isotopes, but only a small part of them remains on the glacier. The average isotopic composition of glacier ice represents the average composition of precipitation that accumulates on it. However, snow and firn of different seasons can occur on the glacier surface, the isotopic composition of which differs from the isotopic composition of glacier ice. At different times of the ablation season different parts of the glacier melt, therefore the isotopic composition of melt waters will be different. Differences in the isotopic composition of the major runoff-forming components on the Northern slopes of the massif Tabyin-Bogdo-Ola had been identified. A part of melting ice in the formation of the runoff on this massif is determined by estimation of the isotopic composition of snow, ice, and firn on different glaciers of this region. The average $\delta^{18}O$ of snow on the glacier surface is -11.9‰ , and this snow can be attributed to the precipitation fallen in late spring or early summer. Measured average isotopic composition of precipitation ($\delta^{18}O = -11.9\text{‰}$) was compared with the online calculator of the isotope content in precipitation (OIPC). The isotopic composition of glacial melt waters on the Northern macro-slope in the middle of July 2015 ($\delta^{18}O = -15.3\text{‰}$) differs from the isotopic composition of the territory of the Mongolian part of the massif ($\delta^{18}O = -17.4\text{‰}$) obtained from results of the analysis of eight samples taken at different edges of the glaciers at the beginning of August 2013. Isotopic separation shows important role of summer snow in feeding the glacial rivers of the massif even in the middle of the ablation season, especially for glaciers in the central part of the massif. The role of seasonal snow in feeding the glacier streams depends on the morphological type of glacier. It is maximum for corrie glaciers and minimum for the valley ones.

Citation: 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]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-333-342.

Поступила 25 января 2018 г.

Принята к печати 4 апреля 2018 г.

Ключевые слова: изотопный состав, ледники, ледниковый сток, таяние, Юго-Восточный Алтай.

Определены различия изотопного состава основных стокоформирующих компонентов на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола. По изотопному разделению дана оценка доли ледникового стока в середине сезона абляции для крупнейших ледников массива. Выявлены отличия в изотопном составе талых ледниковых вод российской и монгольской частей массива, отмечена возможная связь между морфологическим типом ледников и долей талых снежных вод в стоке.

Введение

Исследование концентраций стабильных изотопов кислорода и дейтерия в воде — одно из современных направлений гидрологических исследова-

ний. Данные об изотопном составе речных вод позволяют получить информацию об источниках воды в реке и разделить её гидрограф на составляющие [1]. Изотопные исследования выполнены экспедицией Санкт-Петербургского

государственного университета в июле 2015 г. на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола, в бассейне р. Ак-Алаха на территории Юго-Восточного Алтая. Поставленные задачи предусматривали: а) получение информации о соотношениях основных стокоформирующих компонентов в ледниковых водотоках на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола; б) их сравнение с полученными ранее данными; в) дополнительную проверку изотопного метода в условиях аридных высокогорий.

Территория Юго-Восточного Алтая отличается аридным климатом и относится к проблемной с точки зрения обеспечения водными ресурсами, поэтому исследование условий формирования стока высокогорных рек с помощью новых методов вызывает особый интерес. Этот регион уже несколько лет представляет собой объект исследования географов Санкт-Петербургского государственного университета [2–4]. Первые изотопные исследования ледников и рек предприняты нами с 1 по 16 августа 2013 г. и с 25 июля по 20 августа 2014 г. в монгольской части массива Табын-Богдо-Ола [1]. Горный массив Табын-Богдо-Ола находится на границе России, Монголии и Китая. Это – крупнейший центр оледенения Алтая. Здесь сходятся несколько горных хребтов: Южный Алтай с запада, Сайлюгем с востока и Монгольский Алтай с юга. По состоянию на 2015 г. на северном склоне массива Табын-Богдо-Ола насчитывалось 16 ледников суммарной площадью 23,46 км². Средневзвешенная высота фирновой границы составляет 3335 м. Одна из отличительных особенностей данного массива – ярко выраженное увеличение количества осадков с востока на запад [2].

Методика исследования

В основе изотопных исследований объектов гидросферы лежит определение относительных концентраций изотопов кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O} + \delta\text{D}$) [5]. Поскольку концентрации стабильных изотопов в воде из разных источников, например, талой ледниковой и грунтовой воды, различаются, этот метод можно использовать для определения доли воды различного происхождения в общем питании реки [6, 7].

Экспедиционные работы по отбору проб проводили с 8 по 20 июля 2015 г. Образцы воды отбирали в герметичные пробирки вместимостью 50 мл. Изотопные характеристики анализировали в Лаборатории изменения климата и окружающей среды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института на газовом анализаторе Picarro L2120-i. В качестве стандарта использовалась дистиллированная водопроводная вода г. Санкт-Петербург со следующими характеристиками: $-9,79\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $-75,47\text{‰}$ по δD относительно стандарта МАГАТЭ «V-SMOW2». Точность измерений составляла 0,05‰ для $\delta^{18}\text{O}$ и 0,5‰ для δD .

Образцы речной воды отбирали непосредственно из водотоков в районе исследования. Снег и фирн были взяты с поверхности ледников, а также из шурфов в области аккумуляции. Всего за время полевых работ отобрано 145 проб (126 – на массиве Табын-Богдо-Ола и 19 – на хр. Чихачева). Больше всего проб (71) взято из водотоков. Это – талые ледниковые воды, которые отбирались непосредственно у края ледника, и воды неледникового происхождения. Число образцов снега, фирна и льда составило 68. Большинство из них отбирали в двух снежно-фирновых шурфах, пройденных на высотах 3650 м (шурф № 1) и 3400 м (шурф № 2) в области питания ледников северного склона массива Табын-Богдо-Ола (рис. 1). Брали образцы и атмосферных осадков (шесть проб). Небольшое число образцов речной воды, снега, фирна и осадков было отобрано в 2015 г. в юго-восточной (монгольской) части массива Табын-Богдо-Ола на ледниках Потанина и Александры почти одновременно с работами, рассматриваемыми в данной статье.

Результаты

В табл. 1 приведены средние значения $\delta^{18}\text{O}$ по группам образцов для массива Табын-Богдо-Ола. Среднее значение изотопного состава атмосферных осадков получено за три года полевых исследований. Осадки собирались в августе 2013 г., в июле и августе 2014 г., а также в июне и июле 2015 г., поэтому отражают изотопный состав только летних осадков. Данных по изотопному составу осадков других сезонов недостаточно, так как ближайшие метеостан-

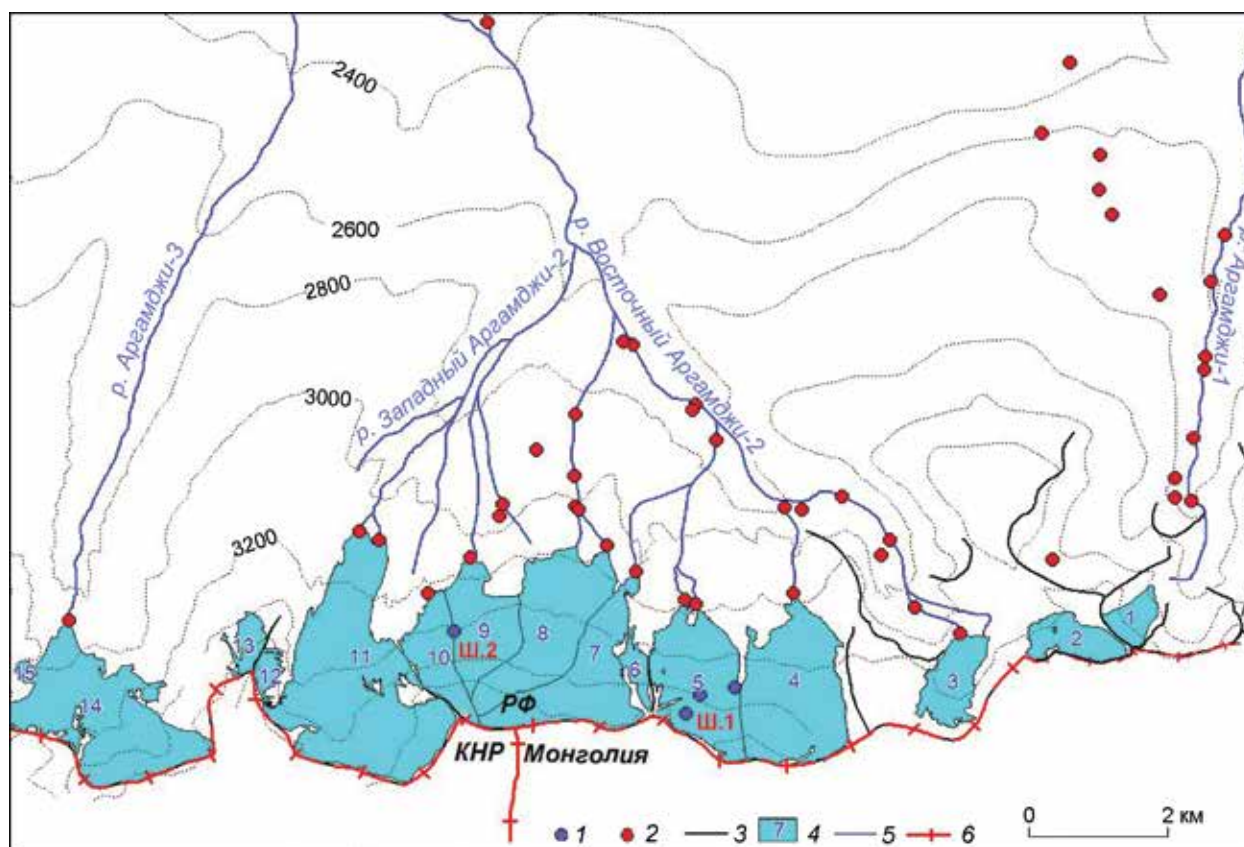


Рис. 1. Карта-схема района исследования с точками отбора изотопных проб:

1 – пробы снега и фирна; 2 – пробы воды; 3 – горные хребты; 4 – ледники и их номера; 5 – водотоки; 6 – государственная граница; Ш.1 и Ш.2 – шурфы

Fig. 1. Map of the research area:

1 – sampling points of snow and firn; 2 – sampling points of water; 3 – ridges; 4 – glaciers and their numbers; 5 – rivers; 6 – state border; Ш.1 and Ш.2 – prospect hole

Таблица 1. Средние изотопные характеристики по группам образцов*

Тип образцов	Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Среднее $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Число проб
Осадки (июль–август) 2013–2015 гг.	–4,9 ÷ –24,8	–11,9	22
Талая вода у края ледника (Монголия, 2013 г.)	–16,2 ÷ –18,0	–17,4	7
Талая вода у края ледника (Россия, 2015 г.)	–13,8 ÷ –18,3	–15,3	12
Ручьи (Россия, 2015 г.)	–12,5 ÷ –16,9	–14,5	22
Снег/фирн из шурфов (Россия, 2015 г.)	–10,3 ÷ –20,4	–13,0	57

* $\delta^{18}\text{O}$ – относительная концентрация ^{18}O .

ции, входящие в сеть GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation) (Омск, Урумчи), находятся на большом удалении от района исследования. Средний изотопный состав по $\delta^{18}\text{O}$ талых ледниковых вод для северного макросклона составил –15,3‰. Это значение на 2‰ изотопно тяжелее среднего значения талых ледниковых вод, полученного для ледников юго-восточной (монгольской) части массива в 2013–2014 гг. [8].

Отсутствие многолетних данных об изотопном составе осадков существенно осложняет изотопные исследования. По данным ближайшей метеостанции в пос. Кош-Агач (абсолютная высота 1700 м), во внутригодовом распределении преобладают летние осадки (70%). Информацию о внутригодовом изменении изотопного состава осадков можно получить с помощью косвенных методов, среди которых – интерполирование

данных по метеостанциям сети GNIP за период 1960–2010 гг. Подобная информация представлена на портале IsoMAP – Isoscapes Modeling, Analysis and Prediction [9, 10]. Использование связанного с данным порталом онлайн-калькулятора OIPC (The Online Isotopes in Precipitation Calculator) позволяет с помощью ввода географических координат рассчитывать средние значения изотопного состава осадков по месяцам для разных территорий [9, 11]. В 2014–2016 гг. группой учёных из Института водных и экологических проблем СО РАН (г. Барнаул) в предгорьях Алтая был налажен отбор зимних осадков на изотопный анализ. Согласно результатам измерений, $\delta^{18}\text{O}$ проб изменялся от $-15,9$ до $-30,63\text{‰}$, а средние значения для двух зим составили $-20,4$ и $-21,2\text{‰}$ соответственно. В работе [12] показана высокая согласованность результатов изотопного анализа осадков за зимний сезон с результатами интерполяции IsoMAP.

Полученное по результатам отбора проб осадков июля и августа в течение трёх лет среднее значение $\delta^{18}\text{O}$, равное $-11,9\text{‰}$ (см. табл. 1), ниже на 2‰ расчётных значений, но в целом близко к $\delta^{18}\text{O}$ летних месяцев, полученному с помощью OIPC. Исходя из этого, модельные данные об изотопном составе осадков для данного района можно использовать в дальнейшей работе. На рис. 2, б показано внутригодовое изменение изотопного состава осадков по данным OIPC (для 49° с.ш., 88° в.д. и высоты 3000 м). Среднее $\delta^{18}\text{O}$ отобранных проб, а также рассчитанное с помощью OIPC среднегодовое значение $\delta^{18}\text{O}$ осадков выше фирновой границы (3500 м) составило $-17,8\text{‰}$.

Для образцов поверхностного снега $\delta^{18}\text{O}$ колеблется от $-13,7$ до $-10,3\text{‰}$, в среднем составляя $-11,9\text{‰}$. Такое высокое значение $\delta^{18}\text{O}$ показывает, что снег на поверхности ледников аккумуляровался преимущественно весной и ранним летом. Полученное значение близко к среднему $\delta^{18}\text{O}$ для летних осадков. Поверхностные пробы снега и фирна также отбирались в начале августа 2015 г. на ледниках Потанина и Александры в монгольской части массива, и большинство проб имело тяжёлый изотопный состав. В шести образцах из семи значение $\delta^{18}\text{O}$ изменялось от $-10,5$ до -14‰ . Отметим, что одна проба, взятая на наименьшей высоте (3150 м) существенно ниже фирновой границы, имеет наи-

более лёгкий изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -21,8\text{‰}$), что позволяет отнести её к остаткам зимнего снега на поверхности ледника. Остальные пробы, как и в российской части, можно связывать с осадками поздней весны. При этом в распределении изотопного состава по высотам наблюдаются признаки описанного Ю.К. Васильчуком обратного высотного эффекта, который заключается в утяжелении изотопного состава поверхностного снега с увеличением высоты, что объясняется лучшей сохранностью изотопно-тяжёлого снега на больших высотах [13].

Снежно-фирновые шурфы глубиной 1 м (шурф № 1) и $1,9$ м (шурф № 2) были пройдены в области питания ледников № 5 и № 9 на высотах 3650 и 3400 м соответственно (см. рис. 1). Образцы отбирались через каждые 5 см по глубине. Выше границы питания толщина слоя фирна и снега не превышала 20 – 25 см. Более мощная снежно-фирновая толща наблюдалась только у стенки каров, где и были пройдены оба шурфа. В неблагоприятных условиях ветрового переноса, когда зимний снег преимущественно сносится на подветренные юго-восточные склоны, кары выступают в качестве накопителей атмосферных осадков. Среднее $\delta^{18}\text{O}$ по шурфу № 1 равнялось $-14,6\text{‰}$, а по шурфу № 2 составляло $-12,1\text{‰}$. Причём в шурфе № 2 изменение изотопного состава с глубины 25 см до глубины $1,8$ м очень невелико и равняется $1,7\text{‰}$ (от $-11,3$ до $-13,0\text{‰}$). По изотопному составу снега из шурфов видно, что в снежно-фирновой толще в 2015 г., как и в поверхностном снеге, преобладали осадки тёплого сезона.

Средние значения стокоформирующих компонентов в районе работ на массиве Табын-Богдо-Ола за ограниченные интервалы времени оказались систематически изотопно легче аналогичных средних изотопных характеристик, полученных в результате полномасштабных изотопных исследований стока с ледника Джанкуат на Кавказе [1]. На рис. 2, а показана зависимость между δD и $\delta^{18}\text{O}$ по группам образцов.

Обсуждение

Близость уравнения линейной зависимости между δD и $\delta^{18}\text{O}$ к глобальной линии метеорных вод ($\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$) показывает подо-

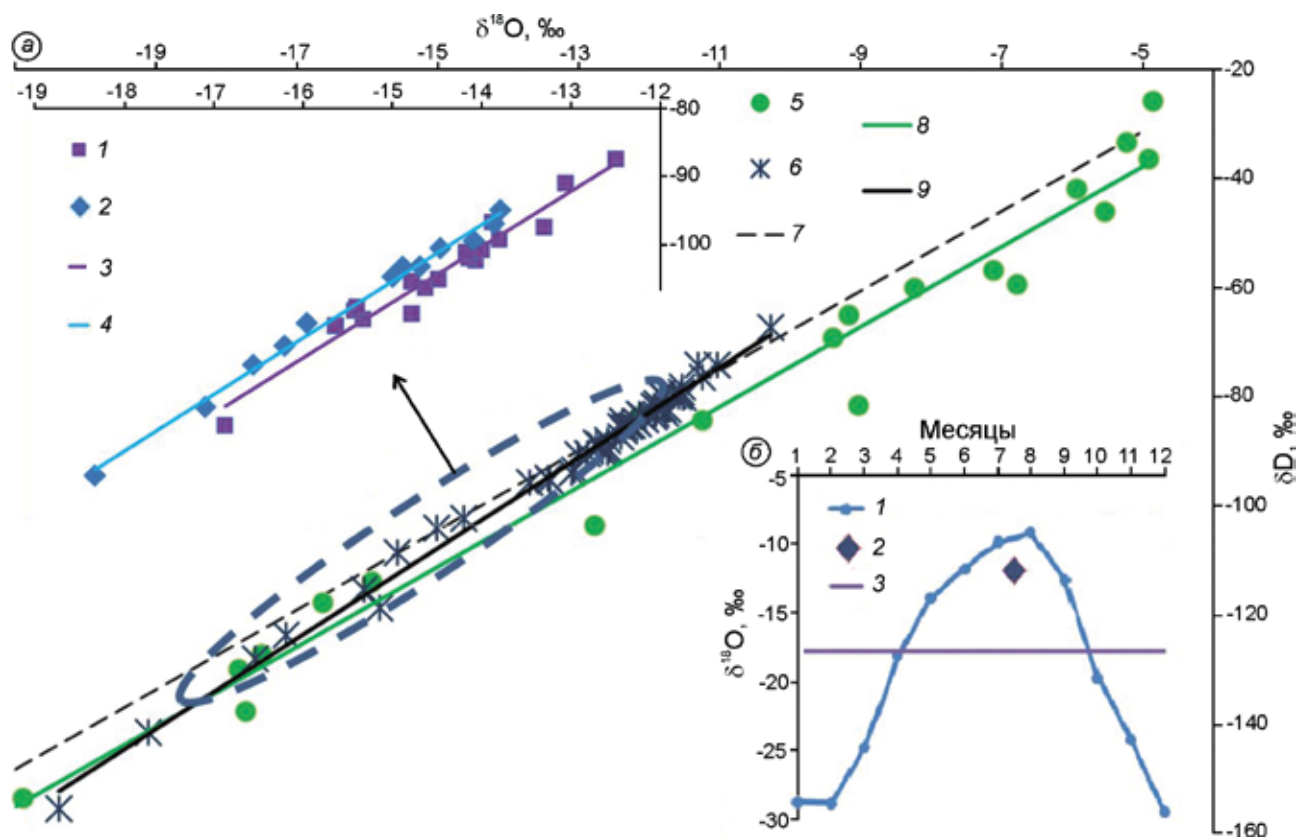


Рис. 2. Зависимость между относительной концентрацией δD и $\delta^{18}\text{O}$ по группам образцов (а) и расчётный изотопный состав осадков по месяцам согласно The Online Isotopes in Precipitation Calculator (ОИРС) (б).

а: 1 – неледниковые водотоки; 2 – талые ледниковые воды; 3 – линейная зависимость для неледниковых водотоков ($\delta\text{D} = 8,2\delta^{18}\text{O} + 14,1$); 4 – линейная зависимость для талых ледниковых вод ($\delta\text{D} = 8,4\delta^{18}\text{O} + 20$); 5 – летние осадки за три года; 6 – снег и фирн из шурфов; 7 – локальная линия метеорных вод по данным ОИРС ($\delta\text{D} = 7,3\delta^{18}\text{O} + 5,2$); 8 – линейная зависимость для осадков ($\delta\text{D} = 7,3\delta^{18}\text{O} - 1,2$); 9 – линейная зависимость для снега и фирна ($\delta\text{D} = 8,3\delta^{18}\text{O} + 16,5$); б: 1 – изотопный состав по месяцам (данные ОИРС); 2 – средний изотопный состав летних осадков за 2013–2015 гг.; 3 – расчётное среднегодовое значение изотопного состава осадков на высоте 3500 м

Fig. 2. Relations between $\delta^{18}\text{O}$ and δD for the groups of the samples (а) and calculated isotopic content of precipitation by month (The Online Isotopes in Precipitation Calculator data) (б).

а – 1 – non-glacial fed streams; 2 – meltwater; 3 – linear dependence for the samples of non-glacial fed streams ($\delta\text{D} = 8,2\delta^{18}\text{O} + 14,1$); 4 – linear dependence for the samples of meltwater ($\delta\text{D} = 8,4\delta^{18}\text{O} + 20$); 5 – precipitation (3 years); 6 – snow and firm from snow-pits; 7 – local meteoric water line by OIPC ($\delta\text{D} = 7,3\delta^{18}\text{O} + 5,2$); 8 – linear dependence for the samples of precipitation ($\delta\text{D} = 7,3\delta^{18}\text{O} - 1,2$); 9 – linear dependence for the samples of snow and firm ($\delta\text{D} = 8,3\delta^{18}\text{O} + 16,5$); б – 1 – calculated isotopic content of precipitation by month (OIPC data); 2 – average isotopic content of summer precipitation in 2013–2015; 3 – calculated average annual isotopic content of precipitation at the height of 3500 m

бие условий образования осадков равновесным и указывает на невысокий вклад повторного испарения в формирование изотопного состава. По рис. 2, а видно, что угловой коэффициент линейной зависимости между δD и $\delta^{18}\text{O}$ для летних атмосферных осадков меньше, чем у других типов образцов.

С использованием среднемесячных значений изотопного состава по данным ОИРС была построена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) – уравнение, характеризующее взаимо-

отношение между δD и $\delta^{18}\text{O}$ для осадков в определённом районе. Угловой коэффициент для проб осадков совпадает с угловым коэффициентом локальной линии метеорных вод, построенной по данным интерполяции ОИРС. Угловой коэффициент 7,3 показывает вклад испарения при выпадении летних осадков в формировании их изотопного состава, что неудивительно, если учесть аридность климата и относительно высокие летние температуры воздуха. Ледники и неледниковые водотоки, по-видимому, фор-

мировались преимущественно из осадков более холодных месяцев, поэтому угловой коэффициент зависимости между δD и $\delta^{18}O$ ближе к 8, т.е. ближе к глобальной линии метеорных вод.

В 2015 г., судя по изотопному составу образцов поверхностного снега и снега из шурфов (см. табл. 1), на поверхности ледников лежал изотопно-тяжёлый снег поздней весны. Его изотопный состав тяжелее изотопного состава ледникового льда. С учётом этого можно установить вклад снега с поверхности ледника в общий объём талых вод. Изотопный состав талых вод у краёв ледников отражает изменения условий накопления и залегания снега из-за различий в их морфологии. В 2013 г. среднее $\delta^{18}O$ талых ледниковых вод юго-восточной (монгольской) части массива составляло $-17,4\text{‰}$ [8]. Средний изотопный состав талых ледниковых вод на северном макросклоне в 2015 г. тяжелее ($-15,3\text{‰}$) по сравнению с юго-восточной частью массива. Это объясняется различиями в характере оледенения: ледники юго-восточной части массива имеют крупные языки, иногда, как в случае с ледником Козлова, спускающиеся до высоты 2650 м [8]. Следовательно, в 2013 г. в юго-восточной части массива в формировании ледникового стока влияние талых вод сезонного снега было невелико, а значительной была роль талого ледникового льда. На северном склоне в 2015 г., напротив, было велико влияние на сток снега на поверхности ледников.

Используя концентрации стабильных изотопов в качестве маркеров, можно определить долю сезонного снега в стоке у краёв ледников. Выделяемая в данном случае такая составляющая стока, как и сезонный снег на поверхности ледника, согласно одному из подходов в гляциогидрологии, не может быть отнесена к ледниковому стоку, так как за ледниковый принимается сток таяния многолетних запасов фирна и льда. Данный подход отражает основную гидрологическую роль ледников, заключающуюся в накоплении осадков и временном исключении их из круговорота воды с последующим перераспределением по годам [14–16]. Оценить вклад талых ледниковых и снежных вод в общее питание ледниковых рек на северном макросклоне массива Табын-Богдо-Ола в 2015 г. можно, если использовать некоторые допущения.

Во-первых, из-за отсутствия данных об изотопном составе ледникового льда для исследуемого массива за его значение принято полученное в 2013 г. среднее $\delta^{18}O$ талых ледниковых вод для монгольской части массива в августе, которое составило $-17,4\text{‰}$. Естественно, в формировании данного изотопного состава участвовала и талая вода из снежно-фирновой толщи, но, судя по изотопному составу, в гораздо меньших масштабах, чем в 2015 г. на северном макросклоне. Это значение близко также к расчётному среднегодовому значению изотопного состава осадков выше фирновой границы по данным ОИРС ($-17,8\text{‰}$). За значение изотопного состава сезонного снега на поверхности ледников северного макросклона массива в 2015 г. принималось среднее $\delta^{18}O$ поверхностного снега, равное $-11,9\text{‰}$.

Во-вторых, ввиду ограничения времени на полевые работы не было возможности учесть фактор времени, влияющий на соотношения стокоформирующих компонентов в общем стоке. Пробы отбирались в течение нескольких дней в самый разгар сезона абляции — в середине июля. Логично предположить, что к концу сезона абляции доля сезонного снега уменьшилась бы.

Разделение стока на составляющие проводилось с помощью уравнения изотопного баланса

$$R^{18}O_1 f_1 + R^{18}O_2 f_2 = R^{18}O, \quad (1)$$

где $R^{18}O_1$ и $R^{18}O_2$ — соответственно изотопный состав первого и второго компонентов; f_1, f_2 — соответственно доля первого и второго компонентов; $R^{18}O$ — результирующий изотопный состав [1].

В данном случае в качестве компонентов рассматривались талые ледниковые воды и воды, сформировавшиеся при таянии сезонного снега на поверхности ледника. В качестве результирующего изотопного состава использовался состав талых вод у краёв ледников. Отметим, что талая вода с ледника № 3 имеет значение $\delta^{18}O$ (среднее по двум пробам $-17,7\text{‰}$) изотопно легче принятой величины $\delta^{18}O$ для ледниковых вод. Определялись только доли различных компонентов, измерения расхода воды не проводились. Результаты расчётов по формуле (1) (табл. 2) показывают, что в середине сезона абляции в питании рек северного макросклона массива в июле 2015 г. большую

Таблица 2. Доли стокоформирующих компонентов для водотоков ледникового происхождения

Номер ледника на карте-схеме (см. рис. 1)	Относительная концентрация ^{18}O талых вод, ‰	Доля ледникового льда, %	Доля сезонного снега на поверхности, %
3	-17,7	100	0
4	-13,9	35	65
5	-14,4	45	55
7	-16,2	78	22
8	-14,9	54	46
9	-13,8	34	66
10	-14,5	46	54
11	-15,9	73	27
14	-16,5	85	15

роль играл талый снег с поверхностей ледников. Для ледников центральной части массива доля сезонного снега в формировании ледникового стока достигала 66%. У крупных долинных ледников № 11 и 14 эта доля была гораздо меньше. На северном макросклоне массива площади ледников закономерно возрастают, а абсолютная высота концов ледников понижается с востока на запад в результате увеличения количества осадков, при этом преобладающие морфологические типы ледников изменяются от каровых висячих и склоновых на востоке до долинных на западе.

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. Связано это с тем, что они имеют длинные и пологие языки, которые быстро освобождаются от снега в начале сезона абляции. В общий объём талой воды у краёв крупных ледников большой вклад вносят изотопно более лёгкие талые воды многолетнего льда, поэтому образцы воды, отобранные у краёв долинных ледников № 11 и 14, имеют более лёгкий изотопный состав по сравнению с ледниками центральной части массива (-15,9 и -16,5‰ соответственно). Напротив, в центральной части массива в основном представлены склоновые ледники, которые ввиду высокого гипсометрического положения закрыты снегом длительный период, причём на их поверхности долго сохраняется снег поздней весны – раннего лета. Данные ледники при отборе образцов в июле 2015 г. визуально были на 70% покрыты свежим снегом. Поэтому именно у краёв относительно небольших ледников в

центральной части северного макросклона массива в сезон абляции 2015 г. наблюдался наиболее тяжёлый изотопный состав талых вод, и именно у ледников центральной части массива, за исключением ледника № 7, наблюдалась наибольшая доля поверхностного снега в формировании талых вод.

Самый лёгкий изотопный состав (-18,3 и -17,1‰) имела талая вода у края ледника № 3 (см. рис 1). Связано это, в первую очередь, с его неблагоприятной для накопления снега морфологией. Данный ледник, несмотря на то, что начинается в каре, имеет большой уклон поверхности [2]. Способность ледников концентрировать большие массы весеннего снега на своей поверхности определяет их важную гидрологическую роль на северном макросклоне Табын-Богдо-Ола.

За время гляциологических наблюдений, которые ведутся на территории массива с 1999 г., в данном районе отмечена тенденция к быстрому отступанию долинных ледников. Исходя из этого, можно предположить, что роль сезонного снега в питании рек будет только увеличиваться со временем. Вместе с тем при продолжающемся сокращении оледенения выпавший в долине снег будет таять быстрее, так как на поверхности ледников он сохраняется дольше. Также была предпринята попытка проследить изменение изотопного состава воды по течению реки. Для этого вдоль течения р. Восточный Аргамджи-2 был заложен профиль изотопных проб воды. Образцы отбирались от края ледника № 3 (см. рис. 1) на протяжении 12 км. Изотопный состав воды реки выравнивается под влиянием крупных притоков, берущих своё



Рис. 3. Изотопный состав воды в р. Восточный Аргамджи-2 и её притоках:

1 – вода из реки; 2 – небольшие притоки; 3 – крупные притоки

Fig. 3. Isotopic content of water in East Argamgy-2 river and its tributaries.

1 – river water; 2 – little tributaries; 3 – big tributaries

начало у ледников центральной части массива, и составляет по $\delta^{18}\text{O} = -15,1\text{‰}$ (рис. 3). Это значение за период наблюдений практически не изменялось, что подтвердили и повторно взятые пробы.

Поскольку максимум осадков выпадает летом, грунтовые воды должны питаться в первую очередь летними осадками и иметь более тяжёлый изотопный состав. Это частично подтверждается пробой воды из почвенного шурфа в бассейне р. Аргамджи: $\delta^{18}\text{O}$ грунтовой воды составил $-13,2\text{‰}$. Проба из источника с грунтовым питанием в монгольской части массива также имела относительно тяжёлый изотопный состав ($\delta^{18}\text{O} = -14,0\text{‰}$). Однако грунтовые воды – изотопно более лёгкие по сравнению со среднелетними значениями изотопного состава осадков по данным ОИРС ($-10,3\text{‰}$) и средними значениями изотопного состава летних осадков ($-11,9\text{‰}$). Это связано с тем, что на высоте отбора проб грунтовых вод за последние несколько лет значения среднелетних температур, полученные по данным метеостанции Кош-Агач с использованием рассчитанного авторами ранее высотного градиента $0,6\text{ °C}/100\text{ м}$ [2], были выше 8 °C . При такой температуре большое количество выпавших осадков испаряется до попадания в грунтовые воды [17], поэтому на формирование изотопного состава грунтовых вод изотопно тяжёлые летние осадки будут влиять меньше. Изотопный состав грунтовых вод массива показывает, что наиболее вероятно их формирование происходило из осадков мая, начала июня, конца августа и сентября.

Заключение

По результатам исследования выполнено сравнение расчётных данных по изотопному составу атмосферных осадков для исследуемого района с изотопным составом проб осадков. Установлено, что в питании водотоков, берущих своё начало у ледников северного макросклона массива Табын-Богдо-Ола, в отличие от водотоков монгольской части, в середине сезона абляции большую роль играет снег с поверхности ледников. Связано это с преобладанием морфологических типов ледников, благоприятных для снегонакопления. Соотношение снежной и ледяной составляющих в ледниковом стоке меняется в зависимости от размера и морфологического типа ледника. Для небольших каровых ледников с благоприятными условиями снегонакопления доля талых снеговых вод в ледниковом стоке больше, чем у долинных. Отметим, что данные выводы получены по результатам кратковременных работ и требуют дополнительного уточнения.

Основная задача, которая предусматривала определение долей стокоформирующих компонентов в питании ледниковых рек, выполнена только для ограниченного периода сезона абляции, но полученные данные могут служить базой для дальнейших исследований. На территории Юго-Восточного Алтая, используя изотопный метод, можно оценивать соотношение снежной и ледовой составляющих ледникового стока. Однако были установлены и некоторые методологические просчёты. По результату по-

левой проверки изотопного метода были сформулированы предложения по усовершенствованию методики исследования и направления дальнейших работ. Для повышения объективности результатов, кроме изотопного состава вод, следует использовать и другие трассеры, например общую минерализацию. Необходим отбор как можно большего числа проб из разных источников для накопления статистики.

У ледниковых рек, особенно в период абляции, доли различных компонентов в стоке изменяются в течение времени, поэтому для получения объективных данных следует проводить изотопные исследования на протяжении всего сезона абляции. Необходимы также полустационарные наблюдения на временных гидропостах, где должны отбираться пробы на изотопный анализ для количественной оценки

объёма воды, поступающей от каждого стокоформирующего компонента.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Русского географического общества в рамках научного проекта № 08/2016-И, проекта РГО № 13-05-41075, проектов РФФИ – № 15-05-06611 А, № 13-05-00851а, № 14-05-00796, а также проекта Санкт-Петербургского государственного университета № 18.38.418.2015.

Acknowledgements. The study was carried out with the financial support of the Russian Geographical Society within the framework of the scientific project № 08/2016-I, RFBR and the RGO, project № 13-05-41075 RGO_a, RFBR, projects № 15-05-06611 A, № 13-05-00851a, № 14-05-00796, as well as St. Petersburg State University, project № 18.38.418.2015.

Литература

1. Чижова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева 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. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-161-168.
2. Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Волков И.В., Банцев Д.В., Кунаева Е.П., Харламова Н.Ф. Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола (Алтай) // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 307–325. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-307-325.
3. Москаленко И.Г., Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В. Современное и древнее оледенение северного склона массива Таван-Богдо-Ола // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 3. С. 33–44. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-33-44.
4. Чистяков К.В., Ганюшкин Д.А., Курочкин Ю.Н. Современное состояние и динамика нивально-гляциальных систем массивов Таван-Богдо-Ола и Монгун-тайга // Лёд и Снег. 2015. Т. 55. № 1. С. 49–60. doi: 10.15356/2076-6734-2015-1-49-60.
5. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
6. Dinçer T., Payne B.R., Flowkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of Tritium and Oxygen 18 // Water Resources Research. 1970. V. 6. P. 110–124.
7. Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships. Catena. 1980. V. 7. P. 251–263.

References

1. Chizhova Yu.N., Rets E.P., Vasil'chuk Yu.K., Tokarev I.V., Budantseva 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. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-161-168. [In Russian].
2. Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Volkov I.V., Bantsev D.V., Kunaeva E.P., Kharlamova N.F. Modern data on glaciation of the northern slope of Tavan-Bogdo-Ola massif (Altai). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (3): 307–325. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-307-325. [In Russian].
3. Moskalenko I.G., Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V. Modern and ancient glaciation of northern slope of the Tavan-Bogdo-Ola massif. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (3): 33–44. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-33-44. [In Russian].
4. Chistyakov K.V., Ganyushkin D.A., Kurochkin Yu.N. Present state and dynamics of glacio-nival systems of Mongun-Taiga and Tavan-Bogdo-Ola mountain massifs. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2015, 55 (1): 49–60. doi: 10.15356/2076-6734-2015-1-49-60. [In Russian].
5. Vasil'chuk Yu.K., Kotlyakov V.M. *Osnovy isotopnoy glatsiologii i geokriologii*. Principles of isotope geocryology and glaciology. Moscow: Moscow University Press, 2000: 616 p. [In Russian].
6. Dinçer T., Payne B.R., Flowkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of Tritium and Oxygen 18. *Water Resources Research*. 1970, 6: 110–124.
7. Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships. *Catena*. 1980, 7: 251–263.

8. 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. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-169-176.
9. Электронный ресурс: <http://www.waterisotopes.org> (Bowen G.J. (Year). The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version X.X).
10. Электронный ресурс: <https://nucleus.iaea.org/wiser>. IAEA/WMO (2015). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at.
11. Bowen G.J., Wassenaar L.I., Hobson K.A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wild-life forensics // Oecologia. 2005. V. 143. P 337–348.
12. 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. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68.
13. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н. Высотный градиент распределения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках и в снежном покрове высокогорных районов // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 1. С. 13–21.
14. Глазырин Г.Е. Влияние сокращения оледенения на сток рек в Средней Азии // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 3. С. 20–25. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-20-25.
15. Шетинников А.С. Морфология и режим ледников Памиро-Алая. Ташкент: изд. САНИГМИ, 1998. 219 с.
16. Шульц В.Л. Реки Средней Азии. Л.: Гидрометеоздат, 1965. 691 с.
17. Блютген И. География климатов: В 2 томах. М.: Прогресс, 1972. 864 с.
8. Bantsev D.V., Ganyushkin D.A., Ekaykin A.A., Chistyakov K.V. Isotope-geochemical investigation of glacio-nival systems of the Tabyn-Bogdo-Ola mountain massif (Western Mongolia). *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (2): 169–176. doi: 10.15356/2076-6734-2016-2-169-176. [In Russian].
9. Electronic resource: <http://www.waterisotopes.org> (Bowen G.J. (Year). The Online Isotopes in Precipitation Calculator, version X.X).
10. Electronic resource: <https://nucleus.iaea.org/wiser> (IAEA/WMO (2015). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at.).
11. Bowen G.J., Wassenaar L.I., Hobson K.A. Global application of stable hydrogen and oxygen isotopes to wild-life forensics. *Oecologia*. 2005, 143: 337–348.
12. Malygina N.S., Eirikh A.N., Kurepina N.Yu., 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. doi: 10.15356/2076-6734-2017-1-57-68. [In Russian].
13. Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Yu.N. Altitudinal gradient of $\delta^{18}\text{O}$ and δD in precipitation and snow cover in high mountains. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2010, 14 (1): 13–21. [In Russian].
14. Glazyrin G.E. Influences of deglaciation on the river run-off in Central Asia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (3): 20–25. doi: 10.15356/2076-6734-2013-3-20-25. [In Russian].
15. Shchetinnikov A.S. *Morfologiya i reghim lednikov Pamiro-Alaya*. Morphology and regime of glaciers in the Pamirs-Alti. Tashkent: SANIGMI, 1998: 219 p. [In Russian].
16. Shulz V.L. *Reki Sredney Azii*. Rivers of Central Asia. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965: 691 p.
17. Blyutgen I. *Geografiya klimatov*. Geography of climates. In 2 volums. Moscow: Progress, 1972: 864 p. [In Russian].