

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЫ С ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ

8. Calsteren P. van Uranium-series dating applications in natural environmental science [Text] / P. van Calsteren, L. Thomas // *Earth-Science Rev.* – 2006. – V. 75. – P. 155–175.
9. Chen T. Ocean mixing and ice-sheet control of seawater $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ during the last deglaciation [Text] / T. Chen, L. F. Robinson, M. P. Beasley, L. M. Claxton, M. B. Andersen, L. J. Gregoire, J. Wadham, D. J. Fornari, K. S. Harpp // *Science*. – 2016. – V. 354. – P. 626–629.
10. Jiráková H. Insights into palaeorecharge conditions for European deep aquifers [Text] / H. Jiráková, F. Huneau, H. Celle-Jeanton, Z. Hrkál, P. Le Coustumer // *Hydrogeology J.* – 2011. – V. 19. – P. 1545–1562.
11. Ku T. L. An evaluation of the $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ method as a tool for dating pelagic sediments [Text] / T. L. Ku // *J. Geophys. Res.* – 1965. – V. 70(14). – P. 3457–3474.
12. Li T. Deep-sea coral evidence for enhanced subglacial discharge from Antarctica during the last deglaciation [Text] / T. Li, L. F. Robinson, G. A. MacGilchrist, T. Chen, W. B. Rae J., J. A. Stewart, A. Burke, M. Wang, G. Li, J. Chen // *Sixth Xiamen Symposium on Marine Environmental Sciences*. – January 9-12, 2023. – Xiamen, China. – Poster GEO-03\INT-10-03.
13. Tokarev I. Non-Equilibrium Uranium as an Indicator of Global Climate Variations–The World Ocean and Large Lakes [Text] / I. Tokarev, E. Yakovlev // *Water*. – 2021. – V. 13. – P. 3514. DOI:10.3390/w13243514.
14. Yakovlev E. Isotope Signs ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, ^2H , ^{18}O) of Groundwater: An Investigation of the Existence of Paleo-Permafrost in European Russia (Pre-Volga Region) [Text] // E. Yakovlev, I. Tokarev, S. Zykov, S. Iglovsky, N. Ivanchenko // *Water*. – 2021. – V. 13. – P. 1838. DOI:10.3390/w13131838.

ДИАГНОСТИКА КОМПОНЕНТОВ СТОКА МАЛОГО ГОРНОГО ВОДОСБОРА С ОЛЕДЕНЕНИЕМ НА БАЗЕ ДАННЫХ ОБ ИЗОТОПНОМ СОСТАВЕ ВОДЫ (БАССЕЙН Р. АЛА-АРЧА, СЕВЕРНЫЙ СКЛОН КИРГИЗСКОГО ХРЕБТА)

Токарев И.В.¹, Яковлев Е.Ю.², Ерохин С.А.³, Тузова Т.В.³, Дружинин С.В.², Пучков А.В.²

¹Научный парк ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУ науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, г. Архангельск, Россия

³Институт водных проблем и гидроэнергетики национальной Академии Наук Кыргызской Республики,
г. Бишкек, Кыргызстан

Дважды (в августе и сентябре 2022 г.) выполнено масштабное (105 точек) опробование вод бассейна р. Ала-Арча (площадь бассейна 233 км², средняя высота водосбора 3290 м н.у.м., среднемноголетний расход воды в реке – 4,17 м³/с, длина – 78 км [3]), ее притоков и родников в ее долине с целью расчленения источников формирования стока на базе данных о распространенности изотопов дейтерия ($\delta^2\text{H}$) и кислорода-18 ($\delta^{18}\text{O}$). Пробы отбирались в 10 мл пластиковые толстостенные виалы с герметично завинчивающимися крышками, на месте определялась температура (t) и электропроводность воды (ЕС), а также редокс (Eh) и водородный (pH) потенциалы. Пробы хранились в холодильнике при +4°C до пересылки и после поступления в лабораторию. Измерения изотопного состава воды выполнены на лазерном анализаторе Picarro L2130i с использованием стандартов USGS45 и USGS46.

В целом, обнаруживается нормальное для поверхностных и подземных вод горных стран изменение измеренных показателей, в зависимости от высоты местности. По мере подъема в горы:

- падает температура воды и ее электропроводность (рис. 1a);
- уменьшается концентрация дейтерия и кислорода-18 (происходит облегчение изотопного состава воды, что выражается в появлении все более отрицательных величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ (рис. 1b).

Судя по уравнению аппроксимации для изменения температуры воды в р. Ала-Арча с высотой (рис. 1 а), снеговая линия располагается на высоте около 3600 м над уровнем моря, что соответствует натурным наблюдениям [1]. Для редокс и водородного потенциалов зависимость от высоты менее выражена, однако заметно смещение pH в более кислую сторону и Eh в сторону увеличения положительных значений при подъеме отметок местности.

На указанные тренды накладываются вариации, обусловленные наличием нескольких источников формирования водного баланса и изотопно-химического состава воды (рис. 2).

Пространственный характер изменения изотопного состава поверхностных и подземных вод связан с наличием нескольких источников формирования стока, включая:

- атмосферные осадки;
- талый сток от современного оледенения (сезонный снег→фирн→лед);
- талый сток от древнего оледенения (захороненный под плащом обломочных отложений лед и/или мерзлота);
- термальные воды.

Разработка точек по вкладу факторов формирования стока возможна на базе сравнения изотопных и физико-химических параметров воды (рис. 2).

Изменения изотопного состава воды подчиняются линейной зависимости (рис. 2a). Это обычная картина при отсутствии значимого влияния вторичных факторов, изменяющих изотопный состав воды в ходе стока, в первую очередь, испарения и взаимодействия с породами (кислородный сдвиг). Уравнение линии аппроксимации изотопного состава воды (уравнение на диаграмме Рисунок 2 а) близко к параметрам локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ), найденной по данным, полученным в проекте МНТЦ КР-330.3 [2].

СЕКЦИЯ 3. ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ПРИРОДНЫХ ВОД

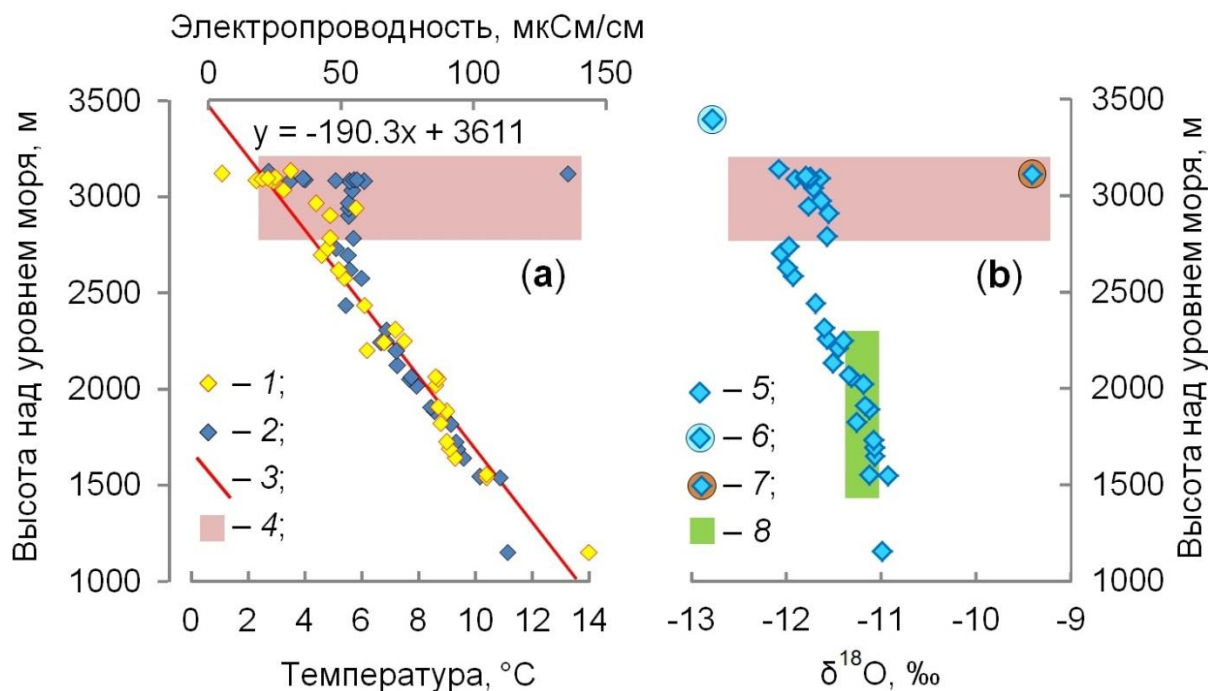


Рис. 1. Изменение температуры и электропроводности (а), а также изотопного состава (б) воды реки Ала-Арча (северный склон Киргизского хребта), в зависимости от высоты местности (сентябрь 2022 г.): 1 – температура; 2 – электропроводность; 3 – линия аппроксимации для данных по температуре воды (уравнение на диаграмме); 4 – высотная зона, в пределах которой наблюдается аномалия по температуре, электропроводности и изотопному составу воды; 5 – изотопный состав воды; 6 – проба характеризующая «чистый» компонент современного ледникового стока; 7 – проба, характеризующая «аномальный» компонент; 8 – изотопный состав атмосферных осадков в пределах водосбора реки Ала-Арча по [5]

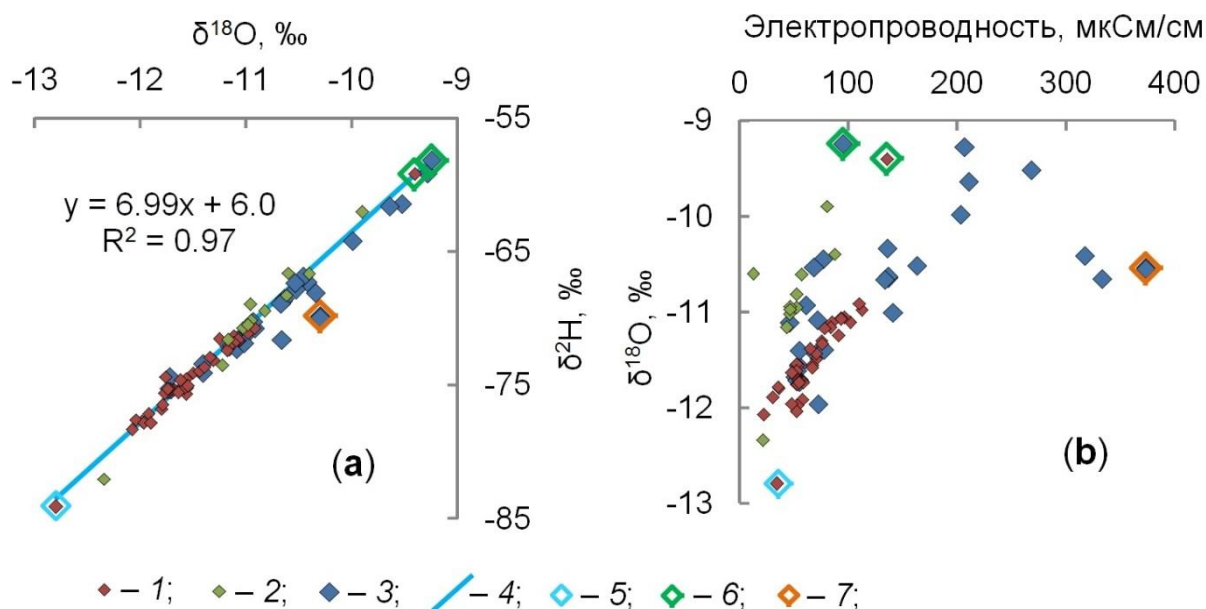


Рис. 2. Изотопный состав поверхностных и подземных вод в бассейне реки Ала-Арча (северный склон Киргизского хребта, сентябрь 2022 г.) (а), а также сравнение изотопного состава кислорода с электропроводностью воды (б): 1 – р. Ала-Арча; 2 – р. Адзгине (наиболее крупный приток); 3 – родники; 4 – линия аппроксимации для всех данных по изотопному составу воды (уравнение на диаграмме); 5 – проба характеризующая «чистый» компонент современного ледникового стока; 6 – проба, вероятно характеризующая компонент, обусловленный таянием древнего оледенения (захороненный под плащом обломочных отложений лед и/или мерзлота); 7 – проба, вероятно характеризующая термальную воду

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДЫ С ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ

Две крайние точки на диаграмме (рис. 2а) однозначно определяют:

- талый сток от современного оледенения с наиболее легким изотопным составом (проба льда из языка ледника, пункт 5 на указанном рисунке);
- талый сток от древнего оледенения или, скорее, талой мерзлоты с аномально тяжелым для высоты опробования изотопным составом (проба погребенного льда в верховьях р. Ала-Арча, пункт 6 на указанном рисунке).

Погребенный лед, изотопный и химический состав которого принят в качестве характеристик древнего оледенения/мерзлоты, имеет аномально тяжелый для высоты опробования изотопный состав. Обнаруженный эффект изотопного утяжеления без следов вторичного неравновесного фракционирования, скорее всего, является следствием того, что вода (атмосферные осадки), из которой сформировался данный лед, поступила в подземную гидросферу в предыдущий период потепления (то есть, должна была быть изотопически достаточно тяжелой). Поскольку подземный сток происходит с существенно меньшими скоростями, чем поверхностный, то при промерзании разреза этот унаследованный изотопный состав был «заморожен» до настоящего времени. В настоящее время таяние мерзлоты могло быть инициировано потеплением климата.

Сравнение изотопного состава кислорода с минерализацией воды позволяет надежно идентифицировать третий источник формирования стока – термальные воды. Этот компонент отличается, как обычно, большей минерализацией и повышенной, относительно бытовой, температурой (проба воды из родника). Вероятнее всего обнаруженная разгрузка – это фланговый фрагмент гидротермальной системы, центр которой находится в соседних долинах рек Аламедин и Иссык-Ата [1; 4]. Этот компонент стока пока охарактеризован плохо и вода родника, которая принята для параметризации указанного конечного члена, в свою очередь, почти наверняка является смесью глубинной компоненты и воды приповерхностной зоны гипергенеза. Вполне возможно, что имеется несколько активных участков выхода термальных вод. На это указывает наличие участка р. Ала-Арча с повышенной минерализацией и температурой (рис. 1а). Вполне возможно также, что разгрузка термальной воды активизирует таяние мерзлоты.

Воды приповерхностной зоны разреза (грунтовый горизонт, связанный с рыхлыми обломочными породами, и воды из зоны трещиноватости коренных пород) должны формироваться под значительным влиянием местных атмосферных осадков. Это объясняет расположение части точек, характеризующих воду в р. Ала-Арча в ее нижнем течении, в области местных метеорных осадков (рис. 1б).

Таким образом, полезность данных об изотопном составе воды для определения составляющих стока реки в зоне развития современного оледенения применительно к р. Ала-Арча доказана. В дальнейшем, использование данных об изотопном составе урана ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) должно улучшить понимание характеристик процессов, управляющих формированием стока в данных условиях.

Задачами будущих наблюдений относительно наблюдений за изотопным составом воды являются:

- мониторинг состава атмосферных осадков;
- более детальная характеристика современного и древнего оледенения/мерзлоты;
- поиски и опробование выходов термальных подземных вод;
- мониторинг изотопного состава стока р. Ала-Арча в нижнем течении для расчленения годового гидрографа стока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №20-77-10057 «Диагностика деградации мерзлоты на базе изотопных трассеров ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $\delta^{18}\text{O}+\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}+^{14}\text{C}$)».

Литература

1. Ерохин С. А. Оценка изменений в развитии горных озер и их прорывоопасности в условиях изменения климата [Текст] / С. А. Ерохин, Ш. Э. Усупаев, Т. В. Тузова, В. В. Загинаев // Водные и гидроэнергетические ресурсы Кыргызстана в условиях изменения климата (Коллективная монография, посвященная основателю Института водных проблем и гидроэнергетики НАН КР академику НАН КР и РТ Маматканову Д.М.). – Бишкек. – 2021. – Гл. 2. – С. 49–150.
2. Изучение гидродинамики озера Иссык-Куль изотопными методами [Текст] / МНТЦ, НАН КР. – Бишкек, 2007. – Часть 1. – 160 с.
3. Калашникова О. Ю. Влияние климатических изменений на сток и оледенение бассейна реки Ала-Арча за период 1915-2018 гг. [Текст] / О. Ю. Калашникова, Эсенаман уулу Мухаммед, Р. А. Усубалиев // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2019. – № 4. – С. 36-41.
4. Чалов П. И. Изотопные параметры вод разломов земной коры в сейсмически активной зоне [Текст] / П. И. Чалов, Т. В. Тузова, В. М. Алехина. – Фрунзе: Илим, 1980. – 105 с.
5. He Z. Comparing Bayesian and traditional end-member mixing approaches for hydrograph separation in a glacierized basin. Hydrol [Text] / Z. He, K. Unger-Shayesteh, S. Vorogushyn, S.M. Weise, D. Duethmann, O. Kalashnikova, A. Gafurov, B. Merz // Earth Syst. Sci. – 2020. – V. 24. P. 3289–3309.