

Л.С. ЛЕБЕДЕВА*, В.В. ШАМОВ**, В.В. ГОРЯЧЕВ***,
Н.А. ПАВЛОВА*

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
677010, Якутск, Мерзлотная, 36, Россия, lyudmilaslebedeva@gmail.com, napavlova@mpi.ysn.ru

**Тихоокеанский институт географии ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия, vlshamov@yandex.ru

***Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, Россия, goryachev@poi.dvo.ru

ТРИТИЙ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ БАСЕЙНА РЕКИ ЛЕНЫ

Охарактеризована многолетняя динамика содержания трития в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах бассейна р. Лены на основе полученных в 2019 и 2020 гг. новых данных и собранной в литературных источниках исторической информации. Дан анализ взаимосвязи содержания трития с концентрациями растворенных химических веществ. В 2019 и 2020 гг. в периоды зимней и летней межени было отобрано 43 пробы воды из р. Лены, ее крупных, средних и мелких непромерзающих притоков, межмерзлотных и подмерзлотных подземных вод, снежного покрова и жидких осадков. Впервые публикуются данные о содержании трития в верхнем и среднем течении р. Лены и в ее притоках. Содержание трития в пробах речной воды, снежного покрова и дождя согласуется с многолетней кривой спада содержания трития. Концентрации трития в речных водах в зимнюю межень ниже, чем в летний период, когда содержание трития в реках приближается к его значениям в атмосферных осадках, что указывает на участие в питании реки подземных вод, несмотря на повсеместное распространение многолетнемерзлых пород в регионе. Обнаружены статистически значимые корреляционные связи содержания трития с окислительно-восстановительным потенциалом, с содержанием гидрокарбонат-ионов, ионов лития, натрия, общей минерализацией и водородным показателем.

Ключевые слова: тритий, бассейн р. Лены, взаимодействие поверхностных и подземных вод, многолетняя мерзлота, химический состав воды.

L.S. LEBEDEVA*, V.V. SHAMOV**, V.V. GORYACHEV***,
N.A. PAVLOVA*

*Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
677010, Yakutsk, ul. Merzlotnaya, 36, Russia, lyudmilaslebedeva@gmail.com, napavlova@mpi.ysn.ru

**Pacific Institute of Geography, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
690041, Vladivostok, ul. Radio, 7, Russia, vlshamov@yandex.ru

***V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
690041, Vladivostok, ul. Baltiiskaya, 43, Russia, goryachev@poi.dvo.ru

TRITIUM IN NATURAL WATER OF THE LENA RIVER BASIN

This study aims at the description of the long-term dynamics of tritium content in atmospheric precipitation and in surface and ground water of the Lena river basin, based on new data obtained received in 2019 and 2020, and on historical information. The relationship of tritium content with the concentration of dissolved chemicals was analyzed. In 2019 and 2020, during the periods of winter and summer low water, 44 water samples were taken from the Lena river, its large, medium and small non-freezing tributaries, interpermafrost and subpermafrost groundwater, snow cover and liquid precipitation. Data on tritium concentrations in the upper and middle Lena river and its tributaries are reported for the first time. Tritium content in samples from river water, snow cover and rain is consistent with the long-term tritium decline curve. The tritium concentration in river waters during the winter low-water period is lower than in the summer period, when tritium content in the rivers approaches its values in atmospheric precipitation, which is evidence of the contribution of groundwater to the alimentation of the rivers river feeding, in spite of the widespread occurrence of permafrost in the region. Statistically significant correlations between tritium content and redox potential, the content of bicarbonate ions, lithium and sodium ions, total dissolved solids and pH were found.

Keywords: interaction of surface and ground water, Lena river basin, permafrost, tritium, water chemical composition.

ВВЕДЕНИЕ

Тритий, радиоактивный изотоп водорода с массой 3 а. е. м., входит в молекулу сверхтяжелой воды и может играть роль трассера, по содержанию которого оцениваются происхождение и время нахождения воды в поверхностном водном объекте или подземном водоносном горизонте. Период полураспада трития составляет 12,32 года. Считается, что процесс распада и поступление техногенного трития при испытаниях термоядерного оружия и эксплуатации предприятий ядерно-топливного цикла преобладают над процессами изотопного фракционирования, которые определяют содержание стабильных изотопов водорода и кислорода [1]. Это позволяет по содержанию данного изотопа проследить, являются ли источником исследуемой воды атмосферные осадки, выпавшие до или после периода 1952–1960-е гг., когда был произведен массовый выброс техногенного трития в атмосферу и концентрация его превышала естественные уровни в 10–100 раз [2].

Использование изотопных трассеров — широко распространенный метод исследования взаимодействия подземных и поверхностных вод в регионах с нетропическим климатом [1, 3, 4], однако в высоких широтах известны лишь эпизодические случаи их применения. Исследователи [5] обнаружили, что наибольшее содержание трития в водах 23 рек и озер на территории криолитозоны Канадской Субарктики характерно для регионов, где в настоящее время происходит интенсивная деградация мерзлоты, и связали это с высвобождением трития, законсервированного в подземных льдах.

В работе [6] изучено содержание трития в четырех источниках межмерзлотных вод в среднем течении р. Лены, оценено время фильтрации подземных вод от области питания до места их разгрузки от 1 до 55 лет. На основе данных о содержании трития в водах шести крупнейших арктических рек (Обь, Енисей, Лена, Колыма, Юкон и Маккензи) в 2003–2006 гг. в работе [7] показано, что для р. Лены характерно самое высокое содержание трития, и выявлена корреляция выноса трития с распространением многолетней мерзлоты в пределах речного бассейна. По данным С.М. Вакуловского и И.Ю. Катрича [8], среди 10 северных рек России Лена отличалась наивысшими концентрациями трития в воде за счет континентального эффекта, когда в процессе переноса воздушных масс атмосферная влага насыщается тритием из стратосферы. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что данные о содержании трития в верхнем и среднем течении, а также в притоках р. Лены и подмерзлотных водах Якутии ранее не публиковались.

Цель статьи — изучение многолетней динамики содержания трития в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах бассейна р. Лены на основе литературных и полученных в 2019–2020 гг. новых данных, а также анализ взаимосвязи содержания трития с концентрациями растворенных химических веществ.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2019 и 2020 гг. было отобрано 43 пробы природных вод (табл. 1). В период зимней межени в марте и начале апреля было взято 35 проб, из которых 25 — пробы речных вод, шесть — снежного покрова и четыре — подземных вод. Семь проб речных вод взяты в летнюю межень в июле и августе 2019 г., одна проба дождевой воды — в мае 2019 г.

Шестнадцать проб было отобрано из р. Лены на протяженном участке от с. Чанчура (Иркутская область) до пос. Кюсюра (замыкающий створ р. Лены, Якутия); по 1–3 пробы — из крупных и средних непромерзающих притоков р. Лены (р. Алдан в верхнем и нижнем течении, реки Амга, Олёкма, Синяя, Бутома, Вилуй, Мая, Чульман и Тимптон). По одной пробе взято из двух мелких непромерзающих притоков р. Лены, а также из скважины, вскрывающей подмерзлотные воды с глубины 320 м, и источников межмерзлотных подземных вод. Шесть проб отобраны из верхнего, 50-сантиметрового слоя снежного покрова, одна проба — жидких осадков. Места отбора проб и характер распространения многолетнемерзлых пород в пределах бассейна р. Лены показаны на рис. 1.

Аналитические исследования водных проб заключались в определении содержания трития (43 пробы), основных ионов (27 проб), отдельных микроэлементов — стронция, лития, бария (27 проб) — в лабораториях Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН (Владивосток) и Института мерзлотоведения СО РАН (Якутск).

Для измерения трития использовался низкофоновый жидкосцинтилляционный счетчик QUANTULUS 1220. Для 9 мл воды пробы в 11 мл цинтиллятора Optiphase Hisafe 3 использовались пороги в спектральной области, соответствующей энергии β -излучения трития (каналы анализатора 50–175, эффективность регистрации 20 %, фон ~0,7 импульсов в минуту), что обеспечивает за время

Таблица 1

Характеристика проб на тритий в бассейне р. Лены, отобранных в 2019 и 2020 гг.

Номер	Тип вод	Пункт отбора	Площадь водо- сбора, км ²	Дата отбора	Концентрация трития, ТЕ
1	р. Алдан	пос. Томмот	49 500	07.04.2019	15,55
2	р. Алдан	Устье	729 000	20.03.2019	16,47
3	р. Алдан	Эльдикан	484 000	02.04.2020	18,74
4	р. Амга	12 км ниже с. Бетюнцы	56 800	03.04.2020	13,04
5	р. Буотома	Устье	12 600	25.03.2019	15,01
6	р. Буотома	Устье	12 600	27.03.2020	16,15
7	р. Вилуй	Устье	454 000	21.03.2019	19,97
8	р. Вилуй	с. Сюльдюкар	168 000	20.03.2020	21,54
9	Дождь	Якутск	—	25.05.2019	17,85
10	р. Лена	с. Чанчур	4690	23.03.2019	16,15
11	р. Лена	Выше уст. р. Олёкмы	560 000	15.03.2019	13,26
12	р. Лена	Выше уст. р. Олёкмы	560 000	16.07.2019	20,51
13	р. Лена	с. Саняхтах	812 000	17.03.2019	15,37
14	р. Лена	с. Синск	870 000	28.03.2020	14,47
15	р. Лена	с. Мохсоголлох	892 000	25.03.2019	16,67
16	р. Лена	с. Табага	897 000	25.03.2019	14,90
17	р. Лена	с. Табага	897 000	29.03.2020	13,89
18	р. Лена	с. Кангалассы	912 000	26.03.2019	16,14
19	р. Лена	с. Кангалассы	912 000	25.03.2020	14,49
20	р. Лена	Выше уст. р. Алдан	951 000	29.07.2019	23,10
21	р. Лена	Сангар	1 680 000	20.03.2019	13,22
22	р. Лена	Сангар	1 680 000	29.07.2019	22,30
23	р. Лена	с. Жиганск	2 170 000	30.07.2019	23,36
24	р. Лена	с. Кюсюр	2 430 000	31.07.2019	22,56
25	р. Мая	с. Усть-Мая	165 000	03.04.2020	15,39
26	р. Олёкма	с. Троицк	210 000	15.03.2019	13,97
27	Подземные воды	Источник Суллар	—	25.03.2020	8,66
28	Подземные воды	Озеро-источник Юногестях	—	26.03.2020	3,46
29	Подземные воды	Источник Булуус	—	27.03.2020	7,82
30	Подземные воды	Якутск, скважина 1-Я	—	19.03.2019	0,26
31	руч. Балыктах-Юрях	Устье	< 100	16.03.2019	12,18
32	р. Синяя	Устье	30 400	17.03.2019	14,54
33	р. Синяя	Устье	30 400	28.03.2020	12,58
34	Снежный покров	р. Олёкма – Троицк	—	16.03.2019	23,55
35	Снежный покров	р. Буотома – устье	—	25.03.2019	21,50
36	Снежный покров	р. Лена – Сангар	—	21.03.2019	17,16
37	Снежный покров	Озеро-источник Юногестях	—	26.03.2020	20,22
38	Снежный покров	пос. Синск	—	28.03.2020	22,60
39	Снежный покров	пос. Эльдикан	—	02.04.2020	18,74
40	р. Тимптон	6,5 км ниже пгт. Нагорного	613	04.08.2019	26,71
41	р. Чульман	пос. Чульман	3840	02.04.2019	15,30
42	р. Чульман	пос. Чульман	3840	16.08.2019	25,11
43	р. Дюнекян	9-й км трассы Эльдикан – Солнечный	3340	02.04.2020	21,19

Примечание. ТЕ – тритиевая единица. Прочерк – характеристика неприменима.

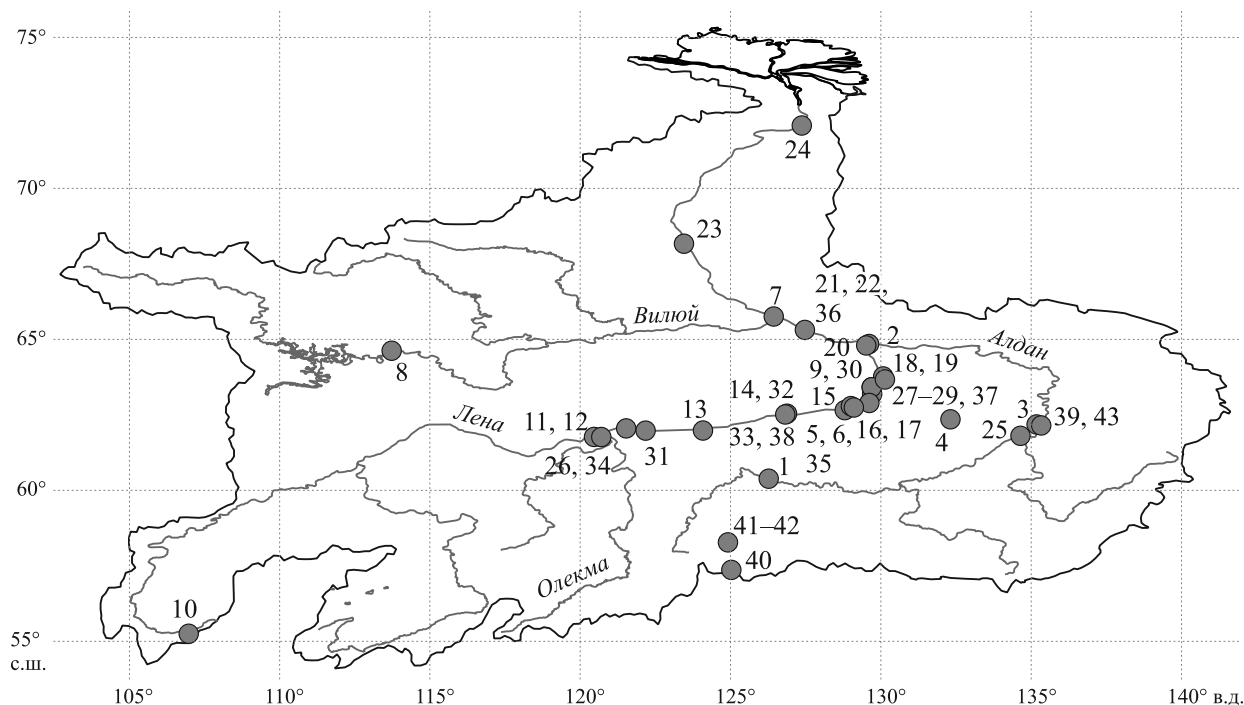


Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб воды.

1–43 — номера проб (см. табл. 1).

измерения 1000 мин минимально регистрируемую концентрацию 8,3 тритиевой единицы (ТЕ) [9]. Имеющаяся в лаборатории система двухступенчатого электролитического обогащения позволяет понизить минимальный порог измерения концентрации трития до 0,08 ТЕ [10].

Нестабильные параметры (водородный показатель pH и окислительно-восстановительный потенциал Eh) измерялись на месте отбора проб посредством портативного мультипараметрового анализатора. Определение основных ионов и микрокомпонентов проводилось в лабораторных условиях. Отобранные пробы для анализа предварительно пропускались через мембранный фильтр (0,45 мкм). Основные катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+}) и микроэлементы (Sr^{2+} , Li^{+} , Ba^{2+}) были проанализированы с использованием капиллярного электрофореза. Методами титриметрии определены компоненты карбонатной системы (HCO_3^{-} и CO_3^{2-}) и хлориды (Cl^{-}). Для анализа содержания сульфатов (SO_4^{2-}) применен фотоколориметрический метод. Сумма основных ионов составила общую минерализацию (TDS).

Для анализа связи между концентрациями химических компонентов, общей минерализацией (TDS), pH и Eh в отобранных пробах рассчитывались парные коэффициенты корреляции Пирсона с уровнем значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика химического состава природных вод. Все воды по величине минерализации относятся к пресным. Минерализация атмосферных осадков и снежного покрова — 8–20 мг/л, по химическому составу это гидрокарбонатные преимущественно кальциево-магниевые воды (рис. 2). Низкое содержание растворенных веществ (40–130 мг/л) характерно для вод Вилюя и рек Южной Якутии — Алдана, Чульмана, Тимптона. По химическому типу эти воды сходны с атмосферными осадками, что свидетельствует о быстрой возобновляемости ресурсов речных вод.

Состав воды в Лене подвержен сезонным изменениям и зависит от условий питания реки. В летний период, когда ее сток формируется преимущественно за счет жидких атмосферных осадков, минерализация поверхностных вод на всем протяжении реки изменяется от 70 до 180 мг/л. В анионном составе воды Лены на отрезке от г. Олёкминска до устья Алдана в это время преобладают гидрокарбонат-ионы (42–62 %-экв) и хлорид-ионы (21–36), присутствуют сульфат-ионы (14–20 %-экв). В формировании катионного состава основная роль принадлежит ионам кальция (40–55 %-экв) и натрия

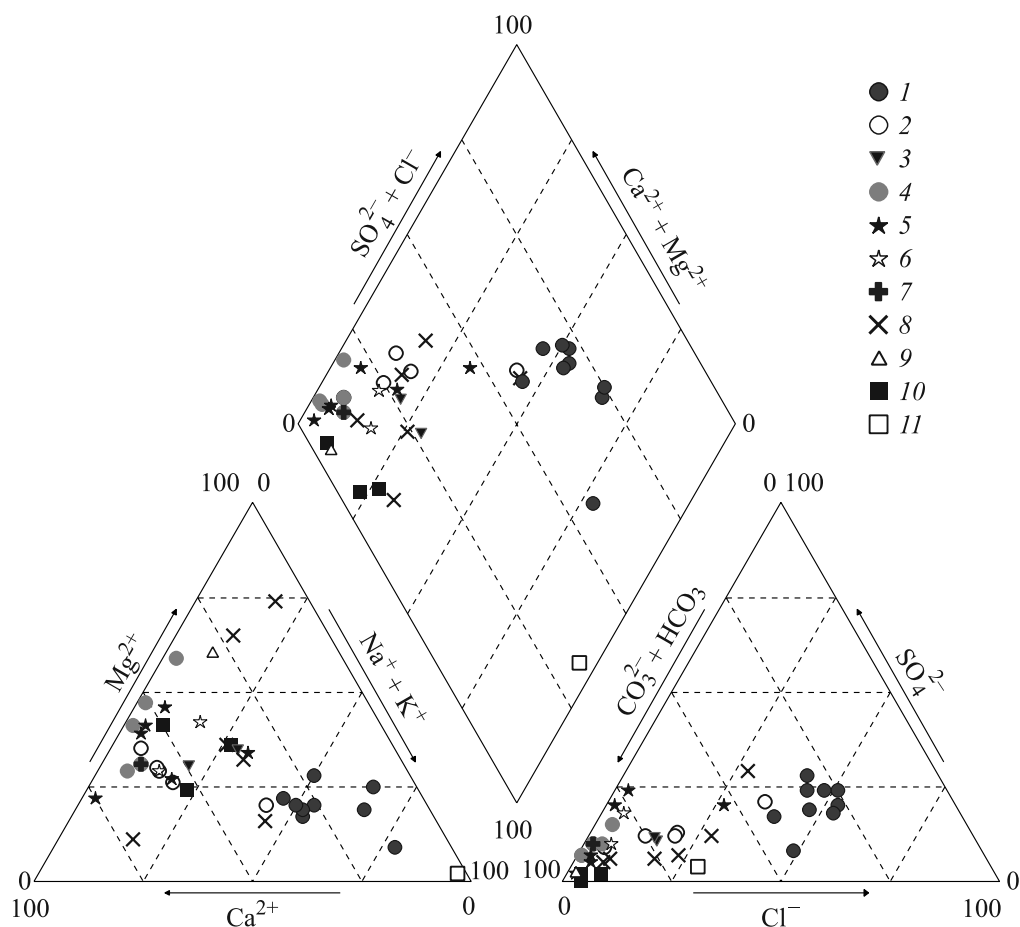


Рис. 2. Химический состав природных вод.

Речные воды: 1 — р. Лена (зима), 2 — р. Лена (лето), 3 — р. Вилюй (зима), 4 — реки Синяя, Буотома, Амга (зима), 5 — р. Алдан и его притоки (зима), 6 — р. Алдан и его притоки (лето), 7 — ручьи Хара-Балык, Балыктах-Юрях. Атмосферные осадки: 8 — снег, 9 — дождь. Подземные воды: 10 — источники межмерзлотных вод, 11 — подмерзлотные воды.

(25–31), содержание магния не превышает 19–25 %-экв. Лишь в районе с. Табага, в русле реки, а также в водных пробах, отобранных ближе к правому берегу, ион магния становится вторым по значимости (27–34 %-экв). Вероятная причина этого изменения — наличие на правом берегу пресных высокодебитных родников и малых притоков Лены, несущих воду гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава. В зимний период родниковый сток концентрируется в наледях, а большинство малых рек перемерзают.

Ниже по течению Лены, после слияния с ней Алдана, в поверхностных водах содержание гидрокарбонат-ионов возрастает до 66–85 %-экв, а концентрация хлорид-ионов составляет 28–31 %-экв. Для левобережной части реки характерно повышенное содержание сульфат-иона (16–22 %-экв), поставщиком которого являются притоки Лены, берущие свое начало с Верхоянского хребта. Обогащение их сульфатами происходит при взаимодействии с водовмещающими аллювиальными отложениями, основную часть которых составляет обломочный материал терригенной толщи, содержащий сульфидные минералы. В условиях окислительной обстановки сульфидные минералы легко растворяются и обогащают поверхностные воды сульфат-ионами.

Зимой, при переходе р. Лены на подземное питание, количество растворенных веществ в ее воде увеличивается до 400–500 мг/л, а химический состав повсеместно преобразуется в гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый. При этом содержание хлорид-ионов достигает 37–52 %-экв, гидрокарбонат-ионов — 25–31, сульфат-ионов — 15–24 %-экв. Доля ионов натрия в катионном составе воды возрастает до 37–59 %-экв, а кальция — снижается до 22–41 %-экв, содержание магния изменяется незначительно.

Минерализация межмерзлотных вод варьирует в пределах 160–250 мг/л, среди анионов стабильно преобладает гидрокарбонат-ион (более 80 %-экв), катионный состав смешанный. Подземные воды, залегающие под толщей многолетнемерзлых пород, имеют самую высокую минерализацию (0,7–1,0 г/л) и хлоридно-гидрокарбонатный натриевый состав.

Содержание трития в природных водах бассейна р. Лены во второй половине XX–начале XXI в. На рис. 3 представлены данные по концентрации трития в атмосферных осадках, снежном покрове, подземных и поверхностных водах бассейна Лены, а также прилегающих бассейнов рек Индигирки и Колымы за 1969–2013 гг., взятые из литературных источников [6, 7, 11–13, 15, 18, 20–22], а также полученные авторами в 2019 и 2020 гг.

По имеющейся информации, с 1969 по 2020 г. наблюдалось снижение концентрации трития во всех типах природных вод. По данным С.М. Вакуловского и И.Ю. Катрича [8], его содержание в атмосферных осадках и речных водах России после 2000 г. установилось на уровне 17–34 ТЕ. В Якутске в 1969–1970 гг. концентрация трития в атмосферных осадках составляла более 400 ТЕ, а в отобранной в 2019 г. пробе дождевой воды — 18 ТЕ. Рост содержания трития в июне 1986 г., скорее всего, связан с последствиями аварии на Чернобыльской АЭС, однако уже в следующем году его концентрация в осадках вернулась к значениям, измеренным до аварии. Относительно высокие концентрации трития (от 7 до 70 ТЕ) в снежном покрове Центральной Якутии в 2013 г. могут быть связаны с радиационной аварией на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 г. [11].

В 1979 г. содержание трития в водах р. Лены у с. Кюсюр было 199 ТЕ [12], а в 2019 г. — 23 ТЕ. Повышенные концентрации этого изотопа в реках Тэлгэспит, Тас-Юрях и Улахан-Ботубуйа (бассейн Вилюя) в 2010 г. со 136 до 915 ТЕ стали следствием подземных ядерных взрывов, производившихся в бассейнах этих рек с 1976 по 1987 г. [13], и рассматриваются как локальное явление.

В 2010-х гг. было проведено опробование межмерзлотных вод Центральной Якутии [6]. Сравнительный анализ исторических и современных данных показал, что концентрация трития в источнике межмерзлотных вод Булуус с 2009 г. (по [6]) к 2020 г. (данные авторов) снизилась с 10,5 до 7,8 ТЕ.

Концентрация трития в речных водах определяется главным образом его содержанием в атмосферных осадках, выпадающих на водосборную площадь реки, и временем миграции просачивающихся атмосферных осадков в водоносных горизонтах, через которые осуществляется питание и разгрузка подземных вод в речное русло [12, 14]. В многолетнем разрезе содержание трития в реках и атмосферных осадках бассейна р. Лены сходно, тогда как пробы подземных вод показывают более низкие концентрации трития, возможно за счет высокой доли «старых» вод (возрастом более 70 лет), которые не испытали влияния массовых техногенных выбросов трития после 1950-х гг.

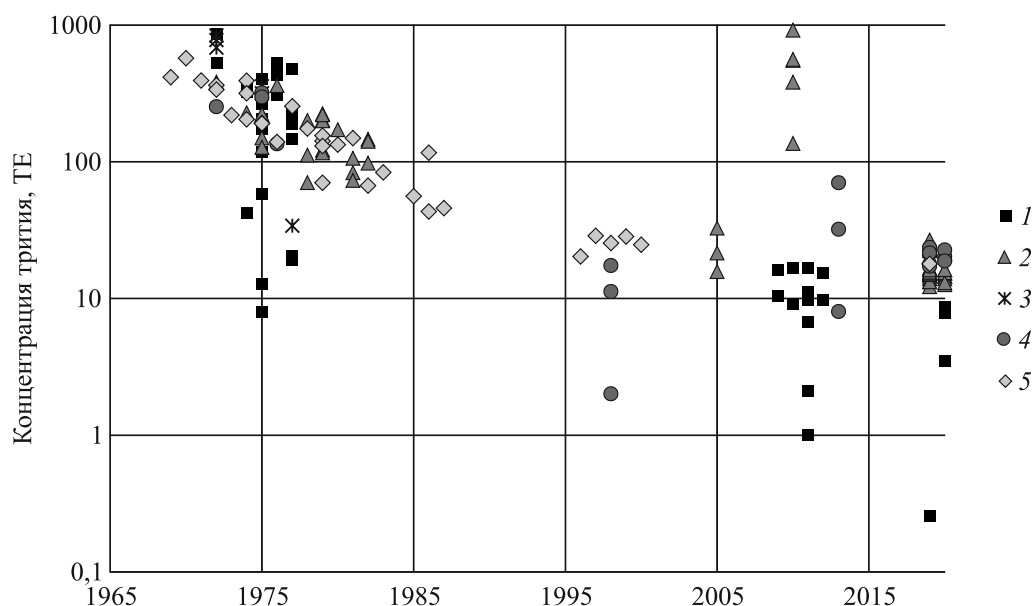


Рис. 3. Содержание трития в подземных, поверхностных и атмосферных водах в бассейнах рек Лены, Индигирки и Колымы по литературным данным [6, 7, 11–13, 15, 18, 20–22] и данным, полученным авторами в 2019 и 2020 гг.

1 — подземные воды; 2 — река; 3 — наледь; 4 — снежный покров; 5 — осадки.

Содержание трития в природных водах бассейна р. Лены в 2019–2020 гг. Усиленный обмен между стратосферой и тропосферой в весенне-летнее время приводит к формированию весенне-летнего максимума и осенне-зимнего минимума в сезонном распределении содержания трития в атмосферных осадках [2]. По данным GNIP [15], доступным для периодов 1969–1983 и 1996–2000 гг., максимумы содержания трития в атмосферных осадках Якутска наблюдались с апреля по август, минимумы приходились на зимний период. Содержание трития в пробах снежного покрова, отобранных в 2019 и 2020 гг. в шести точках (в районе Олёкминска, устья р. Буотомы, озера-источника Юногестях, сел Сангар, Синск и Эльдикан), и в пробе дождевой воды, взятой в Якутске, — 17,2–23,6 ТЕ, что согласуется с многолетней кривой спада содержания трития в атмосферных осадках в Якутске по данным МАГАТЭ [15] (см. рис. 3).

Практически отсутствие трития (0,26 ТЕ) в глубоких подмерзлотных водах на территории Якутска говорит о том, что время их водообмена превышает 60–80 лет, а потенциально может составлять сотни и тысячи лет. Хотя сквозные подрусловые талики выявлены бурением в среднем течении р. Лены недалеко от Якутска, около г. Покровска, Табагинского и Кангаласского мысов [16], предельно низкая концентрация трития в подмерзлотных водах указывает на отсутствие значимого водообмена подземных вод с поверхностными на этой территории.

Источники межмерзлотных подземных вод обеднены тритием (от 3,5 до 8,7 ТЕ), вероятно, в силу того, что в их формировании участвуют воды возрастом более 70 лет.

Считается, что сезонные колебания концентрации трития в речных водах менее значительны, чем в атмосферных осадках [17]. Разброс содержания этого изотопа в поверхностных водах бассейна р. Лены в 2019–2020 гг., по данным анализа 33 проб, составляет 12,2–26,7 ТЕ. Его концентрации в реках в зимнюю межень (12,2–21,5 ТЕ) ниже, чем в июле и августе (20,5–26,7 ТЕ), когда содержание трития в реках и атмосферных осадках сходно. Аналогичная зависимость прослеживается на реках Дальнего Востока [18]. Внутригодовое поведение трития в Индигирке и Печоре противоположно: в 1970–1980-е гг. [17] максимальное его содержание в речных водах наблюдалось зимой, а минимальное — в период половодья при снеготаянии. Пониженные концентрации трития в речной воде Лены в зимнюю межень могут объясняться увеличением доли подземного питания в этот период. Об этом свидетельствует самое низкое содержание трития (12,2 ТЕ) среди всех отобранных проб речных вод в руч. Балыктах-Юрях, незамерзающем малом притоке р. Лены, который предположительно является местом разгрузки подземных вод. Наибольшими значениями (20 и 21,5 ТЕ) в зимнюю межень характеризуется р. Вилюй, что связано с влиянием Вилюйского водохранилища.

Среди отобранных в летний период семи проб речной воды максимальное количество трития (26,7 ТЕ) обнаружено в верховьях правого притока Алдана — горной реке Тимптон, а наименьшее (20,5 ТЕ) — в Лене, выше устья Олёкмы. Концентрации изотопа в Тимптоне (26,7 ТЕ) и Чульмане (25,1 ТЕ) превосходят его содержание в современных дождевых водах Якутска и в снеге исследуемого региона. Насыщению тритием речных вод Южной Якутии могут способствовать: большое количество атмосферных осадков — 560 мм в пос. Чульман (среднее в Центральной Якутии — 250–300 мм); более высокие в целом концентрации трития в атмосферных осадках в этом регионе; разгрузка в данные реки подземных вод, обогащенных тритием, из зоны свободного водообмена.

Анализ связей содержания трития с концентрациями растворенных веществ. Концентрация трития имеет статистически значимую положительную корреляционную связь с окислительно-восстановительным потенциалом ($r = 0,55$) и отрицательную корреляционную связь с содержанием гидрокарбонат-ионов ($r = -0,78$), ионов лития ($r = -0,55$), натрия ($r = 0,52$), общей минерализацией ($r = -0,63$), водородным показателем ($r = -0,54$) и другими гидрохимическими характеристиками (табл. 2). Положительная корреляционная связь с окислительно-восстановительным потенциалом может объясняться тем, что Eh показывает количество присутствующего в воде растворенного кислорода. Отрицательная связь трития с водородным показателем, а также с содержанием ионов натрия и лития может свидетельствовать о криогенном преобразовании минерального состава воды либо о затрудненных условиях водообмена и рассматриваться как параметр при оценке источников питания водного объекта. Вопрос корреляции содержания трития с количеством гидрокарбонат-ионов в природных водах остается дискуссионным.

Среди всех отобранных проб выделяются подмерзлотные воды, обладающие щелочной реакцией, повышенными (0,8–1,1 г/л) минерализацией и концентрациями натрия, лития, гидрокарбонат-иона, низким содержанием ионов кальция и магния и отсутствием трития. Пробы воды из Чульмана и Тимптона, напротив, характеризуются низкой минерализацией, а также незначительным содержанием основных ионов и микроэлементов и максимальным — трития.

Таблица 2

Статистически значимые коэффициенты корреляции Пирсона между концентрациями химических компонентов, общей минерализацией (TDS), pH и окислительно-восстановительным потенциалом (Eh) в отобранных пробах ($n = 40$)

Показатель	pH	Eh	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	TDS*	Sr ²⁺	Li ⁺	Ba ²⁺
H3	-0,54	0,55	-0,42	-0,50	-0,52	-0,46	-0,78		-0,34	-0,63	-0,36	-0,55	
pH		-0,36	0,40	0,35	0,39		0,63			0,49		0,35	
Eh				-0,38	-0,51	-0,44	-0,65	-0,40	-0,32	-0,59		-0,54	
Ca ²⁺				0,75			0,63	0,55		0,49	0,55		
Mg ²⁺						0,42	0,61	0,59	0,41	0,61	0,41		
Na ⁺						0,54	0,48	0,51	0,85	0,86		0,79	0,43
K ⁺							0,40	0,53	0,58	0,64	0,42		
HCO ₃ ⁻										0,68	0,33	0,54	
SO ₄ ²⁻									0,73	0,77	0,61		
Cl ⁻										0,86		0,45	
TDS											0,40	0,61	
Sr ²⁺													
Li ⁺													0,57
Ba ²⁺													

На приведенных диаграммах (см. рис. 2) группируются точки, относящиеся к пробам атмосферных, поверхностных и подземных вод, а также к отобранным в зимний и летний периоды. Химический состав вод небольших горных рек Тимптона и Чульмана в летний период оказывается близок к таковому атмосферных вод, тогда как зимние пробы воды из крупнейших равнинных рек исследуемой территории сходны с пробами подземных вод.

Вне зависимости от площади водосбора содержание трития летом выше 20 ТЕ во всех исследуемых реках, а зимой — ниже 17 ТЕ (кроме р. Вилюй). В зимнюю межень наиболее минерализованы воды р. Лены (320–500 мг/л) в сравнении с другими исследуемыми реками (120–240 мг/л). Это происходит в первую очередь за счет ионов натрия и хлоридного иона, содержание которых в воде Лены зимой превышает таковые в водах других рек.

Авторы исследования [19] не обнаружили связи концентраций трития в подземных водах Дальнего Востока с их гидрохимическим типом и указали на время циркуляции вод и наличие/отсутствие инфильтрации поверхностных вод как на основные факторы, влияющие на содержание трития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание трития в пробах снежного покрова и дождевой воды составляет 17,2–23,6 ТЕ, что согласуется с многолетней кривой спада содержания трития в атмосферных осадках в Якутске. Практически отсутствие трития (0,26 ТЕ) в глубоких подмерзлотных водах на территории Якутска говорит о том, что время их водообмена превышает 60–80 лет. Источники межмерзлотных подземных вод обеднены тритием (от 3,5 до 8,7 ТЕ). Концентрации трития в речных водах в зимнюю межень (<17 ТЕ, кроме р. Вилюй) в среднем ниже, чем в летний период (>20 ТЕ), когда содержание трития в реках приближается к его значениям в атмосферных осадках, что подтверждает участие в питании реки подземных вод, несмотря на повсеместное распространение многолетнемерзлых пород в регионе.

Минерализация атмосферных осадков составляет 8–20 мг/л, по химическому составу это гидрокарбонатные преимущественно кальциево-магниевые воды. Воды рек Вилюй, Алдан, Чульман и Тимптон с минерализацией 40–130 мг/л по химическому типу сходны с атмосферными осадками. Минерализация воды Лены в летний период — 70–180 мг/л при хлоридно-гидрокарбонатном натриево-кальциевом или магниевом-кальциевом составе. Зимой она увеличивается до 400–500 мг/л, а химический состав преобразуется в гидрокарбонатно-хлоридный кальциево-натриевый. Минерализация

межмерзлотных вод варьирует в пределах 160–250 мг/л, среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, катионный состав смешанный. Подмерзлотные воды имеют высокую минерализацию (0,7–1,0 г/л) и хлоридно-гидрокарбонатный натриевый состав.

Содержание трития в природных водах бассейна р. Лены имеет статистически значимую положительную корреляционную связь с окислительно-восстановительным потенциалом и отрицательную — с содержанием гидрокарбонат-ионов, ионов лития, натрия, общей минерализацией и водородным показателем.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (19–77–00055, отбор проб в 2020 г. и интерпретация результатов) и Российского фонда фундаментальных исследований (18–45–140065, отбор проб в 2019 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jasechko S. Global isotope hydrogeology — Review // Reviews of Geophysics. — 2019 [Электронный ресурс]. — <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2018RG000627> (дата обращения 21.08.2020).
2. Поляков В.А., Ферронский В.И. Изотопия гидросферы Земли. — М.: Научный мир, 2009. — 632 с.
3. Cartwright I., Morgenstern U. Using tritium to document the mean transit time and sources of water contributing to a chain-of-ponds river system: implications for resource protection // Applied Geochemistry. — 2016. — N 75. — P. 9–19.
4. Sprenger M., Stumpp C., Weiler M., Aeschbach W., Allen S.T., Benettin P., Dubbert M., Hartmann A., Hrachowitz M., Kirchner J.W., McDonnell J.J., Orlowski N., Penna D., Pfahl S., Rinderer M., Rodriguez N., Schmidt M., Werner C. The demographics of water: a review of water ages in the critical zone // Reviews of Geophysics. — 2019 [Электронный ресурс]. — <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018RG000633> (дата обращения 21.08.2020).
5. Bond M.J., Carr J. Permafrost thaw and implications for the fate and transport of tritium in the Canadian north // Journ. Environmental Radioactivity. — 2018. — N 192. — P. 295–311.
6. Hiyama T., Asai K., Kolesnikov A.B., Gagarin L.A. Estimation of the residence time of permafrost groundwater in the middle of the Lena River basin, eastern Siberia // Environmental Research Letters. — 2013 [Электронный ресурс]. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/8/3/035040/pdf> (дата обращения 20.08.2020).
7. Yi Y., Gibson J.J., Cooper L.W., Hille J.-F., Birks S.J., McClelland J. W., Holmes R.M., Peterson B.J. Isotopic signals (^{18}O , ^2H , ^3H) of six major rivers draining the pan-Arctic watershed // Global Biogeochemical Cycles. — 2012 [Электронный ресурс]. — <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2011GB004159> (дата обращения 20.08.2020).
8. Вакуловский С.М., Катрич И.Ю. Тритий в водных объектах на территории России в 1975–2012 годах // АНРИ. — 2013. — № 3 (74). — С. 38–42.
9. Povinec P.P., Baxter M.S., Gastaud J., Liang L., Kwong W., Oregioni B. Low-Level Liquid Scintillation spectrometry of soft beta emitters // Proceedings of the International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry. — Glasgow, 1994. — P. 149–153.
10. Горячев В.А., Воронцова Н.А., Шлык Н.В. Тритий. Техника измерений, содержание в природных водах // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы II Всерос. науч. конф. с междунар. участием (6–11 сентября 2015 г., о. Русский, Владивосток). — Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та. — С. 567–569.
11. Makarov V.N. Tritium in the Snow Cover at Mid-Taiga Landscapes in Central Yakutia // Geochemistry International. — 2016. — Vol. 54, N 11. — P. 1005–1010.
12. Романов В.В., Ферронский В.И., Вакуловский С.М., Катрич И.Ю., Рослый Е.И. Содержание трития в поверхностных водах СССР в 1979–1980 гг. // Водные ресурсы. — 1983. — № 3. — С. 109–121.
13. Аргунова Т.В., Терентьев А.С., Тихонов И.О., Артамонова С.Ю. Геохимические особенности поверхностных вод Среднеобуобинского нефтегазоконденсатного месторождения // Разведка и охрана недр. — 2012. — № 7. — С. 26–29.
14. Вакуловский С.М., Воронцов А.И., Катрич И.Ю., Колосков И.А., Ровинский Ф.Я., Рослый Е.И. Тритий в атмосферных осадках, реках и морях, омывающих территорию Советского Союза // Атомная энергия. — 1978. — Т. 44, вып. 5. — С. 432–435.
15. IAEA/WMO. Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database [Электронный ресурс]. — <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 20.08.2020).
16. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. — Новосибирск: Акад. изд-во “ГЕО”, 2003. — 138 с.
17. Катрич И.Ю. Мониторинг трития в природных водах СССР (Россия): Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. — М., 2009. — 42 с.

18. Сойфер В.Н., Горячев В.А., Вакуловский С.М., Катрич И.Ю. Тритиевые исследования природных вод в России. — М.: ГЕОС, 2008. — 286 с.
19. Харитонова Н. А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А. Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России // Тихоокеанская геология. — 2012. — Т. 31, № 2. — С. 75–86.
20. Афанасенко Е.А., Морковкина И.К., Романов В.В., Романовский Н.Н. О возрасте подземных вод хребта Тас-Хаяхтах и Селенняхской наложенной впадины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геол. — 1973. — № 5 — С. 105–109.
21. Морковкина И.К. Опыт применения трития в гидрогеологических исследованиях // Изотопные исследования природных вод. — М.: Наука, 1979. — С. 75–84.
22. IAEA. Global Network of Isotopes in Rivers. The GNIR Database [Электронный ресурс]. — <https://nucleus.iaea.org/wiser> (дата обращения 20.08.2020).

Поступила в редакцию 30.10.2020

После доработки 14.04.2021

Принята к публикации 13.10.2021
