

УДК 551.345 551.343.72 551.438.223

Ю.Н. Чижова¹, Н.А. Буданцева², Е.П. Рец³, Н.А. Лошакова⁴, В.В. Поповнин⁵, Ю.К. Васильчук⁶**ВАРИАЦИИ ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОГО СОСТАВА ТАЛОГО СТОКА ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ КАВКАЗЕ⁷**

Рассмотрены изотопные вариации талого ледникового стока с ледника Джанкуат на Центральном Кавказе в течение сезона абляции 2013 г. Этот сезон отличался аномальным количеством атмосферных осадков и нетипичной формой гидрографа р. Джанкуат. В результате исследований сделаны качественные оценки вклада таяния ледникового льда в общий сток. Определение вклада ледникового стока в стокообразование — ключевая часть комплексного гидроклиматологического подхода к мониторингу ледниковых бассейнов. Значения $\delta^{18}\text{O}$ воды р. Джанкуат в период абляции 2013 г. варьировали от $-15,04$ в начале июня до $-11,27\text{‰}$ в конце сентября. Значение $\delta^{18}\text{O}$ базисной составляющей стока в конце периода абляции составило $-11,9\text{‰}$. Низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (-14‰ – -15‰) ледникового стока в июне связаны с таянием изотопически легкого зимнего и ранневесеннего снега и ледникового льда, увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ ($> -12\text{‰}$) в сентябре, видимо, указывает на преобладающую роль в питании реки подледных и подземных вод при снижении интенсивности абляции. Внутрисуточные колебания изотопного состава талой воды очень незначительны.

Ключевые слова: изотопно-кислородный состав, абляция, сток, Центральный Кавказ.

Введение. Применение стабильных изотопов в гидрологических исследованиях основано на естественной вариации изотопного состава осадков в результате фракционирования при фазовых переходах воды. Изотопно-кислородный состав широко применяется как индикатор для выделения вод различного происхождения [15, 17, 19].

Значение $\delta^{18}\text{O}$ природных осадков в глобальном масштабе тесно связано с температурой воздуха [14], поэтому зимние осадки имеют более низкие значения $\delta^{18}\text{O}$, чем летние (сезонный изотопный эффект). Кроме того, чем больше высота местности (высотный изотопный эффект) и чем больше расстояние от источника происхождения воздушных масс (континентальный изотопный эффект), тем ниже значения $\delta^{18}\text{O}$. Процесс метаморфизма снега также обогащает фирновый лед тяжелым кислородом [12].

Накопление ледникового льда в высокогорье умеренного и субтропического климата происходит в основном в зимний период. В холодное время года изотопный состав снега заметно более отрицательный по сравнению с изотопным составом осадков теплых сезонов, к тому же весенний снег практически пол-

ностью стайвает 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 низкими значениями $\delta^{18}\text{O}$, чем средние значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках за год. Эти изотопные различия делают значения $\delta^{18}\text{O}$ хорошим изотопным индикатором при изучении формирования ледникового стока.

В структуре питания высокогорных рек обычно выделяют следующие компоненты: а) талые воды льда и фирна с разных частей ледника (из зоны абляции/аккумуляции); б) талые снеговые воды как с ледниковой, так и с неледниковой части бассейна; в) летние дождевые осадки; г) подземные воды.

Каждый из этих компонентов может добегать по поверхности водосбора до замыкающего створа разными способами. Так называемый быстрый или надбазисный сток [5], формирующий внутрисуточную амплитуду колебания ледникового стока р. Джанкуат, в дни без осадков образуется за счет таяния на практически свободных от снега участках языка ледника или там, где толщина снега $0,5$ – 1 м и менее. Талая снеговая вода с неледниковой части бассейна р. Джа-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: eacentr@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, ст. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: nadin.budanceva@mail.ru

³ Институт водных проблем Российской академии наук, лаборатория гидрогеологии и проблем окружающей среды, мл. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: retska@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, студентка; *e-mail*: retska@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра криолитологии и гляциологии, доцент, канд. геогр. н.; *e-mail*: ro@geogr.msu.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail*: vasilch@geol.msu.ru

⁷ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Соглашение 14-27-00083), Е.П. Рец и Н.А. Лошакова выполняли работу при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-05-31239).

куат из-за особенностей его строения добегают до замыкающего створа в основной своей массе за 20—30 часов, внося вклад в формирование водного и гидрохимического стока последующего дня [10].

Максимум таяния снега и фирна в области питания ледника значительно нивелируется в сезонном ходе расходов — это задерживающий эффект от фильтрации талой воды через снежный покров и фирновую толщу и стекания в теле ледника. Вследствие этого указанная составляющая в общем стоке ледниковой реки обычно имеет достаточно плавный сезонный колоколовидный ход с выраженным максимумом в середине периода абляции [5]. Так называемая базисная составляющая стока ледниковой реки, испытывающая незначительные колебания в течение теплого периода года и плавно истощающаяся в течение всего холодного периода, формируется за счет подземных вод, сезонных талых вод и дождевых вод длительного хранения, попавших в глубинные регулирующие емкости ледника, а также в неледниковой части бассейна [16].

Постановка проблемы. Цель исследования — определение вариаций $\delta^{18}\text{O}$ талого стока ледника Джанкуат в начале и конце периода абляции в 2013 г. Это послужит базой для дальнейших изотопных исследований по выявлению доли непосредственного таяния ледникового льда в формировании общего стока р. Адьлсу.

Исторические данные свидетельствуют о существовании общего многовекового тренда деградации оледенения в средних широтах практически всюду, что подтверждается результатами изучения ледниковых кернов и моделирования климата [20]. Сокращение оледенения, безусловно, приводит к значительным изменениям годового и летнего стока — по мере того как ледники отступают, их стокообразующая роль слабеет [11]. Кроме того, ледники регулируют годовой и внутригодовой сток посредством хранения воды в виде льда в годы обильных осадков и высвобождения талой воды в теплые сезоны и годы.

Формирование стока с горно-ледниковых бассейнов имеет свои особенности: изменчивость стока в горно-ледниковых бассейнах контролируется в первую очередь потоками поверхностной энергии, тогда как в неледниковых бассейнах изменчивость определяется режимом выпадения осадков, существует и эффект задержки, вызванный удержанием воды в толще ледника и действием подледниковой дренажной сети [16]. В ледниковых водосборных бассейнах сочетание измерения расхода воды и изотопных индикаторов позволяет сделать количественные оценки современного вклада таяния ледников в стокообразование. Особенно это важно для бассейнов, где получение метеорологических и гидрологических данных затруднено или ограничено. На леднике Джанкуат с 1968 г. ведется непрерывный масс-балансовый мониторинг, ледник включен в перечень объектов Всемирной службы мониторинга ледников (WGMS, World Glacier Monitoring Service, www.wgms.ch) как опорный репрезента-

тивный ледник Кавказа. В период Международного геофизического десятилетия (МГД) проводились режимные метеорологические и гидрологические наблюдения, после 1975 г. они стали неполными.

Наши исследования позволяют сделать качественную оценку вклада таяния ледникового льда в общем стоке. Определение вклада ледникового стока в стокообразование — ключевая часть комплексного гидроклиматологического подхода к мониторингу ледниковых бассейнов.

Ю.К. Васильчук и Н.А. Буданцева в процессе исследования суточных вариаций изотопного состава воды р. Азау (исток р. Баксан) в районе Эльбрусской учебно-научной станции географического факультета МГУ в августе 2010 г. выявили изотопный импульс у талых ледниковых вод.

Опробование воды проводили в створе, заложенном в 1 км от края ледника Большой Азау, образцы отбирали в течение суток с интервалом 3 ч. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьировали от $-14,8\text{‰}$ в интервале 3—9 ч.; в дневные часы (12—18 ч.) значение $\delta^{18}\text{O}$ составило $-14,1\text{‰}$, вечером и ночью отмечалось утяжеление изотопного состава до $-13,9\text{‰}$. Таким образом, в течение суток изотопный состав р. Азау изменился на $0,5\text{‰}$. Сдвиг времени максимального таяния льда (12—16 ч.) и фиксация наиболее легкого изотопного состава воды в р. Азау (3—9 ч.), скорее всего, соответствует времени добегающего основного объема талой ледниковой воды до русла реки [4].

В задачу работ в 2013 г. входило исследование сезонной и суточной вариативности изотопного состава талых ледниковых вод ледника Джанкуат.

Материалы и методы исследований. Ледник Джанкуат расположен на северном склоне Главного Кавказского хребта. Верхняя граница ледника оконтурена скальным гребнем Главного Кавказского хребта и далее проходит по относительно выровненной поверхности Джантуганского фирнового плато, лежащего в пригребневой части Кавказского хребта. Большая часть плато относится к ледосбору ледника Лекзыр, стекающего на юг. Однако часть льда с плато питает систему ледника Джанкуат. Вытекая из-под одноименного ледника, р. Джанкуат служит одним из истоков р. Адьлсу, которая впадает в р. Баксан. В горно-ледниковом бассейне ледника Джанкуат расположены три малых ледника — Койавган, Виатау и Висячий, сток с которых поступает в р. Джанкуат (рис. 1).

В пределах ледника Джанкуат выделяются восемь высотных зон [7]. Зона I (2700—2730 м над уровнем моря) — участки мертвого льда, обрамляющие язык в его концевой части и практически потерявшие с ним связь. Толща льда насыщена моренными отложениями. Скорость абляции подморенного льда в несколько раз меньше, чем скорость абляции чистого льда [9]. Зона II (2700—2770 м) — конец языка с крутизной свыше 20° . Его поверхность перекрыта моренными валами, вытянутыми вдоль движения ледника, трещины отсутствуют. Толщина льда достигает 50 м.

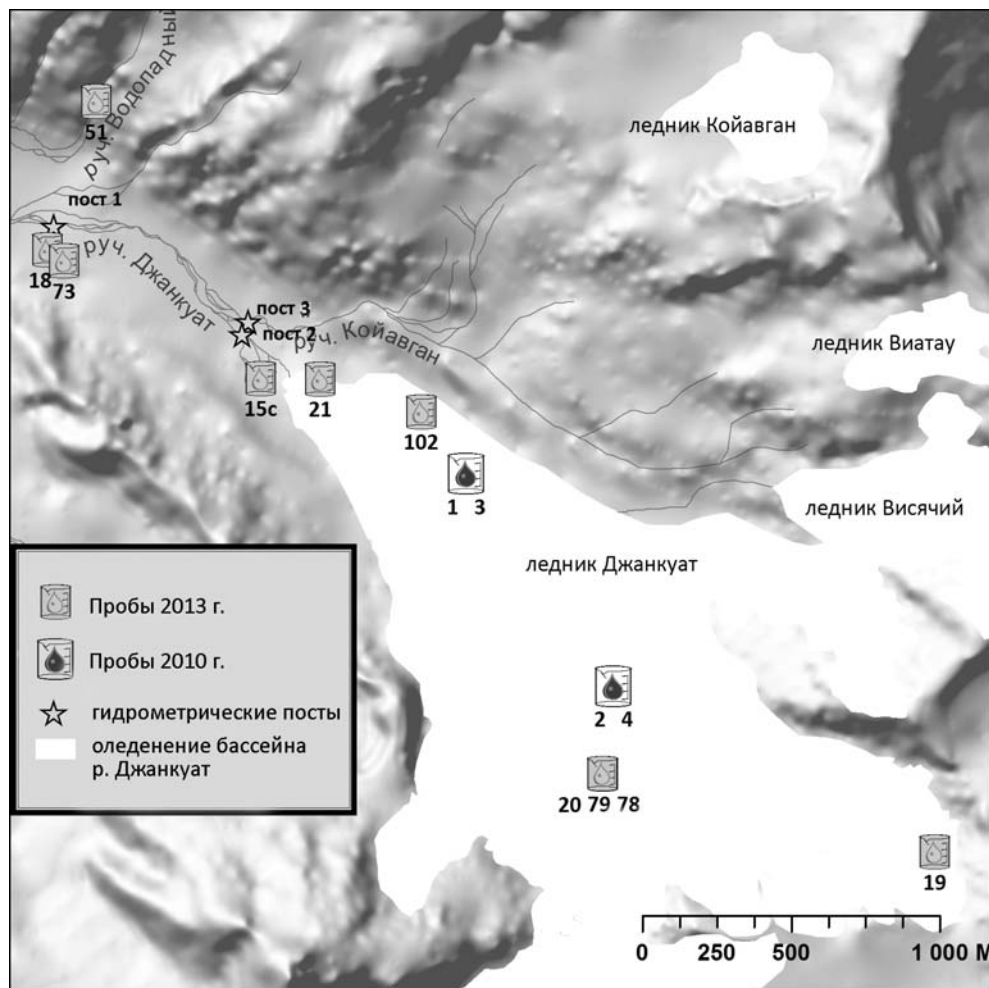


Рис. 1. Карта-схема бассейна ледника Джанкуат, расположение гидрологических створов и точек опробования

Зона III (2770–2850 м) — пологий участок ледника (крутизна до 8°). Вся эта зона представляет собой зону сжатия. Толщина льда достигает 80 м. Зона IV (2850–2940 м) — крутой участок ледника (крутизна 15–20°), разбитый в центральной части ледопадом с системой радиальных и поперечных трещин отрыва. Толщина льда на ледопаде составляет 30–40 м. Зона V (2940–3020 м) — пологий участок ледника (4–6°), заключенный между IV зоной и ледопадом, разделяющим области аккумуляции и абляции. Толщина льда в верхней части зоны более 100 м. 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). Примерно 80% площади зоны разбито поперечными трещинами. Толщина льда, очевидно, невелика, судя по выходящему местами на поверхность скальному ригелю, и составляет 30–50 м. В зону VII (3200–3500 м) входит большая часть области аккумуляции, вплоть до бергшрунда. Поверхность разбита многочисленными трещинами и провальными воронками. К зоне VIII относятся участки ледника, лежащие выше бергшрунда (3500 м и выше) на скальном обрамлении [7].

В.В. Поповниным [8] и А.А. Алейниковым [1] на основе прямых наблюдений и данных об изменении гипсометрии ледника Джанкуат для конца XX в. установлена тенденция к переходу от квазистационарного состояния к деградации — общее отступление языка ледника за период с 1968 по 2000 г. составило 105 м, но этот процесс был крайне неравномерным. Так, с 1968 по 1974 г. ледник отступил на 60 м, к началу 1980-х гг. еще на 28 м, после чего оставался стационарным в течение нескольких лет. С 1985 по 1993 г. положение ледника было квазистационарным, а начиная с 1994 г. отступление фронта продолжилось. Среднее понижение поверхности ледника с 1968 по 1999 г. составило почти 6 м в слое воды, в нижней части его языка, свободной от морены, максимальное понижение поверхности превысило 28 м, а по всему языку составило 10,5 м [8].

Для изучения изотопных вариаций ледникового стока ледника Джанкуат были заложены постоянные гидрологические створы (рис. 1). Полевые гидрологические работы в бассейне р. Джанкуат в период абляции 2013 г. включали:

— непрерывное измерение стока р. Джанкуат на посту 1 (рис. 1). Регистрация уровня воды с часовым

ходом проводилась автоматическим самописцем уровня воды АДУ-02. Для перерасчета уровня воды в расход воды построены кривые зависимости расхода от уровня воды в р. Джанкуат для разных месяцев теплого периода. Суммарно выполнено более 40 измерений расхода воды методом ионного паводка. При измерении расхода воды также определялась ее фоновая электропроводность;

— пробы воды для исследования суточного хода вариаций $\delta^{18}\text{O}$ и содержания главных ионов отбирали в р. Джанкуат и руч. Койавган в створе постов 1—3 (рис. 1) 11.06., 20.06., 29.06 и 19.09.;

— пробы снега, фирна и льда с разных частей ледника Джанкуат, атмосферных осадков, а также из отдельных водотоков бассейна отбирали для определения изотопного состава источников питания р. Джанкуат (суммарно 9 проб).

Исследован изотопный состав льда ледника Джанкуат в зоне абляции и на границе зон абляции и аккумуляции. В августе 2010 г. В.Г. Пастухов отобрал образцы льда из глубоких трещин в III и VI гляциологических зонах ледника Джанкуат. Для сравнения использован изотопный состав снега и фирна из зоны аккумуляции ледникового плато Джантуган, исследованный ранее [21].

Таблица 1

Суточный ход значений $\delta^{18}\text{O}$ в стоке ледников Джанкуат (посты 1 и 2) и Койавган (пост 3) в 2013 г.

Время отбора, ч.	$\delta^{18}\text{O}$, ‰				
	11.06.	20.06.	29.06.	29.06.	19.09.
	пост 1		пост 2	пост 3	пост 1
07:00	-14,86	-14,54	—	—	—
08:00	-14,88	-14,53	—	—	-12,88
09:00	-14,73	-14,59	—	—	—
10:00	-14,75	-14,46	—	—	-12,91
11:00	-14,8	-14,66	-14,66	-14,6	-12,98
12:00	-14,74	-14,41	-14,82	-14,58	-12,85
13:00	-14,71	-14,50	-14,40	-14,59	-12,7
14:00	-14,82	—	-14,75	-14,58	-12,96
15:00	-14,76	—	-14,06	-14,54	-12,97
16:00	-14,77	—	-14,72	-14,52	-12,34
17:00	-14,75	-14,47	—	-14,51	-13
18:00	-14,82	-14,35	-14,62	-14,50	-12,85
19:00	-14,82	—	-14,57	-14,53	-11,97
20:00	-14,67	—	-14,75	-14,61	-11,27
21:00	-15,04	—	-14,73	-14,65	—
22:00	-14,8	—	—	—	-12,88
23:00	-14,89	-14,54	—	—	-12,83

Примечание. Прочерк — образцы не отбирали.

Изотопные определения выполнены в изотопной лаборатории географического факультета МГУ на масс-спектрометре “Delta-V” со стандартной опцией газ-бенч. Для измерений использованы международные стандарты V-SMOW ($\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$), GISP ($\delta^{18}\text{O} = -24,76\text{‰}$), SLAP ($\delta^{18}\text{O} = -55,5\text{‰}$), лабораторные стандарты МАГАТЭ (IAEA 12: $\delta^{18}\text{O} = -12,1\text{‰}$, IAEA 13: $\delta^{18}\text{O} = -33,35\text{‰}$), собственный лабораторный стандарт МГУ — снег ледника Гарабаши ($\delta^{18}\text{O} = -15,60\text{‰}$). Точность определений $\delta^{18}\text{O}$ составила $\pm 0,08\text{‰}$. Химический анализ 19 отобранных проб воды р. Джанкуат проводили частично в оборудованной полевой лаборатории (электропроводность воды, значение pH и общая щелочность), а общий солевой состав вод — в лаборатории Красновидовской учебно-научной базы географического факультета МГУ.

Результаты исследований и их обсуждение. Полученные значения $\delta^{18}\text{O}$ стока ледника Джанкуат с 06.06.2013 по 23.09.2013 варьируют от $-11,27$ до $-15,04\text{‰}$ (табл. 1), значения $\delta^{18}\text{O}$ атмосферных осадков и снега на леднике — от $-8,85$ до $-17,64\text{‰}$ (табл. 2). Расход воды в створе 1 в течение всего периода наблюдений изменялся от $0,4$ до $3,0 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 2).

Таблица 2

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в образцах осадков, льда, снега и воды ледника Джанкуат в 2013 г.

Номер образца	Дата	Время	Описание образца	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
18	12.06.		Дождь	-8,85
19	12.06.		Снег с ледника, рейка 70	-11,08
20	12.06.		Снег с ледника, рейка 49	-8,97
21	12.06.		Снег с языка	-14,80
51г	11.06.		Правый ручей выше двух снежников	-13,87
52к			Ручей из-под моренного вала	-14,06
53к			Р. Джанкуат	-14,25
72	20.06.	00:00	Р. Джанкуат	-14,69
73	20—21.06	23:00—4:00	Мокрый свежесвыпавший снег	-9,90
78	22.06.		Снег из шурфа, глубина 1 м	-17,64
79	22.06.		Фирн из шурфа, глубина 3,8 м	-11,24
102	01.07.		Лед с языка ледника, II зона	-14,96
15с	23.09.		Ручей из-под правой морены	-11,94
16с	23.09.		Р. Джанкуат	-11,89

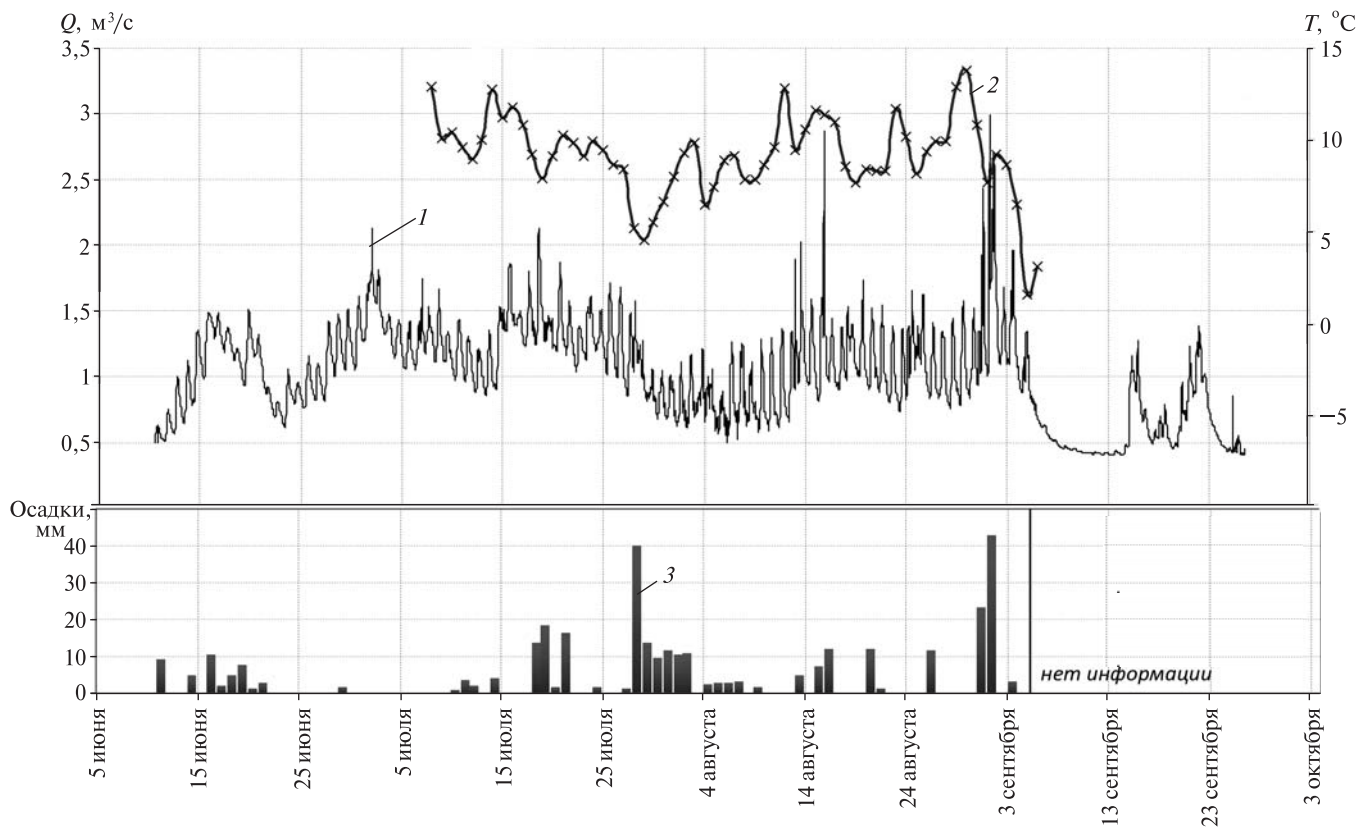


Рис. 2. Расходы воды в р. Джанкуат (1), температура воздуха (2) и количество осадков (3) в июне—сентябре 2013 г.

В характере сезонных изменений изотопного и гидрохимического состава воды р. Джанкуат в замыкающем створе (створ 1) отражены метеорологические и гидрологические условия в бассейне во время сезона абляции в 2013 г., основной погодной особенностью которого было повышенное количество атмосферных осадков (рис. 2). Так, за июль и август в бассейне выпало 293 мм осадков, что на 50% выше многолетней нормы для этих месяцев по данным наиболее близко расположенной метеостанции Терскол (находится на высоте 2143 м). Преобладание пасмурной погоды стало причиной низкой интен-

сивности таяния в бассейне и относительно меньшей водности р. Джанкуат летом 2013 г. Гидрограф стока р. Джанкуат имел в 2013 г. волнообразную форму, отличающуюся от типичного для этого ледникового бассейна колоколовидного изменения расхода воды. Периодические спады водности связаны с периодами похолоданий и пасмурной погоды (рис. 2).

В сезонном ходе $\delta^{18}\text{O}$ воды в р. Джанкуат (рис. 3) прослеживается общее монотонное увеличение значений за период с июня по сентябрь от $-14,75\text{‰}$ — $-14,85\text{‰}$ в начале июня до $-11,8\text{‰}$ — $-12,8\text{‰}$ в конце сентября. Эта закономерность характерна для ледниковых рек и связана со значительной долей таяния изотопно-легкого зимнего снега в структуре питания реки в первую половину 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.

Изотопные значения ледникового стока в течение суток в июне варьируют незначительно — $\delta^{18}\text{O}$ изменяется менее чем на 1‰ в пределах от -15 до -14‰ . Более выраженные колебания $\delta^{18}\text{O}$ в суточном ходе 29.06. связаны с тем, что отбор проводился на посту 2, который находится на 30—50 м ниже слияния нескольких ручьев, формирующих р. Джанкуат, каждый из них имеет свои особенности формирования стока, а следовательно, изотопного состава, т.е. отбор проб проводился в зоне смешения вод из разных источников.

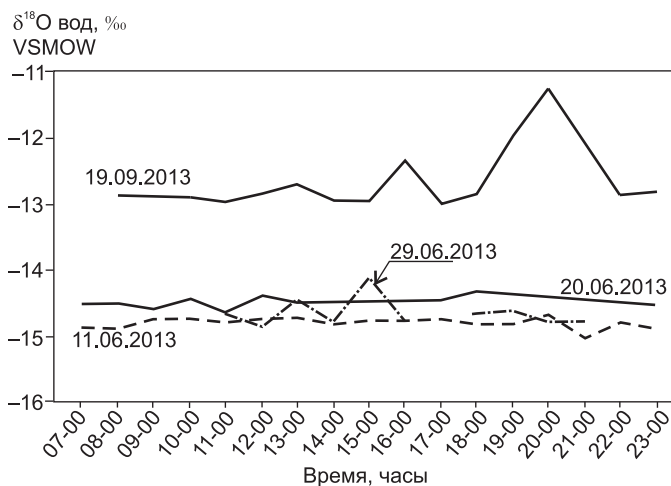


Рис. 3. Сезонный ход суточных значений $\delta^{18}\text{O}$ в р. Джанкуат

В сентябре в течение суток значения $\delta^{18}\text{O}$ также варьировали от -13 до -12‰ , однако вечером от 19 до 21 ч. (табл. 1, рис. 4) отмечено резкое увеличение значений изотопного состава талой воды до $-11,27\text{‰}$. Это, скорее всего, связано с добеганием волны дневного таяния снега, выпавшего в начале сентября. В сентябре 2013 г. ледник дважды перекрывался свежим снегом — первый раз после интенсивных осадков 05.09., при этом практически полностью приостанавливалось таяние ледника. На гидрографе за период с 05.09. по 14.09. (рис. 2) отражается кривая сработки запаса регулирующей емкости ледника, а также неледниковой части бассейна. Выпавший на ледник снег с дождем в течение последующих дней не таял вследствие наступившего похолодания. Затем с 14.09. по 22.09. наступило временное потепление, послужившее причиной активного таяния свежеснеговывпавшего снега, что отражается в заметном утяжелении изотопного состава воды р. Джанкуат при добегании суточной волны таяния. После непродолжительного потепления ледник снова был перекрыт свежеснеговывпавшим снегом 23.09., период абляции окончательно завершился. Таким образом, проба воды, отобранная из р. Джанкуат 23.09., характеризует изотопный состав “базисной” составляющей стока р. Джанкуат за 2013 г., формирующейся за счет подземных вод, сезонных талых и дождевых вод длительного хранения. Достаточно тяжелый изотопный состав базисной составляющей стока р. Джанкуат ($-11,89\text{‰}$) связан прежде всего с большим количеством осадков в период абляции 2013 г.

В сезонном изменении минерализации р. Джанкуат прослеживается ярко выраженная обратная зависимость от водности реки, связанная с разбавлением базисной составляющей стока талой водой быстрого добегания с ледника. При этом зависимость имеет

более сложный характер, чем простая линейная обратная пропорциональность. В начале сезона таяния (пробы отобраны 09.06.—10.06.) минерализация вод р. Джанкуат на посту 1 (рис. 1) составляла $60\text{—}70$ мг/л, с подъемом волны таяния 13.06.—15.06. она уменьшилась до $40\text{—}50$ мг/л. Серия интенсивных дождей 16.06.—21.06. вызвала увеличение минерализации воды в ручье до $50\text{—}60$ мг/л вследствие насыщения склонового стока солями (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-) в процессе добегания по свободной от снега поверхности водосбора и фильтрации через чехол моренных отложений. После уменьшения таяния ледникового льда из-за заморозков в начале сентября минерализация воды в замыкающем створе установилась на уровне 80 мг/л, что может характеризовать минерализацию “базисной” составляющей стока. Во время последующих оттепелей минерализация в реке уменьшилась до $50\text{—}60$ мг/л.

Общее изменение изотопного состава талой воды в р. Джанкуат в период абляции с июня по сентябрь оставило немного более 2‰ (рис. 4). Аналогичный сезонный ход $\delta^{18}\text{O}$ отмечается на ледниках Австрийских Альп [12, 18], Скалистых гор [13], где в годовом ходе содержания ^{18}O отмечается ярко выраженный минимум в начале периода таяния и увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ на $2\text{—}3\text{‰}$ в конце периода абляции.

Исследование механизма формирования стока с ледника осложняется его образованием из атмосферных осадков и в результате таяния снега и льда. В ледниковом стоке, как правило, выделяют три компонента таяния: а) талые воды с языка ледника, б) прямой сток от таяния фирна и снега, в) талые воды более длительного сохранения в леднике (во внутриледниковых полостях). Обычно каждый компонент имеет суточные колебания с разным временем добегания [12].

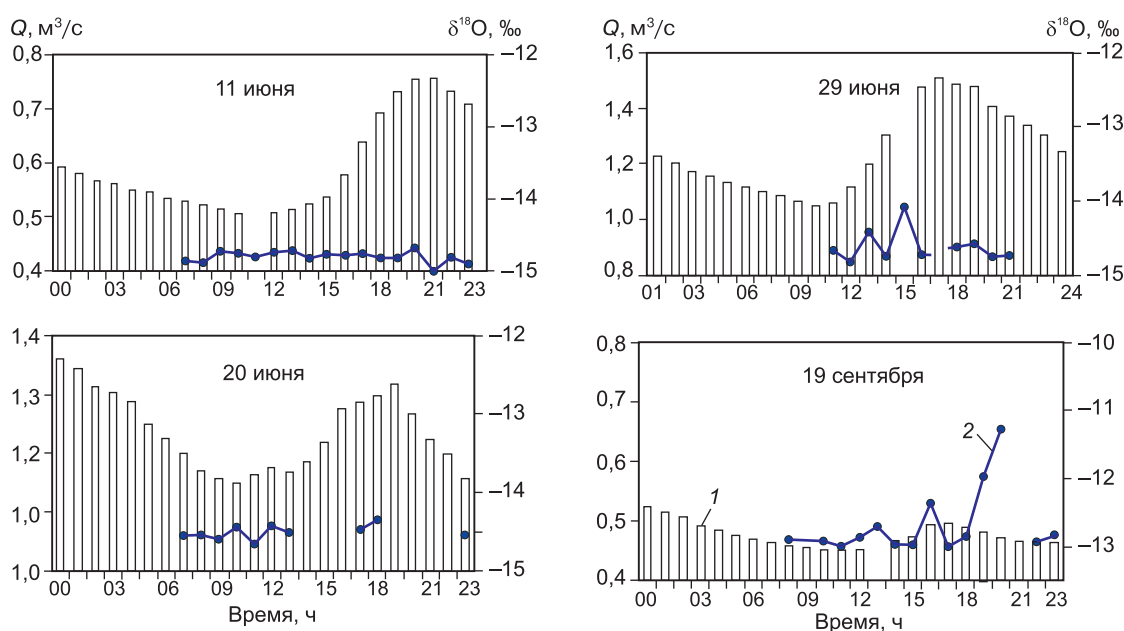


Рис. 4. Суточный ход значений $\delta^{18}\text{O}$ и расхода воды в р. Джанкуат

В нашем случае эти внутрисуточные эффекты полностью нивелированы. В начале периода абляции стает снег и лед, что формирует относительно низкие изотопные значения стока. В течение всего периода абляции тает подморенный лед, и во время всего периода абляции в стоке участвуют внутрiledниковые и подледниковые воды более длительного хранения, а также подземные (внутригрунтовые) воды неледниковой части. Видимо, в июне их роль крайне невелика. В конце сентября лед не тает, на леднике начинается новый сезон аккумуляции, поэтому в ледниковом стоке принимают участие лишь подледные, внутрiledниковые и внутригрунтовые воды.

Сезон абляции 2013 г. характеризовался обильными осадками. Летние атмосферные осадки обладают наиболее тяжелым изотопным составом. Значение $\delta^{18}\text{O}$ в дожде, выпавшем 12.06., составило $-8,85\text{‰}$, в мокром свежевывавшем снеге 20.06.—21.06. — $-9,9\text{‰}$. Наименьшее значение $\delta^{18}\text{O}$ характерно для зимних атмосферных осадков. В течение лета сезонный снежный покров насыщается ^{18}O под воздействием промачивания летними атмосферными осадками, которые имеют относительно тяжелый изотопный состав, и вследствие изотопного фракционирования, происходящего при таянии снежного покрова. Наименьшее значение $\delta^{18}\text{O}$ ($-17,64\text{‰}$) характерно для пробы, отобранной с глубины 1 м из шурфа № 7 (рис. 1, № 78), это, скорее всего, ранневесенний снег или ранневесенний снег, подвергшийся незначительному изотопному обогащению. В поверхностном снеге в зоне аккумуляции (рис. 1, № 19, 20) в результате насыщения дождевыми осадками значение $\delta^{18}\text{O}$ уже повышено относительно более глубоких слоев сезонного снега и составляет $-8,97\text{‰}$ — $-11,08\text{‰}$ (табл. 2). В зоне абляции снег за счет меньшей мощности и большей интенсивности таяния задерживается на по-

верхности ледника менее продолжительное время, чем в зоне аккумуляции, что в совокупности позволяет толще снега быстрее дойти до температуры таяния [10]. 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 на языке ледника (рис. 1, № 21), имеет более легкий состав ($\delta^{18}\text{O} = -14,8\text{‰}$). Относительно тяжелый изотопный состав поверхностного снега в более гипсометрически высоких зонах может быть связан с участием изотопно более тяжелого весеннего снега, в то время как в нижних зонах ледника осадки выпадали уже в жидкой форме. При этом жидкие осадки не могут пропитать снег больше, чем на величину водоудерживающей способности.

Изотопный состав ледникового льда может значительно варьировать в зависимости от погодных условий, при которых он образовывался. В августе 2010 г. по нашей просьбе В.Г. Пастухов отобрал образцы льда из глубоких трещин в III и VI гляциологических зонах (рис. 1, 1, 3 и 2, 4.).

В зоне III значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в толще льда от $-18,62$ до $-13,41\text{‰}$, в зоне VI — от $-15,05$ до $-11,78$ (рис. 5). Зона VI — область ледопадов, здесь находится средняя многолетняя граница питания ледника, зона III — зона абляции и находится на 200 м ниже. То что в области абляции лед изотопно легче, чем в верхних зонах ледника, говорит о том, что этот изотопноотрицательный пластически сместившийся сюда лед характеризует накопление 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.

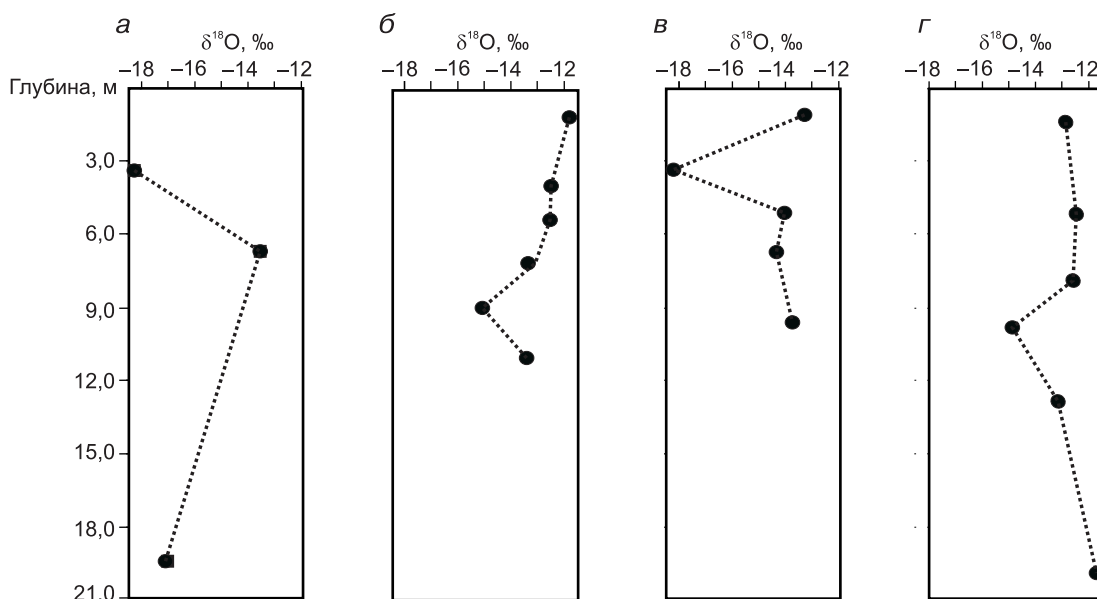


Рис. 5. Вариации $\delta^{18}\text{O}$ и δD , исследованные в образцах льда из трещин ледника Джанкуат, по [3]: а — трещина 1, зона III; б — трещина 2, зона VI; в — трещина III, зона 3; г — трещина 4, зона VI

Согласно прямым наблюдениям на ст. Терскол, температура воздуха зимой за последние 60 лет менялась незначительно [2], а колебания среднегодовой температуры воздуха по метеостанции Пятигорск в течение последних 100 лет составили 0,5 °С, при этом наиболее холодным был период 1890—1900 гг., когда отклонение среднегодовой температуры составило –0,3 °С от средней за столетие [6]. Возможно, более изотопно холодный лед в зоне абляции — это лед, сформировавшийся в такой период похолодания.

Значение $\delta^{18}\text{O}$ в пробе льда, отобранной с поверхности языка 01.07. (рис. 1, 102), составило –14,96‰, что близко к его значению в поверхностном снеге в этой же зоне.

Так как на языке ледника тают одновременно обнаженные на его поверхности разновозрастные и соответственно разные по составу слои льда, то в итоге составляющая стока, формирующаяся 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 (рис. 1, 20) значение $\delta^{18}\text{O}$ составило –11,24‰, это меньше, чем в летних атмосферных осадках, но больше, чем в среднем для образцов льда (табл. 2).

Ранее изотопно-кислородные исследования выполнены в скважине на фирновом плато Джантуган [21]. Здесь из скважины, пробуренной на высоте 3620 м, проанализировано около 50 образцов фирна и льда до глубины 52 м, где залегает лед, сформировавшийся из снега в конце 1950-х — начале 1960-х гг.

Скорость накопления фирна составляет ~3 м/год, т.е. нижняя граница фирна, залегающая на глубине около 14,5 м, датируется 1978 г. (бурение проводилось в 1980 г.). Отбор на изотопные определения выполнен из нижней части фирновой толщи и из средней

части ледяной толщи (с глубины 45—52 м), накопившейся с 1960 по 1964 г.

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в толще варьируют от –7,8 до –18,9‰ [21]. Таким образом, общая вариативность значений $\delta^{18}\text{O}$ в области абляции ледника Джанкуат находится внутри диапазона вариаций в области его питания.

Выводы:

— значения $\delta^{18}\text{O}$ воды р. Джанкуат в период абляции 2013 г. варьировали от –15,04‰ в начале июня до –11,27‰ в конце сентября. Значение $\delta^{18}\text{O}$ базисной составляющей стока в конце периода абляции составило –11,9‰;

— сток ледника Джанкуат с июня по сентябрь характеризовался значениями расхода воды от 0,5 до 3,0 м³/с (средняя величина стока для бассейна), гидрограф имел волнообразную форму, это необычно и связано с периодическими резкими изменениями температуры воздуха и количества осадков в течение сезона абляции;

— низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ (–14...–15‰) ледникового стока в июне связаны с таянием изотопически легкого зимнего и ранневесеннего снега и ледникового льда, увеличение значений $\delta^{18}\text{O}$ (>–12‰) в сентябре, возможно, указывает на преобладающую роль в питании реки подледных и подземных вод при снижении интенсивности абляции;

— заметные изотопные вариации выявлены в точном ходе талого стока ледника Джанкуат 19.09. — резкое увеличение $\delta^{18}\text{O}$ почти на 2‰ между 18 и 20 ч. (до –11,27‰). Резкий рост $\delta^{18}\text{O}$ при незначительном повышении расходов связан с поступлением талых вод из-за дневного таяния изотопнотяжелого свежеснежного при краткосрочном потеплении.

Авторы благодарят за помощь в полевых и лабораторных работах М.В. Гайдамуху, В.Г. Пастухова, А.М. Смирнова и А.Г. Ростиашвили.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алейников А.А. Взаимосвязь движения горного ледника и его баланса массы на примере ледника Джанкуат, Центральный Кавказ: Автореферат канд. дисс. М., 2001.
2. Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Буданцева Н.А. и др. Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски // Геориск. 2010. № 2. С. 16—29.
3. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Изотопные методы в географии. Ч. 1. Геохимия стабильных изотопов природных льдов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. 222 с.
4. Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Изотопные методы в географии. Ч. 3. Геохимия стабильных изотопов атмосферы и гидросферы. М., 2013. 216 с.
5. Голубев Г.Н. Гидрология ледников. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 248 с.
6. Золотарев Е.А., Поповнин В.В. О реакции ледника Джанкуат на изменения климата // Материалы гляциологических исследований. 2003. Вып. 95. С. 107—110.
7. Ледник Джанкуат: Центральный Кавказ. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 184 с.
8. Поповнин В.В., Петраков Д.А. Ледник Джанкуат за минувшие 34 года (1967/68—2000/01) // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 167—174.
9. Резепкин А.А. Тепловые потоки на ледяной и заморенной частях ледника Джанкуат (Приэльбрусье) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 5. С. 43—48.
10. Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В. Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лед и снег. 2011. № 4. С. 24—31.
11. Barnett T., Adam J., Lettenmaier D. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow dominated regions // Nature. 2005. Vol. 438, iss. 7066. P. 303—309. doi:10.1038/nature04141.
12. Behrens H., Moser H., Oerter H. et al. Models for the runoff from a glaciated catchments area using measurements of environmental isotope contents // Isotope Hydrology. Vienna: I.A.E.A., 1979. 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. Process.* 2011. Vol. 25, N 14. P. 2228–2236.
14. *Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // *Tellus.* 1964. Vol. 16, iss. 4. P. 436–468.
15. *Dinner T., Payne B.R., Florkowski T.* et al. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18 // *Water Res.* 1970. Vol. 6, N 1. P. 110–124.
16. *Jansson P., Hock R., Schneider P.* The concept of glacier storage: A review // *J. Hydrol.* 2003. Vol. 282. P. 116–129. doi:10.1016/S0022-1694(03).
17. *Herrmann A., Stichler W.* Groundwater-runoff relationships // *Catena.* 1980. Vol. 7. P. 251–263.
18. *Krainer K., Mostler W., Spotl C.* Discharge from active rock glaciers, Austrian Alps: a stable isotope approach // *Austr. J. Earth Sci.* 2002. Vol. 100. P. 102–112.
19. *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, March 11–15, 1974. Int. At. Energy Agency (I.A.E.A.). Vienna, 1974. P. 145–155.
20. *Oerlemans J.* Extracting a climate signal from 169 glacier records // *Science.* 2005. Vol. 308. P. 675–677. doi:10.1126/science.1107046.
21. *Popovnin V.V.* Annual mass-balance series of a temperate glacier in the Caucasus, reconstructed from an ice core // *Geografiska Ann.* 1999. Vol. 81A, N 4. P. 713–724.

Поступила в редакцию
26.08.2014

Yu.N. Chizhova, N.A. Budantseva, E.P. Rets, N.A. Loshakova, V.V. Popovnin, Yu.K. Vasilchuk

ISOTOPIC VARIATION OF RUNOFF FROM THE DZHAN KUAT GLACIER (CENTRAL CAUCASUS)

The isotopic variation of glacial runoff from the Dzhan Khat glacier (Central Caucasus) during the 2013 summer season is described. The season was abnormally rainy with resulting non-typical form of the Dzhan Khat River hydrograph. The contribution of melting glacier ice to the total runoff was qualitatively assessed. Studying the input of glacial melt water into the runoff is a key element of integral hydroclimatic approach to the monitoring of glacier basins.

In summer 2013 the $\delta^{18}\text{O}$ of the Dzhan Khat River water varied from $-15,04\text{‰}$ in June to $-11,27\text{‰}$ in September. The basic component of runoff in the end of ablation season has $\delta^{18}\text{O} = -11,9\text{‰}$. Low values of $\delta^{18}\text{O}$ (-14‰ – -15‰) for the glacial runoff in June correspond to the melting of isotopically light winter and early spring snow and glacier ice. The growing $\delta^{18}\text{O}$ values of river water (more than -12‰) in September probably indicate a predominant role of subglacial water and groundwater in runoff formation during the period of decreasing intensity of ice ablation. Daily isotopic variations of runoff are negligible.

Key words: isotopic composition, variation, ablation, Central Caucasus.