

Два подхода к расчёту расчленения гидрографа стока реки с ледниковым питанием с помощью изотопных методов

© 2016 г. Ю.Н. Чижова^{1*}, Е.П. Ретц², Ю.К. Васильчук¹, И.В. Токарев³, Н.А. Буданцева¹, М.Б. Киреева¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; ²Институт водных проблем РАН, Москва;

³Ресурсный центр «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета

^{1*}*eacentr@yandex.ru*

Two approaches to hydrograph separation of the glacial river runoff using isotopic methods

Yu.N. Chizhova^{1*}, E.P. Rets², Yu.K. Vasil'chuk¹, I.V. Tokarev³, N.A. Budantseva¹, M.B. Kireeva¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ²Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

³Centre for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL) at St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^{1*}*eacentr@yandex.ru*

Article accepted for publication on February 13, 2016

Keywords: *Caucasus, hydrograph separation, snow melt, stable isotope.*

Summary

Application of the stable isotope method in the balance equations used to calculate separation of the runoff hydrograph from the Djankuat Glacier basin is demonstrated. Simultaneous solution of equations of water, isotope and ion balances is applied to estimate contributions of different components and processes to formation of the Djankuat River runoff regime. For June 2014, we made calculations for the purpose to separate contributions of the spring (isotopically weighted) snow and winter (isotopically depleted) snow. Field works in the glacial basin Djankuat were performed during two ablation seasons, i.e. from June to September of 2013 and 2014. Two approaches were used when calculating separation of the runoff hydrograph by means of solution of systems of equations for isotopic and ion balances: 1) taking account of the isotope fractionation during snow melting, and 2) with no account for the fractionation. Separation of the hydrograph for June 2014 have shown that about 15–20% of the Djankuat River runoff is formed by spring snow melting, sometimes increasing up to 36%. Contribution of spring meltwater to the total runoff increases when the isotope fractionation during the snow melting is taken into account for the calculations. In this case, the contribution of spring snow changes from 30 to 50%.

Статья принята к печати 13 февраля 2016 г.

Ключевые слова: *изотопный состав, Кавказ, снежный покров, таяние.*

Рассмотрено применение метода стабильных изотопов в балансовых расчётах расчленения гидрографа стока с ледника Джанкуат. Изученные изотопные вариации стока на замыкающем створе р. Джанкуат для двух сезонов абляции 2013 и 2014 г. совместно с измерениями $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации различных источников питания р. Джанкуат (атмосферные осадки, снег разных сезонов, фирн, лёд и грунтовые воды) позволили расчленить гидрограф стока 2014 г. Применялись два методических подхода к расчётам: разделение гидрографа стока решением систем уравнений ионного и изотопного баланса с учётом изотопного фракционирования при таянии снега и без учёта фракционирования. Установлена величина погрешности расчётов с использованием значений $\delta^{18}\text{O}$ и абсолютных концентраций ^{18}O .

Введение

Информация об источниках питания рек важна для ряда гидрологических задач и, в частности, для прогноза характерных расходов воды в условиях изменчивости климата. Особую сложность эта задача приобретает при изучении горных рек с большой долей оледенения в бассейне. В этом случае в формировании стока реки участвуют воды, образующиеся в результате таяния льда и фирна в разных частях ледника, воды от таяния сезонного снега как в ледниковой, так

и в неледниковой частях бассейна, а также поступающие за счёт летних дождевых осадков и подземных вод. 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 стока.

Применение стабильных изотопов водорода ^2H и кислорода ^{18}O в гляциологии и гидрологии основано на естественной вариации изотопного состава составляющих стока ледниковых рек

и баланса массы ледника в течение года [1]. В качестве эталона для оценки концентраций ^2H (D) и ^{18}O используется SMOW (или его современный аналог V-SMOW) – стандарт среднеокеанической воды, который отвечает абсолютной концентрации дейтерия, т.е. отношению содержания дейтерия к протию, равному 0,0001557, и концентрации тяжёлого кислорода $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0,002005$. Концентрации дейтерия и тяжёлого кислорода измеряются в виде отклонения от стандарта и оцениваются как отношение δ в ‰:

$$\delta\text{D} = [({}^{\text{D}}R_{\text{образца}} - {}^{\text{D}}R_{\text{стандарта}}) / {}^{\text{D}}R_{\text{стандарта}}] \times 1000\text{‰};$$

$$\delta^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}R_{\text{образца}} - {}^{18}\text{O}R_{\text{стандарта}}) / {}^{18}\text{O}R_{\text{стандарта}}] \times 1000\text{‰},$$

$$\text{где } {}^{\text{D}}R = {}^2\text{H}/{}^1\text{H}, {}^{18}\text{O}R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}.$$

Снег, фирн, лёд, талая, дождевая и подземная вода имеют разное содержание стабильных изотопов кислорода и дейтерия. Это позволяет применять данные об изотопном составе в качестве индикатора при исследовании вод разного происхождения [9, 10] и расчленении гидрографа. В классическом варианте расчленения гидрографа реки геохимическим методом маркером служат выраженные различия в концентрации какого-либо элемента в том или ином источнике питания.

Изотопные трассеры в сочетании с геохимическими (электропроводность воды, растворённый углерод и т.д.) применяют для выяснения особенностей гидрологических процессов в пределах небольших водосборов, особенно в периоды выпадения дождей и таяния снега. Изотопы ^{18}O , ^2H и ^3H используют наиболее часто, так как они – составная часть молекулы воды. Применение этих консервативных природных трассеров связано с тем, что метеорные воды сохраняют свои отличительные свойства до смешивания с водами другого состава. Существует мнение, что изотопный метод плохо применим на горных ледниках умеренных широт, особенно с тёплым режимом, так как интенсивное таяние ледников, их повторное замерзание, частые фазовые переходы вместе с модифицирующим влиянием талых и дождевых вод должны приводить к сглаживанию первоначальных изотопных различий. Тем не менее, глубокое керновое бурение тёплых ледников показало, что изучение изотопного состава даже тёплых ледников помогает решить целый ряд задач [4]. На Кавказе един-

ственное место, где в ледниковой толще прослойки инфильтрационного льда не превышают 10 мм и формируются не каждый год, – Западное плато Эльбруса на высотах более 5000 м [11].

Совместное решение уравнений изотопного, ионного (солевого) и водного балансов позволяет установить сезонную динамику различных составляющих стока – источников, участвующих в его формировании [7]. Обычно двухкомпонентные ($f_1 + f_2 = 1$) системы уравнений решают с применением одного маркера, трёхкомпонентные – с использованием двух, а четырёхкомпонентные – трёх маркеров [6, 8, 12]. В нашем случае вместе с изотопным маркером применяется геохимический маркер – общая минерализация воды, рассчитанная по полученной для данного ледникового бассейна зависимости от электропроводности. В общем виде система уравнений для разделения гидрографа балансовым изотопно-солевым методом основывается на следующих положениях:

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1;$$

$$M_1f_1 + M_2f_2 + M_3f_3 = M_{\text{ст}};$$

$$R^{18}\text{O}_1f_1 + R^{18}\text{O}_2f_2 + R^{18}\text{O}_3f_3 = R^{18}\text{O}_{\text{ст}}$$

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.

Методика работ

Для ледника Джанкуат, расположенного на северном склоне Главного Кавказского хребта ($43,2^\circ$ с.ш., $42,75^\circ$ в.д.), в 2013 и 2014 г. выполнены комплексные изотопно-геохимические исследования талого стока и компонентов, участвующих в формировании стока р. Джанкуат [2, 5], с заложением временных гидрологических постов (рис. 1). В периоды абляции (июнь–сентябрь) 2013 и 2014 г. выполнялись гидрологические работы в бассейне р. Джанкуат, предусматривающие непрерывное измерение стока р. Джанкуат на посту примерно в 1000 м ниже истока. Регистрация уровня воды с часовым ходом проводилась автоматическими самописцами уровня воды АДУ-02 и Solinst. Для перерасчёта уровней воды в расходы были по-

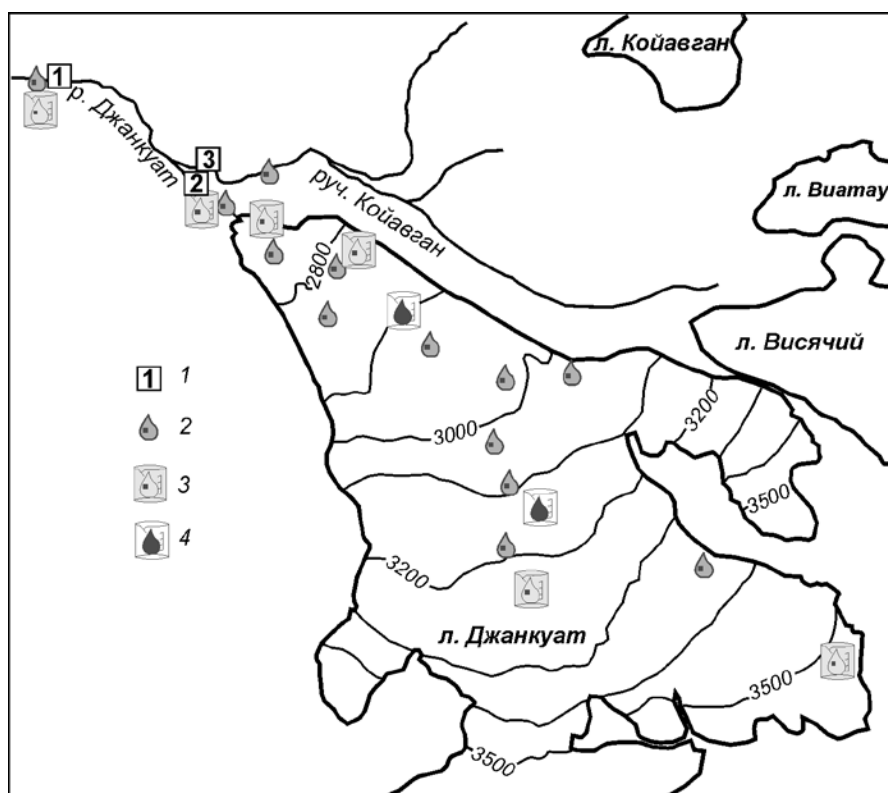


Рис. 1. Ледниковый бассейн Джанкуат с расположением пунктов отбора проб:

1 – гидрологические створы; 2 – отбор 2014 г.; 3 – отбор 2013 г.; 4 – отбор 2010 г.

Fig. 1. Glacial basin Djankuat with the location of sampling points:

1 – gauging stations; sampling sites: 2 – 2014; 3 – 2013; 4 – 2010

строены кривые связи этих двух характеристик р. Джанкуат для разных месяцев тёплого периода. Всего выполнено более 80 измерений расходов воды методом ионного паводка. При измерении расхода воды определялась также её электропроводность. В 2014 г. пробы воды на изотопный состав отбирались на гидрологическом посту ежедневно дважды в день. Всего отобрано 242 пробы воды р. Джанкуат. Снежный покров, фирн и лёд с разных частей ледника Джанкуат отбирался как с поверхности в разных высотных зонах, так и в пройденных четырёх шурфах на леднике (9 проб в 2013 г. и 58 проб в 2014 г.). Также отбирались пробы атмосферных осадков из осадкомера, установленного на гляциологической станции. В 2013 г. было взято две пробы, в 2014 г. отбирались все индивидуальные осадки, если их количество превышало 0,5 мм (всего за сезон была взята 31 проба).

Образцы, отобранные в 2013 г., анализировались в изотопной лаборатории географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч. В 2014 г. все пробы отбирались в двух экземплярах и независимо анализировались в изотопной лаборатории МГУ и в Ресурсном цен-

тре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета на лазерном инфракрасном анализаторе изотопного состава воды Picarro L-2120i. Для измерений использовались международные стандарты V-SMOW, GISP, SLAP, а также собственные лабораторные стандарты. Разница в результатах определения $\delta^{18}\text{O}$ по одним и тем же образцам, полученным в ходе анализа двумя лабораториями, не превышала $\pm 0,2\text{‰}$ [2]. Измерения электропроводности и pH в пробах воды вели в оборудованной полевой лаборатории.

Результаты

Выполнено расчленение гидрографа стока для июня 2014 г. совместным решением уравнений изотопного, солевого (минерализация) и водного баланса. Для изотопного расчленения гидрографа реки необходимое условие – выраженное различие в изотопном составе составляющих баланса (подземные воды, снег, дождь, лёд). Для расчленения гидрографа стока 2014 г. использованы средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации, полученные для различных источников питания р. Джанкуат (табл. 1). На начало сезона

Таблица 1. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и минерализации в отобранных образцах

Источники питания	Средние значения $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Интервал значений $\delta^{18}\text{O}$, ‰	Использовано в расчётах	Средняя минерализация, мг/л	Интервал минерализации, мг/л	Использовано в расчётах, мг/л
Зимний снег	-14,6	-12,32 ÷ -19,0	-15‰ = 0,001975	11,6	6,4 ÷ 33,5	12
Весенний снег	-7,3	-6,76 ÷ -7,68	-7‰ = 0,001991	8,67	7,36 ÷ 9,71	9
Фирн	-11,0	-7,64 ÷ -13,75	-11‰ = 0,001983	13,3	6,14 ÷ 22,5	13
Лёд	-12,8	-9,76 ÷ -16,0	-13‰ = 0,001979	15,1	9,8 ÷ 39,6	15
Дождь	-4,7	-0,8 ÷ -10,9	Каждое значение	12,3	—	12
Грунтовые воды	-11,5	-11,13 ÷ -11,8	-12‰ = 0,001981	96,7	83,2 ÷ 105	97

абляции (для июня) составлена система уравнений, состоящая из двух подсистем для дней без значительных жидких осадков, в которых отдельно рассматриваются солевой баланс – формула (1) и изотопный баланс – формула (2):

$$\begin{cases} M = q_{sn}^{Gl} M_{sn} + (q_{sn}^{NGl} + q_{gr}) M_{gr}, \\ q_{sn}^{Gl} + q_{sn}^{NGl} + q_{gr} = 1; \end{cases} \quad (1)$$

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

где M_{sn} – средняя минерализация талой снежной воды (снега); q_{sn}^{Gl} и q_{sn}^{NGl} – доли стока за счёт таяния снега с ледниковой и неледниковой частей бассейна соответственно; $R^{18}\text{O}_{snw}$ и $R^{18}\text{O}_{snc}$ – средние концентрации ^{18}O в тёплом (весеннем) и холодном (зимнем) снеге соответственно; q_{snw} и q_{snc} – доли стока за счёт таяния тёплого и холодного снега соответственно.

Были приняты некоторые допущения. Во-первых, в начале периода абляции таяние льда незначительное, поскольку в основном снег тает на поверхности и эту составляющую можно не учитывать. Во-вторых, вода от таяния снега, стекая по неледниковой части бассейна, фильтруется через слой отложений и насыщается со-

лями в той же степени, что и грунтовые воды. В ходе гидрохимических полевых исследований установлено, что фоновое значение электропроводности в ручьях, стекающих со снежников, и грунтовых водах примерно одинаково. Следовательно, минерализацию талого снега с неледниковой части бассейна можно принять равной минерализации грунтовых вод, что значительно упрощает систему уравнений [2].

Система уравнений (1) имеет решение, если исключить одну из переменных, например, принять расход грунтовых вод за постоянную величину. Более ранними наблюдениями установлено, что величина базисного стока приблизительно составляет $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ [5]. Тогда гидрограф р. Джанкуат для июня может быть разделён на три составляющие: базисный сток; сток, образованный за счёт таяния снега с ледниковой части бассейна; сток, сформировавшийся в результате таяния снега с неледниковой части бассейна (рис. 2). Доля последней составляющей закономерно уменьшается в течение рассматриваемого периода. Аналогичным образом решается и система уравнений (2) [2].

Подход 1. Расчёт по уравнению изотопного баланса для июня позволяет разделить составляющие таяния весеннего и зимнего снега

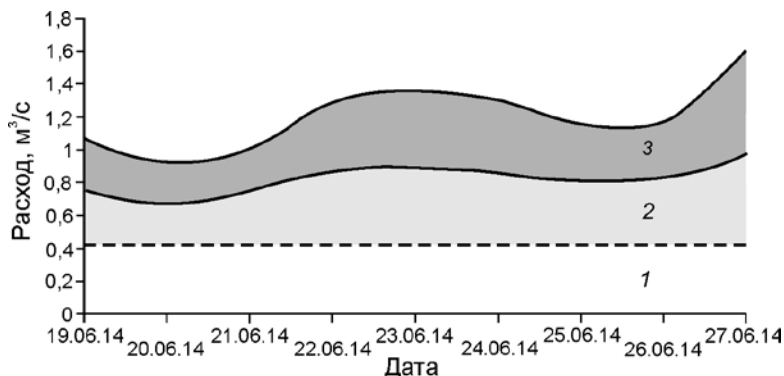


Рис. 2. Расчленение гидрографа стока р. Джанкуат за июнь 2014 г. с помощью системы уравнений (1):

1 – базисный сток; 2 – сток за счёт таяния снега с неледниковой части; 3 – сток за счёт таяния на леднике

Fig. 2. The Djankuat river hydrograph separation in June 2014 using equations (1):

1 – base flow; 2 – snow melt on non-glacial territory; 3 – snow melt on glacier

Таблица 2. Расчёт расходов компонента весеннего снега в стоке р. Джанкуат в июне 2014 г. двумя подходами*

Дата	Q , м ³ /с	Расчёт по значениям $\delta^{18}\text{O}$	Расчёт по абсолютным концентрациям	Расчёт с учётом фракционирования
09.06.2014	0,83	0,14/16,6	0,15/18,5	0,26/30,8
10.06.2014	0,83	0,13/15,5	0,16/18,6	0,26/31,0
11.06.2014	0,73	0,18/24,1	0,16/22,2	0,24/32,9
12.06.2014	0,54	0,04/7,4	0,05/8,6	0,08/14,4
13.06.2014	0,44	0,01/1,4	0,01/1,4	0,01/1,4
14.06.2014	0,50	0,02/3,6	0,03/6,1	0,05/10,2
15.06.2014	0,64	0,07/11,1	0,08/13,0	0,14/21,7
16.06.2014	0,82	0,22/26,4	0,20/24,5	0,30/36,7
17.06.2014	1,03	0,23/22,3	0,23/22,3	0,38/37,1
18.06.2014	1,15	0,28/24,5	0,28/23,9	0,46/39,8
19.06.2014	1,07	0,25/23,4	0,24/22,8	0,41/38,0
20.06.2014	0,92	0,24/26,1	0,25/26,7	0,37/40,3
21.06.2014	1,00	0,32/31,7	0,34/34,2	0,49/48,7
22.06.2014	1,29	0,39/30,3	0,41/31,6	0,63/48,5
23.06.2014	1,37	0,40/29,1	0,44/32,2	0,68/49,5
24.06.2014	1,30	0,36/27,9	0,41/31,6	0,63/48,5
25.06.2014	1,15	0,26/22,6	0,27/23,8	0,46/39,7
26.06.2014	1,19	0,27/23,0	0,29/24,2	0,48/40,4
27.06.2014	1,64	0,44/26,6	0,46/27,9	0,76/46,5
28.06.2014	1,68	0,61/36,3	0,58/34,4	0,89/53,2
29.06.2014	1,43	0,39/27,1	0,38/26,5	0,63/44,1
30.06.2014	1,34	0,24/18,2	0,26/19,5	0,49/36,7

* Q – расход в замыкающем створе; в числителе – $Q_{\text{сн. в}}$ – расход за счёт таяния весеннего снега, м³/с; в знаменателе – доля таяния весеннего снега, %.

в общем стоке (табл. 2, рис. 3). В июне существенную долю в суммарном стоке р. Джанкуат имеет сток от таяния весеннего снега благодаря сформировавшим его особым погодным условиям 2014 г. – обильному весеннему снегопаду. В рассматриваемый отрезок времени (июнь) роль этой составляющей в суммарном стоке варьирует от 10 до 35%. Для стока же, образованного от таяния зимнего снега, характерна положительная динамика: его доля в течение июня увеличивается с 20–30% для начала месяца до 50% для конца. Изменчивость подземного стока для данного периода, к сожалению, оценить невозможно, так как значение расхода этой составляющей для упрощения решения было принято за константу, но в среднем на их долю приходится 40% суммарного стока.

Авторы рассчитали изотопный баланс для июня (уравнение 2) по значениям $\delta^{18}\text{O}$ [2], а затем эта же система уравнений решалась с применением абсолютных концентраций. Поскольку в си-

стему объединяются уравнения водного и ионного баланса, логично использовать одноразмерные величины, т.е. концентрации. Это были значения изотопного состава в абсолютных величинах концентраций $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ (см. табл. 1), так как $\delta^{18}\text{O}$ и δD – величины относительные и их использование в математических расчётах может привести к погрешностям. Итоговые рассчитанные величины вклада весеннего и зимнего снега в общий сток в июне при использовании значений $\delta^{18}\text{O}$ и абсолютных концентраций различаются незначительно (см. табл. 2), а на графиках визуально неотличимы. Существует мнение, что в балансовых расчётах требуется использовать абсолютные концентрации изотопов для корректного выполнения математических вычислений. В методическом отношении это совершенно правильно. Тем не менее, погрешность расчётов в случае применения значений $\delta^{18}\text{O}$ при довольно качественных оценках вклада составляющих в общий сток можно признать незначительной.

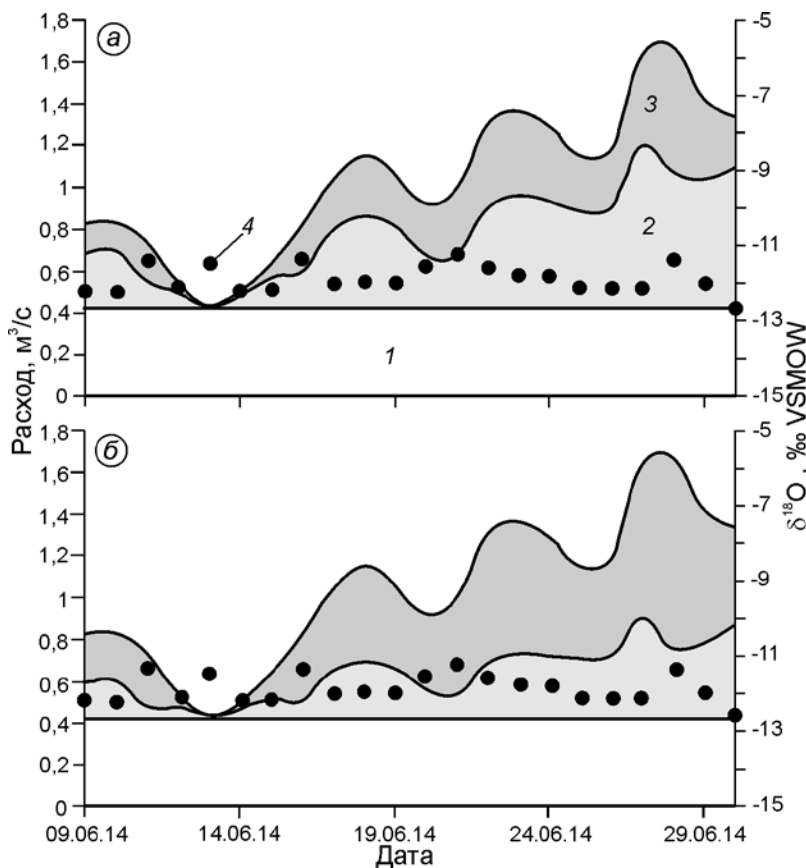


Рис. 3. Расчленение гидрографа стока р. Джанкуат за июнь 2014 г. с помощью системы уравнений (2) без учёта изотопного фракционирования (а) и с учётом изотопного фракционирования при таянии снега (б):

1 – базисный сток; 2 – сток за счёт таяния зимнего снега; 3 – сток за счёт таяния весеннего снега; 4 – значения $\delta^{18}\text{O}$ р. Джанкуат на замыкающем створе

Fig. 3. The Djankuat river hydrograph separation in June 2014 using equations (2) without isotope fractionation (a) and taking into account the isotope fractionation during snow melt (b):

1 – base flow; 2 – spring snow melt; 3 – winter snow melt; 4 – $\delta^{18}\text{O}$ values in total Djankuat river runoff

Подход 2. Важный аспект в расчётах по расчленению гидрографа – выбор значений, закладываемых в систему уравнений (см. табл. 1). Для расчёта выбраны средние изотопные значения для весеннего поверхностного снега и зимнего сезонного снега, вскрытого пройденными шурфами в разных высотных зонах ледника. Шурфы исследованы в середине июня, и в снежной толще по изотопному составу выделены слои изотопно тяжёлого весеннего снега и изотопно лёгкого зимнего снега. В точках заложения шурфов вели наблюдения за изотопной динамикой снежной толщи в течение всего периода абляции. Зафиксированы изотопная гомогенизация разреза снежной толщи от июня к августу и изменение соотношения $\delta^{18}\text{O}$ – δD в сторону уменьшения угла наклона аппроксимирующей прямой, что свидетельствует о процессах изотопного фракционирования при таянии снега и промачивании его жидкими атмосферными осадками (рис. 4).

Известно, что при таянии снежного покрова первые порции талой воды изотопно облегчены относительно среднего состава снежной

толщи примерно на 3–2‰ по $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 5) [13]. Если для середины июня, когда мощность весеннего снега на леднике всё ещё очень велика, учесть величину фракционирования, то для решения системы уравнений надо выбрать значения $\delta^{18}\text{O}$ –9‰ для весеннего снега и –17‰ для зимнего. В этом случае картина изотопного гидрографа заметно изменится (см. рис. 3, б, см. табл. 2) и доля весеннего снега составит в среднем от 30 до 50%. Но это картина характеризует лишь июнь, так как к июлю постоянно и постепенно тающий снежный покров будет поставлять талую воду последовательно изотопно утяжеляющуюся (близкую к средней величине по разрезу) и выделить весенний и зимний снег не удастся. Точнее, талая снеговая вода будет нести обобщённую изотопную характеристику.

Вероятно, к концу июля изотопный состав оставшегося снега уже не отличается от фирна и льда и ледник в изотопном отношении становится однородной системой независимо от высотных зон. Наши исследования ледника Джанкуат показали, что лёд из трещин в разных высотных зонах не имеет высотного изотопного эффек-

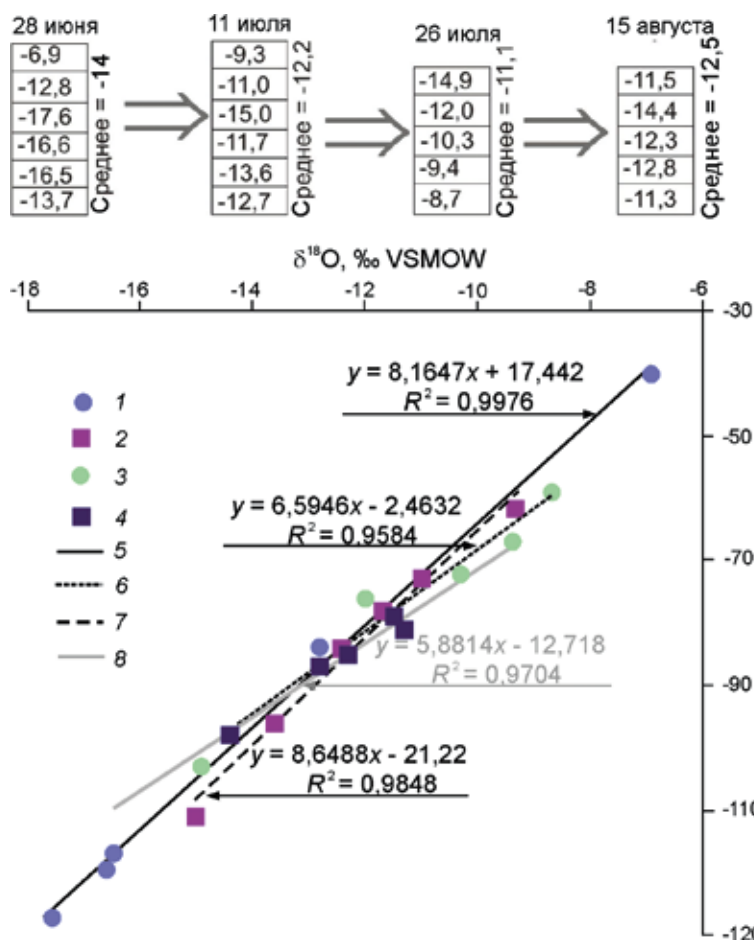


Рис. 4. Изменение значений $\delta^{18}\text{O}$ в снежных горизонтах в шурфе, заложенном в десятой зоне ледника Джанкуат, от июня к августу 2014 г. и соответствующие этим датам зависимости $\delta^{18}\text{O}$ – δD :

1 – 28 июня; 2 – 11 июля; 3 – 26 июля; 4 – 15 августа; 5 – линия линейной аппроксимации для 28 июня; 6 – линия линейной аппроксимации для 26 июля; 7 – линия линейной аппроксимации для 11 июля; 8 – линия линейной аппроксимации для 15 августа

Fig. 4. Changing of $\delta^{18}\text{O}$ values in snow pits in 10 zone of the Djankuat Glacier from June to August and corresponding to these dates $\delta^{18}\text{O}$ – δD relations:

1 – 28 June; 2 – 11 July; 3 – 26 July; 4 – 15 August; 5 – linear trend for 28 June; 6 – linear trend for 26 July; 7 – linear trend for 11 July; 8 – linear trend for 15 August

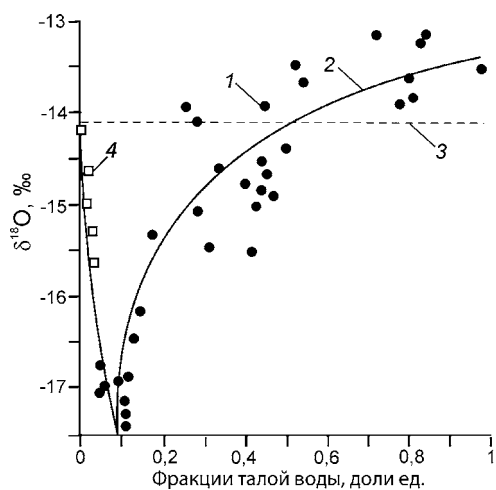


Рис. 5. Изотопное фракционирование при таянии снежного покрова, по [11]:

1 – значения $\delta^{18}\text{O}$ в талой воде; 2 – линия аппроксимации; 3 – среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ снега; 4 – самые первые образцы талой воды с обратным трендом изотопных значений

Fig. 5. The isotope fractionation during snow melt [11]: 1 – $\delta^{18}\text{O}$ values of melt; 2 – approximation line; 3 – $\delta^{18}\text{O}$ values of snow; 4 – early meltwaters that show the opposite trend of isotopic composition variation from the remaining sample

та [5]. Это же можно сказать о снежном покрове в течение периода абляции, когда тающий снег дополнительно промачивается летними дождями. Поэтому во второй половине периода абляции более важными становятся вопросы о подледниковом таянии и подледниковом резервуаре талых вод. Для ледника Джанкуат построены детальные карты подледного рельефа на основе площадной радиолокационной съёмки [3], отражающие систему цирков под ледником. Можно предположить наличие под ложем резервуара талых вод.

Выводы

Совместное решение уравнений баланса минерализации и $\delta^{18}\text{O}$ позволяет с помощью определённых допущений вычлениить составляющие весеннего, зимнего снега, таяния на леднике и неледниковой части в общем стоке р. Джанкуат в июне. Для повышения точности результатов и более детального расчленения гидрографа

стока ледниковой реки необходимо использовать большее число характеристик водного тока в качестве предикторов. Учёт изотопного фракционирования при таянии снега предложенным методом ведёт к значительным изменениям в оценке вклада составляющих в общем стоке ледниковой реки.

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

Исследования финансово поддерживались за счёт грантов Российского научного фонда (изотопные определения 2013 и 2014 гг. в снеге и льду – по проекту № 14-27-00083 Ю.К. Васильчук; изотопные определения в стоке в 2014 г. – по проекту № 14-17-00766 И.В. Токарев) и РФФИ (гидрологические исследования – по проекту № 16-35-60042 мол-а-дк Е.П. Рец; изотопные обобщения и расчёты – по проекту № 16-05-00977 Ю.Н. Чиждова, Н.А. Буданцева).

Литература

1. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во МГУ, 2000. 616 с.
2. Васильчук Ю.К., Рец Е.П., Чиждова Ю.Н., Токарев И.В., Фролова Н.Л., Буданцева Н.А., Киреева М.Б., Лошакова Н.А. Расчленение гидрографа стока реки Джанкуат, Центральный Кавказ с помощью изотопных методов // Водные ресурсы. 2016. № 4. С. 58–69.
3. Лаврентьев И.И., Кутузов С.С., Петраков Д.А., Попов Г.А., Поповнин В.В. Толщина, объём льда и подлёдный рельеф ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) // Лёд и Снег. 2014. № 4 (128). С. 7–19.
4. Михаленко В.Н. Глубинное строение ледников тропических и умеренных широт. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 320 с.
5. Чиждова Ю.Н., Буданцева Н.А., Рец Е.П., Лошакова Н.А., Поповнин В.В., Васильчук Ю.К. Вариации изотопно-кислородного состава талого стока ледника Джанкуат на Центральном Кавказе // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 2014. № 6. С. 48–56.
6. Bhatia M.P., Das S.B., Kujawinskie E.B., Henderson P., Burke A., Charette M.A. Seasonal evolution of water contributions to discharge from a Greenland outlet glacier: insight from a new isotope-mixing model // Journ. of Glaciology. 2011. V. 57. № 205. P. 929–941.
7. 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 // Hydrological Processes. 2011. V. 25. № 14. P. 2228–2236.
8. Carey S.K., Quinton W.L. Evaluating runoff generation during summer using hydrometric, stable isotope and hydrochemical methods in a discontinuous permafrost alpine catchment // Hydrological Processes. 2005. V. 19. P. 95–114.
9. Dinçer T., Payne B.R., Flowkowski T., Martinec J., Tongiorgi E. Snowmelt runoff from measurements of Tritium and Oxygen-18 // Water Resources Research. 1970. V. 6. P. 110–124.
10. Herrmann A., Stichler W. Groundwater-runoff relationships // Catena. 1980. V. 7. P. 251–263.
11. Mikhalenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Faïn X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // The Cryosphere. 2015. № 9. P. 2253–2270.
12. Ohlanders N., Rodrigues M., McPhee J. Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt // Hydrology and Earth System Sciences. 2013. V. 17. P. 1035–1050.
13. Taylor S., Feng X., Kirchner J.W., Osterhuber R., Klauß B., Renshaw C.E. Isotopic evolution of a seasonal snowpack and its melt // Water Resource Research. 2001. V. 37. № 3. P. 759–769.