

ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556.3:553.7:551.324:550.42:546.027

РАСЧЛЕНЕНИЕ ГИДРОГРАФА РЕКИ ДЖАНКУАТ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАВКАЗ, С ПОМОЩЬЮ ИЗОТОПНЫХ МЕТОДОВ¹

© 2016 г. Ю. К. Васильчук*, Е. П. Рец**, Ю. Н. Чиждова*, И. В. Токарев***,
Н. Л. Фролова*, Н. А. Буданцева*, М. Б. Киреева*, Н. А. Лошакова*

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
119991 Москва ГСП-1, Ленинские горы

**Институт водных проблем РАН
119333 Москва, ул. Губкина, 3

***Санкт-Петербургский государственный университет, Ресурсный центр "Геомодель"
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 9

E-mail: vasilch_geo@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2015 г.

Рассмотрено формирование талого стока с ледника Джанкуат, и выполнено расчленение гидрографа р. Джанкуат с помощью изотопного и ионного баланса. Изучены изотопные вариации стока на замыкающем створе р. Джанкуат для двух сезонов абляции 2013 и 2014 гг. Для расчленения гидрографа 2014 г. использованы средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации, полученные для различных источников питания р. Джанкуат: атмосферных осадков, снега разных сезонов, фирна, льда и грунтовых вод. Изотопное разделение гидрографа показало, что в июне существенную долю в суммарный сток р. Джанкуат вносит сток от таяния весеннего снежного покрова (15–20%) благодаря сформировавшимся его весенним снегопадам. Роль этой составляющей в суммарном стоке июня доходит до 36% в отдельные дни. Доля стока, образованного от таяния зимнего снега, варьирует от 20% в начале до 50% в конце июня. Для периода с августа по сентябрь доля подземных вод составляет от 30 до 100%, доля осадков – от 0 до 30% (в среднем 6% для рассматриваемого периода), а доля талой воды от фирна и льда – от 0 до 70% (в среднем 38.6%).

Ключевые слова: изотопный состав, расчленение гидрографа, Кавказ.

DOI: 10.7868/S0321059616060080

ВВЕДЕНИЕ

Для целого ряда гидрологических задач большое значение имеет информация о генезисе вод, поступающих в русло реки в характерные фазы водного режима, за конкретные годы или многолетний период. От источников питания рек, их соотношения зависят: водность рек в период межени, половодья и паводков, экстремальные расходы воды и режим стока рек. Проблема изменчивости источников питания важна для прогноза характерных расходов воды в условиях изменчивости климатических условий. Особую сложность данная задача приобретает для горных рек с большой долей оледенения в бассейне. В этом случае в формировании стока реки участвуют воды, образующиеся в результате таяния льда и фирна с различных частей ледника; таяния сезон-

ного снега как с ледниковой, так и с неледниковой части бассейна; летние дождевые осадки; подземные воды. Оценка роли и режима каждого из источников питания необходима для понимания механизмов формирования стока в высокогорных речных бассейнах.

Для решения данной задачи в гидрологии рек часто используется метод расчленения гидрографа реки. Изотопные трассеры в сочетании с геохимическими (электропроводность воды, растворенный углерод и т.д.) применяют для выявления особенностей гидрологических процессов в пределах небольших водосборов, особенно в периоды выпадения дождей и таяния снега. Это позволяет определить вклад различных компонентов в суммарный сток по соотношению между содержаниями стабильных изотопов и макрокомпонентов химического состава воды в источнике и в стоке замыкающего створа. Также это позволяет рассчитать пропорции водных масс от различных источников питания, формирующих суммарный сток с территории речного бассейна.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (полевые исследования – по проекту № 14-17-00155, изотопный анализ – по проекту № 14-27-00083), РФФИ (гидрохимические исследования – по проектам № 16-05-00977 и № 16-35-60042).

Изотопы ^{18}O , ^2H (D) и ^3H для расчленения гидрографа применяются наиболее часто ввиду того, что они – составная часть молекулы воды. Использование этих природных трассеров оправдано тем, что метеорные (атмосферные) воды сохраняют свои отличительные свойства до смешения с другими составляющими стока.

Концентрации ^{18}O и D измеряются в виде отклонения от стандарта и выражаются в значениях δ : $\delta\text{D} = [(^2\text{H}/^1\text{H}_{\text{образца}} - ^2\text{H}/^1\text{H}_{\text{стандарта}})/^2\text{H}/^1\text{H}_{\text{стандарта}}] \times 1000\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = [(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{образца}} - ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{стандарта}})/^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{стандарта}}] \times 1000\text{‰}$.

Снег, фирн, лед, талая, дождевая и подземная вода имеют различное содержание стабильных изотопов кислорода и дейтерия. Это дает основу для широкого применения данных об изотопном составе как индикаторе вод различного происхождения [16, 20] и соответствующего расчленения гидрографа.

Состав воды рек с ледниковым питанием тесно связан с активным летним таянием ледников. Таяние снега и ледникового льда привносит в реки изотопно более легкую воду как по значениям δD , так и по значениям $\delta^{18}\text{O}$.

На изотопный состав речных вод влияет испарение, при котором происходит изотопное обогащение воды водоемов. Температурный эффект обуславливает сезонную изотопную изменчивость поверхностных вод, одно из проявлений температурной зависимости изотопного состава – высотный эффект, проявляющийся в снижении значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD при снижении температуры с высотой. Градиенты для значений $\delta^{18}\text{O}$ обычно составляют от -0.15 до $-0.4\text{‰}/100$ м, для δD – в 8 раз больше [3].

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в атмосферных осадках в глобальном масштабе тесно связаны с температурой воздуха [15]. Поэтому для зимних осадков, выпадающих в виде снега, характерны низкие отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD , а для летних, выпадающих в виде дождя, – относительно высокие, но тоже отрицательные. Эта закономерность носит название “сезонный изотопный эффект”. Кроме того, чем больше расстояние от места происхождения воздушных масс, тем ниже значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD – это континентальный изотопный эффект [12].

Накопление ледникового льда в высокогорье умеренного и субтропического климата, как правило, происходит в основном за счет зимних изотопно легких осадков. Весенний снег практически полностью стает в начале периода абляции почти на всей площади ледников, сохраняясь только в самой верхней части зоны аккумуляции. Поэтому обычно изотопный состав ледникового льда характеризуется более легкими $\delta^{18}\text{O}$ и δD , чем состав осадков в среднем за год. Однако про-

цесс метаморфизма снега обогащает фирновый лед (промежуточная стадия между снегом и кристаллическим льдом) ^{18}O и D, с чем связаны более высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD во льду и фирне относительно зимних атмосферных осадков.

Одна из первых публикаций, в которой выполнено расчленение гидрографа стока с помощью изотопа трития, – работа П. Хаберта и др. [21]. Уже в 1970 г. Т. Динцер с соавторами [15] использовали ^{18}O для решения этой задачи. А начиная с середины 1970-х гг. опубликовывалась серия статей, посвященных расчленению гидрографа стока по источникам питания с использованием ^{18}O и D [18–20, 24–26, 30]. К настоящему времени количество публикаций, посвященных расчленению гидрографа реки с помощью изотопных методов, превышает 300.

Метод изотопного анализа для оценки вклада источников питания горных ледниковых рек Приэльбрусья применен Ю.К. Васильчуком и Н.А. Буданцевой в процессе исследования суточных вариаций изотопного состава воды р. Баксан [3].

В настоящей работе предпринята попытка на основе детальных полевых исследований репрезентативного для Центрального Кавказа горноледникового бассейна Джанкуат дать оценку различных составляющих речного стока на основе метода расчленения гидрографа с применением изотопных маркеров.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Ледник Джанкуат (43.2° с.ш., 42.75° в.д.) расположен на северном склоне Главного Кавказского хребта (рис. 1). Верхняя граница ледника на большом протяжении оконтурена скальным гребнем Главного Кавказского хребта. Далее она проходит по относительно выровненной поверхности Джантуганского фирнового плато, лежащего в пригребневой части и относящегося к ледобору ледника Лекзыр (Грузия). Однако часть льда с плато питает систему ледника Джанкуат. Вытекая из-под одноименного ледника, р. Джанкуат является одним из истоков р. Адыл-су – притока р. Баксан. В горноледниковом бассейне р. Джанкуат расположены также три малых ледника: Койавган, Виатау и Висячий, сток с которых поступает в р. Джанкуат.

В пределах ледника Джанкуат выделяются восемь [6] (реже 10–13 [8]) высотных зон. Зоны с I по V (высоты с 2700 до 3020 м над у. м.) представляют собой область абляции, зона VI (3020–3200 м) – ледопад, разделяющий области аккумуляции и абляции. В пределах этой зоны от года к году мигрирует фирновая граница (кроме аномально теплых или холодных лет). Зоны VII и VIII (высоты 3200–3500 м и более) – это область аккумуляции вплоть до границы движущегося льда – берг-

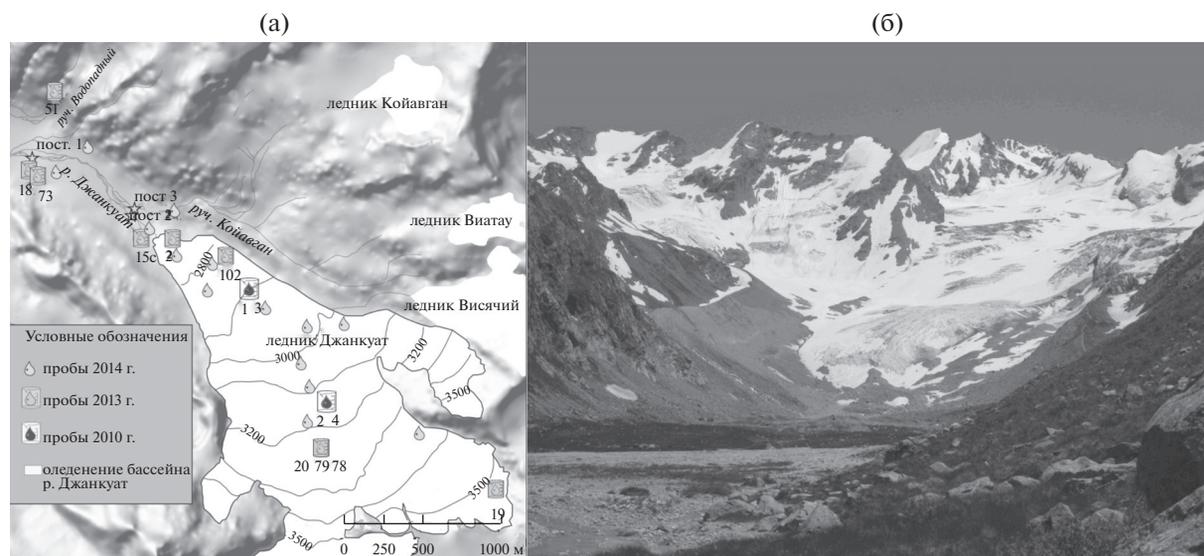


Рис. 1. Карта-схема бассейна ледника Джанкуат с расположениями пунктов отбора проб (а) и вид из долины (б) (фото Н.Л. Фроловой).

шрудна. Толщина ледника в зонах VII и VIII составляет 60–90 м, максимальная измеренная толщина ледника составляет 105 м при средней толщине 31 м [5, 6].

Комплексные наблюдения в горно-ледниковом бассейне Джанкуат по программе Международного гидрологического десятилетия (МГД) начаты сотрудниками МГУ в 1965 г. и ведутся до настоящего времени без перерывов. На данный момент работы включают в себя гляциологические, гидрологические и метеорологические наблюдения.

В.В. Поповниным [7] и А.А. Алейниковым [1] на основе прямых измерений и данных об изменении гипсометрии ледника Джанкуат для конца XX в. установлена тенденция перехода ледника от квазистационарного состояния к его деградации. Общее отступление языка ледника за период с 1968 по 2000 г. составило 105 м, при этом процесс был крайне неравномерным.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для изучения вариаций изотопного состава ледникового стока ледника Джанкуат были организованы временные гидрологические посты (рис. 1а).

Проведены следующие полевые гидрологические работы в бассейне р. Джанкуат в период абляции (июнь–сентябрь) в 2013 и 2014 гг.

1. Непрерывное измерение стока р. Джанкуат на посту 1 в ~1000 м ниже истока (рис. 1а). Регистрация уровня воды с часовым ходом проводилась автоматическим самописцем уровня воды АДУ-02 и “Solinst”. Для перерасчета уровня воды

в расходы воды были построены кривые связи этих двух характеристик р. Джанкуат для разных месяцев теплого периода. Суммарно было выполнено более 80 измерений расходов воды методом ионного паводка. При измерении расхода воды также определялась ее электропроводность.

2. Отбор проб воды для исследования суточного хода вариаций $\delta^{18}\text{O}$ и содержания главных ионов в р. Джанкуат в створе постов 1, 2 и 3 (рис. 1а) проводился 11, 20, 29 июня и 19 сентября 2013 г. В 2014 г. пробы воды на изотопный состав отбирались на посту 1 ежедневно дважды в день (в 8 ч 00 мин и 20 ч 00 мин), 29 июня и 29 июля было отобрано по 10 проб для определения суточного хода, всего было отобрано 242 пробы воды из р. Джанкуат.

3. Отбор проб снега, фирна и льда с различных частей ледника Джанкуат. Снежный покров отбирался как с поверхности в разных высотных зонах, так и в заложенных четырех шурфах на леднике (суммарно 9 проб в 2013 г., 58 проб в 2014 г.).

4. Отбор проб атмосферных осадков из осадкомера, установленного на гляциологической станции. В 2013 г. было отобрано 2 пробы, в 2014 г. пробы отбирались при каждом событии выпадения осадков, при превышении слоя 0.5 мм (суммарно за сезон была отобрана 31 проба).

В августе 2010 г. были отобраны образцы льда из глубоких трещин в гляциологических зонах III и VI ледника Джанкуат.

Изотопные определения образцов 2013 г. выполнялись в изотопной лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч. В 2014 г. все пробы отбирались в двух экземплярах и были

независимо проанализированы в изотопной лаборатории географического факультета МГУ и в Ресурсном центре “Геомодель” Научного парка СПбГУ на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды “Picarro L-2120i”. Для измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GISP, SLAP. Результаты определения $\delta^{18}\text{O}$, полученные независимо в ходе анализа двумя лабораториями, оказались хорошими, разница в определении по одним и тем же образцам не превышает $\pm 0.2\%$.

Измерения электропроводности и рН в пробах воды проводились в оборудованной полевой лаборатории.

МЕТОД ИЗОТОПНЫХ МАРКЕРОВ

Использование изотопного метода наряду с гидрохимическим дает возможность получить качественно новые результаты изучения формирования стока в высокогорном ледниковом бассейне. Совместное решение уравнений изотопного, ионного (солевого) и водного балансов позволяет установить сезонную динамику различных составляющих стока — источников, которые участвуют в его формировании [13].

Вместе с изотопным маркером в качестве геохимического маркера используется электропроводность воды, пересчитанная в общую минерализацию. В общем виде система уравнений для разделения гидрографа балансовым изотопно-солевым методом основывается на следующих положениях [23]:

$$\begin{aligned} f_1 + f_2 + f_3 &= 1, \\ M_1 f_1 + M_2 f_2 + M_3 f_3 &= M_{\text{стока}}, \\ R^{18}\text{O}_1 f_1 + R^{18}\text{O}_2 f_2 + R^{18}\text{O}_3 f_3 &= R^{18}\text{O}_{\text{стока}}, \end{aligned}$$

где f_1, f_2, f_3 — доли отдельных компонент в формировании общего стока; M_i — минерализация воды каждой компоненты; $R^{18}\text{O}_i$ — изотопный состав каждой компоненты.

В систему объединяются уравнения ионного баланса (концентрации) и изотопного баланса, при этом в изотопном балансе могут применяться как значения $\delta^{18}\text{O}$, так и абсолютные концентрации изотопов [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследован талый сток р. Джанкуат в течение двух сезонов абляции 2013 и 2014 гг. (рис. 2).

Реки высокогорных бассейнов с большой долей оледенения обладают весьма сложной структурой питания и это определяет водный режим стока. Таяние снега, льда и фирна происходит в течение всего теплого периода года, вследствие

чего колебания водности рек высокогорных бассейнов определяются, прежде всего, режимом теплового баланса поверхности. Гидрограф ледниковой р. Джанкуат имеет характерный пилообразный вид с ярко выраженными суточными максимумом и минимумом (рис. 2а). В июне одновременно с развитием процесса таяния на леднике увеличивается аккумулируемый им запас воды, т.е. водоотдача происходит не сразу. В течение всего июня происходит плавное увеличение расходов воды (от 0.3—1 до 1—2 м³/с), связанное с увеличением стока из фирновой области. При этом внутрисуточные колебания стока, возникающие главным образом от таяния открытого льда [4], для всех трех месяцев различаются не сильно. Так, суточный диапазон изменения расходов воды в р. Джанкуат в июне и в августе составляет в среднем 0.2, а в июле — 0.3 м³/с.

Максимум запаса воды, аккумулируемого в снежно-фирновой зоне, и стока воды из этой зоны приходится на середину лета (начало—середина июля). Он связан с освобождением языка ледника от сезонного снега и с активным таянием на всей площади ледника. Средние расходы воды в июле, по данным многолетних наблюдений, составляют от 1 до 2.5 м³/с. Прохождение максимальных расходов воды обычно связано с совпадением времени интенсивных дождевых паводков с периодом наиболее интенсивного таяния. Максимальный суточный расход вод р. Джанкуат в июле 2013 г. составил 1.67, а в 2014 г. — 1.75 м³/с (рис. 2). Максимальные значения, зарегистрированные в 2008 и 2009 гг., составили 2.5 и 3.5 м³/с соответственно.

В течение августа—сентября происходит плавное уменьшение интенсивности таяния на фоне постепенной сработки аккумулированных ледником водных запасов. Кроме того, время начала суточного подъема и максимума расхода воды сдвигается на более ранние часы, что, скорее всего, связано с сокращением площади и мощности снежно-фирнового покрова, а также с максимальной степенью развития к концу лета систем дренирования ледника [4].

К концу сентября — началу октября ледник Джанкуат полностью перекрывается снегом, после чего таяние прекращается и сток р. Джанкуат начинает определяться динамикой разгрузки грунтовых вод и поступлением вод из подземных водоносных горизонтов.

Все это обуславливает сложные закономерности формирования изотопного и солевого состава воды ледниковой реки и отсутствие прямой зависимости изотопного и солевого состава от таяния ледникового комплекса бассейна.

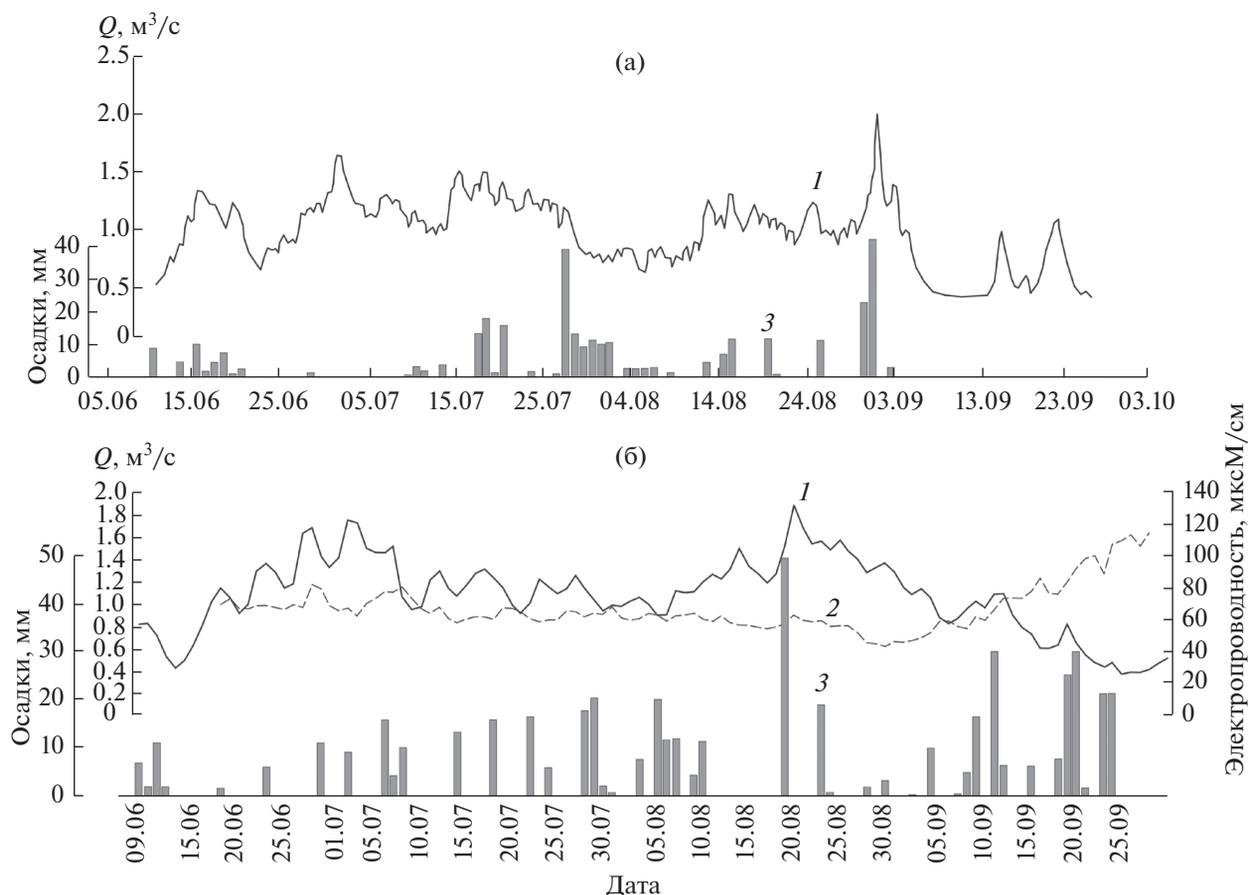


Рис. 2. Расходы (1), электропроводность (2) воды р. Джанкуат и количество осадков (3) в июне–сентябре: а – 2013 г., б – 2014 г.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТ СТОКА

Изотопный сигнал жидких атмосферных осадков

В течение сезона абляции 2013 г. за период с середины июня по начало сентября выпало 222 мм осадков. В 2013 г. было получено лишь два значения $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков: в дожде 12 июня $\delta^{18}\text{O} = -8.85\text{‰}$, в мокром свежеснеге 20–21 июня $\delta^{18}\text{O} = -9.9\text{‰}$, а $\delta\text{D} = -54.2\text{‰}$.

В 2014 г. с июня по сентябрь выпало 496 мм осадков, пробы отбирались при каждом событии выпадения осадков, при превышении слоя 0.5 мм (суммарно 31 проба). Значения $\delta^{18}\text{O}$ в дожде варьируют от 0.8 до -10.9‰ , δD – от 19 до -70‰ . Экстремально положительный состав дождя 23 августа, в котором $\delta^{18}\text{O} = 0.8$ и $\delta\text{D} = 19$, скорее всего, связан с приходом на Кавказ воздушных масс с Ближнего Востока. Известно, что даже в Москве и Вене раз в 2–3 года, а иногда и чаще, выпадает дождь с изотопным составом $\delta^{18}\text{O} \sim 0\text{‰}$ [2]. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – δD в атмосферных осадках 2014 г. описывается уравнени-

ем $\delta\text{D} = 8.22 \delta^{18}\text{O} + 17.42$, что характеризует локальную линию метеорных вод этого района и находится очень близко к Глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) Х. Крейга (рис. 3а).

Изотопный сигнал снежного покрова

Изотопный состав слоев снежного покрова различается в зависимости от условий выпадения снега. В целом, чем ниже температура воздуха в приземном слое при выпадении снега, тем ниже отрицательные значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD . В соответствии с этим зимние атмосферные осадки изотопно легче летних. К началу полевых работ на леднике Джанкуат (конец мая – начало июня) изотопный состав сезонного снежного покрова уже успевает утяжелиться вследствие промачивания летними атмосферными осадками, имеющими относительно тяжелый изотопный состав, перекрестия свежеснегавшим весенним и летним снегом и изотопного фракционирования при таянии снежного покрова. При этом жидкие осадки не могут пропитать снег более чем на величину водоудерживающей способности. В соответствии

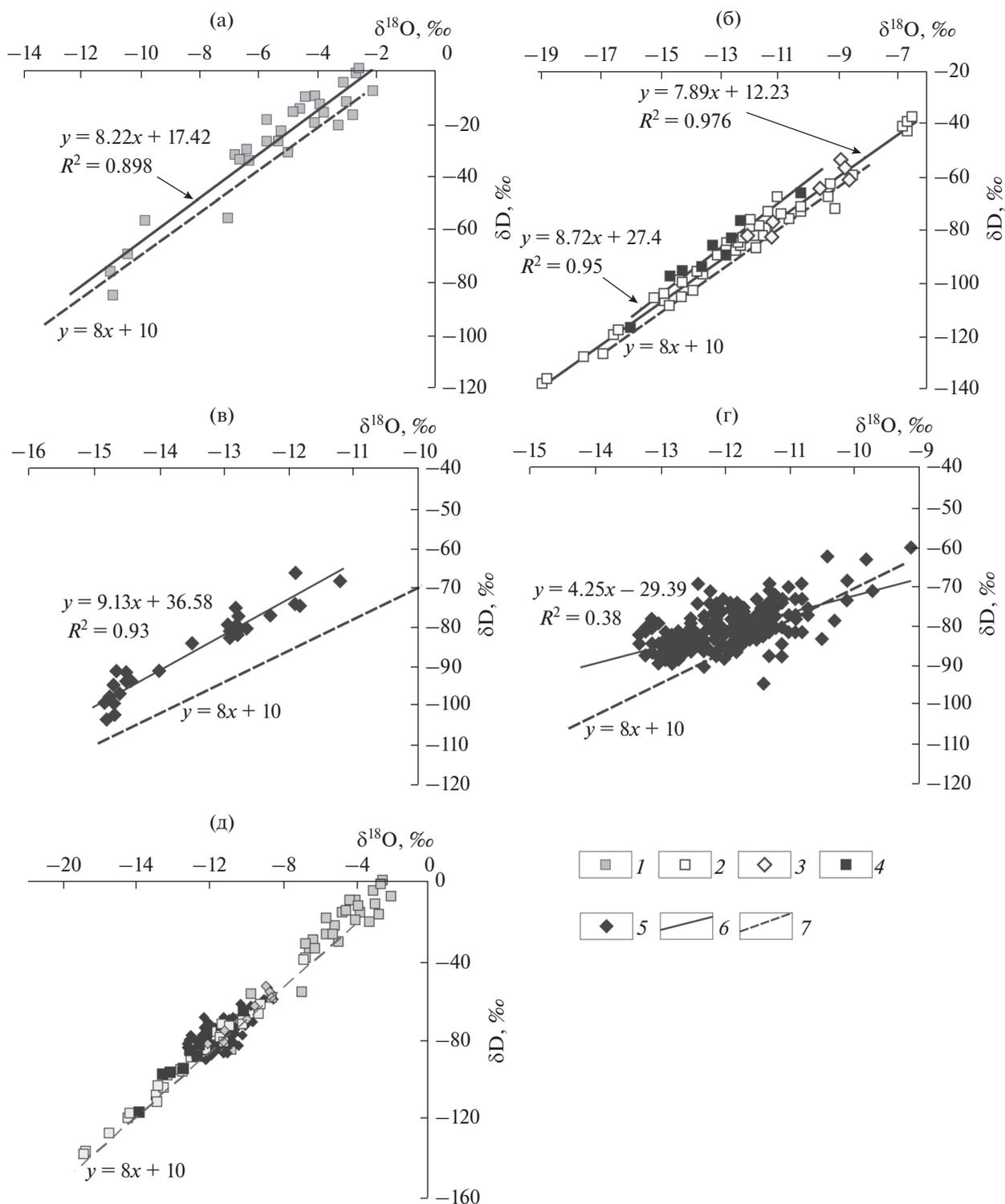


Рис. 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – δD в компонентах стока и в воде р. Джанкуат: в атмосферных осадках (а); в снеге, фирне и льду за 2013 и 2014 гг. (б); в стоке в течение сезона абляции 2013 г. (в) и 2014 г. (г); во всех образцах 2014 г. (д): 1 – атмосферные осадки; 2 – снег; 3 – фирн; 4 – лед; 5 – вода р. Джанкуат; 6 – локальные линии регрессии; 7 – глобальная линия метеорных вод (ГЛМВ) X. Крейга.

с этим наименьшие значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD получены для проб, отобранных в шурфах в относительно более глубоких слоях снега. Наименьшие значе-

ния $\delta^{18}\text{O}$ и δD в 2013 г. (-17.64 и -108.3‰ соответственно) характерны для пробы, отобранной с глубины 1 м из шурфа в зоне VII ледника (№ 78 на

рис. 1а), это, скорее всего, ранневесенний снег. В поверхностном снеге в зоне аккумуляции в результате насыщения снега дождевыми осадками $\delta^{18}\text{O}$ повышено относительно более глубоких слоев сезонного снега и составляет $-8.97...-11.08\text{‰}$. Наименьшие значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в 2014 г. получены в шурфах в зонах VII ($\delta^{18}\text{O} = -19.0...-18.9\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -136...-137\text{‰}$ на глубине 1–2 м) и X ($\delta^{18}\text{O} = -17.6...-16.6\text{‰}$ и $\delta\text{D} = -127...-119\text{‰}$ на глубине 2–4 м). Для сезонного снежного покрова 2014 г. характерно перекрытие зимнего снега с поверхностью изотопно тяжелым “теплым” снегом, выпавшим на ледник непосредственно перед началом сезона абляции (весенний снег). Толщина данного слоя составляла от 0.5 до 2 м в различных зонах ледника, характерные значения $\delta^{18}\text{O}$ составили $-6...-9\text{‰}$, $\delta\text{D} = -30...-60\text{‰}$.

В течение лета сезонный снежный покров изотопно утяжеляется пропорционально длительности своего залегания на дневной поверхности, прежде всего под воздействием летних атмосферных осадков, имеющих относительно тяжелый изотопный состав, испарения и таяния. Данный процесс хорошо иллюстрируется изменением изотопного состава толщи снега в течение периода абляции, по данным наблюдений по шурфу в зоне X ледника в 2014 г (рис. 4). К 26 июля изотопически тяжелый снег, залегающий на поверхности, полностью растаял, а залегающий глубже снег подвергся некоторому изотопному утяжелению, при этом произошло изменение соотношения $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ (рис. 4б).

В зоне абляции снег задерживается на поверхности ледника менее продолжительное время, чем в зоне аккумуляции, за счет меньшей мощности и большей интенсивности таяния, что в совокупности позволяет толще снега быстрее нагреться до температуры таяния [9]. Вследствие этого поверхностный снег в зоне абляции не успевает насытиться водой летних атмосферных осадков в той же мере, что и в зоне аккумуляции. Поверхностная проба снега, отобранная в 2013 г. на языке ледника (точка 21 на рис. 1), имеет более легкий состав $\delta^{18}\text{O} = -14.8\text{‰}$. Относительно легкий изотопный состав поверхностного снега более низких гипсометрических зон в пробах 2014 г. ($\delta^{18}\text{O} = -16.6...-12\text{‰}$ в зонах I–V при $\delta^{18}\text{O} = -6...-9\text{‰}$ в зонах VII–IX) связан с более быстрым сходом отложений весеннего снега за счет меньшей мощности и большей интенсивности таяния.

Изотопный сигнал льда

В августе 2010 г. были отобраны образцы льда из глубоких трещин в двух гляциологических зонах – III и VI (1, 3 и 2, 4 на рис. 1а).

В толще льда зоны III значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -18.62 до -13.41‰ , в зоне VI – от -15.05 до -11.78 (рис. 4в–4е). Зона VI – это область ледопалов, здесь находится средняя многолетняя граница питания ледника; зона III – зона абляции и находится на 200 м ниже. То, что в области абляции лед изотопически легче, чем в верхних зонах ледника, говорит о том, что этот изотопически отрицательный лед, пластически сместившийся из зоны аккумуляции, формировался или в более низкотемпературный период, или в период, когда весенние снегопады на Кавказе были очень незначительны и весенний изотопно более теплый снег не участвовал в льдонакоплении.

Ранее изотопно-кислородные исследования были выполнены в скважине на фирновом плато Джантуган [28]. Здесь из скважины, пробуренной на высоте 3620 м, проанализировано около 50 образцов фирна и льда до глубины 52 м, где залегают лед, сформировавшийся из снега конца 1950-х–начала 1960-х гг.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в керне варьируют от -7.8 до -18.9‰ [28]. Таким образом, общая вариативность значений $\delta^{18}\text{O}$ для области абляции ледника Джанкуат находится в пределах диапазона вариаций для области его питания.

Значение $\delta^{18}\text{O}$ в пробе льда, отобранной с поверхности языка 1 июля 2013 г., составило -14.96‰ , $\delta\text{D} = -97.6\text{‰}$, что близко к составу поверхностного снега в этой же зоне.

Так как на языке ледника одновременно тают обнаженные на его поверхности разновозрастные и, соответственно, различные по составу слои льда, то, в итоге, составляющая стока, формирующегося за счет таяния льда, обладает некоторыми осредненными характеристиками изотопного состава.

Изотопный состав фирна зависит, прежде всего, от погодных условий предыдущего года, когда происходило его формирование. В пробе фирна 2013 г. (точка 20 на рис. 1а) $\delta^{18}\text{O} = -11.24\text{‰}$, $\delta\text{D} = -75.47\text{‰}$. Это меньше, чем в летних атмосферных осадках, но больше, чем в среднем для образцов льда.

Во льду, отобранном 7 августа, 2 и 8 сентября 2014 г. на леднике, значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -9.76 до -16.0‰ , δD – от -65 до -116‰ , средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD составили -13.3 и -89.0‰ соответственно. В фирне, отобранном в 2014 г., значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от -8.7 до -12.2‰ , δD – от -53 до -82‰ .

Все образцы льда и фирна (за 2013 и 2014 гг.) располагаются вблизи ГЛМВ (рис. 3б).

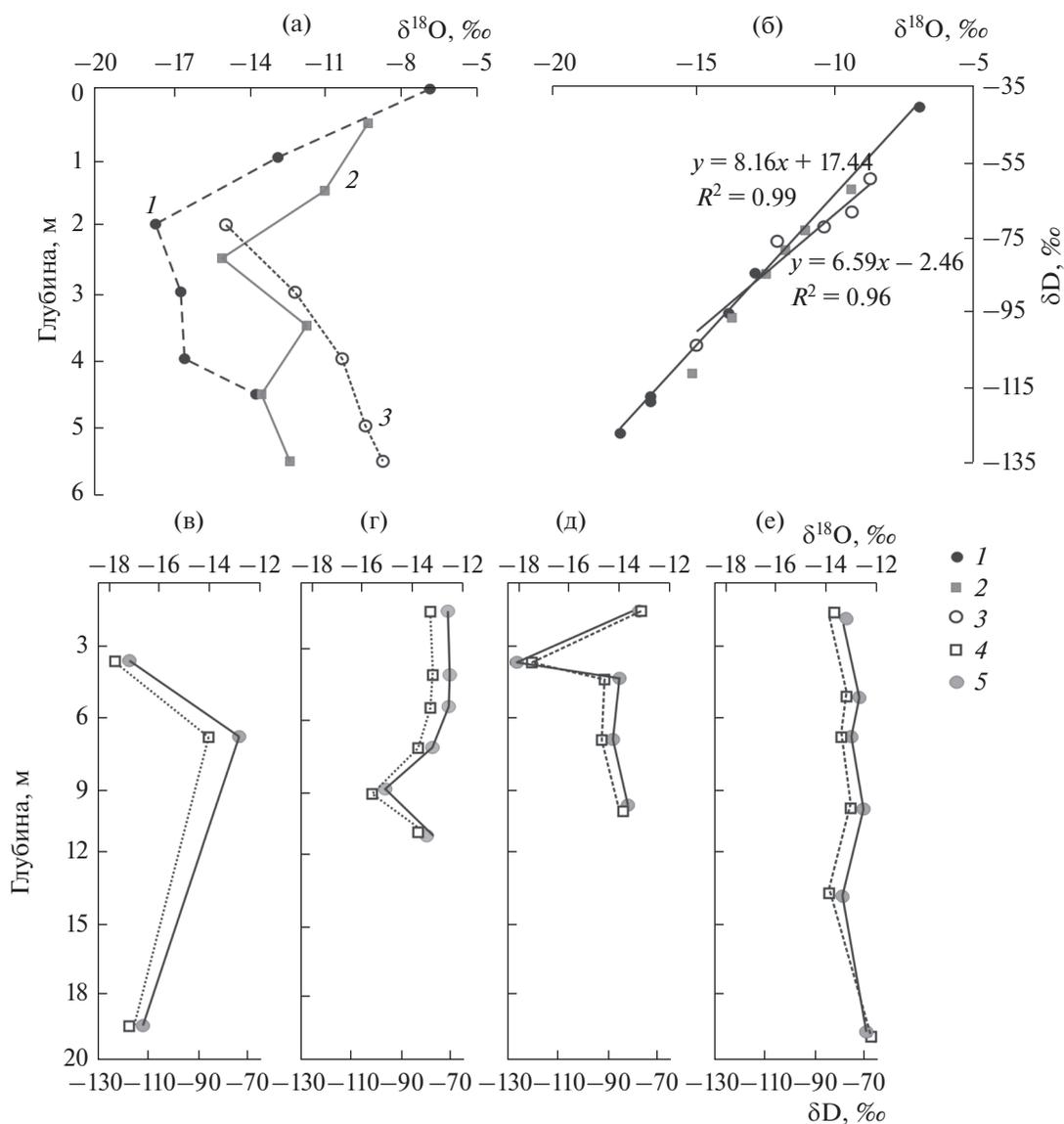


Рис. 4. Изотопные вариации в снежном покрове и во льду ледника Джанкуат: а – распределение $\delta^{18}\text{O}$ в снежном шурфе 28 июня (1), 11 июля (2) и 26 июля (3); б – соотношение $\delta^{18}\text{O}$ – δD в снежном шурфе; распределение $\delta^{18}\text{O}$ (4) и δD (5) во льду: в – трещины 1, зона III; г – трещины 2, зона VI; д – трещины 3, зона III; е – трещины 4, зона VI [2].

Сезонная динамика изотопного состава воды р. Джанкуат

В сезонной динамике изотопного состава воды р. Джанкуат и компонентов стока отмечается заметная изменчивость. Значения $\delta^{18}\text{O}$ воды в 2013 г. варьировали от -11.27 до -15.04‰ , значения δD от -67.3 до -102.8‰ (с 6 июня по 23 сентября). Значения $\delta^{18}\text{O}$ воды в р. Джанкуат в 2014 г. варьировали от -9.1 до -13.3‰ и значения δD от -60 до -91‰ .

Прослеживается общее монотонное увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ воды р. Джанкуат в 2013 г. за период с июня по сентябрь от -14.75‰ ... -14.85‰ в начале июня до -11.8‰ ... -12.8‰ в конце сентября.

Эта закономерность характерна для ледниковых рек и связана со значительной долей таяния изотопно легкого зимнего снега в первой половине сезона абляции. Так, в период абляции 2007 г., согласно данным моделирования [9], доля таяния снега в суммарном таянии в бассейне р. Джанкуат изменялась от 99% в начале июня до 40% в начале сентября.

Изотопный состав ледникового стока в течение суток в июне варьирует незначительно: значения $\delta^{18}\text{O}$ изменялись менее чем на 1‰ в пределах от -15 до -14‰ (рис. 5).

В 2014 г. обильные весенние снегопады стали причиной образования мощного слоя (~ 1 – 1.5 м)

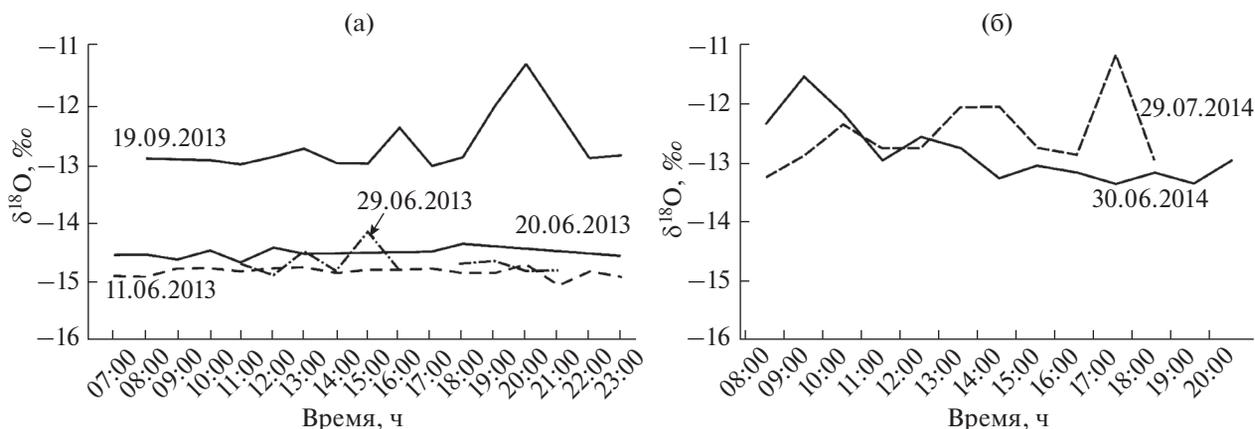


Рис 5. Сезонность суточного хода значений $\delta^{18}\text{O}$ в р. Джанкуат в сезон абляции 2013 г. (а) и 2014 г. (б). Сезонность выражается в смещении $\delta^{18}\text{O}$ к более тяжелым значениям от июня к сентябрю.

изотопно тяжелого снега, перекрывшего с поверхности зимний снег. В связи с этим изотопный состав талого стока 2014 г. — заметно тяжелее, а сезонный ход — нехарактерный (рис. 6): минимумы значений δD и $\delta^{18}\text{O}$, обусловленные таянием зимнего, изотопно “холодного” снега, наблюдаются только после преимущественного ставания отложений весеннего снега — со второй половины июня до конца июля. Дальнейшее закономерное утяжеление изотопного состава вод р. Джанкуат связано с увеличением доли таяния льда и фирна и жидких атмосферных осадков в структуре питания ледника. Так, в июне 2014 г. среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляло -12.06 , в июле -12.44 , в августе -11.50 , в сентябре -11.7% .

Также сезонный ход $\delta^{18}\text{O}$ в реке характеризуется отдельными кратковременными повышениями значений, что связано, прежде всего, с выпадением осадков. Такая же временная изменчивость характерна для δD (рис. 6).

Величины соотношения $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ в воде р. Джанкуат в течение сезона абляции в 2013 и 2014 гг. различаются (рис. 3в, 3г). В 2013 г. все точки на диаграмме, соответствующие образцам талой воды, расположены выше ГЛМВ и описываются уравнением $\delta\text{D} = 9.13 \delta^{18}\text{O} + 36.58$ ($R^2 = 0.93$), такое расположение проб на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ в целом характерно для снега в Приэльбрусье (графически это выражается в смещении точек на диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ вверх от ГЛМВ). Для 2014 г. диаграмма демонстрирует больший разброс точек (рис. 3г) с меньшим наклоном, но низким коэффициентом линейной аппроксимации. Осредненные по декадам значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD в стоке за весь период абляции 2014 г. описываются уравнением $\delta\text{D} = 6.37 \delta^{18}\text{O} - 3.75$ ($R^2 = 0.58$). Можно отметить отличие наклона аппроксимации линейной функцией от ГЛМВ. При этом на

общей для всех отобранных в 2014 г. образцов диаграмме $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ точки, соответствующие пробам воды р. Джанкуат, находятся в центре изотопного диапазона (рис. 3д).

В отличие от изотопного состава воды, минерализация имеет выраженные суточные колебания. Согласно данным отбора проб, в дни с интенсивным таянием суточный диапазон колебания минерализации может превышать 10 мг/л, что составляет $\sim 1/4$ от зарегистрированного сезонного диапазона.

Значения минерализации воды в данном исследовании позволяют понять, как вода добегает до замыкающего створа. Часть воды, которая сразу же стекает по поверхности ледника и затем — по системе ручейков, не успевает насытиться растворенными солями, что обуславливает ее относительно низкую степень минерализации. С другой стороны, грунтовые воды и вода, которая течет по непокрытой ледником части бассейна, просачиваясь через мощный слой отложений, наоборот, насыщаются солями, что значительно увеличивает их минерализацию.

Минимальные значения минерализации отмечены в атмосферных осадках (в среднем -12.3 мг/л), фирне и сезонном снеге. При этом для воды от таяющего льда в целом характерна меньшая минерализация, чем для воды от таяния сезонного снега. Минерализация воды в анализируемых водотоках бассейна (р. Джанкуат, ручьях Койавган, Водопадный и прочие меньшие водотоки) (1, 2, 3, 51 на рис. 1а) колеблется от 40 до 120 мг/л, что свидетельствует о более значительной минерализации подземных вод, а также о значительном насыщении сезонных талых и дождевых вод химическими элементами в процессе добегаания по поверхности водосбора и по ложу ледника. Это обстоятельство в совокупности с изменением соотношения основных источников питания в течение сезона аб-

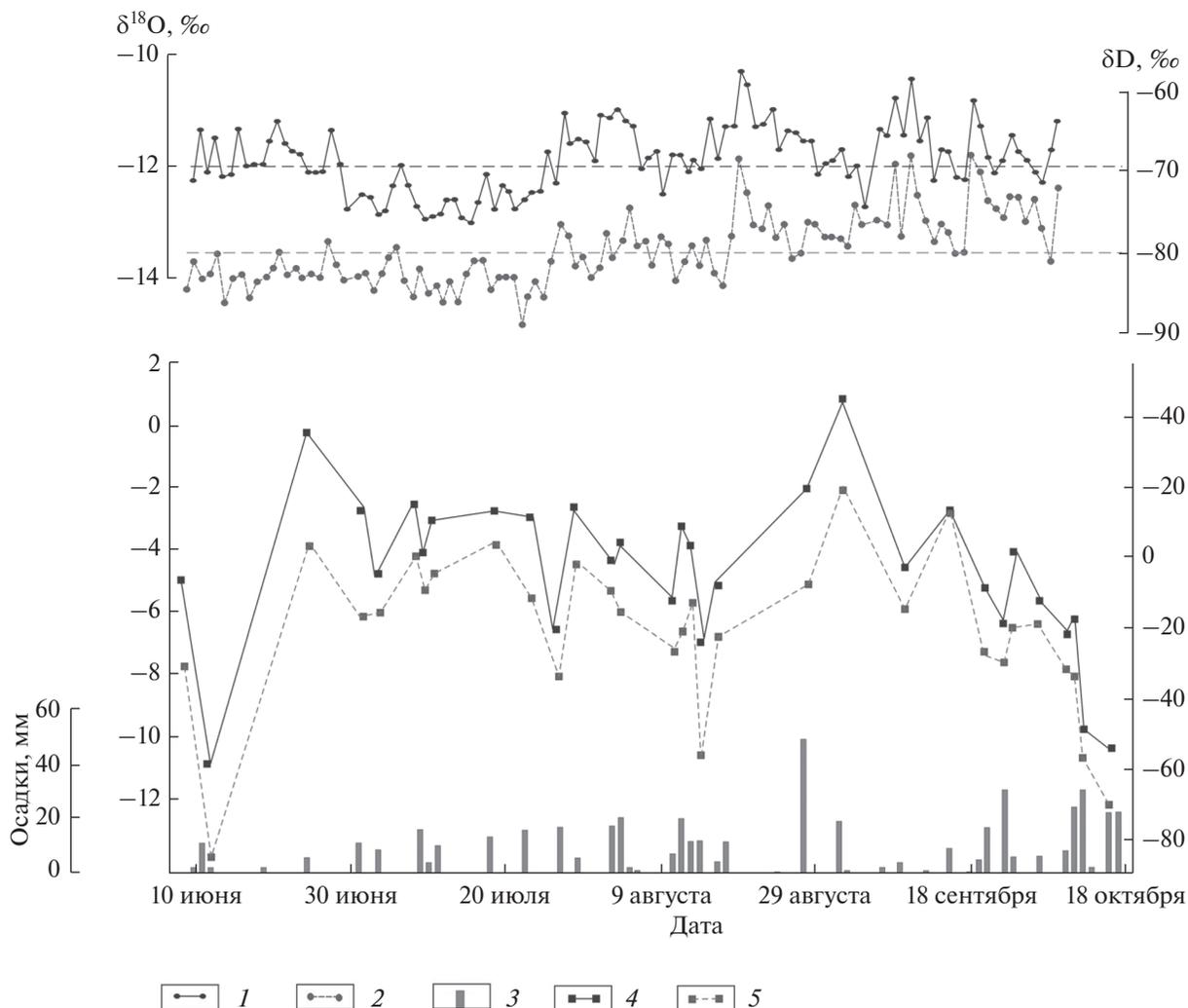


Рис. 6. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ и δD в воде р. Джанкуат за период абляции 2014 г. (а) совместно с количеством и изотопным составом атмосферных осадков (б). 1 – $\delta^{18}\text{O}$ воды р. Джанкуат, 2 – δD воды р. Джанкуат, 3 – количество осадков, 4 – $\delta^{18}\text{O}$ осадков, 5 – δD осадков. Пунктирная черная и серая линии – средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD соответственно.

ляции объясняет наличие ярко выраженной обратной связи между стоком реки и минерализацией воды в замыкающем створе (рис. 26). При этом зависимость имеет более сложный характер, чем простая линейная обратно пропорциональная зависимость.

Изотопное разделение гидрографа

Необходимое условие для изотопного расчленения гидрографа реки – выраженное различие изотопного состава составляющих баланса (подземные воды, снег, дождь, лед). Для расчленения гидрографа стока 2014 г. использованы средние значения $\delta^{18}\text{O}$, полученные для различных источников питания р. Джанкуат (таблица).

Значения $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков использовались в расчете разделения гидрографа в ин-

дивидуальном порядке, т.е. $\delta^{18}\text{O}$ дождя за конкретный день учитывалось в изотопной характеристике весеннего снега для июня. Весенний снег в начале сезона абляции часто промачивается дождем, и его изотопный состав является некоторой интегральной величиной. Для августа и сентября значения $\delta^{18}\text{O}$ осадков добавлялись в изотопную метку фирна и льда, так как в конце сезона абляции снег на леднике полностью стает и на поверхности открывается фирн и лед, которые промачиваются выпадающими дождями. Поэтому в расчете для августа и сентября значение $\delta^{18}\text{O}$ дождя за конкретный день добавлялось в изотопную метку фирна и льда.

Изотопный состав речной воды во многом связан с изотопным составом локальных атмосферных осадков [3]. Средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в отобранных образцах дождя составили -4.7

Значения $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации в отобранных образцах

| Показатель | Зимний снег | Весенний снег | Фирн | Лед | Дождь | Грунтовые воды |
|---|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|------------------|----------------------|
| Средние значения $\delta^{18}\text{O}$, использованные в расчете | -15‰ | -7‰ | -11‰ | -13‰ | Каждое значение | -12‰ |
| Интервал значений $\delta^{18}\text{O}$ | -12.32... -19.0‰ | -6.76... -7.68‰ | -7.64... -13.75‰ | -9.76... -16.0‰ | 0.8... -10.9‰ | -11.13... -11.89‰ |
| Средняя минерализация, мг/л, использованная в расчете | 12 | 9 | 13 | 15 | 12 | 97 |
| Интервал минерализации, мг/л | 6.4...33.5 | 7.36...9.71 | 6.14...22.5 | 9.8...39.6 | — | 83.2...105 |

и -21.1‰ соответственно (таблица). Таким же тяжелым изотопным составом обладают осадки в теплый период в твердой фазе (“теплый” снег), среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в нем составило -7.3‰ (таблица). И, наоборот, изотопически наиболее легкий – зимний (“холодный”) снег, среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -14.6‰$.

Что касается других источников питания р. Джанкуат, а именно фирна, льда и грунтовых вод, то они характеризуются весьма близким изотопным составом (таблица). Именно это обстоятельство затрудняет выделение этих составляющих в суммарном стоке. Значение $\delta^{18}\text{O}$ для грунтовых вод оценивалось по результатам измерений стока р. Джанкуат за 2013 г. в период после перекрытия ледника свежим снегом и истощения динамических запасов талых вод в теле ледника. Проба воды, отобранная из р. Джанкуат 23 сентября, когда период абляции полностью закончился, характеризует изотопный состав “базисной” составляющей стока р. Джанкуат за 2013 г. Это значение базисной составляющей принимается за компонент грунтовых вод, $\delta^{18}\text{O} = -11.89‰$.

В связи с тем, что реки высокогорных бассейнов имеют сложную структуру питания, решение уравнений ионного и изотопного балансов выполнялось для тех месяцев, для которых можно не учитывать некоторые составляющие питания в суммарном стоке, например – не разделять лед и фирн, а рассматривать их как некоторую интегральную характеристику. Такие вынужденные допущения приняты для того, чтобы построенные системы уравнений имели решение (выполнялось условие сходимости системы), т.е. для поиска трех неизвестных требовалось три балансовых уравнения.

На начало сезона абляции (июнь) составлена система уравнений из двух подсистем, в которых для дней без значительных жидких осадков отдельно рассматриваются ионный (1) и изотопный (2) балансы:

$$\begin{cases} M = q_{\text{sn}}^{\text{GI}} M_{\text{sn}} + (q_{\text{sn}}^{\text{NGI}} + q_{\text{gr}}) M_{\text{gr}}, \\ q_{\text{sn}}^{\text{GI}} + q_{\text{snc}}^{\text{NGI}} + q_{\text{gr}} = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} R^{18}\text{O} = q_{\text{snw}} R^{18}\text{O}_{\text{snw}} + q_{\text{snc}} R^{18}\text{O}_{\text{snc}} + q_{\text{gr}} R^{18}\text{O}_{\text{gr}}, \\ q_{\text{snw}} + q_{\text{snc}} + q_{\text{gr}} = 1 \end{cases}, \quad (2)$$

где M_{sn} – средняя минерализация снега; $q_{\text{sn}}^{\text{GI}}$ и $q_{\text{sn}}^{\text{NGI}}$ – доли стока за счет таяния снега соответственно с ледниковой и неледниковой частей бассейна; $R^{18}\text{O}_{\text{snw}}$ и $R^{18}\text{O}_{\text{snc}}$ – средние значения $\delta^{18}\text{O}$ соответственно в теплом (весеннем) и холодном (зимнем) снеге; q_{snw} и q_{snc} – доли стока за счет таяния соответственно теплого и холодного снега.

Здесь также приняты некоторые допущения. Во-первых, в начале периода абляции таяние льда незначительное, поскольку в основном тает снег на его поверхности, и поэтому эту составляющую можно не учитывать. Во-вторых, вода от таяния снега, стекая по неледниковой части бассейна, фильтруется через слой отложений и насыщается по мере этого солями в той же степени, что и грунтовые воды. Этот факт установлен в ходе гидрохимических полевых исследований, которые показали, что фоновые значения электропроводности в ручьях, стекающих со снежников, и в грунтовых водах примерно одинаковые. Следовательно, минерализацию талого снега с неледниковой части бассейна можно принять в среднем равной минерализации грунтовых вод, что значительно упрощает систему.

Система (1) имеет решение в том случае, если исключить одну из переменных, например принять расход грунтовых вод таким же, как и расход этой составляющей в августе. Тогда гидрограф р. Джанкуат для июня может быть разделен на три составляющие: базисный сток (25–40% в течение рассмотренного периода); сток, образованный за счет таяния снега с ледниковой части бассейна (40–45%); сток, образованный за счет таяния снега

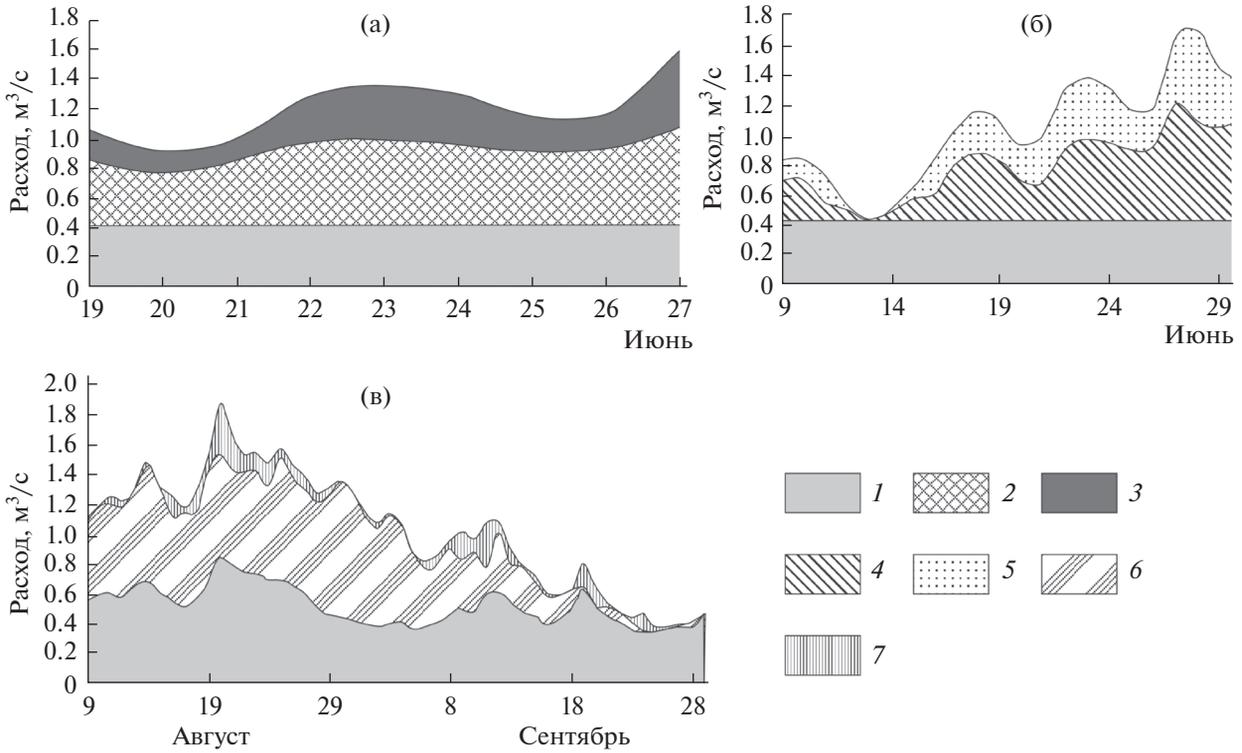


Рис. 7. Расчленение гидрографа р. Джанкуат: а – за июнь 2014 г. с помощью системы уравнений (1), б – за июнь 2014 г. с помощью системы уравнений (2), в – за сентябрь 2014 г. с помощью системы уравнений (4) изотопного, ионного и водного балансов. 1 – базисный сток, 2 – таяние снега на леднике, 3 – таяние снега на неледниковой части бассейна, 4 – таяние зимнего снега, 5 – таяние весеннего снега и жидкие атмосферные осадки, 6 – таяние льда и фирна, 7 – жидкие атмосферные осадки.

с неледниковой части бассейна (15–30%) (рис. 7а). Доля последней составляющей закономерно уменьшается в течение рассматриваемого периода.

Таким же образом решается система (2). По результатам расчета (рис. 7б) видно, что в июне существенную долю в суммарном стоке р. Джанкуат имеет сток от таяния весеннего снега (15–20%) благодаря сформировавшим его особым погодным условиям в 2014 г. – обильному весеннему снегопаду. В течение рассматриваемого отрезка времени – июня – роль этой составляющей в суммарном стоке уменьшается при стаивании данного слоя в снежной пачке. Для стока, образованного от таяния зимнего снега, характерна положительная динамика: его доля в течение июня увеличивается от 20% в начале месяца до 50% в его конце. Изменчивость подземного стока для данного периода, к сожалению, оценить невозможно, но в среднем на их долю приходится 40% суммарного стока. Величина расхода этой составляющей баланса для упрощения решения принята за константу.

Для середины сезона абляции – июля – подобную систему балансовых уравнений для дней без значительных осадков (3) с участием таких трасеров, как $\delta^{18}\text{O}$ и минерализация, решить не полу-

чилось по причине недостаточного количества уравнений, позволяющих исключить ту или иную переменную:

$$\begin{cases} R^{18}\text{O} = q_{if}R^{18}\text{O}_{if} + q_{gr}R^{18}\text{O}_{gr} + \\ + q_{snw}R^{18}\text{O}_{snw} + q_{snc}R^{18}\text{O}_{snc} \\ q_{if} + q_{gr} + q_{snw} + q_{snc} = 1 \\ M = (q_i + q_f)M_{if} + (q_{sn}^{NGI} + q_{gr})M_{gr} + q_{sn}^{GI}M_{sn} \end{cases} \quad (3)$$

Для конца периода абляции, когда можно пренебречь составляющей сезонного снега, поскольку к этому времени, как правило, ледник полностью освобождается от снежного покрова, составлена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} R^{18}\text{O} = (q_i + q_f)R^{18}\text{O}_{if} + \\ + q_{gr}R^{18}\text{O}_{gr} + q_pR^{18}\text{O}_p \\ q_i + q_f + q_{gr} + q_p = 1 \\ M = (q_i + q_f)M_{if} + (q_{gr} + q_p)M_{gr} \end{cases} \quad (4)$$

где q_i, q_f, q_{gr}, q_p – доли соответственно талой ледниковой воды, фирна, грунтовых вод и жидких атмосферных осадков в речном стоке; $R^{18}\text{O}$ – значение $\delta^{18}\text{O}$ в речном стоке; $R^{18}\text{O}_i, R^{18}\text{O}_f, R^{18}\text{O}_{gr}, R^{18}\text{O}_p$ –

средние значения $\delta^{18}\text{O}$ соответственно во льду, фирне, грунтовой воде и атмосферных осадках; M – фоновая минерализация в замыкающем створе; M_{if} – среднее значение минерализации льда и фирна; M_{gr} – среднее значение минерализации грунтовых вод.

Совместное решение 2-го и 3-го уравнений в системе (4) для дней без значительных осадков, когда данной составляющей можно пренебречь, позволяет получить долю грунтовой составляющей в суммарном стоке р. Джанкуат. Так, для сентября 2014 г. доля подземных вод составила от 30 до ~100% – от 0.36 до 0.64 м³/с (рис. 7в), при этом расход р. Джанкуат за данный период составил в среднем 0.45 м³/с. В свою очередь, совместное решение уравнений при известной величине грунтового стока позволяет разделить талую компоненту и жидкие атмосферные осадки в общем стоке р. Джанкуат (рис. 7в). К концу периода абляции сток, образованный за счет таяния льда и фирна, закономерно истощается и совсем утрачивает свою силу к концу сентября, что говорит о завершившейся к концу сентября разгрузке сезонных запасов талых вод на водосборе.

Таким образом, для периода август–сентябрь доли составили: подземных вод – от 30 до ~100%, осадков – от 0 до 30% (в среднем 6% для рассматриваемого периода), талой воды от фирна и льда – от 0 до 70% (в среднем 38.6%). Построенные системы уравнений проверены на устойчивость при изменении некоторых входных данных: для августа при увеличении значений $\delta^{18}\text{O}$ в р. Джанкуат и осадках на 0.56 (т.е. изменение входных данных на 5%) результаты расчленения изменяются в среднем на 6%. Таким образом, можно утверждать, что системы – устойчивые.

Точность данного метода лимитирована, прежде всего, принятием значений $\delta^{18}\text{O}$ в тающем льду и снеге постоянными величинами для всего сезона. Данное допущение возможно при рассмотрении ледника в качестве интегратора талого стока и позволяет (при наличии достаточно больших рядов значений $\delta^{18}\text{O}$ для льда и снега в различных частях ледника) считать, что в итоге в талый сток ледника поступают воды с осредненным значением $\delta^{18}\text{O}$ [13]. В действительности истинное значение $\delta^{18}\text{O}$ для тающего льда и снега на леднике в каждые конкретные сутки будет зависеть от соотношения площади экспонируемых на поверхности и тающих в данный момент различных годовых слоев льда, а также слоев снега, отложившихся при различных температурных условиях. Количество этих слоев на одном леднике – многие десятки, описать изотопный состав тающей поверхности в каждый конкретный момент представляется крайне трудной задачей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сток р. Джанкуат формируется за счет смешения талых снеговых, талых ледниковых, подземных и дождевых вод. Некоторая доля воды р. Джанкуат частично просачивается в водоносные горизонты, частично испаряется. Разность между поступлением и расходом воды составляет поверхностную разгрузку или речной сток.

Соотношение значений δD и $\delta^{18}\text{O}$ большинства рек соответствует ГЛМВ, что указывает на преимущественное питание атмосферными осадками, а также на то, что испарение с водной поверхности рек, как правило, оказывает незначительное влияние на изотопный состав их вод.

Все изотопные значения, характерные для воды р. Джанкуат, на диаграмме $\delta^{18}\text{O}$ – δD находятся вблизи ГЛМВ, однако для 2014 г. расположение точек несколько отличается от их расположения в 2013 г. – точки расположены более кучно и описываются уравнением $\delta\text{D} = 4.25 \delta^{18}\text{O} - 29.29$ ($R^2 = 0.38$). Низкое значение коэффициента достоверности аппроксимации R^2 свидетельствует в пользу отказа от использования данного уравнения. Интересен тот факт, что все компоненты стока (снег, лед, атмосферные осадки) характеризуются расположением на диаграмме, близким к ГЛМВ (рис. 3). Обычно уменьшение наклона $\delta^{18}\text{O}$ – δD на диаграмме указывает на процессы испарения, в данном случае, возможно, – не с поверхности реки, а с поверхности снежного покрова. Однако, как было показано в работах [17, 31], тангенс угла наклона < 8 для талых снеговых вод может быть связан не с процессами сублимации (испарение снега), а с просачиванием и замерзанием талых вод внутри снежного покрова. Это обусловлено тем, что коэффициенты фракционирования между талой водой и льдом составляют 3.1 для ^{18}O и 19.5 для D, поэтому в модельных расчетах наклон линии рассчитывается как $19.5/3.1 \approx 6.3$ [14]. Вопрос соотношения $\delta^{18}\text{O}$ – δD для воды р. Джанкуат остается открытым для будущих исследований.

Следует отметить, что выполненное в настоящем исследовании расчленение гидрографа для отдельных месяцев вносит большой вклад в развитие методики решения подобных систем уравнений. В отечественной практике немного схожих работ, дающих позитивные результаты. Один из удачных примеров использования изотопных исследований – комплексный генетический анализ источников питания, проведенный для Токтогульского водохранилища на р. Нарын (Киргизия) [10]. В основе этой работы – данные о содержании ^{18}O и D в водах различного происхождения и в воде водохранилища.

На р. Нарын имеет место заметное внутригодовое перераспределение стока за счет взаимо-

действия поверхностных и подземных вод. В весеннее время происходит поглощение талых снеговых и дождевых вод рыхлыми отложениями, заполняющими речные долины. Аналогичные процессы, скорее всего, характерны и для р. Джанкуат, что во многом подтверждается полученными данными об изменении изотопного состава.

Интересен факт, что доля талых ледниковых вод в стоке р. Нарын в районе Токтогульского водохранилища (нижнее течение), по результатам расчленения гидрографа на основе изотопных данных, составила $\leq 10\%$ [10]. Можно предположить, что в стоке р. Терек, для которого р. Джанкуат является притоком 3-го порядка, доля талых ледниковых вод также может быть заметно меньше по сравнению с долей в стоке высокогорной приледниковой р. Джанкуат.

Различными изотопными исследованиями доказано, что доля талой ледниковой воды в общем гидрографе горных рек может различаться очень существенно. Так, сравнение двух рек в китайском Тянь-Шане показало, что р. Урумчи менее чем на 9% питается талой ледниковой водой, хотя в непосредственной близости от ледника доля талой воды превышает 87% (здесь значение $\delta^{18}\text{O}$ воды составляет $\sim -10\text{‰}$), в то время как р. Кумалак (среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -9.5\text{‰}$) содержит $>57\%$ талой ледниковой воды (значение $\delta^{18}\text{O} \sim -9\text{‰}$) [22].

Двухкомпонентное изотопное разделение гидрографа р. Юшугуо в восточном Тянь-Шане [32] показало, что во время суточного максимума уровня воды вклад талых снеговых вод варьировал от 96.1 до 51.7%, вклад подземных вод – от 48.1 до 3.9%, а в целом речной сток формировался на 63% талыми снеговыми водами и на 37% – подземными водами [32].

В долине р. Сандур (Итальянские Альпы) общий вклад талых снеговых вод в пополнение подземных вод за трехлетний период исследований (2011–2013 гг.) варьировал от 58 до 72% [27]. Аналогичные выводы получены для горного района на юге Китая [29].

О значительной доле участия подземных вод в стоке горных рек может говорить более узкий диапазон изотопного состава воды реки по сравнению с изотопными вариациями в осадках [34]. Проведенное авторами настоящее исследование подтверждает данную закономерность и для высокогорий Кавказа. Вклад базисного стока, во многом формирующегося за счет подземной составляющей, дает от 20 до 50% общего стока р. Джанкуат в июне и августе–сентябре.

При формировании стока горных рек важную роль играет удержание воды в грубообломочных отложениях. Кумулятивный эффект русел, заполненных грубообломочным коллювием, осыпавшимся со склонов, был исследован для не-

больших водосборов в ледниковом горном районе США с применением изотопных трассеров [33]. Разгрузка вод из грубообломочных отложений в русла рек сказывается на том, что изотопный диапазон в ручьях и реках меньше, чем в осадках, выпадающих в том же районе в тот же период [35]. Вполне логично предположить, что и для р. Джанкуат, где, скорее всего, объем подземных вод в грубообломочном коллювии значителен, их роль в сглаживании сезонных различий балансовых составляющих весьма заметна.

Определенное влияние на характер взаимодействия разных компонентов стока может оказывать наличие мерзлых и сезонномерзлых грунтов, которые в период снеготаяния характерны для всех приледниковых высокогорных районов, в том числе и для пригляциальной зоны бассейна Джанкуата. В ближайшем будущем планируются работы по изучению роли этой составляющей.

ВЫВОДЫ

Получена первая в России полная изотопная запись по стоку ледниковой реки в течение всего периода абляции 2014 г. (с 8 июня по 30 сентября), состоящая из 242 парных значений. В сезон абляции 2013 г. проведены предварительные изотопные исследования.

Изотопный состав воды в р. Джанкуат в течение сезона абляции 2014 г. варьировал от -9.1 до -13.3‰ по $\delta^{18}\text{O}$ и от -60 до -91‰ по δD . В 2013 г. талый сток р. Джанкуат характеризовался значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -11.27 до -15.04‰ (с 6 июня по 23 сентября).

В 2013 г. в стоке р. Джанкуат наблюдалось закономерное увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ от -14.75‰ – -14.85‰ в начале июня до -11.8‰ – -12.8‰ в конце сентября. Данная закономерность связана со значительной долей вод от таяния изотопно-легкого зимнего снега в структуре питания реки в первую половину сезона абляции и от таяния относительно более изотопически тяжелого льда во вторую половину сезона абляции. В 2014 г. в изотопном составе талого стока практически не выражена закономерная сезонность таяния, что связано с особыми погодными условиями 2014 г. – обильными весенними снегопадами.

Изотопное разделение гидрографа показало, что в июне существенную долю в суммарном стоке р. Джанкуат составляет сток от таяния весеннего снежного покрова (15–20%, в отдельные дни до 36%) благодаря сформировавшимся его весенним снегопадам. Доля стока, образованного от таяния зимнего снега, варьирует от 20% в начале до 50% в конце июня. Изменчивость подземного стока для данного периода, к сожалению, оценить невозможно, в среднем на его долю приходится 40% суммарного стока.

Для периода август–сентябрь доля подземных вод в суммарном стоке составила от 30 до ~100%, доля осадков – от 0 до 30% (в среднем 6% для рассматриваемого периода), доля воды от таяния фирна и льда – от 0 до 70% (в среднем 38.6%). При этом доля воды от таяния фирна и льда постепенно уменьшается, что говорит о завершившейся к концу сентября разгрузке сезонных запасов талых вод на водосборе.

Авторы благодарны коллегам, помогавшим при отборе образцов в поле: В.В. Поповнину, М.В. Гайдамухе, В.Г. Пастухову, А.М. Смирнову и А.Г. Ростиашили.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алейников А.А.* Взаимосвязь движения горного ледника и его баланса массы на примере ледника Джанкуат, Центр. Кавказ. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2001. 24 с.
2. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.* Изотопные методы в географии. Ч. 1. Геохимия стабильных изотопов природных льдов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 228 с.
3. *Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чиждова Ю.Н.* Изотопные методы в географии. Ч. 3. Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. М.: Геогр. фак. МГУ, 2013. 216 с.
4. *Голубев Г.Н.* Гидрология ледников. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 248 с.
5. *Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Петраков Д.А., Попов Г.А., Поповнин В.В.* Толщина, подледный рельеф и объем льда ледника Джанкуат // *Лед и снег.* 2014. № 4. С. 7–19.
6. *Ледник Джанкуат: Центр. Кавказ / Под ред. Боярского И.Я.* Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 184 с.
7. *Поповнин В.В., Петраков Д.А.* Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68–2000/01) // *Материалы гляциол. исслед.* 2005. Вып. 98. С. 167–174.
8. *Поповнин В.В., Резепкин А.А., Тиелидзе Л.Г.* Разрастание поверхностной морены на языке ледника Джанкуат за период прямого гляциологического мониторинга // *Криосфера Земли.* 2015. Т. 19. № 1. С. 89–98.
9. *Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В.* Моделирование таяния поверхности горного ледника // *Лед и снег.* 2011. № 4. С. 24–31.
10. *Токарев И.В., Поляков В.А., Самсонова А.А., Шило В.А., Толстихин Г.М., Нурбаев Т.Н., Жакеев Б.И., Шабунин А.Г., Алехина В.М.* Исследование условий формирования водного баланса Токтогульского водохранилища по изотопному составу воды ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) // *Изучение факторов формирования и оценка влияния водохранилищ Нижне-Нарынского каскада ГЭС на качество водных ресурсов бассейна реки Нарын изотопными методами (по результатам проекта МНТЦ КР-1430, 2007–2010).* Бишкек, 2010. С. 56–84.
11. *Чиждова Ю.Н., Рец Е.П., Васильчук Ю.К., Токарев И.В., Буданцева Н.А., Киреева М.Б.* Два подхода к расчету расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов // *Лед и снег.* 2016. Т. 56. № 2. С. 161–168.
12. *Behrens H., Moser H., Oerter H., Rauert W., Stichler W., Ambach W., Kirchlechner P.* Models for the runoff from a glaciated catchments area using measurements of environmental isotope contents // *Isotope Hydrol. Vienna,* 1978. P. 829–846.
13. *Cable J., Ogle K., Williams D.* Contribution of glacier meltwater to streamflow in the Wind River Range, Wyoming, inferred via a Bayesian mixing model applied to isotopic measurements // *Hydrol. Processes.* 2011. 25(14). P. 2228–2236.
14. *Clark I., Fritz P.* Environmental Isotopes in Hydrogeology. N.Y.: Lewis, 1997. 352 p.
15. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* 1964. 16(4). P. 436–468.
16. *Dinçer T., Payne B.R., Flowkowski T., Martinec J., Tongiorgi E.* Snowmelt runoff from measurements of Tritium and Oxygen-18 // *Water Resour. Res.* 1970. V. 6. P. 110–124.
17. *Earman S., Campbell A.R., Phillips F.M., Newman B.D.* Isotopic exchange between snow and atmospheric water vapor: estimation of the snowmelt component of groundwater recharge in the southwestern United States // *J. geophys. Res.* 2006. 111(D9). P. D09302.
18. *Fritz P., Cherry J., Weyer K., Sklash M.* Storm runoff analyses using environmental isotopes and major ions // *Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater, Panel Proc. Ser.-Int. Atomic Energy Agency. Vienna: Int. Atomic Energy Agency,* 1976. P. 111–130.
19. *Hermann A., Martinec J., Stichler W.* Study of snowmelt-runoff components using isotope measurements // *Modeling of Snow Cover Runoff / Eds. Colbeck S.C., Ray M. Hanover: U.S. Army Cold Regions Res. Eng. Lab.,* 1978. P. 288–296.
20. *Herrmann A., Stichler W.* Groundwater-runoff relationships // *Catena.* 1980. 7(2–3). P. 251–263.
21. *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 22 Septembre 1968 // *Archives des Sci. (Geneve).* 1969. 22(3). P. 581–604.
22. *Kong Y., Pang Z.* Evaluating the sensitivity of glacier rivers to climate change based on hydrograph separation // *J. Hydrol.* 2012. V. 434. P. 121–129.
23. *Ladouche B., Probst A., Viville D., Idir S., Baqué D., Loubet M., Probst J.-L., Bariac T.* Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France) // *J. Hydrol.* 2001. 242(3–4). P. 255–274.
24. *Martinec J., Siegenthaler U., Oeschger H., Tongiorgi E.* New insights into the run-off mechanism by environmental isotopes // *Proc. Sympos. Isotope Tech. in Groundwater Hydrol. Vienna: Int. Atomic Energy Agency,* 1974. P. 129–143.
25. *Meiman J., Friedman I., Hardcastle K.* Deuterium as a tracer in snow hydrology // *The Role of Snow and Ice in Hydrology. Proc. Banff Symp. September 1972. UNESCO-WHO-IASH. Int. Association of Sci. Hydrol. Association.* 1973. Publ. 107. P. 39–50.

26. *Mook W.G., Groeneveld D.J., Brouwn A.E., Van Ganswijk A.J.* Analysis of a runoff hydrograph by means of natural ^{18}O // Isotope techniques in groundwater hydrology. Proc. I.A.E.A. Symp. Vienna: Int. Atomic Energy Agency, 1974. P. 145–156.
27. *Penna D., Engel M., Mao L., Dell'Agnese A., Bertoldi G., Comiti F.* Tracer-based analysis of spatial and temporal variations of water sources in a glacierized catchment // Hydrol. Earth System Sci. 2014. 18(12). P. 5271–5288.
28. *Popovnin V.V.* Annual mass-balance series of a temperate glacier in the Caucasus, reconstructed from an ice core // Geografiska Annaler. 1999. 81A(4). P. 713–724.
29. *Pu T., He Yu., Zhu G., Zhang N., Du J., Wang Ch.* Characteristics of water stable isotopes and hydrograph separation in Baishui catchment during the wet season in Mt. Yulong region, south western China // Hydrol. Processes. 2013. 27(25). P. 3641–3648.
30. *Sklash M.G., Farvolden R.N.* The role of groundwater in storm runoff // J. Hydrol. 1979. 43(1–4). P. 45–65.
31. *Stichler W., Schotterer U., Fröhlich K., Ginot P., Kull C., Gaeggeler H., Pouyaud B.* Influence of sublimation on stable isotope records recovered from high-altitude glaciers in the tropical Andes // J. geoph. Res. 2001. 106(D19). P. 22613–22620.
32. *Wang X., Li Z., Ross E., Tayier R., Zhou P.* Characteristics of water isotopes and hydrograph separation during the spring flood period in Yushugou River basin, Eastern Tianshans, China // J. Earth System Sci. 2015. 124(1). P. 115–124.
33. *Weekes A.A., Torgersen C.E., Montgomery D.R., Woodward A., Bolton S.M.* Hydrologic response to valley-scale structure in alpine headwaters // Hydrol. Processes. 2015. 29(3). P. 356–372.
34. *Yeh H-F., Lee Ch-H., Hsu K-Ch., Chang P-H., Wang Ch-H.* Using stable isotopes for assessing the hydrologic characteristics and sources of groundwater research // Environ. Eng. Management J. 2009. 19(4). P. 185–191.