ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПАСНОСТИ В ГИДРОСФЕРЕ
ECOLOGICAL PROBLEMS AND HAZARDS IN THE HYDROSPHERE

УДК 556.16.047
DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.333

ТРАНСФОРМАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД МАЛЫХ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ТУНДРЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ

Л.С. Лебедева[1], В.В. Шамов[1],
А.М. Тарбеева[2], Н.А. Павлова[1]
[1]Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия
[2]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
lyudmilaslebedeva@gmail.com

Аннотация. Степень изученности процессов миграции воды и растворенных веществ в арктических и субарктических мерзлотных ландшафтах крайне низкая. В нашем исследовании на основе гидрохимических данных, полученных в ходе экспедиций в 2019 и 2020 годах, делаются выводы об источниках питания и механизмах формирования стока трех ручьев в арктической тундре в низовьях реки Лены. Исследованные природные воды контрастны по химическому составу. Максимальные концентрации химических веществ, вплоть до солоноватого типа вод, характерны для высачиваний подземных вод, состав которых формируется при длительном взаимодействии с материнскими породами. Наиболее пресные воды приурочены к органогенным горизонтам почвенного профиля. Воды в истоках ручьев ультрапресные, холодные и иногда показывают слабокислую реакцию, что говорит об их формировании в обедненном минеральными веществами органогенном почвенном горизонте сезонно-талого слоя по контакту с кровлей многолетнемерзлых пород. На участках активного врезания русла в коренные породы воды ручьев обогащаются минеральными соединениями. Ниже по течению

TRANSFORMATION OF WATER CHEMICAL COMPOSITION IN ARCTIC TUNDRA CREEKS UNDER WATER-ROCK INTERACTION

Ludmila S. Lebedeva[1], Vladimir V. Shamov[1],
Anna M. Tarbeeva[2], Nadezhda A. Pavlova[1]
[1]Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

lyudmilaslebedeva@gmail.com

Abstract. The degree of knowledge about migration of water and dissolved substances in arctic and subarctic permafrost landscapes is extremely low. In our study the water sources and the mechanisms of streamflow formation of the small Arctic tundra rivers in the lower Lena River are described on the basis of hydrochemical data. Studied natural waters are contrasting in chemical composition. The maximum concentrations of chemicals, up to the brackish type of water, are characteristic of groundwater seeps, the composition of which is formed during long-term interaction with parent rocks. The freshest waters are confined to the organic layers of the soil profile. The sources of streams are ultra-fresh, cold and sometimes show a slightly acidic reaction, which indicates their formation in the organic part of the active layer at the contact with the permafrost top. Downstream where the channel is actively cut into the bedrock, the streams' waters are enriched with mineral compounds. Downstream, water warms up in the channel and ultra-fresh water flows from the slopes and dilute the stream water. The sources and low-mineralized tributaries of the small streams are formed due to the thawing of the ground ice in the active layer. The interaction of water and rocks determines the chemical composition of the water of

происходит прогрев воды в русле и приток ультрапресной воды со склонов, сформированной в верхней грубогумусной части сезонно-талого слоя. Истоки и слабоминерализованные притоки ручьев формируются за счет вытаивания льда сезонно-талого слоя. Взаимодействие воды и горных пород определяет химический состав воды исследованных ручьев. Сведения о химическом составе природных вод позволяют делать выводы об источниках и путях движения воды на водосборах, что необходимо для разработки моделей и прогнозирования природных процессов.

Ключевые слова: химический состав природных вод; реки арктической тундры; взаимодействие воды и породы; сезонно-талый слой; формирование речного стока; многолетнемерзлые породы.

the studied streams. Information about the chemical composition of natural waters allows drawing conclusions about the sources and water pathways in the watersheds, which is necessary for developing models and predicting natural processes.

Keywords: s chemical composition of natural water; Arctic tundra rivers; water-rock interaction; active layer; river runoff formation; permafrost.

Введение

Степень изученности процессов миграции воды и растворенных веществ в арктических и субарктических мерзлотных ландшафтах крайне низкая. В обзоре гидрологических последствий деградации мерзлоты [Walvoord, Kurylyk, 2016] указано, что получение новых полевых данных, характеризующих состояние гидрологических систем в зоне распространения многолетнемерзлых пород, является одной из наиболее актуальных задач для выявления изменений природных процессов в настоящем и будущем. Одним из важнейших препятствий для исследования потоков воды и растворенных химических веществ в речных бассейнах криолитозоны является сложность получения натурных данных в суровых климатических условиях из-за трудоемкости и логистических трудностей непосредственных полевых измерений.

Ожидается, что потепление климата и деградация многолетней мерзлоты приведет к трансформации гидрологического цикла, в том числе изменениям режима влажности почво-грунтов, усилению взаимодействия подземных и поверхностных вод, сезонному перераспределению элементов водного баланса, а также к возрастанию выноса растворенных и взвешенных веществ. Формирование химического состава малых рек в сплошной криолитозоне происходит в условиях их взаимодействия с породами сезонноталого слоя (далее – СТС) и отложениями, слагающими кровлю многолетнемерзлых пород. Предполагается, что увеличение мощности СТС и деградация мерзлоты под влиянием изменений климата может существенно трансформировать химический состав подземных и поверхностных вод криолитозоны [Colombo et al., 2018].

Существует очень мало оценок источников питания малых рек в холодных регионах. Так, Blaen и другие [2013] с использованием гидрохимических и изотопных трассеров определили, что талая вода является основным источником питания ледниковых рек на Шпицбергене в течение всего теплого сезона. Методы трассерной гидрологии применяются для исследования стока воды, растворенных и взвешенных веществ в Канаде [Carey, Quinton, 2004; Lamhonwah et al., 2017].

Работы, посвященные оценкам источников питания малых рек северной криолитозоны

Lebedeva L.S., Shamov V.V., Tarbeeva A.M., Pavlova N.A. Transformation of water chemical composition in arctic tundra creeks under water-rock interaction. *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2021, vol. 3, iss. 4, pp. 333–345. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2021.3.4.333.

России, единичны. А.Г. Георгиади, А.Н. Золотокрылин и другие [Тепловодообмен…, 2007] на притоке реки Суонаннаах около поселка Тикси выявили, что 80% атмосферных осадков формирует неразделимые поверхностно-надмерзлотные воды и расходуется на формирование стока реки. Одновременно происходит криогенное изъятие части осадков и поверхностно-надмерзлотных вод СТС на формирование многолетних подземных льдов. Kutzbach [2006] на основе годичного цикла наблюдений оценил элементы водного баланса для полигональной тундры острова Самойловского (дельта реки Лены), равные 350 мм – осадки, 108 мм – летнее испарение, 171–201 мм – речной сток и изменение запасов воды в грунте, 40–70 мм – сублимация снега. Helbig и соавторы [2013] показали, что водный баланс полигональной тундры в дельте реки Лены в течение лета во многом определяется глубиной протаивания грунта, в зависимости от которой меняются емкости задержания и пути преимущественного стекания воды. О.Д. Трегубовым и другими [2021] было выяснено, что в среднем и нижнем течении рек Анадырской низменности стабильность водного режима обеспечивают талые воды сезонных льдов, в горных истоках рек − конденсационные воды. Т.С. Губарева и соавторы [2018] обосновала наличие тало-мерзлотного, дождевого и почвенно-грунтового источников питания на малых водосборах в зоне Байкало-Амурской магистрали.

Целью исследования было выявление источников питания и описание механизмов формирования речного стока на малых водосборах арктической тундры низовьев реки Лены по данным о химическом составе природных вод.

Природные условия

Исследовались бассейны трех небольших соседних ручьев (таблица 1, рисунок 1), дренирующих уступ отрогов Хараулахского хребта, обращенный к Быковской протоке дельты реки Лены. Максимальные отметки водоразделов достигают 170 м, устья ручьев приурочены к урезу реки Лены на высоте около 1 м над уровнем моря. Вершины водоразделов имеют разреженную растительность, сложены крупнообломочным элювием коренных пород – алевролитов каменноугольного возраста, которые обнажаются также в руслах водотоков и на обрывах, обращенных к руслу реки Лены. Мощность рыхлого чехла не превышает 5 м. Верхние части склонов сложены супесями, содержащими щебень. Нижние пологие части склонов на высотах от 5 до 50–70 м над уровнем моря сложены сильнольдистыми алевритистыми супесями с включением ледяных жил видимой шириной до 1–2 м, оторфованными в верхней части и занятыми кочкарной осоково-пушицевой тундрой [Тарбеева, Ефремов, Лебедева, 2020]. Сток склоновых вод проходит как в СТС, мощность которого достигает 50 см, так и по многочисленным ложбинам стока – наиболее увлажненным участкам склонов, в которых может формироваться поверхностный сток. Русловой сток начинается в оврагах в верховьях ручьев, где поток достигает коренных пород. На некоторых участках ручьев ниже оврагов наблюдаются области аккумуляции наносов, где русло теряется либо формируется в рыхлых отложениях.

Из трех исследованных ручьев водосбор ручья Сейсмического сильно отличается от остальных по морфологии: в его бассейне развиты более крутые склоны, левый борт долины ручья почти на всем протяжении представлен очень крутым (до 50–60°) незадернованным осыпным склоном, а сама долина имеет коленообразный изгиб под прямым углом.

По данным [1] полярной станции «Столб» имени Ю.А. Хабарова за период с 1954 по 2020 годы средняя годовая температура воздуха составляет минус 12,4°С, средняя температура января – минус 30,7°С, средняя температура июля – +8,8°С. Средний годовой слой осадков составляет 227 мм, около половины из них выпадает в виде снега.

[1] Температура воздуха и осадки по месяцам и годам: Столб Остров (Якутия, Россия) // Погода и Климат [Электронный ресурс]. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/21721.htm (дата обращения: 09.08.2021).

Таблица 1. Характеристики исследуемых водосборов
Table 1. Characteristics of the studied watersheds

Ручей	Площадь водосбора, км²	Макси-мальная высота, м	Средние уклоны ручьев	Средний модуль стока за 25.08-05.09.2020, л/с·км²	Количество проб
Метеорологический	1,03	143	0,044	5,6	10
Сейсмический	0,54	164	0,079	3,2	9
Столбовой	1,32	162	0,073	4,6	9

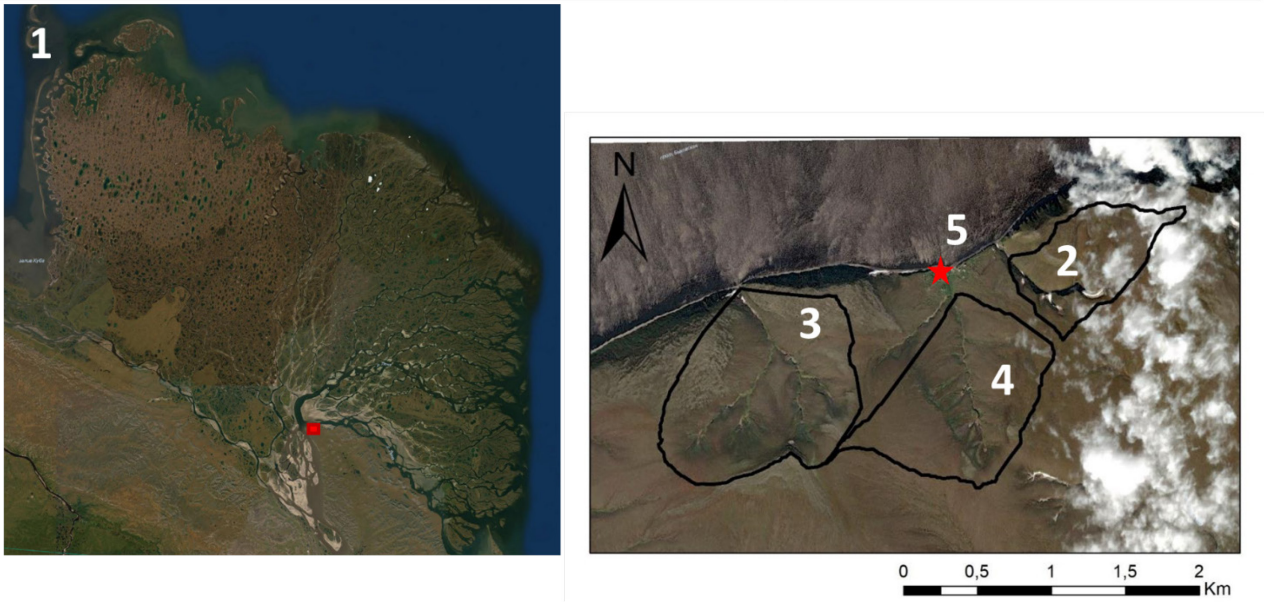

Рисунок 1. Район и объекты исследований: 1 – район работ на космическом снимке дельты реки Лены; 2 – граница бассейна ручья Сейсмический; 3 – граница бассейна ручья Столбовой; 4 – граница бассейна ручья Метеорологический; 5 – полярная станция «Столб» им. Ю.А. Хабарова.
Figure 1. Area and objects of research: 1 – area of work on the satellite image of the Lena river delta; 2 – border of the Seismicheski creek watershed; 3 – border of the Stolbovoy creek watershed; 4 – border of the Meteorologicheski creek watershed; 5 – polar station “Stolb” named after Yu.A. Khabarov.

Методы исследований

В ходе экспедиции в августе – сентябре 2020 года было проведено гидрохимическое опробование различных типов природных вод на водосборах трех ручьев (таблица 1), впадающих в Быковскую протоку дельты реки Лены. 28 проб было отобрано из ручьев, 12 проб – из их притоков, вод слоя сезонного протаивания и других водопроявлений на водосборах, одна проба из подземного льда ледника и одна проба из Быковской протоки реки Лены. Определение основных ионов и микрокомпонентов проводилось в лабораторных условиях на базе Института мерзлотоведения имени П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук. 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 титрометрии 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 (далее – TDS). Гидрохимические измерения, включающие удельную электропроводность, значение водородного показателя и температуру воды выполнялись вдоль русел ручьев от истока к устью в 2019 и 2020 годах с помощью портативного мультипараметрического анализатора HM-200 (Республика Корея).

Результаты исследований и их обсуждение

Общая характеристика химического состава природных вод

В пределах изучаемой территории опробованные воды имеют минерализацию от 60 до 1 250 мг/л (рисунок 2). До минерализации 300 мг/л в анионном составе воде преобладает гидрокарбонат-ион. При последующем повышении минерализации происходит насыщение воды гидрокарбонатом кальция, который в виде кальцита начинает выпадать в осадок и вызывает снижение роли кальция в формировании состава воды. В нормальных условиях (при температуре 20–25°С и нейтральной реакции водной среды) выпадение в осадок кальцита происходит при минерализации около 500–600 мг/л. На участке исследований насыщение водного раствора гидрокарбонатом кальция наступает значительно раньше и, по-видимому, связано с температурным фактором. Дальнейшее повышение минерализации воды происходит на фоне роста концентрации хорошо растворимых сульфатов магния и кальция, а также хлоридов магния [Анисимова, 1981; Иванов, 1998]. При минерализации раствора более 800 мг/л эти соли становятся преобладающими.

Воды ручьев пресные, их минерализация изменяется от 220 до 500 мг/л. Средние за период наблюдения значения минерализации воды ручьев Столбовой и Метеорологический около 250 мг/л, ручья Сейсмический – 430 мг/л.

Две пробы (880 и 1250 мг/л), относящиеся к солоноватым водам и водам с повышенной минерализацией, отобраны в местах высачивания воды у подножия склонов долины в верховьях ручья Метеорологического. Даже в засушливый период при отсутствии дождей около 2 недель и частичном пересыхании ручьев высачивания воды не пересыхали.

Самыми опресненными водами (<100 мг/л) являются воды СТС и притоков ручьев, формирующиеся в органогенном слое почвы без контакта с минеральным субстратом. Воды притоков с минерализацией от 150 до 500 мг/л, предположительно, взаимодействуют с горными породами, подстилающими органогенный слой. Минерализация в пробе подземного льда составляет 141 мг/л, реки Лены – 78 мг/л.

Все опробованные воды относятся к гидрокарбонатно-кальциевым или сульфатно-кальциевым первого или третьего типов (по классификации [Алекин, 1953]). Подземный лед относится к сульфатно-натриевым водам второго типа. Воды ручья Сейсмического относятся к сульфатно-кальциевым водам третьего типа, ручьев Метеорологического и Столбового – к гидрокарбонатно-кальциевым третьего типа. Солоноватые воды и воды с повышенной минерализацией относятся к сульфатно-кальциевым водам третьего типа, а слабоминерализованные притоки ручьев – к гидрокарбонатно-кальциевым водам первого типа. Водные пробы со средней минерализацией из притоков ручьев относятся к гидрокарбонатно-кальциевым водам третьего типа.

Концентрации гидрокарбонат-ионов минимальны в подземном льду, в реке Лене (45–56 мг/л) и некоторых притоках ручьев Метеорологического и Сейсмического, максимальны – на участках высачивания подземных вод в верховьях ручья Метеорологического (170–200 мг/л), относительно понижены в ручье Сейсмическом (120–145 мг/л) и повышены в ручьях Столбовом и Метеорологическом (140–160 мг/л).

Концентрации сульфат-ионов повышены в местах высачивания воды в верховьях ручьев Метеорологического (440–700 мг/л) и Столбового (228 мг/л), а самые низкие значения отмечены в некоторых притоках ручья Метеорологического (0,1–0,35 мг/л) и в реке Лене (0,5 мг/л). Концентрации сульфат-ионов в ручье Сейсмическом (100–200 мг/л) значительно превосходят их содержания в ручьях Метеорологическом и Столбовом (18–47 мг/л).

Минимальные концентрации хлоридов наблюдаются в притоках ручьев Метеорологического и Сейсмического (0,2–1,7 мг/л) и в реке Лене (2,2 мг/л), максимальные – в местах выхода склоновых вод в верховьях ручья Метеорологического (26 мг/л) и

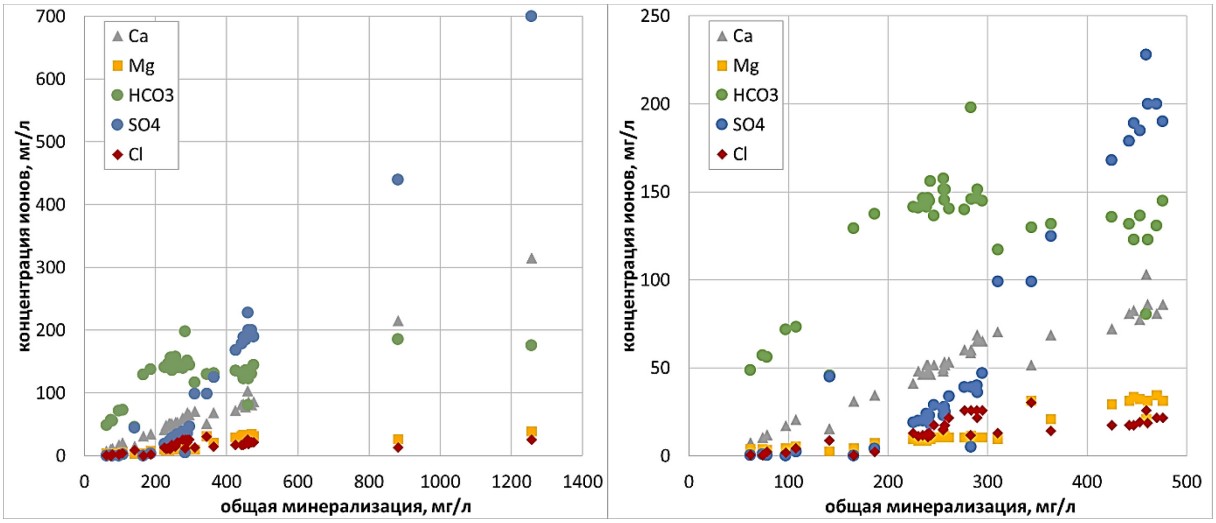

Рисунок 2. Связь общей минерализации с концентрацией основных ионов: слева – по всем пробам, справа – по пробам с минерализацией не более 500 мг/л.

Figure 2. Relationship of TDS with the concentration of major ions: on the left - for all samples, on the right – for samples with TDS of not more than 500 mg/l.

во временном напорном выходе подземных вод (грифоне) в бассейне ручья Столбового (26 мг/л). В водах ручья Метеорологического содержание хлоридов варьируются в широких пределах (от 10,8 до 26 мг/л), ручья Столбового – от 12 до 17 мг/л, ручья Сейсмического – от 14 до 22 мг/л.

Концентрации ионов кальция минимальны в притоках ручья Метеорологического и Сейсмического (7–10 мг/л), в реке Лене (12 мг/л), в подземном льду (15 мг/л) и в воде СТС (17 мг/л). Содержание ионов кальция увеличивается в воде ручьев Метеорологический и Столбовой до 40–70 мг/л, в Сейсмическом – до 70–90 мг/л. Максимальные его концентрации отмечаются в местах высачивания склоновых вод в верховьях ручьев Метеорологического (215–315 мг/л) и Столбового (103 мг/л). Ионам кальция принадлежит основная роль (60–80%) в формировании катионного состава воды относительно маломинерализованных вод ручьев.

Содержание ионов магния минимально в подземном льду (2,6 мг/л), водах реки Лены (3 мг/л) и некоторых притоков (4–10 мг/л), максимально – в местах разгрузки грунтовых вод в верховьях ручья Метеорологического (26 и 39 мг/л), а также в водах ручья Сейсмического (29–35 мг/л). Концентрации этого иона в водах ручьев Метеорологического и Столбового составляют от 8 до 12 мг/л. В процентном отношении содержания магния к остальным катионам прослеживается тенденция увеличения его доли при переходе гидрокарбонатного типа вод в сульфатный.

У четырех самых слабоминерализованных водных проб (воды СТС, притоки ручьев Сейсмического и Метеорологического) наблюдаются повышенные концентрации ионов натрия (>0,7 мг/л). Обогащение ультрапресных (<100 мг/л) вод СТС и притоков ручьев Сейсмического и Метеорологического ионами натрия свидетельствуют об участии в их формировании воды, образующейся при таянии льда. Это позволяет сделать вывод, что текущие в меженный период слабоминерализованные притоки ручьев формируются за счет вытаивания льда из СТС.

Ручей Сейсмический выделяется повышенным содержанием стронция (0,36–0,46 мг/л) по сравнению с остальными водами (0–0,23 мг/л). В подземных водах, разгружающихся на поверхность в верховьях ручья Метеорологического, обнаружены максимальные значения минерализации (880 и 1260 мг/л), концентрации ионов кальция (215 и 314 мг/л), сульфат-ионов (440 и 700 мг/л) и ионов магния (26 и 39 мг/л).

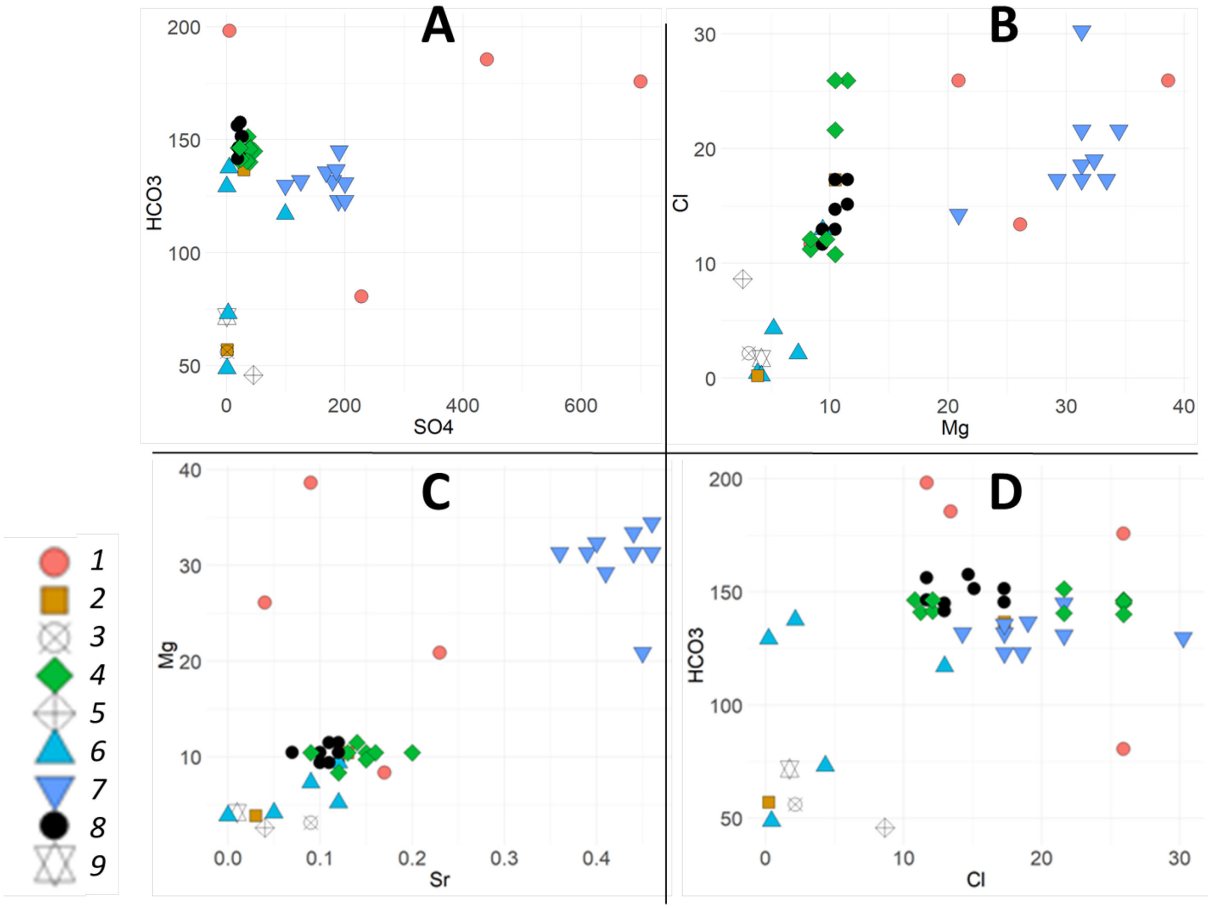

Рисунок 3. Связи концентраций некоторых ионов, мг/л: A – гидрокарбонатов с сульфатами; B – хлоридов с ионами магния; C – ионов магния с ионами бария; D – гидрокарбонатов с хлоридами. 1 – склоновые подземные воды; 2 – истоки ручьев; 3 – река Лена; 4 – ручей Метеорологический; 5 – подземный лед; 6 – притоки, формирующиеся в почвенном органогенном слое; 7 – ручей Сейсмический; 8 – ручей Столбовой; 9 – подземные воды СТС.

Figure 3. Relationships between the concentrations of selected ions, mg/l: A – bicarbonates with sulfates; B – chlorides with magnesium ions; C – magnesium ions with barium ions; D – hydrocarbonates with chlorides. 1 – slope groundwater; 2 – sources of streams; 3 – Lena River; 4 – Meteorologicheski creek; 5 – ground ice; 6 – tributaries forming in the soil organic layer; 7 – Seismicheski creek; 8 – Stolbovoy creek; 9 – groundwater of the active layer.

Связь концентраций различных химических веществ

На рисунке 3 показаны графики связи содержаний некоторых ионов. На большинстве диаграмм связи все точки объединяются в три группы, что, за некоторым исключением, может указывать на схожие источники питания вод одной группы:

1) ручьи Метеорологический и Столбовой;

2) ручей Сейсмический;

3) притоки, формирующиеся в почвенном органогенном слое, реке Лене, и подземный лед.

Точки, относящиеся к высачиваниям подземных вод в верховьях ручьев Метеорологического и Столбового на диаграммах часто отражаются в виде выбросов, поскольку концентрации большинства определяемых компонентов максимальны в водах этого типа.

В группу проб с пониженными концентрациями химических веществ входят пробы воды реки Лены, подземный лед, воды СТС и притоки ручьев, которые, по-видимому, практически не взаимодействуют с коренными

породами и питаются атмосферными осадками и талыми водами.

Пробы ручьев Метеорологического и Столбового на всех диаграммах группируются вместе. Лишь по соотношению гидрокарбонат-ионов и сульфат-ионов к стронцию в водах ручья Столбового несколько повышено содержание гидрокарбонат-ионов, чем в водах ручья Метеорологического, а концентрация сульфат-иона и стронция, наоборот, понижена.

Отдельной группой почти на всех диаграммах выделяются пробы воды ручья Сейсмического, для которых характерно обогащение (по сравнению с другими типами вод) стронцием, магнием, сульфатами и повышенная минерализация (по сравнению с другими ручьями). Это связано с тем, что значительная часть водосбора ручья Сейсмического не задернована и на ней обнажены скальные породы, в том числе практически на всем протяжении русла ручья. Активное взаимодействие воды и породы приводит к обогащению воды ручья минеральными веществами.

Гидрохимические измерения вдоль ручьев

Изменение основных гидрохимических показателей вдоль русел трех ручьев в 2020 году показаны на рисунке 4.

Гидрохимические измерения вдоль ручья Метеорологического выполнялись 3, 13 августа 2019 года и 30 августа 2020 года. В начале августа 2019 года в меженный период при пересыхании ручья на некоторых участках удельная электропроводность воды увеличивалась со 150–600 мкСм/см в истоке до максимального значения 1 500 мкСм/см на расстоянии 885 м от устья и затем уменьшилась до 500 мкСм/см в устье ручья. Температура воды увеличилась с 1°С у истока до 6°С в 330 м от устья, с понижением до 2°С на расстоянии 290 м от устья и ростом до 10°С в устье. После прохождения дождей 5–7 августа 2019 года во время съемки 13.08.2019 удельная электропроводность возрастала с 250 мкСм/см в истоке до 440 мкСм/см в 1 км от устья и опустилась до 230 мкСм/см в устье. Температура воды вдоль русла была почти постоянной в пределах 7–8°С и только в истоке составляла 5,4°С. Схожая ситуация с изменением электропроводности вдоль русла наблюдалась и в сентябре 2020 года, когда она увеличивалась с 350 мкСм/см в истоке до 1 480 мкСм/см примерно в 1 км от устья и уменьшилась до 400 мкСм/см в устье. Температура воды колебалась от 3 до 5,5°С. Исток ручья Метеорологического, находящийся на расстоянии 1 100 м от устья, ультрапресный. Ручей насыщается минеральными соединениями на участке протяженностью 800–1 000 м от устья, где происходит активное врезание русла в коренные породы. Ниже по течению происходит приток ультрапресной воды со склонов, и удельная электропроводность воды уменьшается к устью.

Измерения гидрохимических показателей вдоль русла ручья Сейсмического выполнялись 4 августа 2019 года и 1 сентября 2020 года в межень при отсутствии дождей около 2 недель до дня съемки. В августе 2019 года в истоке ручья на расстоянии 800 м от устья воды были холодные (2°С) и опресненные (100 мкСм/см). Ниже по течению удельная электропроводность воды постепенно увеличилась до 800 мкСм/см на расстоянии 450 м от устья и затем уменьшилась до 450 мкСм/см к устью. Температура воды увеличилась до 6,5°С на расстоянии 550–700 м от устья и затем уменьшилась до 4,3°С на расстоянии 450 м от устья и опять поднялась до 7°С к устью ручья. Изменение показателей на расстоянии 450 м от устья объясняется влиянием холодного и опресненного притока, формирующегося за счет таяния снежника. В целом вниз по течению ручья вода прогревается и обогащается растворенными веществами за счет взаимодействия с подстилающими породами. Водородный показатель оказался стабилен вдоль русла ручья и увеличился с 6 в истоке до 7 в устье.

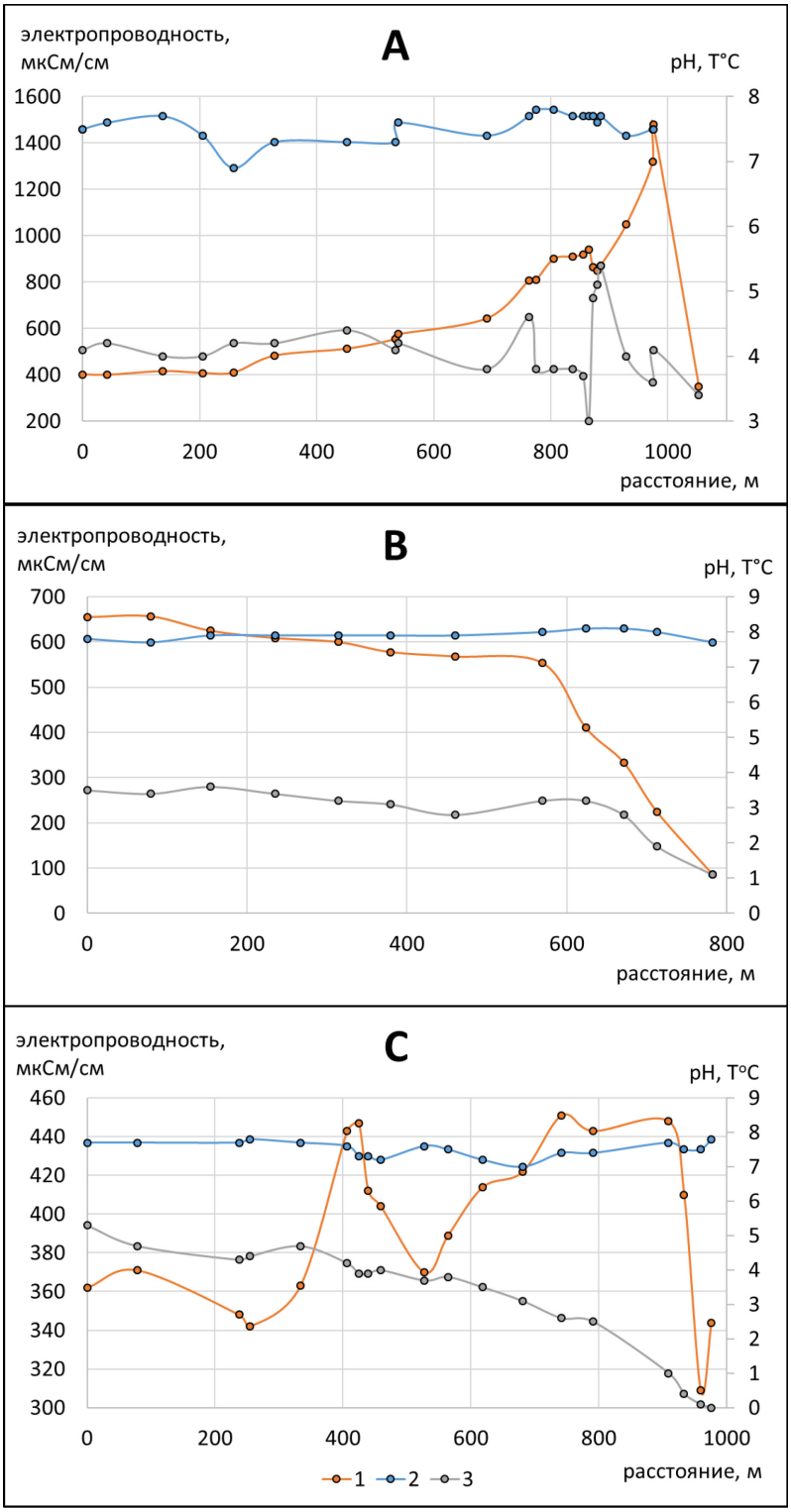

Рисунок 4. Изменение основных гидрохимических показателей вдоль русел ручьев: А – ручей Метеорологический, 30.08.2020; В – ручей Сейсмический, 01.09.2020; С – ручей Столбовой, 30.08.2020. 1 – удельная электропроводность, мкСм/см; 2 – водородный показатель pH; 3 – температура воды, °С. Расстояние показано от устья к истоку.

Figure 4. Changes of the basic hydrochemical parameters along the streams channels: A – Meteorologicheski creek, 08/30/2020; B – Seismicheski creek, 09/01/2020; C – Stolbovoy creek, 08/30/2020. 1 – specific electrical conductivity, μS/cm; 2 – pH; 3 – water temperature, °C. The distance is shown from the mouth to the source.

В сентябре 2020 года удельная электропроводность и температура воды в истоке составляли 100 мкСм/см и 1°С. Ниже по течению вода интенсивно прогревалась и обогащалась растворенными веществами на протяжении 250 м. На расстоянии 550 м от устья удельная электропроводность и температура воды были равны 550 мкСм/см и 3,2°С. Далее оба показателя плавно увеличивались до значений 650 мкСм/см и 3,5°С в устье ручья. К сентябрю 2020 года снежник полностью стаял и приток, впадавший на расстоянии 450 м от устья, пересох.

Можно сделать заключение, что в меженный период исток ручья Сейсмического формируется в относительно бедном минеральными соединениями органогенном почвенном горизонте на контакте с кровлей многолетнемерзлых пород. Вниз по течению происходит прогрев воды в русле, выщелачивание минеральных соединений из обнажающихся в русле коренных пород, а также подпитка ручья более минерализованными водами из трещиноватых коренных пород. Пока снежник тает, холодные и опресненные воды притока влияют на удельную электропроводность и температуру ручья.

Гидрохимические измерения вдоль ручья Столбового выполнялись 4, 11 августа 2019 года и 30 августа 2020 года. В начале августа 2019 года при пересыхании ручья на пониженных участках с сохраняющейся водой от истока к устью ее удельная электропроводность колебалась от 190 до 460 мкСм/см с минимумами в истоке и на расстоянии 600 м от устья, с максимумами на расстоянии 960 и 400 м от устья, а также в устье. Температура воды колебалась противоположным образом: с минимумами 1,6–3°С в истоке, локальным повышением до 7,5°С на расстоянии 600 м от устья и с максимумами выше 9°С в устье. После дождей 5–7 августа, во время съемки 11 августа 2019 года ход электропроводности и температуры воды вдоль русла ручья сгладился. Максимум электропроводности 280 мкСм/см наблюдался в 740 м от устья, минимумы около 210 мкСм/см – вблизи устья и истока ручья. Температура воды увеличивалась от истока к устью с 0°С до 8°С. 30 августа 2020 года, как и в межень 2019 года, наблюдалось два пика максимальной электропроводности вдоль русла – на расстоянии 400 и 750–900 м от устья (участок интенсивного врезания русла). Вблизи истока, устья и на расстоянии 520 м от устья фиксировались минимумы электропроводности 310–370 мкСм/см, два последних из которых связаны с впадением ультрапресных притоков. Температура воды при этом плавно увеличивалась с 0 до 5°С от истока к устью.

Выводы

Воды, формирующиеся на исследованных малых тундровых водосборах, контрастны по химическому составу. Максимальные концентрации химических веществ, вплоть до солоноватого типа вод, характерны для высачиваний подземных вод, состав которых формируется при длительном взаимодействии с материнскими породами. Так, на водосборе ручья Метеорологического, уклон которого почти в два раза меньше, чем у других обследованных ручьев, наблюдаются высачивания наиболее минерализованных вод. Наиболее пресные воды приурочены к органогенным горизонтам почвенного профиля. Повышенные концентрации ионов натрия в ультрапресных притоках ручьев свидетельствуют об их формировании за счет вытаивания льда СТС. С ростом минерализации, превышающей 300 мг/л, происходит смена гидрокарбонатных вод на сульфатные.

Истоки ручьев Столбового и Метеорологического ультрапресные, холодные и иногда имеют слабокислую реакцию, что говорит об их формировании в обедненном минеральными веществами органогенном почвенном горизонте СТС по контакту с кровлей многолетнемерзлых отложений. На участках активного врезания русла в коренные породы воды ручьев обогащаются минеральными соединениями, благодаря чему их удельная электропроводность достигает максимальных значений. Ниже по течению происходит прогрев воды в русле и приток ультрапресной воды со склонов, сформированной в грубогумусной части СТС, в результате удельная электропроводность воды уменьшается к устью.

В ручье Сейсмическом обогащение воды растворенными химическими веществами происходит по всей длине ручья благодаря его врезанию в подстилающие горные породы и низкой степени задернованности водосбора.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-05-00840. Логистика обеспечена Российско-Германской экспедицией. Авторы благодарят сотрудников Полярной станции им. Ю.А. Хабарова и Усть-Ленского заповедника за помощь в проведении полевых работ.

Литература

Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1953. 297 с.

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

Губарева Т.С., Гарцман Б.И., Василенко Н.Г. Источники формирования речного стока в зоне многолетней мерзлоты: оценка методами трассерной гидрологии по данным режимных гидрохимических наблюдений // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 1. С. 32–43. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(32-43).

Иванов А.В. Криогенная метаморфизация состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск: Дальнаука, 1998. 163 с.

Тарбеева А.М. Мониторинг овражной термоэрозии на севере Якутии // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и северо-запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 8. (г. Санкт-Петербург, 16–17 декабря 2021 года). С. 228–234.
DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-228-234.

Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С. Термоэрозионные процессы в бассейнах малых рек арктического побережья Якутии вблизи дельты р. Лены // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Выпуск 8. (г. Санкт-Петербург, 17–18 декабря 2020 года). С. 215–220. DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10733.

References

Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]*, Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1953. 297 p. (In Russian).

Anisimova N.P. *Kriogidrogeokhimicheskie osobennosti merzloi zony [Cryohydrogeochemical features of the permafrost zone]*. Novosibirsk, Publ. Nauka, 1981. 153 p. (In Russian).

Blaen P.J., Hannah D.M., Brown L.E., Milner A.M. Water temperature dynamics in High Arctic River basins. *Hydrological Processes*, 2013, vol. 27, iss. 20, pp. 2958–2972. DOI: 10.1002/hyp.9431.

Carey S.K., Quinton W.L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data. *Nordic Hydrology*, 2004, vol. 35, no. 4–5, pp. 309–324. DOI: 10.2166/nh.2004.0023.

Colombo N., Salerno F., Gruber S., Freppaz M., Williams M., Fratianni S., Giardino M. Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water. *Global and Planetary Change*, 2018, vol. 162, pp. 69–83. DOI:10.1016/J.GLOPLACHA.2017.11.017.

Gubareva T.S., Gartsman B.I., Vasilenko N.G. Sources of river flow formation in the zone of permafrost: estimation by the methods of tracer hydrology according to the data of regime hydrochemical observations. *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 29–40. DOI: 10.21782/EC2541-9994-2018-1(29-40).
(Russ. ed.: Gubareva T.S., Gartsman B.I., Vasilenko N.G. Istochniki formirovaniya rechnogo stoka v zone mnogoletnei merzloty: otsenka metodami trassernoi gidrologii po dannym rezhimnykh gidrokhimicheskikh nablyudenii. *Kriosfera Zemli*, 2018, vol. 22, iss. 1, pp. 32–43. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(32-43)).

Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы / Отв. редакторы Георгиади А.Г., Золотокрылин А.Н. Тверь: Триада, 2007. 575 с.

Трегубов О.Д., Гарцман Б.И., Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Шепелев В.В. Пространственная и временная динамика источников питания и водного режима рек Анадырской низменности // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 4. С. 427–438. DOI: 10.31857/S0321059621040180.

Blaen P.J., Hannah D.M., Brown L.E., Milner A.M. Water temperature dynamics in High Arctic river basins // Hydrological Processes. 2013. Vol. 27. Iss. 20. Pp. 2958–2972. DOI: 10.1002/hyp.9431.

Carey S.K., Quinton W.L. Evaluating snowmelt runoff generation in a discontinuous permafrost catchment using stable isotope, hydrochemical and hydrometric data // Nordic Hydrology. 2004. Vol. 35. No. 4–5. Pp. 309–324. DOI: 10.2166/nh.2004.0023.

Colombo N., Salerno F., Gruber S., Freppaz M., Williams M., Fratianni S., Giardino M. Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water // Global and Planetary Change. 2018. Vol. 162. Pp. 69–83. DOI:10.1016/J.GLOPLACHA.2017.11.017.

Helbig M., Boike J., Langer M., Schreiber P., Runkle B.R.K., Kutzbach L. Spatial and seasonal variability of polygonal tundra water balance: Lena River Delta, northern Siberia (Russia) // Hydrogeology Journal. 2013. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 133–147. DOI: 10.1007/s10040-012-0933-4.

Kutzbach L. The exchange of energy, water and carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena river delta, Northern Siberia. PhD zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburg, Universität Hamburg, 2006. 160 p. DOI: 10.2312/BZPM_0541_2006.

Lamhonwah D., Lafrenière M.J., Lamoureux S.F., Wolfe B.B. Multi-year impacts of permafrost disturbance and thermal perturbation on high Arctic stream chemistry // Arctic Science. 2017. Vol. 3. No. 2. Pp. 254–276. DOI: 10.1139/as-2016-0024.

Helbig M., Boike J., Langer M., Schreiber P., Runkle B.R.K., Kutzbach L. Spatial and seasonal variability of polygonal tundra water balance: Lena River Delta, northern Siberia (Russia). *Hydrogeology Journal*, 2013, vol. 21, iss. 1, pp. 133–147. DOI: 10.1007/s10040-012-0933-4.

Ivanov A.V. *Kriogennaya metamorfizatsiya sostava prirodnykh l'dov, zamerzayushchikh i talykh vod [Cryogenic metamorphization of the composition of natural ice, freezing and melt waters]*. Khabarovsk, Publ. Dal'nauka, 1998. 163 p. (In Russian).

Kutzbach L. *The exchange of energy, water and carbon dioxide between wet arctic tundra and the atmosphere at the Lena River delta, Northern Siberia.* PhD zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. Hamburg, Universität Hamburg, 2006. 160 p. DOI: 10.2312/BZPM_0541_2006.

Lamhonwah D., Lafrenière M.J., Lamoureux S.F., Wolfe B.B. Multi-year impacts of permafrost disturbance and thermal perturbation on high Arctic stream chemistry. *Arctic Science*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 254–276. DOI: 10.1139/as-2016-0024.

Tarbeeva A.M. Monitoring ovrazhnoi termoerozii na severe Yakutii [Monitoring of gully thermal erosion in the north of Yakutia]. *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i severo-zapada Rossii. Materialy ezhegodnoi konferentsii po rezul'tatam ekspeditsionnykh issledovanii. Vypusk 8. (g. Sankt-Peterburg, 16–17 dekabrya 2021 goda) [Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. Proceedings of the annual conference on the results of expedition research. Issue 8. (St. Peterburg, 16–17 December 2021)]*, pp. 228–234. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-228-234.

Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review // Vadose Zone Journal. 2016. Vol. 15. Iss. 6. Pp. 1–20. DOI: 10.2136/VZJ2016.01.0010.

Tarbeeva A.M., Efremov V.S., Lebedeva L.S. Termoerozionnye protsessy v basseinakh malykh rek arkticheskogo poberezh'ya Yakutii vblizi del'ty r. Leny [Thermoerosion in the small basins of the arctic coast of Yakutia near the Lena delta]. *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarktiki i severo-zapada Rossii. Materialy ezhegodnoi konferentsii po rezul'tatam ekspeditsionnykh issledovanii. Vypusk 7. (g. Sankt-Peterburg, 17–18 dekabrya 2020 goda) [Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. Proceedings of the annual conference on the results of expedition research. Issue 7. (St. Peterburg, 17–18 December 2020)],* pp. 215–220. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.24411/2687-1092-2020-10733.

Teplovodoobmen v merzlotnykh landshaftakh Vostochnoi Sibiri i ego faktory [Heat and water exchange in permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors]. Tver', Publ. Triada, 2007. 575 p. (In Russian).

Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Spatial and temporal dynamics of sources and water regime of the Ugol'naya-Dionisiya river (Anadyr lowland, Chukotka). *Water Resources*, 2021, vol. 48, iss. 4, pp. 521–531. DOI: 10.1134/S0097807821040187. (Russ. ed.: Tregubov O.D., Gartsman B.I., Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Shepelev V.V. Prostranstvennaya i vremennaya dinamika istochnikov pitaniya i vodnogo rezhima rek Anadyrskoj nizmennosti. *Vodnye resursy*, 2021, vol. 48, iss. 4, pp. 427–438. DOI: 10.31857/S0321059621040180).

Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic impacts of thawing permafrost – a review. *Vadose Zone Journal*, 2016, vol. 15, iss. 6, pp. 1–20. DOI: 10.2136/VZJ2016.01.0010.