

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ СУШИ

УДК 556.114.5:551.345.1

DOI: 10.15372/KZ20230202

**ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОД КРУПНЫХ РЕК ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ  
И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МОЩНОСТИ СЛОЯ  
СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ПОЧВ НА ВОДОСБОРАХ****О.И. Габышева<sup>1,\*</sup>, В.А. Габышев<sup>1</sup>, И.А. Якшина<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН – обособленное подразделение  
ФГБУН ФИЦ “Якутский научный центр СО РАН”, 677980, Якутск, пр. Ленина, 41, Россия*<sup>2</sup> *Государственный природный заповедник “Усть-Ленский”,  
678400, пос. Тикси, ул. Академика Федорова, 28, Россия**\*Автор для контакта, g89248693006@yandex.ru*

На основе наблюдений, проведенных в 2007–2011 гг. в период летней межени на 12 наиболее крупных реках Восточной Сибири (Лена, Алдан, Колыма, Вилюй, Индигирка, Яна, Витим, Оленёк, Олёкма, Анабар, Чара, Амга), охарактеризованы основные особенности химического состава и физических показателей их вод. Установлено, что для исследованных рек характерен благоприятный кислородный режим, относительно высокие показатели химического потребления кислорода и цветности, повышенная концентрация железа общего, иона аммония и невысокое содержание солей. На территории Восточной Сибири многолетняя мерзлота имеет повсеместное распространение. Мощность залегающего над ней слоя сезонного протаивания пород сильно варьирует на различных участках водосборов региона. С применением метода канонических корреляций определено, что содержание в водах исследованных рек ряда компонентов солевого состава (жесткости, ионов кальция, магния, гидрокарбонатов, сульфат-ионов и суммы солей) зависит от мощности сезонноталого слоя. При этом на участках водосборов с наиболее мощным сезонноталым слоем для рек характерна максимальная концентрация данных компонентов солевого состава. Это объясняется тем, что мерзлота образует барьер на пути проникновения поверхностного стока в глубокие минеральные горизонты, препятствуя насыщению воды ионами минеральных веществ.

**Ключевые слова:** физико-химический состав вод, главные ионы, сумма солей, многолетняя мерзлота, сезонноталый слой, крупные реки, Восточная Сибирь.

**Ссылка для цитирования:** Габышева О.И., Габышев В.А., Якшина И.А. Химический состав вод крупных рек Восточной Сибири и его зависимость от мощности слоя сезонного протаивания почв на водосборах // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 2, с. 16–24. DOI: 10.15372/KZ20230202.

**CHEMICAL COMPOSITION OF THE WATER OF LARGE EAST SIBERIAN RIVERS  
AND ITS DEPENDENCE ON THE THICKNESS OF SEASONALLY THAWED LAYER  
IN THE CATCHMENTS****O.I. Gabysheva<sup>1,\*</sup>, V.A. Gabyshev<sup>1</sup>, I.A. Yakshina<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Institute for Biological Problems of the Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Lenina ave. 41, Yakutsk, 677980, Russia*<sup>2</sup> *Ust-Lensky State Nature Reserve, str. Akademika Fedorova 28, Tiksi, 678400, Russia**\*Corresponding author, g89248693006@yandex.ru*

Based on observations on 12 largest rivers of East Siberia (Lena, Vilyuy, Kolyma, Aldan, Olenek, Vitim, Indigirka, Amga, Olekma, Anabar, Yana, and Chara) during summer low-water runoff in 2007–2011, the main features of the chemical composition and physical properties of river water have been determined. It is found that favorable oxygen regime, higher chemical oxygen demand and color of water, higher concentration of total iron and ammonium ions, and moderate salinity are characteristic of the investigated rivers. The territory of East Siberia is characterized by an ubiquitous distribution of permafrost. The thickness of seasonally thawed layer within river catchments is extremely variable in the studied region. Using canonical-correlation analysis, it was found that concentrations of specific components of ionic constituents (water hardness, calcium, magnesium, bicarbonates, sulfate ions, and salinity) depend on the active layer thickness (ALT). Herewith, the deeper the active layer in a catchment, the higher the concentration of mentioned components of ionic constituents. This pattern is explained by the fact that permafrost serves as a confining barrier that prevents infiltration of surface water through deep mineral horizons thus restricting water saturation with mineral ions. The increase in ALT noted in recent decades in the permafrost zone of the northern hemisphere may continue in the

current century. Therefore, knowledge of how the concentration of soluble biogeochemical constituents in the rivers depends on ALT of permafrost in the catchments is valuable for assessment of potential changes in the chemical composition of river water in the permafrost zone in the future.

**Keywords:** physico-chemical composition of water, major ions, salinity, permafrost, seasonally thawed layer, large rivers, East Siberia.

## ВВЕДЕНИЕ

На территории Восточной Сибири многолетнемерзлые породы (ММП) имеют почти повсеместное распространение. Мощность ММП составляет в центральной части региона 350–450 м, а на севере, в бассейне р. Оленёк, достигает 1500 м [Шенелев, 2009]. Мощность сезонноталого слоя (СТС) варьирует от 0.1 до 1.5 м на севере региона, на приморских участках, а к югу, в бореальной зоне, его глубина достигает 3 м [Десяткин и др., 2009]. В центральной части региона сезонное протаивание начинается в конце апреля и достигает максимума в конце августа. В октябре идет промерзание одновременно сверху и снизу, промерзшие слои смыкаются в конце ноября–декабре примерно на глубине 0.7–0.8 м от мощности протаивающего слоя [Атлас..., 1989].

Такая характеристика многолетней мерзлоты, как мощность СТС, имеет значительный потенциал воздействия на химический состав поверхностных вод криолитозоны [Smith et al., 2005; Frey, McClelland, 2009]. Механизмы такого воздействия могут быть различными. Во-первых, растворимые химические компоненты, зафиксированные в верхнем горизонте мерзлоты, становятся лабильными, когда оказываются в пределах СТС. Во-вторых, на водосборах с более мощным СТС глубина поверхностного стока и длительность пребывания воды в почве иные в сравнении с водосборами с маломощным СТС. Это оказывает воздействие на химический состав поверхностных вод посредством реакций обмена между водой и почвой. И наконец, на химический состав рек влияет баланс между вкладом в их питание осадков и грунтовых вод, который различается на водосборах с разной мощностью СТС.

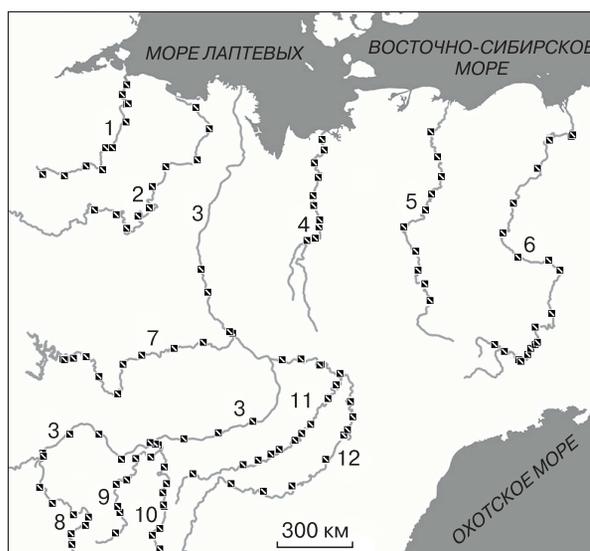
В современных условиях глобальных климатических изменений актуальность вопросов, связанных с изучением особенностей воздействия мощности СТС на водосборе на химический состав речных вод, повышается. Так, согласно результатам моделирования динамики сезонного протаивания пород [Stendel, Christensen, 2002], вероятно увеличение мощности СТС на 30–40 % для большинства районов распространения многолетней мерзлоты в Северном полушарии к 2100 г. Для таких регионов, как Восточная Сибирь, где ММП распространены повсеместно, трансформации, вызванные процессами деградации мерзлоты, могут быть наиболее драматичными из-за своих масштабов, поскольку охватят всю территорию.

Поэтому знание механизмов воздействия мощности СТС на химический состав речных вод важно для прогноза как химического состава рек Арктики, так и темпов поступления растворенных веществ в Северный Ледовитый океан.

Цель настоящего исследования состоит в том, чтобы охарактеризовать основные особенности химического состава и физических показателей вод крупных рек Восточной Сибири и оценить особенности воздействия мощности СТС водосборов региона на формирование химического состава речных вод.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящим исследованием охвачено 12 наиболее крупных рек Восточной Сибири: Лена, Вилюй, Колыма, Алдан, Оленёк, Витим, Индигирка, Амга, Олёкма, Анабар, Яна и Чара (рис. 1). Отбор гидрохимических проб произведен из поверхностного горизонта (0–0.3 м) в прибрежье рек и по фарватеру в летнюю межень (июнь–август) 2007–2011 гг. Консервация и хранение водных образцов выполнены в соответствии с общепринятыми методиками [Семенов, 1977].



**Рис. 1.** Карта-схема района работ и пункты наблюдений (квадраты).

Реки: 1 – Анабар, 2 – Оленёк, 3 – Лена, 4 – Яна, 5 – Индигирка, 6 – Колыма, 7 – Вилюй, 8 – Витим, 9 – Чара, 10 – Олёкма, 11 – Амга, 12 – Алдан.

Прозрачность воды определялась по диску Секки; цветность – фотометрическим методом на приборе СФ-26; водородный показатель – потенциометрическим методом на приборе “Мульти-тест ИПЛ-101”; взвешенные вещества – гравиметрическим методом; содержание кислорода – титриметрическим методом; процентная насыщенность кислородом – расчетным методом; диоксид углерода – титриметрическим методом с фенолфталеином; жесткость, кальций – титриметрическим методом; магний – расчетным методом; натрий, калий – методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе ААС АAnalyst400; гидрокарбонаты – титриметрическим методом обратного титрования; хлорид-ионы – меркуриметрическим методом; сульфат-ионы – турбидиметрическим методом на приборе СФ-26; минерализация (сумма растворенных солей) – расчетным методом; ион аммония – фотометрическим методом с реактивом Несслера на приборе СФ-26; нитрит-ион – фотометрическим методом с реактивом Грисса на приборе СФ-26; нитрат-ион – фотометрическим методом с салициловой кислотой на приборе СФ-26; фосфат-ионы, кремний – фотометрическим методом с молибдатом аммония на приборе СФ-26; фосфор общий – фотометрическим методом с персульфатом аммония на приборе СФ-26; железо общее – фотометрическим методом с сульфациловой кислотой на приборе СФ-26; биологическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) – титриметрическим методом (йодометрическое определение); химическое потребление кислорода (ХПК) – фотометрическим методом на приборе “Флюорат-02”; нефтепродукты, фенолы, анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ) – флуориметрическим методом на приборе “Флюорат-02”. Для характеристики рек применяли общепринятые в гидрохимии классификации [Алекина, 1953, 1970], а также использовали систему предельно допустимых концентраций для условий рыбохозяйственного водопользования (ПДК<sub>рх</sub>).

Полные сведения о физико-химических параметрах вод в каждом пункте отбора проб на исследованных реках были опубликованы ранее [Габышев, Габышева, 2018].

Данные о мощности СТС (минимальной, средней и максимальной) извлечены с помощью программного пакета ArcGIS в соответствии с координатами точек наблюдений авторов (см. рис. 1) из набора данных с привязкой к географическим координатам. Описанный набор данных основан на материалах 1960–1987 гг., является приложением к работе К. Бири и др. [Beer et al., 2013] и доступен в репозитории PANGEA в виде файла NetCDF. Также использована карта России “Сезонное промерзание и протаивание грунтов” [Вечная мерзлота..., 2001].

Сформированный авторами массив данных включает две группы количественных переменных: физико-химические показатели воды (28 переменных) и характеристики сезонноталого слоя (3 переменные). Общее количество наблюдений массива – 303.

Подход в анализе множественных корреляционных связей заключался в использовании метода канонических корреляций для парного набора количественных признаков [Афифи, Эйзен, 1982], описывающих СТС и физико-химические показатели речных вод. Применение многомерной модели анализа канонических величин позволило также дискриминировать (различить) данные рассматриваемого массива по группирующему признаку (исследованным рекам). При проверке статистических гипотез критический уровень статистической значимости принимался равным 5%. Процедуры статистического анализа выполнялись в программном пакете Statistica 10.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание взвешенных веществ для рек Алдан, Оленёк, Колыма не превышают 10 мг/дм<sup>3</sup> (здесь и далее приведены средние значения для реки в целом), для рек Яна, Анабар, Индигирка варьирует в диапазоне от 25 до 65 мг/дм<sup>3</sup>, для остальных рек (Вилуй, Чара, Олёкма, Лена, Витим, Амга) составляет 14–18 мг/дм<sup>3</sup>. По водородному показателю речные воды являются неагрессивными. Для рек Алдан, Вилуй, Яна и Колыма значения pH свидетельствуют о смещении реакции в нейтральную сторону (7.14–7.47). Воды остальных рек (Чара, Олёкма, Лена, Витим, Амга, Анабар, Оленёк, Индигирка) обладают слабощелочной реакцией среды (7.57–8.44).

Большинство рек характеризуются средним содержанием кислорода 8.90–10.80 мг/дм<sup>3</sup> при 93–99%-й насыщенности. Воды рек Алдан, Яна, Амга незначительно перенасыщены кислородом – в среднем степень насыщения составляет 102–118 % при концентрации кислорода 9.90–11.50 мг/дм<sup>3</sup>. В р. Анабар степень насыщения характеризуется более низкими значениями, которые в среднем по реке составляют 7.43 мг/дм<sup>3</sup> при 69%-й насыщенности, что указывает также на благоприятный кислородный режим. Случаев дефицита кислорода не зафиксировано. Содержание углекислого газа невысокое и меняется в относительно узких пределах – от 1 до 6 мг/дм<sup>3</sup>.

По классификации О.А. Алекина воды большей части исследованных рек являются пресными, маломинерализованными (в среднем от 43.4 до 113.8 мг/л), по показателю жесткости – очень мягкими (от 0.49 до 1.28 мг-экв/л). Исключение составляют реки Амга и Оленёк. Их воды среднеминерализованные, среднежесткие для р. Амга

(279.3 мг/л, 3.39 мг-экв/л) и мягкие для р. Оленёк (249.3 мг/л, 2.84 мг-экв/л).

Все реки характеризуются относительно невысокой концентрацией главных ионов. Содержание кальция не превышает 45 мг/дм<sup>3</sup>, магния – 20 мг/дм<sup>3</sup>, натрия – 10 мг/дм<sup>3</sup>, калия – 2 мг/дм<sup>3</sup>, гидрокарбонатов – 200 мг/дм<sup>3</sup>, сульфатов – 50 мг/дм<sup>3</sup>, хлоридов – 15 мг/дм<sup>3</sup>. По распределению главных ионов, согласно классификации О.А. Алекина, большая часть речных вод (Алдан, Вилюй, Лена, Витим, Амга, Анабар, Оленёк, Колыма) относится к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе, II–III типа. Исключение составляют воды рек Чара, Олёкма, Яна и Индигирка, они относятся к сульфатному классу, кальциевой группе, II–III типа.

Для рек региона характерны относительно высокие показатели ХПК и повышенное содержание ионов аммония и железа общего. Среднее значение фактической концентрации для ионов аммония варьирует по рекам от 200 до 1095 мкг/дм<sup>3</sup> (при ПДК 500 мкг/дм<sup>3</sup>); по показателю цветности – от 7 до 57° (при ПДК 20°); по железу общему варьирует от 0.04 до 0.98 мг/дм<sup>3</sup> (при ПДК 0.10 мг/дм<sup>3</sup>); по показателю ХПК – от 11 до 58 мг/дм<sup>3</sup> (при ПДК 15 мг/дм<sup>3</sup>).

Содержание неорганических соединений невысокое: нитриты – 11 мкг/дм<sup>3</sup>, фосфаты – 55 мкг/дм<sup>3</sup>, фосфор общий – 150 мкг/дм<sup>3</sup>, нитраты – 650 мкг/дм<sup>3</sup>, кремний – 3 мг/дм<sup>3</sup>. Концентрация фенолов не превышает 5 мкг/дм<sup>3</sup>, нефтепродуктов – 45 мкг/дм<sup>3</sup>, АПАВ – 157 мкг/дм<sup>3</sup>. Значение БПК<sub>5</sub> невелико и составляет 1.50 мг/дм<sup>3</sup>.

Для исследованных рек характерно незначительное превышение ПДК по ХПК (1.0–3.9 ПДК), показателю цветности (1.0–2.9 ПДК), иону аммония (1.0–2.2 ПДК). Исключение отмечено по содержанию железа общего. В реках Лена, Витим, Индигирка и Яна обнаруженные концентрации превышали ПДК<sub>рв</sub> в 5–10 раз, для рек Чара, Алдан, Вилюй, Олёкма, Лена, Анабар, Колыма кратность превышения составляла 1.9–4.0 ПДК.

Поиск связи между парами наборов признаков, характеризующих, с одной стороны, физико-

химические показатели речных вод (28 переменных, далее – набор ГИДРОХИМИЯ) и, с другой, – характеристики сезонноталого слоя мерзлотных почв на территории бассейнов рек (3 переменные, далее – набор СТС), выполнен методом канонических корреляций. Как известно, число рассчитанных канонических коэффициентов корреляции соответствует минимальному количеству признаков в одном из двух анализируемых наборов и в данном случае равно 3. Для наиболее информативного (первого) решения каноническая корреляция между характеристиками СТС мерзлотных почв и показателями химического состава речных вод, скорректированная на объем наблюдений, составила  $R = 0.75$ . Таким образом, связь между набором признаков СТС и набором признаков ГИДРОХИМИЯ характеризуется как сильная. Уровень значимости первой канонической корреляции  $p < 0.0001$ , следовательно, полученный результат пригоден для анализа. В прикладных исследованиях большую известность получили четыре критерия (табл. 1), являющиеся тестовыми статистиками, на основе которых исследователь может принять решение о нулевой гипотезе. Кроме них, в табл. 1 приведены F-значение (критерий Фишера) и показатель Pг (>F), обозначающий вероятность того, что между наборами переменных отсутствует реальная связь. Критерий Фишера для каждой тестовой статистики изменяется (см. табл. 1), но Pг (>F) для каждого теста меньше 0.05, поэтому мы отвергаем нулевую гипотезу анализа и делаем вывод, что между двумя исследуемыми наборами признаков (СТС и ГИДРОХИМИЯ) связь действительно существует.

Для более подробного сравнительного анализа рассмотрены нормализованные канонические коэффициенты, т. е. z-преобразованные переменные с нулевым средним и единичным стандартным отклонением. Рассчитаны коэффициенты связи между признаками обоих наборов (СТС и ГИДРОХИМИЯ) и тремя каноническими осями. Максимальные корреляции между собой имеют первые канонические оси, вследствие этого они наиболее информативны и представляют интерес для анализа. В табл. 2 приведены коэффициенты связи между характеристиками сезонноталого слоя мерзлотных почв и канонической осью СТС1, ранжированные в порядке убывания их мо-

Таблица 1. Многомерная статистика канонической корреляции признаков в наборах СТС (3 признака) и ГИДРОХИМИЯ (28 признаков)

Статистика	Значение	F-значение	Pг (>F)
Лямбда Уилкса	0.17	7.81	<0.0001
Признак Пилляя	1.26	7.05	<0.0001
Признак Хотеллинга–Луоли	2.65	8.56	<0.0001
Наибольший корень Роя	1.55	15.20	<0.0001

Примечание. F – критерий Фишера, Pг – значение вероятности для теста Фишера.

Таблица 2. Нормализованные канонические коэффициенты для оси СТС1

Признак	Вес признака
Мощность сезонноталого слоя, м	
Максимальная	0.94
Минимальная	0.15
Средняя	-0.04

Таблица 3. Нормализованные канонические коэффициенты для оси ГИДРОХИМИЯ1

Признак	Вес признака
Жесткость, мг-экв/л	196.90
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	143.62
Сумма солей, мг/л	142.07
HCO <sup>3-</sup> , мг/л	104.48
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	88.68
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	27.94
Cl <sup>-</sup> , мг/л	7.09
Na <sup>+</sup> , мг/л	5.05
Фенолы, мкг/л	1.09
K <sup>+</sup> , мг/л	-0.75
Si, мг/л	0.38
NH <sub>4</sub> , мг/л	-0.36
CO <sub>2</sub> , мг/л	0.29
АПAB, мг/л	0.22
ХПК, мг/л	0.22
БПК <sub>5</sub> , мг/л	0.17
Насыщенность кислородом, %	-0.16
PO <sub>4</sub> , мкг/л	0.12
Цветность, град	-0.12
Прозрачность воды, м	-0.11
pH, ед.	-0.10
NO <sub>3</sub> , мг/л	-0.10
Fe <sub>общ</sub> , мг/л	-0.10
O <sub>2</sub> , мг/л	0.09
NO <sub>2</sub> , мкг/л	0.09
Взвешенные вещества, мг/л	-0.04
P <sub>общ</sub> , мкг/л	-0.04
Нефтепродукты, мг/л	0.03

Примечание. АПАВ – анионные поверхностно-активные вещества, ХПК – химическое потребление кислорода, БПК<sub>5</sub> – биологическое потребление кислорода.

дуля. Эти коэффициенты стандартизованные и безразмерные, поэтому пригодны для сравнения между собой. Максимальный вес в исследуемой канонической оси имеет признак “максимальная мощность сезонноталого слоя”. Другие характеристики СТС имеют незначительные веса.

Среди физико-химических параметров вод наибольшее значение имеют жесткость, сумма солей и показатели ионного состава (кальций, гидрокарбонаты, магний и сульфат-ионы) (табл. 3).

Таким образом, указанные компоненты солевого состава вод тесно связаны с мощностью сезонноталого слоя мерзлотных почв. При этом, чем больше глубина сезонного оттаивания, тем выше содержание солей в речных водах.

Данные исследуемого массива были дискриминированы (различены) в двух полученных канонических осях по исследованным рекам. На диаграмме рассеяния (рис. 2) вертикальная ось отражает совокупно подмножество гидрохимиче-

ских показателей, а горизонтальная ось – характеристики СТС. Каждая точка на рис. 2 соответствует одному наблюдению (пункту отбора проб). Примененный в исследовании метод канонических корреляций позволяет дискриминировать данные между группами наблюдений. Были дискриминированы данные по 12 исследованным рекам. Для того чтобы прочесть результат анализа по данной диаграмме рассеяния, нужно оценить расположение наблюдений в двух канонических осях. Ось ординат на диаграмме соответствует канонической оси ГИДРОХИМИЯ1, на которой максимальные веса имеют такие параметры, как жесткость, сумма солей. Ось абсцисс соответствует канонической оси СТС1, в которой наибольший вес имеет признак “максимальная мощность сезонноталого слоя”. Оценив, в какой четверти диаграммы расположено каждое наблюдение и где сгруппирована большая их часть, можно определить условия, характеризующие реку по максимальной мощности СТС, жесткости и степени минерализации воды. Вдоль соответствующей оси диаграммы эти параметры возрастают.

Результаты классификации наблюдений по исследованным рекам в двух этих осях наглядно показывают, что такие арктические реки, впадающие в Северный Ледовитый океан, как Оленёк, Индигирка и Яна, протекают по территории с СТС малой мощности (см. рис. 2). Реки центральной части региона (Амга, Олёкма, Алдан, Вилюй) расположены в зоне с мощным СТС. А реки, пересекающие значительные расстояния в меридиональном направлении (Колыма, Лена), а также южные реки (Витим, Чара), верховья которых расположены в горных районах, на разных своих участках протекают в зонах с различной глубиной сезонного протаивания мерзлотных почв. Для р. Анабар наблюдения разделились по оси СТС1 на две группы, часть наблюдений характеризуется СТС малой мощности, а часть смещена по оси абсцисс влево от нулевой отметки, это говорит о том, что частично для этой реки характерен более глубокий СТС. Видно также, что реки с наибольшей концентрацией компонентов солевого состава в воде расположены в центральной части рассматриваемого региона (Амга, Олёкма, Вилюй, Алдан).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для исследованных крупных рек Восточной Сибири отмечен благоприятный кислородный режим. Большая часть рек характеризуется невысоким содержанием солей. Известно, что в питании р. Амга, в отличие от других рек региона, существенную роль играют подземные воды [Саввинов и др., 2000], этим могут объясняться повышенные показатели жесткости вод Амги. Относительно высокие показатели ХПК и цветности, повышен-

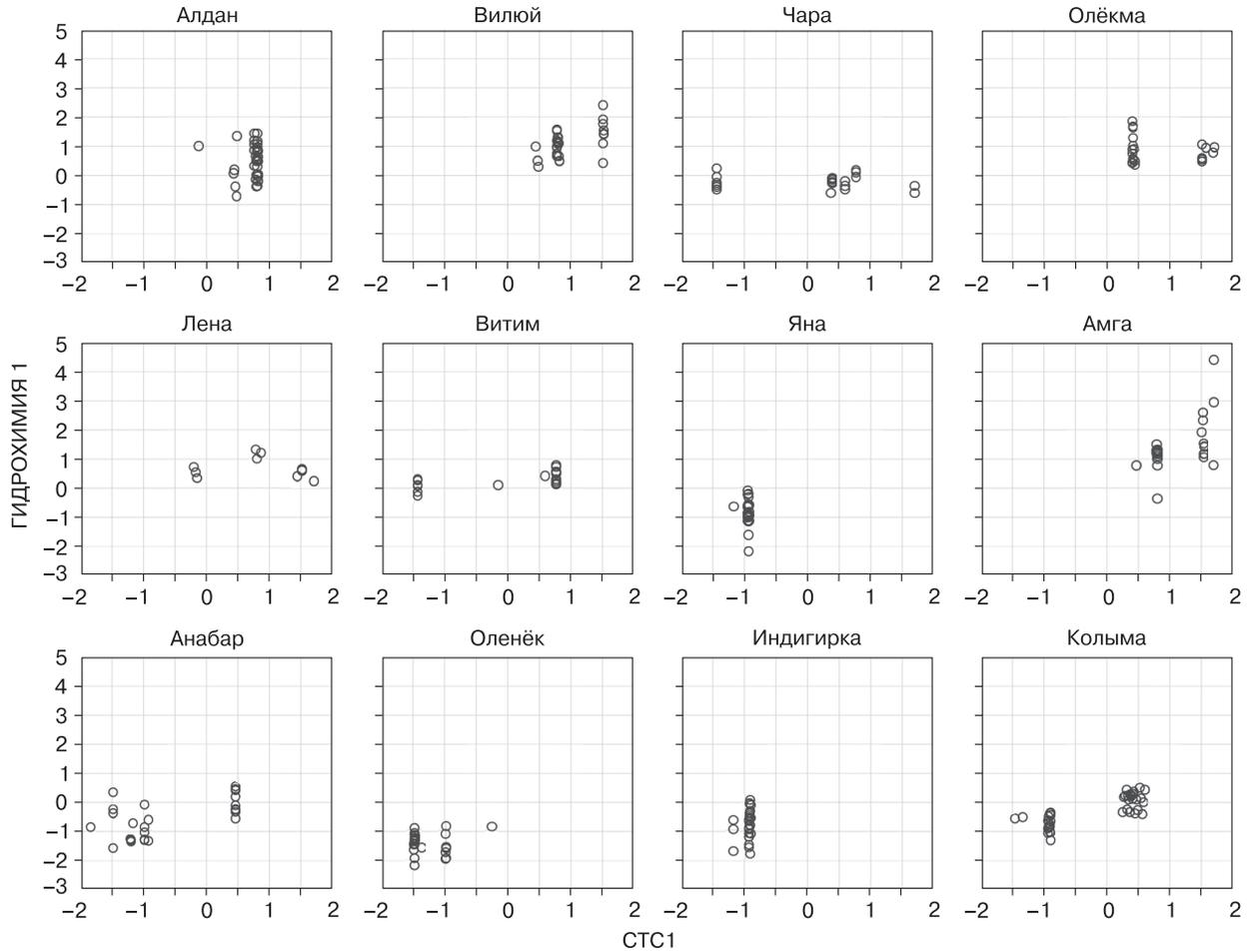


Рис. 2. Диаграмма рассеяния наблюдений, категоризованных по исследованным рекам в канонических осях ГИДРОХИМИЯ1 (28 признаков) и СТС1 (3 признака).

ная концентрация железа общего и иона аммония характерны для многих водоемов и водотоков региона и вызваны природными факторами [Кириллов и др., 1979; Венглинский и др., 1987]. Это явление связано с поступлением в поверхностные воды веществ природного происхождения, накопление которых происходит в результате естественных процессов, таких как выщелачивание из железомарганцевых, медно-колчедановых и других руд, в результате разложения донных осадков и др. [Зенин, Белоусова, 1988].

Результаты канонической корреляции свидетельствуют о наличии связи между мощностью СТС и концентрацией ряда компонентов солевого состава, а именно, жесткости, суммы солей, ионов кальция, гидрокарбонатов, магния и сульфат-ионов. Мощность СТС характеризуется низкими значениями на севере региона, а также в горных районах на юге. В центральной части региона мощность СТС в целом выше [Beer et al., 2013]. Сопоставление закономерностей пространствен-

ного распределения СТС на водосборах Восточной Сибири и концентрации анализируемых показателей физико-химического состава речных вод позволило выявить следующую закономерность: чем больше глубина сезонного оттаивания на водосборе, тем выше концентрация указанных компонентов солевого состава. Наиболее высокая концентрация по совокупности шести перечисленных компонентов солевого состава отмечена для четырех рек центральной части региона (Амга, Олёкма, Вилюй, Алдан), протекающих по территории с наиболее мощным СТС. И наоборот, большинство арктических рек, приуроченных к водосборам с маломощным СТС, характеризуются низкими показателями содержания этих компонентов солевого состава.

Данная закономерность может быть объяснена с применением элементов концептуальной модели влияния мощности сезонного слоя пород на химический состав поверхностных вод, разработанной Р. Маклином с соавт. [MacLean et al.,

1999]. В весенний период поверхностный сток ограничен верхними слоями грунтов вне зависимости от того, распространена многолетняя или сезонная мерзлота. Но позднее, ближе к летней межени, такой фактор, как многолетняя мерзлота, а точнее, мощность сезонноталого слоя оказывает сильное влияние на глубину проникновения в грунт поверхностного стока. Концептуальная модель, о которой идет речь, опирается на известный факт, что верхний почвенный горизонт характеризуется накопленными запасами органических веществ, а нижележащий слой – минеральный. Сезонноталый слой малой мощности удерживает сток вблизи от поверхности пород, препятствуя его проникновению в минеральный почвенный горизонт. Более мощный СТС приводит к сокращению времени контакта инфильтрующихся поверхностных вод с верхним горизонтом почв и обеспечивает надмерзлотный сток через нижележащие горизонты, богатые минеральными веществами [Frey, McClelland, 2009]. Такое различие в путях поверхностного стока оказывает влияние на химический состав вод за счет реакций обмена между почвой и водой [Colombo et al., 2018]. Таким образом, мощность СТС оказывает воздействие на естественный процесс переноса растворимых веществ из почв в реки с поверхностным стоком.

Сравнительное исследование, проведенное на водотоках Западной Сибири, также показало, что многолетняя мерзлота препятствует насыщению речных вод минеральными веществами. Так, было выявлено, что общее содержание неорганических растворенных веществ, определяемое как сумма восьми компонентов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), составляет в среднем 289 мг/л для рек, на водосборах которых отсутствует многолетняя мерзлота, и 48 мг/л для рек с водосборами, расположенными в криолитозоне [Frey et al., 2007]. Это различие в общей минерализации вод авторы связывают с гидрологическими особенностями данных водосборов, которые зависят от наличия многолетней мерзлоты. По мнению исследователей, многолетняя мерзлота образует барьер, препятствующий инфильтрации поверхностного стока в глубокие минеральные горизонты, а также ограничивает приток обогащенных минералами подмерзлотных вод в поверхностные воды [Woo, Winter, 1993; Michel, van Everdingen, 1994; Woo et al., 2000].

Эта гипотеза находит подтверждение и в других работах. На примере водосборов Аляски с островным распространением мерзлоты было установлено более высокое содержание гидрокарбонатов, сульфатов, а также ионов кальция, магния, калия и натрия в реках, протекающих на участках водосборов, лишенных мерзлоты, в сравнении со смежными участками криолитозоны

[Stottlemeyer, 2001; Petrone et al., 2006, 2007; Keller et al., 2007]. Для таящих ручьев на Аляске доказано значительное снижение концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  под влиянием многолетней мерзлоты, которая ограничивает сток в пределах верхнего почвенного горизонта [MacLean et al., 1999]. Исследования, проведенные на водосборах Центральной Сибири, свидетельствуют, что концентрация в водотоках региона ионов кальция, натрия, магния и калия значительно повышается летом по сравнению с весенним периодом. Это связывают с тем, что в летний период минеральный горизонт почв становится частью СТС, при этом к нему открывается доступ поверхностного стока и превращает его в источник поступления в речную воду ионов минеральных веществ [Parham et al., 2013].

Сравнительные геохимические исследования современного СТС и кровли ММП показывают, что верхний слой мерзлоты богаче минеральными веществами по отношению к вышерасположенному сезонноталому слою, что обусловлено постепенным удалением растворенных веществ из СТС [Kokelj, Burn, 2005]. Это косвенно подтверждает правильность выбранной концептуальной модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Водосборы Восточной Сибири характеризуются повсеместным распространением многолетней мерзлоты сплошного типа, островного и прерывистого. Мощность слоя сезонного протаивания пород значительно варьирует в пределах региона и является фактором, который контролирует естественный процесс переноса с поверхностным стоком растворимых веществ из почв в реки. Установлено, что для исследованных рек региона характерен благоприятный кислородный режим, относительно высокие показатели ХПК и цветности, повышенная концентрация железа общего, иона аммония и невысокое содержание солей.

Химический состав речных вод формируется в сложной природной системе, в которой действует множество факторов: литологический состав пород, слагающих водосборы и речные русла; подрусловые талики с напорными водами; рельеф, который определяет скорость водного потока, и, соответственно, время взаимодействия речных вод с подстилающими отложениями и т. д. В настоящей работе рассмотрено влияние на химический состав речных вод региона такого фактора, как мощность СТС. В результате установлено наличие связи между мощностью СТС на водосборе и концентрацией в речных водах некоторых компонентов солевого состава: жесткости, суммы солей и ионов кальция, магния, гидрокарбонатов, сульфат-ионов. Определено также, что на участках водосборов региона с более мощным СТС содержание данных компонентов солевого состава в

речных водах выше по сравнению с реками, протекающими на участках с СТС меньшей глубины. Для рек центральной части региона (Амга, Олёкма, Вилюй, Алдан), протекающих по водосборам с мощным СТС, характерно наибольшее содержание указанных компонентов солевого состава. Выявленная закономерность согласуется с основными положениями концептуальной модели влияния мощности СТС на химический состав речных вод.

В последние десятилетия для всей территории распространения многолетней мерзлоты в Северном полушарии отмечается рост мощности СТС, существуют прогнозы его увеличения в текущем столетии. В связи с этим полученные результаты важны для решения вопросов оценки возможных изменений химического состава речных вод арктических регионов в будущем и темпов поступления растворенных веществ в Северный Ледовитый океан.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проектам № FWR5-2021-0026, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190036-6 и № FWR5-2021-0023, ЕГИСУ НИОКТР № АААА-А21-121012190038-0, а также Министерства природных ресурсов и экологии РФ по проекту № 1-22-81-4.

### Литература

- Алекин О.А.** Основы гидрохимии. Л., Гидрометеоздат, 1953, 250 с.
- Алекин О.А.** Основы гидрохимии. Л., Гидрометеоздат, 1970, 443 с.
- Атлас сельского хозяйства Якутской АССР /** Под ред. И.А. Матвеева и др. М., ГУГК СССР, 1989, 116 с.
- Афифи А.** Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ / А. Афифи, С. Эйзен. М., Мир, 1982, 488 с.
- Венглинский Д.Л.** Особенности экологии гидробионтов нижней Лены / Д.Л. Венглинский, Т.М. Лабутина, Р.И. Огай и др. Якутск, Изд. ЯФ СО АН СССР, 1987, 184 с.
- Вечная мерзлота.** М-6 1:15 000 000. Сезонное промерзание и протаивание грунтов. М-6 1:30 000 000. Национальный атлас России. Т. 2. Природа. Экология. М., Роскартография, 2001, с. 240–242.
- Габышев В.А.** Фитопланктон крупных рек Якутии и сопредельных территорий Восточной Сибири / В.А. Габышев, О.И. Габышева. Новосибирск, АНС “СибАК”, 2018, 416 с.
- Десяткин Р.В.** Почвы Якутии / Р.В. Десяткин, М.В. Оконешникова, А.Р. Десяткин. Якутск, Бичик, 2009, 64 с.
- Зенин А.А.** Гидрохимический словарь / А.А. Зенин, Н.В. Белоусова. Л., Гидрометеоздат, 1988, 239 с.
- Кириллов Ф.Н.** Биология Вилюйского водохранилища / Ф.Н. Кириллов, А.Ф. Кириллов, Т.М. Лабутина. Новосибирск, Наука, 1979, 272 с.
- Саввинов Д.Д.** Прикладная экология Амги / Д.Д. Саввинов, Г.Н. Саввинов, Н.П. Прокопьев и др. Якутск, Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2000, 168 с.
- Семенов А.Д.** Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л., Гидрометеоздат, 1977, 540 с.
- Шепелёв В.В.** Многолетняя мерзлота Республики Саха (Якутия), комплексный атлас. Якутск, ФГУП “Якут. аэрогеодез. предприятие”, 2009, с. 30–31.
- Beer C., Fedorov A.N., Torgovkin Y.** Permafrost temperature and active-layer thickness of Yakutia with 0.5-degree spatial resolution for model evaluation // *Earth Syst. Sci. Data*, 2013, vol. 5, iss. 2, p. 305–310.
- Colombo N., Salerno F., Gruber S. et al.** Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water // *Glob. Planet. Change*, 2018, vol. 162, p. 69–83.
- Frey K.E., McClelland J.W.** Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry // *Hydrol. Process.*, 2009, vol. 23, iss. 1, p. 169–182.
- Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C.** Geochemistry of West Siberian streams and their potential response to permafrost degradation // *Water Resour. Res.*, 2007, vol. 43, p. W03406.
- Keller K., Blum J.D., Kling G.W.** Geochemistry of soils and streams on surfaces of varying ages in arctic Alaska // *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 2007, vol. 39, iss. 1, p. 84–98.
- Kokelj S.V., Burn C.R.** Geochemistry of the active layer and nearsurface permafrost, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada // *Can. J. Earth Sci.*, 2005, vol. 42, p. 37–48.
- MacLean R., Oswood M.W., Irons J.G., McDowell W.H.** The effect of permafrost on stream biogeochemistry: A case study of two streams in the Alaskan (USA) taiga // *Biogeochemistry*, 1999, vol. 47, iss. 3, p. 239–267.
- Michel F.A., van Everdingen R.O.** Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic-change // *Permafrost Periglac. Process.*, 1994, vol. 5, p. 191–195.
- Parham L.M., Prokushkin A.S., Pokrovsky O.S. et al.** Permafrost and fire as regulators of stream chemistry in basins of the Central Siberian Plateau // *Biogeochemistry*, 2013, vol. 116, p. 55–68.
- Petrone K.C., Hinzman L.D., Shibata H. et al.** The influence of fire and permafrost on sub-arctic stream chemistry during storms // *Hydrol. Process.*, 2007, vol. 21, iss. 4, p. 423–434.
- Petrone K.C., Jones J.B., Hinzman L.D., Boone R.D.** Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost // *J. Geophys. Res.*, 2006, vol. 111, p. G02020.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D.** Disappearing arctic lakes // *Science*, 2005, vol. 308, iss. 5727, p. 1429.
- Stendel M., Christensen J.H.** Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, iss. 13, p. 1632.
- Stottlemeyer R.** Biogeochemistry of a treeline watershed, northwestern Alaska // *J. Environ. Qual.*, 2001, vol. 30, iss. 6, p. 1990–1998.
- Woo M.-K., Marsh P., Pomeroy J.W.** Snow, frozen soils and permafrost hydrology in Canada, 1995–1998 // *Hydrol. Process.*, 2000, vol. 14, p. 1591–1611.
- Woo M.-K., Winter T.C.** The role of permafrost and seasonal frost in the hydrology of northern wetlands in North America // *J. Hydrol.*, 1993, vol. 141, p. 5–31.
- Zhang T., Barry R.G., Knowles K. et al.** Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere // *Polar Geogr.*, 1999, vol. 23, iss. 2, p. 132–154.

## References

- Alekin O.A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1953, 250 p. (in Russian).
- Alekin O.A. Osnovy gidrokhimii [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970, 443 p. (in Russian).
- Atlas sel'skogo khozyaystva Yakutskoy ASSR [Atlas of Agriculture of the Yakut ASSR]. I.A. Matveev et al. (Eds.). Moscow, GUGK SSSR, 1989, 116 p. (in Russian).
- Afifi A.A., Azen S.P. Statisticheskii analiz: Podkhod s ispol'zovaniyem EVM [Statistical analysis. A computer oriented approach]. Moscow, Mir, 1982, 488 p. (in Russian).
- Venglinsky D.L., Labutina T.M., Ogay R.I. et al. Osobennosti ekologii gidrobiontov nizhney Leny [Features of the ecology of hydrobionts of the lower Lena River]. Yakutsk, YaF SO AN SSSR, 1987, 184 p. (in Russian).
- Vechnaya merzlota [Permafrost]. Scale 1:15 000 000. Sezonnoye promerzaniye i protaivaniye gruntov [Seasonal freezing and thawing of soils]. Scale 1:30 000 000. National Atlas of Russia. Vol. 2. Nature. Ecology. Moscow, Roskartografiya, 2001, p. 240–242 (in Russian).
- Gabyshhev V.A., Gabyshева O.I. Fitoplankton krupnykh rek Yakutii i sopredel'nykh territoriy Vostochnoy Sibiri [Phytoplankton of the largest rivers of Yakutia and adjacent territories of Eastern Siberia]. Novosibirsk, SibAk, 2018, p. 379–401 (in Russian).
- Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V., Desyatkin A.R. Pochvy Yakutii [Soils of Yakutia]. Yakutsk, Bichik, 2009, 64 p. (in Russian).
- Zenin A.A., Belousova N.V. Gidrokhimicheskiy slovar' [Hydrochemical Dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 239 p. (in Russian).
- Kirillov F.N., Kirillov A.F., Labutina T.M. Biologiya Vilyuyskogo vodokhranilishcha [Biology of the Vilyui reservoir]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 272 p. (in Russian).
- Savvinov D.D., Savvinov G.N., Prokopiev N.P. et al. Prikladnaya ekologiya Amgi [Applied ecology of Amga River]. Yakutsk, YaSC SO RAN, 2000, 168 p. (in Russian).
- Semenov A.D. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi [Manual on chemical analysis of land surface waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977, 540 p. (in Russian).
- Shepelev V.V. Mnogoletnyaya merzlota Respublika Sakha (Yakutiya), kompleksnyy atlas [Permafrost of the Republic of Sakha (Yakutia), complex atlas]. Yakutsk, Izd-vo FGUP "Yakutskoye aerogeodezicheskoye predpriyatiye", 2009, p. 30–31 (in Russian).
- Beer C., Fedorov A.N., Torgovkin Y. Permafrost temperature and active-layer thickness of Yakutia with 0.5-degree spatial resolution for model evaluation. Earth Syst. Sci. Data, 2013, vol. 5, iss. 2, p. 305–310, DOI: 10.5194/essd-5-305-2013.
- Colombo N., Salerno F., Gruber S. et al. Review: Impacts of permafrost degradation on inorganic chemistry of surface fresh water. Glob. Planet. Change, 2018, vol. 162, p. 69–83, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2017.11.017.
- Frey K.E., McClelland J.W. Impacts of permafrost degradation on arctic river biogeochemistry. Hydrol. Process., 2009, vol. 23, iss. 1, p. 169–182, DOI: 10.1002/hyp.7196.
- Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. Geochemistry of West Siberian streams and their potential response to permafrost degradation. Water Resour. Res., 2007, vol. 43, p. W03406, DOI: 10.1029/2006WR004902.
- Keller K., Blum J.D., Kling G.W. Geochemistry of soils and streams on surfaces of varying ages in arctic Alaska. Arct. Antarct. Alp. Res., 2007, vol. 39, iss. 1, p. 84–98, DOI: 10.1657/1523-0430(2007)39[84:GOSASO]2.0.CO;2.
- Kokelj S.V., Burn C.R. Geochemistry of the active layer and nearsurface permafrost, Mackenzie delta region, Northwest Territories, Canada. Can. J. Earth Sci., 2005, vol. 42, p. 37–48, DOI: 10.1139/e04-089.
- MacLean R., Oswald M.W., Irons J.G., McDowell W.H. The effect of permafrost on stream biogeochemistry: A case study of two streams in the Alaskan (USA) taiga. Biogeochemistry, 1999, vol. 47, iss. 3, p. 239–267, DOI: 10.1007/BF00992909.
- Michel F.A., van Everdingen R.O. Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic-change. Permafrost Periglacial. Process., 1994, vol. 5, p. 191–195, DOI: 10.1002/ppp.3430050308.
- Parham L.M., Prokushkin A.S., Pokrovsky O.S. et al. Permafrost and fire as regulators of stream chemistry in basins of the Central Siberian Plateau. Biogeochemistry, 2013, vol. 116, p. 55–68, DOI: 10.1007/s10533-013-9922-5.
- Petrone K.C., Hinzman L.D., Shibata H. et al. The influence of fire and permafrost on sub-arctic stream chemistry during storms. Hydrol. Process., 2007, vol. 21, iss. 4, p. 423–434, DOI: 10.1002/hyp.6247.
- Petrone K.C., Jones J.B., Hinzman L.D., Boone R.D. Seasonal export of carbon, nitrogen, and major solutes from Alaskan catchments with discontinuous permafrost. J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, p. G02020, DOI: 10.1029/2005JG000055.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing arctic lakes. Science, 2005, vol. 308, iss. 5727, p. 1429, DOI: 10.1126/science.1108142.
- Stendel M., Christensen J.H. Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM. Geophys. Res. Lett., 2002, vol. 29, iss. 13, p. 1632, DOI: 10.1029/2001GL014345.
- Stottlemeyer R. Biogeochemistry of a treeline watershed, northwestern Alaska. J. Environ. Qual., 2001, vol. 30, iss. 6, p. 1990–1998, DOI: 10.2134/jeq2001.1990.
- Woo M.-K., Marsh P., Pomeroy J.W. Snow, frozen soils and permafrost hydrology in Canada, 1995–1998. Hydrol. Process., 2000, vol. 14, p. 1591–1611, DOI: 10.1002/1099-1085(20000630)14:9<1591::AID-HYP78>3.0.CO;2-W/
- Woo M.-K., Winter T.C. The role of permafrost and seasonal frost in the hydrology of northern wetlands in North America. J. Hydrol., 1993, vol. 141, p. 5–31, DOI: 10.1016/0022-1694(93)90043-9.
- Zhang T., Barry R.G., Knowles K. et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground ice distribution in the Northern Hemisphere. Polar Geogr., 1999, vol. 23, iss. 2, p. 132–154, DOI: 10.1080/10889379909377670.

*Поступила в редакцию 14 апреля 2022 г.,  
после доработки – 17 октября 2022 г.,  
принята к публикации 24 января 2023 г.*