



## СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ ВОДЫ КАК ИНДИКАТОР ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В СПЛОШНОЙ КРИОЛИТОЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

✉ Лебедева Л.С.<sup>1</sup>, Павлова Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия  
✉ lyudmila.slebedeva@gmail.com

Стабильные изотопы кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta\text{D}$ ) являются индикатором источников питания и путей движения поверхностных и подземных вод, позволяя количественно оценить вклад снегового и дождевого питания, роль испарительного фракционирования и участие озёрных вод в питании подземных вод. В работе представлены результаты комплексного изотопного исследования озёр, атмосферных осадков, источников и скважин подземных вод в условиях сплошной криолитозоны Центральной Якутии (бестяхская и тюнгюлюнская террасы р. Лены). Построена локальная линия метеорных вод и линии испарения, по которым выделены группы вод с различной степенью влияния испарительного фракционирования и реконструирован изотопный состав исходной (до испарения) воды. На основе двухкомпонентного изотопного баланса с использованием изотопных составов дождя и снега оценены доли зимних и летних осадков в питании озёр и подземных вод. Показано, что озёра аккумулируют преимущественно снеговое питание ( $\approx 66\%$ ), тогда как надмерзлотные водоносные горизонты имеют изотопный состав, близкий к среднему по атмосферным осадкам ( $\approx 40\%$  снега и  $60\%$  дождя). Для ряда крупных источников межмерзлотных подземных вод выявлен как повышенный вклад снегового питания, так и выраженный испарительный сигнал, что свидетельствует о важной роли озёрно-таликовых систем в формировании их стока. Сопоставление со сведениями о строении таликов и гидрогеологических разрезов позволяет предложить концептуальную схему взаимодействия озёр, над- и межмерзлотных водоносных горизонтов в пределах бестяхской террасы р. Лены, уточняя современные представления о мерзлотно-гидрогеологической обстановке Центральной Якутии.

**Ключевые слова:** стабильные изотопы воды, надмерзлотные и межмерзлотные воды, водоносные талики, испарительное фракционирование, Центральная Якутия

**Введение.** Стабильные изотопы воды ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) широко используются для трассировки источников и путей движения воды в гидрологических системах, так как их фракционирование при фазовых переходах отражает условия выпадения осадков, процессы испарения и смешения вод [Dansgaard, 1964; Gat, 1996; Clark, Fritz, 1997]. В сплошной криолитозоне, где многолетнемёрзлые породы одновременно ограничивают инфильтрацию и направляют подземный сток по таликовым зонам, изотопные методы являются полезным инструментом, позволяющим реконструировать схемы питания и подповерхностной циркуляции [Gibson et al., 2015; Walvoord, Kurylyk, 2016]. Деградация мерзлоты приводит к перестройке водного баланса и изменению источников питания подземных и поверхностных вод, что фиксируется как по стабильным, так и по радиоактивным изотопам [Gibson et al., 2016; Ala-aho et al., 2018; Wan et al., 2020; Wang et al., 2018]. Для Центральной Якутии существуют детальные гидрогеологические и гидрохимические исследования уникальных крупнодебитовых источников подземных вод бестяхской террасы р. Лены [Анисимова, 1981; Анисимова, Павлова, 2014; Павлова и др., 2016, 2020; Семерня и др., 2018], однако изотопный состав воды исследовался фрагментарно [Галанин и др., 2019]. Цель настоящего исследования – на основе анализа стабильных изотопов воды ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) и двухкомпонентного изотопного баланса количественно оценить вклад снегового и дождевого питания в формировании подземных и озёрных вод бестяхской и тюнгюлюнской террас Лены и выявить роль озёрно-таликовых систем в формировании стока крупнейших межмерзлотных источников. Основные задачи включали: (1) построение локальной линии метеорных вод и линий

испарения для различных типов вод; (2) идентификацию испарительного сигнала в озёрах, над- и межмерзлотных подземных водах; (3) оценку долей дождя и снега в питании озёр, надмерзлотных водоносных горизонтов и источников; (4) сопоставление полученных результатов с геологическим строением территории и гидрохимическими особенностями исследуемых поверхностных и подземных вод, предложенными в предыдущих работах.

**Район исследований и гидрогеологические условия.** Район исследования охватывает  $\sim 400$  км<sup>2</sup> правобережья р. Лена, где на Тюнгюлюнской надпойменной террасе реки выявлены водоносные надмерзлотные талики, а на Бестяхской террасе – надмерзлотно-межмерзлотные водоносные горизонты. Террасы сложены мелко- и среднезернистыми песками с галечником в основании, на Тюнгюлюнской террасе в толще песков встречаются прослои супесей и суглинков. На юге, в бассейнах рек Лютенга и Менда, четвертичные отложения перекрывают кембрийские карбонатные породы, на севере – юрские песчаники. Типичными формами рельефа являются эоловые гряды высотой 3–5 м, и мелководные озера (глубина  $\leq 4$  м). Мощность многолетнемерзлых пород составляет 200–400 м. Надмерзлотно-межмерзлотный водоносный комплекс содержит пресные воды. Формирование их ресурсов происходит за счет надмерзлотных грунтовых вод субаэральных и подозерных субаквальных таликов, а разгрузка осуществляется в озера (Юнгестях, Улахан-Тengютте) и субаэрально в виде крупных родников (Улахан-Тарын, Булус, Ерюю и др.) с суммарным дебитом  $>43\ 000$  м<sup>3</sup>/сут. Подмерзлотные воды слабосолоноватые с минерализацией 1,2–3,2 г/дм<sup>3</sup>. Их частичная разгрузка происходит через сквозные талики, развитые под крупными озерами и р. Лена. Климат района резко континентальный, со среднегодовой температурой воздуха  $-9,2$  °С (по данным метеорологической станции Якутск за 1951–2020 гг.) и годовым количеством осадков 239 мм, из которых в среднем 68 % выпадает в виде дождя. Это соотношение важно при интерпретации изотопных данных, поскольку позволяет сопоставить доли снега и дождя в подземных водах с их долями в общем балансе осадков.

**Материалы и методы.** Изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) измерен для вод озёр Эльген, Абага, Кубалах-Сорбат, Хатыльма, Маньчия, Босогор, Хотун-Маньчия, надмерзлотных вод таликов в скважинах на водосборе р. Шестаковка, источников межмерзлотных вод (Булус, Улахан-Тарын, Ерюю, Суллар, Юнгестях), скважинах в зонах питания источников, а также атмосферных осадков (снег и дождь) и данных по изотопному составу осадков в Якутске из базы IAEA/WMO. Анализы выполнены в лаборатории стабильных изотопов Института мерзлотоведения СО РАН (Якутск) на анализаторе Picarro L2140i. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  приводятся относительно Венского стандарта океанической воды (VSMOW) в промилле (‰). Погрешность измерений составляет 0,004–0,168‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и 0,004–0,298‰ для  $\delta\text{D}$ .

На основании данных по осадкам, озёрам и подземным водам построены связи  $\delta\text{D}$ – $\delta^{18}\text{O}$ . Локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) аппроксимирует изотопный состав атмосферных осадков. Для озёрных вод получена линия испарения. Точки подземных вод и озёр, отклоняющиеся вправо от ЛЛМВ вдоль линий с наклоном менее 8, интерпретируются как подверженные испарительному фракционированию. Точка пересечения ЛЛМВ и линии испарения озёр и части подземных вод соответствует изотопному составу исходной, ещё не испарившейся воды [Maule *et al.*, 1994]. В нашем случае это примерно  $\delta^{18}\text{O} = -25\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -190\text{‰}$ , что близко к среднему составу между снегом и дождём и отражает смешение этих компонентов в питании озёр и связанных с ними водоносных горизонтов.

Вклад снега и дождя оценивался методом двухкомпонентного изотопного баланса [Maule *et al.*, 1994; Jasechko, 2019]. В качестве конечных членов использованы средневзвешенные (с учетом количества осадков) годовые изотопные составы дождя и снега в Якутске по данным IAEA/WMO. Осадки с отрицательной температурой воздуха отнесены к снегу, с положительной – к дождю. Полученные значения хорошо согласуются с усреднёнными результатами собственных измерений. Доля снегового питания для

каждого водного объекта определялась из решения системы уравнений изотопного баланса по  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  [Maule *et al.*, 1994; Jasechko, 2019]. Для объектов с выраженным испарительным сигналом использовались реконструированные составы исходной воды на пересечении ЛЛМВ и линии испарения.

**Результаты.** Изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) изучаемых природных вод представлен на рис. 1А. Снежный покров обладает наиболее легким изотопным составом, тогда как дождевая вода – наиболее тяжелым. Средние значения их изотопного состава  $\delta^{18}\text{O} = -15.35\text{\textperthousand}$ ,  $\delta\text{D} = -120.0\text{\textperthousand}$  и  $- \delta^{18}\text{O} = -32.9\text{\textperthousand}$ ,  $\delta\text{D} = -249.6\text{\textperthousand}$  соответственно. Пробы озер демонстрируют сигнал испарительного фракционирования различной интенсивности. Озера можно расположить в порядке возрастания эффекта: Эльген, Абага, Кубалах-Сорбат, Хатылым, Манчия, Босогор, Хотун-Манчия, Хакты-Кюель, Унгкюр и Чай-Кюель. Их изотопный состав описывается уравнением  $\delta\text{D} = 5.4 \cdot \delta^{18}\text{O} - 56.6$ . Наклон регрессии ( $\approx 5.5$ ) характерен для значительного испарительного фракционирования в гипераридных регионах, таких как Тибетское нагорье и Центральная Якутия [Галанин и др., 2019]. Линия аппроксимации изотопного состава озер пересекает ЛЛМВ в области  $\delta^{18}\text{O} = -25\text{\textperthousand}$ ,  $\delta\text{D} = -190\text{\textperthousand}$ , что близко к среднему значению между снегом и дождем – основными источниками питания озер.

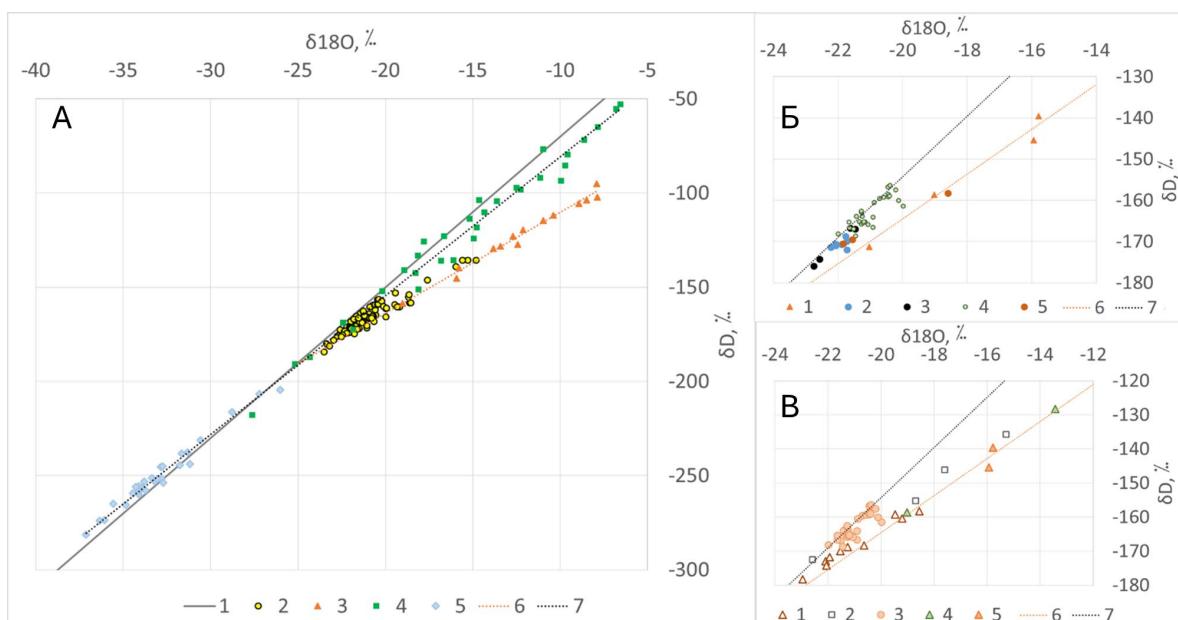


Рис. 1. А – изотопный состав ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) всех исследуемых природных вод: 1 – глобальная линия метеорных вод, 2 – подземные воды, 3 – озера, 4 – дожди, 5 – снежный покров, 6 – линия испарения, 7 – ЛЛМВ; Б – изотопный состав источника Булус и надмерзлотных вод: 1 – озера, 2 – основной выход источника Булус, 3 – зона питания источника Булус, 4 – надмерзлотные воды, 5 – верхний выход источника Булус, 6 – линия испарения, 7 – ЛЛМВ; В – изотопный состав источника Ерюю: 1 – источник Ерюю, 2 – зона питания источника Ерюю, 3 – надмерзлотные воды, 4 – оз. Эльген, 5 – оз. Абага, 6 – линия испарения, 7 – ЛЛМВ.

Средний изотопный сигнал подземных вод составляет  $\delta^{18}\text{O} = -21.0\text{\textperthousand}$ ,  $\delta\text{D} = -165.6\text{\textperthousand}$ , что ближе к дождевой воде, чем к снегу. Некоторые пробы подземных вод также указывают на испарительное фракционирование. Надмерзлотные воды бассейна р. Шестаковка расположены на ЛЛМВ ближе к дождевой воде, чем к снегу со средними значениями  $\delta^{18}\text{O} = -21.2\text{\textperthousand}$ ,  $\delta\text{D} = -164.7\text{\textperthousand}$ . Родники Кетюрен и Находка изотопно схожи с надмерзлотными водами. Изотопный состав воды основного выхода родника Булус и надмерзлотных вод в его зоне питания также тяготеет к ЛЛМВ, но несколько ближе к снеговой воде, чем надмерзлотные воды (рис. 1 Б). Верхний выход родника Булус в октябре и июне изотопно схож с основным выходом, тогда как в сентябре подвержен испарительному фракционированию. Сигнал испарительного фракционирования

присутствует в пробах родника Ерюю и в воде из скважины в его зоне питания, причем в скважине эффект выражен сильнее (рис. 1В). Линейная аппроксимация изотопного состава родника Ерюю пересекает ЛЛМВ между точкой пересечения с линией озер и группой надмерзлотных вод. Рядом расположены пробы озер Абага и Эльген (рис. 1В), которые, вероятно, являются основными источниками питания источника. Среди всех озер эти два наименее подвержены испарительному фракционированию. Наибольшее влияние испарительного обогащения среди всех подземных вод прослеживается в пробах родника Суллар. Изотопный состав озера-родника Юнгестях формирует линию, почти параллельную изотопной линии озер, но несколько выше. Максимальный эффект испарения наблюдается в октябре, а в марте он практически отсутствует. Источники подземных вод в долине руч. Улахан-Тарын образуют несколько групп. В водах родников группы Е проявлен слабый испарительный эффект, они изотопно близки к межмерзлотным водам из скважины у озера Хатылым. Источники группы С ближе к ЛЛМВ, а в водах групп А и В испарительный эффект почти отсутствует.

По результатам расчета двухкомпонентного изотопного баланса выяснено, что в среднемноголетнем разрезе озера получают около 66 % воды из снега и около 34 % из дождя. Надмерзлотные водоносные горизонты характеризуются долей снегового питания около 40 % и дождевого – около 60 %, что близко к долям твердых и жидких осадков (32 и 68 % соответственно). Межмерзлотные источники Улахан-Тарын и Юнгестях имеют наиболее высокий вклад снегового питания (до 58 %), источники Ерюю и часть участков разгрузки также обогащены снеговой составляющей. Источник Булуус получает около 45 % воды из снега, что сопоставимо с надмерзлотными водами. Скважины в зонах питания источников в целом демонстрируют меньшую долю снегового питания (<49 %), за исключением скважины Хатылым, где зафиксировано повышенное содержание снеговой воды, согласующееся с влиянием озёр. Испарительный сигнал в межмерзлотных источниках наиболее выражен в тёплый период – с июня по октябрь; зимой и ранней весной большинство источников возвращается ближе к ЛЛМВ.

**Обсуждение.** Сочетание повышенного вклада снеговой воды и выраженного испарительного сигнала в водах источников Ерюю, Улахан-Тарын С и Е, Юнгестях и Суллар указывает на ключевую роль озёрно-таликовых систем в их питании. Весной снеготальные воды сравнительно быстро достигают озёр по поверхностным и подповерхностным путям стока с минимальными потерями на испарение [Ohta *et al.*, 2008]. В течение лета испарение над озёрной поверхностью концентрирует тяжёлые изотопы, формируя характерную линию испарения. Через подозерные талики часть этих вод просачивается в межмерзлотные водоносные горизонты, сохраняя испарительный сигнал и высокую долю снега. Для источника Ерюю это согласуется с гидрогеологическими данными о развитии таликовой зоны, вытянутой вдоль цепочки озёр Эльгэн, Абага и Босогор [Семерня и др., 2018]. Аналогичная картина характерна и для озера-источника Юнгестях, под которым выявлен мощный (>100 м) талик и восходящий поток подземных вод [Pavlova *et al.*, 2019].

Для надмерзлотных водоносных горизонтов среднемноголетнее соотношение вклада снега и дождя ( $\approx 40\%$  и  $60\%$ ) близко к соотношению твердых и жидких атмосферных осадков (32% и 68%). Это означает, что для локально развитых надмерзлотных таликовых вод вклад снега в пополнение подземных вод не превышает его долю в годовом балансе осадков, в отличие от многих других регионов Северного полушария, где зимние осадки непропорционально важны для питания подземных вод [Jasechko, 2019]. Напротив, озёра и связанные с ними межмерзлотные источники получают увеличенный вклад снегового питания, что отражает специфику поступления талых вод в озёрно-таликовые системы при минимальных потерях на испарение весной и гораздо более значительных потерях летом.

**Заключение.** Построенные ЛЛМВ и линии испарения для озёр и подземных вод Центральной Якутии показали, что большинство озёр и подземные воды ряда источников

(Ерюю, Суллар, Юньюестях, Улахан-Тарын С и Е) испытывают испарительное фракционирование, тогда как воды надмерзлотных таликов и некоторых источников (Булуус, Улахан-Тарын А и В) лишены испарительного сигнала. Расчеты двухкомпонентного изотопного баланса показали, что озёра аккумулируют преимущественно снеговое питание ( $\approx 66\%$ ), а надмерзлотные водоносные горизонты получают воду в пропорциях, близких к общей структуре атмосферных осадков ( $\approx 40\%$  снега, 60% дождя). Источники межмерзлотных вод Улахан-Тарын, Ерюю и Юньюестях характеризуются повышенным вкладом снегового питания (до 58 %) и присутствием испарительного сигнала, что свидетельствует о ведущей роли озёрно-таликовых систем в их питании. Источник Булуус занимает промежуточное положение, будучи связанным как с надмерзлотными таликами, так и с межмерзлотными водоносными горизонтами. Надмерзлотные талики в бассейне р. Шестаковка не имеют испарительного сигнала. Полученные результаты могут служить основой для прогноза реакции озёрно-таликовых систем и подземных вод Центральной Якутии на дальнейшее потепление климата и могут быть использованы при оценке устойчивости источников водоснабжения и уязвимости водоносных горизонтов к загрязнениям.

**Финансирование.** Работа выполнялась за счёт проекта НИОКТР 122012400106-7 “Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования”.

## ЛИТЕРАТУРА

*Анисимова Н.П.* Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.

*Анисимова Н.П., Павлова Н.А.* Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 189 с.

*Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Павлова Н.А.* Стабильные изотопы  $^{18}\text{O}$  и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 333–354. doi: 10.15356/2076-6734-2019-3-414

*Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С., Шепелев В.В.* Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 2. С. 216–227. doi: 10.7868/S0321059616020139

*Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А. и др.* Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 391–401. doi: 10.31857/S0321059620040124

*Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И.* Гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюю (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 2. С. 29–38. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38)

*Ala-aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasypov R.M., Loiko S., Tetzlaff D.* Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost-influenced landscape // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 556. P. 279–293. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.024

*Clark I.D., Fritz P.* Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, 1997. 342 p. doi: 10.1201/9781482242911

*Dansgaard W.* Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16. Is. 4. P. 436–468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x

*Gat J.R., Gonfiantini R.* Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA Technical Reports Series, No. 210. Vienna, 1981. 339 p.

Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y. Higher tritium concentrations measured in permafrost thaw lakes in northern Alberta // *Hydrological Processes*. 2016. Vol. 30. P. 245–249. doi:10.1002/hyp.10599

Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y., Vitt D.H. Runoff to boreal lakes linked to land cover, watershed morphology, and permafrost thaw: A 9-year isotope mass balance assessment // *Hydrological Processes*. 2015. Vol. 29. P. 3848–3861. doi:10.1002/hyp.10502

Jasechko M. Global isotope hydrogeology: review // *Reviews of Geophysics*. 2019. Vol. 57. P. 835–965. doi:10.1029/2018RG000627

Maule C.P., Chanasyk D.S., Muehlenbachs K. Isotopic determination of snow-water contribution to soil water and groundwater // *Journal of Hydrology*. 1994. Vol. 155. Is. 1-2. P. 73–91. doi: 10.1016/0022-1694(94)90159-7

Ohta T., Maximov T.C., Dolman A.J., Nakai T., van der Molen M.K., Kononov A.V., Maximov A.P., Hiyama T., Iijima Y., Moors E.J., Tanaka H., Toba T., Yabuki H. Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998–2006) // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148. Is. 12. P. 1941–1953. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.04.012

Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V. Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. Article 07024. doi: 10.1051/e3sconf/20199807024

Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15. Is. 6. doi:10.2136/vzj2016.01.0010

Wan C., Li K., Zhang H., Yu Z., Yi P., Chen C. Integrating isotope mass balance and water residence time dating: Insights of runoff generation in small permafrost watersheds from stable and radioactive isotopes // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2020. Vol. 326. P. 241–254. doi:10.1007/s10967-020-07315-1

Wang W., Wu T., Zhao L., Li R., Zhu X., Wang W., Yang S., Qin Y., Hao J. Exploring the ground ice recharge near permafrost table on the central Qinghai–Tibet Plateau using chemical and isotopic data // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 560. P. 220–229. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.03.034

## **STABLE WATER ISOTOPES AS INDICATORS OF GROUNDWATER AND SURFACE WATER SOURCES IN CONTINUOUS PERMAFROST OF CENTRAL YAKUTIA**

*Lebedeva L.S., Pavlova N.A.*

Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

Stable oxygen and hydrogen isotopes ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) provide powerful tracers of water sources and flow paths in permafrost terrain, where groundwater circulation is strongly constrained by frozen ground. We present a synthesis of isotope measurements from lakes, suprapermanfrost talik aquifers, intrapermafrost springs and recharge wells in the Bestyakh and Tyungyulyun terraces of the Lena River near Yakutsk, Eastern Siberia. A local meteoric water line and evaporation lines for lakes and groundwater were derived, allowing us to identify waters affected by evaporation and to reconstruct the isotopic composition of initial, pre-evaporation water. Using a two end-member isotope mass balance with amount-weighted annual mean compositions of rain and snow from Yakutsk, we quantified the relative contributions of summer rain and winter snow to lake and groundwater recharge. Lakes receive predominantly snowmelt water (~66 %), whereas suprapermanfrost aquifers have a composition close to the climatological proportion of precipitation (~40 % snow and 60 % rain). Several major intrapermafrost springs (Eryuyu, Ulakhan-Taryn, Yunugestyakh, Sullar) show both enhanced snow contributions and strong evaporative signatures, indicating a dominant role of lake–talik systems in their recharge. In contrast, the Buluuus spring and small springs such as Mechta, Nakhodka and Ketyuren are mainly fed by relatively young precipitation-sourced waters with little evaporation imprint. Joint interpretation of stable isotopes, talik geometry and previously published tritium-based age estimates suggests a coherent conceptual model of lake–groundwater interactions in continuous permafrost, with important implications for the resilience of water resources under climate warming.

Keywords: stable water isotopes; suprapermafrost and intrapermafrost groundwater; talik aquifers; lake-groundwater interaction; Central Yakutia

## REFERENCES:

- Anisimova N.P. Cryohydrochemical features of the permafrost zone. Nauka, Novosibirsk, 1981, 153 p. (in Russian).
- Anisimova N.P., Pavlova N.A. Hydrogeochemical studies of the permafrost zone in Central Yakutia. Academic Publishing House “Geo”, Novosibirsk, 2014, 189 p. (in Russian).
- Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S., Eyrikh A.N., Pavlova N.A. Stable isotopes of  $^{18}\text{O}$  and D in key components of water flows and the permafrost zone of Central Yakutia (Eastern Siberia) // Led i Sneg [Ice and Snow]. 2019. Vol. 59. Is. 3. P. 333–354. doi:10.15356/2076-6734-2019-3-414 (in Russian).
- Pavlova N.A., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., Shepelev V.V. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia // Water Resources. 2016. Vol. 43. Is. 2. P. 353–363. doi:10.1134/S0097807816020135
- Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A. et al. Hydrochemistry of groundwater of suprapermafrost–intrapermafrost runoff at their discharge sites (Central Yakutia) // Water Resources. 2020. Vol. 47. Is. 4. P. 581–590. doi: 10.1134/S0097807820040119
- Semernya A.A., Gagarin L.A., Bazhin K.I. Hydrogeological features of the distribution area of the intrapermafrost aquifer near the Eryuyu spring (Central Yakutia) // Kriosfera Zemli [Earth’s Cryosphere]. 2018. Vol. 22. Is. 2. P. 29–38. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38) (in Russian).
- Ala-aho P., Soulsby C., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Manasypov R.M., Loiko S., Tetzlaff D. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost-influenced landscape // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 556. P. 279–293. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.024
- Clark I.D., Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton, 1997. 342 p. doi: 10.1201/9781482242911
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. 16. Is. 4. P. 436–468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x
- Gat J.R., Gonfiantini R. Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA Technical Reports Series, No. 210. Vienna, 1981. 339 p.
- Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y. Higher tritium concentrations measured in permafrost thaw lakes in northern Alberta // Hydrological Processes. 2016. Vol. 30. P. 245–249. doi:10.1002/hyp.10599
- Gibson J.J., Birks S.J., Yi Y., Vitt D.H. Runoff to boreal lakes linked to land cover, watershed morphology, and permafrost thaw: A 9-year isotope mass balance assessment // Hydrological Processes. 2015. Vol. 29. P. 3848–3861. doi:10.1002/hyp.10502
- Jasechko M. Global isotope hydrogeology: review // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57. P. 835–965. doi:10.1029/2018RG000627
- Maule C.P., Chanasyk D.S., Muehlenbachs K. Isotopic determination of snow-water contribution to soil water and groundwater // Journal of Hydrology. 1994. Vol. 155. Is. 1-2. P. 73–91. doi: 10.1016/0022-1694(94)90159-7
- Ohta T., Maximov T.C., Dolman A.J., Nakai T., van der Molen M.K., Kononov A.V., Maximov A.P., Hiyama T., Iijima Y., Moors E.J., Tanaka H., Toba T., Yabuki H. Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998–2006) // Agricultural and Forest Meteorology. 2008. Vol. 148. Is. 12. P. 1941–1953. doi: 10.1016/j.agrformet.2008.04.012
- Pavlova N., Lebedeva L., Efremov V. Lake water and talik groundwater interaction in continuous permafrost, Central Yakutia // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 98. Article 07024. doi: 10.1051/e3sconf/20199807024
- Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // Vadose Zone Journal. 2016. Vol. 15. Is. 6. doi:10.2136/vzj2016.01.0010
- Wan C., Li K., Zhang H., Yu Z., Yi P., Chen C. Integrating isotope mass balance and water residence time dating: Insights of runoff generation in small permafrost watersheds from stable and radioactive isotopes // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2020. Vol. 326. P. 241–254. doi:10.1007/s10967-020-07315-1
- Wang W., Wu T., Zhao L., Li R., Zhu X., Wang W., Yang S., Qin Y., Hao J. Exploring the ground ice recharge near permafrost table on the central Qinghai–Tibet Plateau using chemical and isotopic data // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 560. P. 220–229. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.03.034