

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Научная статья

УДК 574:556.55

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ОЗЁР
ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ АРКТИЧЕСКОГО ГОРОДА
(НА ПРИМЕРЕ НАДЫМА)**

Андрей Владимирович Соромотин^{1✉}, Николай Владиславович Приходько², Олег Сергеевич Сизов³,
Александр Владимирович Дайзель⁴, Александр Алексеевич Кудрявцев⁵, Милена Римовна Закирова⁶

^{1,2,4,5,6} ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Россия

³ Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Россия

¹ asoromotin@mail.ru ✉

² prihnick@yandex.ru

³ kabanin@yandex.ru

⁴ a.v.dajzel@utmn.ru

⁵ a.a.kudryavcev@utmn.ru

⁶ milenaarslan8@gmail.com

Аннотация. Проведена геоэкологическая оценка естественных и городских термокарстовых озёр на примере типичного для Западно-Сибирской Арктики города Надыма. Несмотря на то, что в городе отсутствует развитая промышленность, установлена антропогенная трансформация геохимического состава поверхностных вод городских термокарстовых озёр по сравнению с фоновыми озерами, которая проявляется в повышении щелочности воды и в хроническом загрязнении нефтепродуктами. Причинами этих изменений являются захламление береговых зон строительным мусором и историческое загрязнение цементной пылью от домостроительного комбината. Поверхностные воды и донные отложения городских озёр содержат значительные концентрации нефтепродуктов, длительное время попадающие с поверхностным стоком с территории гаражных кооперативов промзоны. Показано, что геоэкологический анализ городских озёр должен учитывать не только нейтральные или возрастающие эффекты природных факторов, но и местные условия и исторический аспект антропогенного воздействия.

Ключевые слова: Арктика, термокарстовые озёра, влияние города, геоэкология, нефтепродукты, Надым

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-55-71004.

Для цитирования: Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р. Геоэкологическая оценка состояния термокарстовых озёр Западной Сибири в зоне влияния арктического города (на примере Надыма) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 2(61). С. 90–108. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108.



ECOLOGY AND NATURE USE

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108

GEOECOLOGY OF THERMOKARST LAKES OF WESTERN SIBERIA
IN THE ZONE OF INFLUENCE OF AN ARCTIC TOWN
(A CASE STUDY OF THE TOWN OF NADYM)Andrey V. Soromotin¹, Nikolay V. Prihodko², Oleg S. Sizov³, Aleksandr V. Dayzel⁴, Aleksandr A. Kudryavtsev⁵, Milena R. Zakirova⁶^{1, 2, 4, 5, 6} Tyumen State University, Tyumen, Russia³ Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia¹ asoromotin@mail.ru² prihnick@yandex.ru³ kabanin@yandex.ru⁴ a.v.dajzel@utmn.ru⁵ a.a.kudryavcev@utmn.ru⁶ milenaarslan8@gmail.com

Abstract. The paper provides geoecological assessment of natural and urban thermokarst lakes for the town of Nadym, typical of the West Siberian Arctic. Although there is no developed industry in the town, we have found that there occurs an anthropogenic transformation of the geochemical composition of the surface waters of urban thermokarst lakes in comparison with background ones, which is manifested in an increase in the alkalinity of water and in chronic contamination with petroleum products. The reasons for these changes are littering of coastal zones with construction debris and historical pollution with cement dust from the house-building plant. Surface waters and bottom sediments of urban lakes contain significant concentrations of petroleum products, which for a long time have been carried into lakes by surface runoff from the territory of garage cooperatives of the industrial zone. It is shown that geochemical analysis of urban lakes should consider not only neutral or increasing effects of natural factors but also local conditions and the historical aspect of anthropogenic impact.

Keywords: Arctic, thermokarst lakes, town influence, geoecology, petroleum products, Nadym

Financial Support: the research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (scientific project No. 20-55-71004).

For citation: Soromotin, A.V., Prihodko, N.V., Sizov, O.S., Dayzel, A.V., Kudryavtsev, A.A., Zakirova, M.R. (2022). Geoecology of thermokarst lakes of Western Siberia in the zone of influence of an arctic town (a case study of the town of Nadym). *Geographical Bulletin*. No. 2(61). Pp. 90–108. doi: 10.17072/2079-7877-2022-2-90-108.

Введение

Изменения естественных процессов в природных средах под влиянием антропогенной деятельности – важнейшая проблема современной геоэкологии. Анализ формирования химического состава поверхностных вод под воздействием различных факторов (физических, химических, биологических, природных и антропогенных) необходим для научно обоснованного прогнозирования качества естественных водоемов в условиях возрастающего антропогенного воздействия [11].

Арктика является регионом планеты, в наибольшей степени испытывающим в последнее время последствия глобальных климатических изменений и антропогенной активности. Мерзлые почвы исторически считались препятствием для мобильности загрязняющих веществ, обеспечивая их консервацию [32]. Считается, что в результате естественных термокарстовых процессов химический состав пресной воды арктических водоемов может существенно измениться при миграции различных веществ с поверхностным стоком из

мерзлых грунтов в поверхностные воды [31; 38]. Проблема взаимодействия поверхностных вод и загрязняющих веществ в Арктике достаточно детально освещена в научной литературе, особенно по органическим веществам, металлам (в первую очередь, ртути, никелю, марганцу и свинцу), а также по антропогенному закислению поверхностных вод [21; 38].

Основным видом антропогенной деятельности, приводящим к существенному изменению геоэкологического состояния природной среды на севере Западной Сибири, является добыча нефти и газа [2; 3; 29]. Обустройство месторождений, как правило, связано со строительством вахтовых поселков и отдельных промышленных городов (Новый Уренгой, Ноябрьск, Надым, Муравленко и пр.). Строительство инфраструктуры городов приводит не только к механической трансформации рельефа, но и изменяет геоэкологическое состояние прилегающих территорий, являясь главным источником техногенного химического воздействия [7].

Озера являются обязательными природными объектами в пространстве типичного северного города. В последнее время отмечается особое социальное значение открытых городских водоемов, как особых "синих" пространств, повышающих качество жизни за счет привлекательности, улучшая воздух и смягчая аномалии арктического климата, положительно сказываясь на состоянии здоровья населения [36; 37]. Следовательно, изучение техногенеза естественных природных объектов в пределах городов на фоне глобальных климатических изменений может рассматриваться как один из эколого-социальных аспектов геоэкологии. При этом озера являются одним из наиболее информативных элементов арктических экосистем для рассмотрения их эволюции в условиях активного антропогенного воздействия. Они способны адекватно отражать изменения геохимических циклов элементов, происходящие как на водосборе, так и в самом водоеме под влиянием естественных и антропогенных факторов [4; 15; 16]. Токсичные свойства загрязнителей в низкоминерализованных и низкотемпературных арктических водах проявляются более активно вследствие низкой скорости массоэнергообмена и более бедного видового разнообразия Субарктики [21]. Термокарстовые озера играют доминирующую роль в выделении CO₂ и метана в атмосферу Арктики [24]. Следовательно, изучение техногенеза водоемов в пределах городов на фоне глобальных климатических изменений может рассматриваться как один из эколого-социальных аспектов геоэкологии.

Антропогенный фактор в настоящее время вносит существенный вклад в формирование химического состава поверхностных вод, трансформируя естественные природные процессы [22]. Оценка роли различных видов антропогенного воздействия необходима для научного прогнозирования химического состава природных вод в условиях современных климатических изменений и выявления критических точек "бифуркации" в эволюции водных экосистем в понимании Т.И. Моисеенко [16].

Цель нашего исследования – выявление различий в геоэкологии естественных термокарстовых озер, находящихся в зоне влияния Надыма, как одного из типичных городов на севере Западной Сибири. В рамках данной работы рассматриваются вопросы химизма вод и донных отложений фоновых и городских озер термокарстового генезиса, а также оценка факторов формирования геоэкологических особенностей озерных вод.

Объекты и методы исследований **Характеристика объектов**

Надым расположен в центральной части Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) примерно в 100 км к югу от Полярного круга. Природные условия региона характеризуются суровой зимой и непродолжительным летом – отрицательные температуры воздуха преобладают 7–8 месяцев в году. Площадкой для строительства был выбран останец второй надпойменной террасы р. Надым, сложенный песчаными осадками. Более чем половину

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

участка террасы занимал крупный песчаный раздув – результат типичных для данного региона процессов ветровой эрозии [27]. Город расположен в районе прерывистого распространения мерзлоты в зоне активного термокарста, граница многолетней мерзлоты находится на глубине порядка 8–9 м от поверхности [1; 25].

Город Надым основан в 1972 г. на месте рабочего поселка, который с 1967 г. использовался в качестве опорной базы для освоения Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения. В августе 1971 г. в Надыме начато строительство первого капитального здания [30]. Для строительства городских объектов с 1974 по 2005 г. в городе работал завод крупнопанельного домостроения. В конце 90-х и начале 2000-х гг. в городе работали асфальтовые заводы. Основными источниками загрязнения природной среды в настоящее время являются котельные и ТЭЦ, работающие на газовом топливе, а также автотранспорт. По периметру города в промзоне и гаражных кооперативах отмечены многочисленные неорганизованные свалки строительного и бытового мусора. Аэропорт расположен на удалении 8 км на юго-восток. Зимой, когда городские котельные работают на полную мощность, преобладают юго-западные направления ветров.

Для оценки качества поверхностных вод в водных объектах в окрестностях города Надыма проведены химические исследования воды и донных отложений пяти озер, 2 из которых расположены по периферии города и 3 фоновых озера – на удалении 1,5 км на северо-запад. Водосборная площадь фоновых озер отделена от города автодорогой Надым – Салехард. Выбранные озера являются естественными, существовавшими до начала строительства города, характерны для района исследований и имеют термокарстовое происхождение. Подстилающими породами являются неогеновые глинистые и верхнечетвертичные песчаные отложения, перекрытые торфом. В летний период озера подтопляются надмерзлотными поверхностными водами (рис. 1, табл. 1).

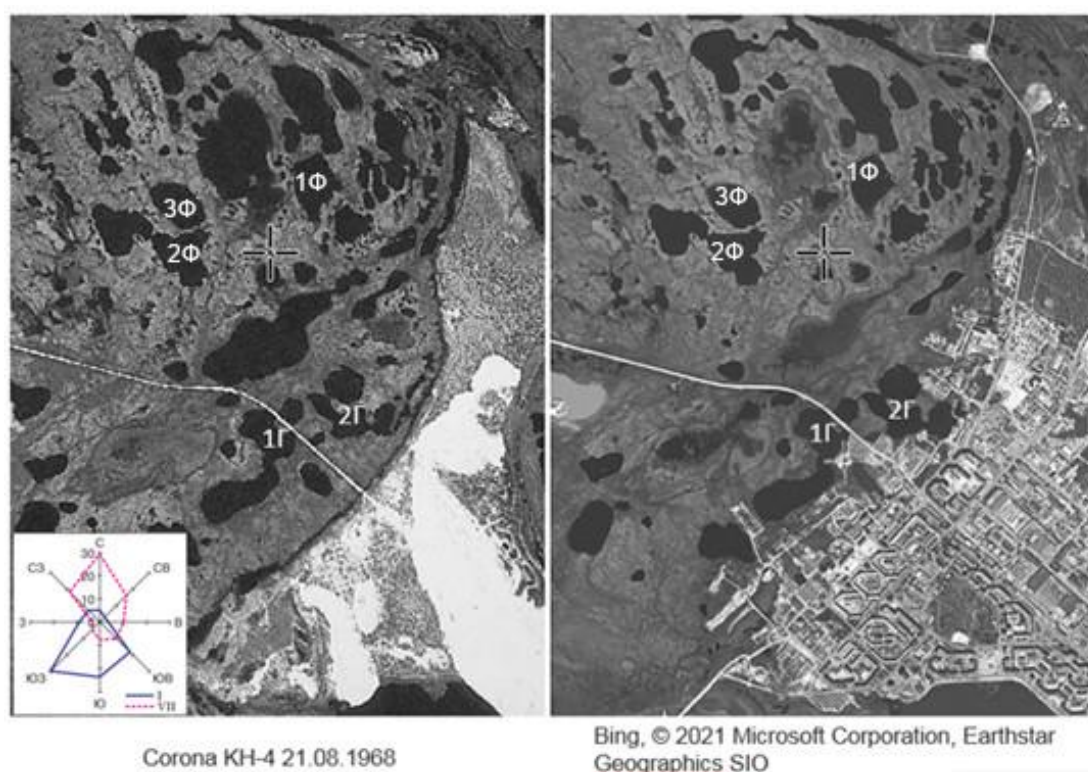


Рис. 1. Расположение термокарстовых озер около города Надыма: а – Corona, 1964; б – снимок с ресурса Bing 2021 год (номера озер соответствуют табл. 1) (<https://ageoportal.ipos-tmn.ru/nadym/>)
 Fig. 1. Location of thermokarst lakes near the town of Nadym: (a) Corona, 1964, (b) image from the Bing resource, 2021 (lake numbers correspond to Table 1) (<https://ageoportal.ipos-tmn.ru/nadym/>)

*Экология и природопользование**Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.*

Таблица 1

Географические координаты исследованных озер
Geographical coordinates of the studied lakes

<i>Обозначение озера</i>	<i>Координаты</i>
Фоновое 1 (фон 1)	65.557442° N 72.487900° E
Фоновое 2 (фон 2)	65.554381° N 72.486456° E
Фоновое 3 (фон 3)	65.555891° N 72.478432° E
Городское 1 (город 1)	65.543083° N 72.501090° E
Городское 2 (город 2)	65.543961° N 72.510790° E

Методы полевых и лабораторных анализов

Морфометрические характеристики озер определялись по результатам батиметрической съемки с помощью эхолота GPSmap 421s Garmin и путем построения батиметрических карт с помощью ArcGis 10.2, Global Mapper 14, SAS.Планета, MS Excel 2010.

Отбор проб воды с поверхностного слоя (0,5 м от поверхности) осуществлялся стеклянным батометром в конце августа 2019 г. с берега и в центральной части озер с лодки. Пробы на нефтепродукты отбирались в бутылки из темного стекла объемом 1 л, с добавлением фиксатора (четырёххлористый углерод). Отбор проб верхних 10 см минеральной части донных отложений (ДО) производился отборником Eijkelkamp. Пробы снега отбирались в марте 2021 г. на каждом из озер на всю глубину снежного покрова с последующим растапливанием при комнатной температуре, далее осуществлялись фильтрование через крупноячеистую сетку и анализ фильтрата.

Физико-химические параметры озерных вод определяли трехкратно на каждом водоеме непосредственно в полевых условиях: температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), удельная электропроводность (УЭП) и общая минерализация (М) определялись приборами фирмы HM Digital: PH-200, ORP-200, COM-100. Содержание растворенного кислорода вычислялось с помощью оксиметра AMT08 Amstat USA Inc., цветность – колориметром HI 727 HANNA, мутность измерялась в единицах на мг/дм³ по каолину с помощью анализатора AMT 27 Amstat USA Inc. Гидрохимический анализ воды и ДО осуществлялся по стандартным методикам в лабораториях Института химии ТюмГУ и АО «Региональный аналитический центр» (г. Тюмень).

Анализ нефтепродуктов в воде озер проводился по ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 ПНД Ф 14.1:2:4.128-9, в донных отложениях – по ПНД Ф 16.1:2.2.22-98.

В пробах снежного покрова, сразу после полного таяния, были определены физико-химические параметры талой воды теми же приборами, что и при анализе озерной воды.

Для статистической обработки и визуализации полученных данных использовались Statistica 10.0. В случаях, когда значения содержания ионов и элементов были ниже пределов обнаружения согласно методике, в расчет статистических характеристик принималось половинное значение соответствующего предела обнаружения.

**Результаты
Морфометрия**

Морфометрические характеристики обследованных озер представлены в табл. 2. Озера Надыма по величине площади зеркала относятся к категории очень малые и озёрки, а по глубине – к очень малым [5; 8].

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Таблица 2

Морфометрические характеристики исследованных озер
Morphometric characteristics of the studied lakes

Обозначение озера	Длина, км	Средняя ширина, км	Площадь зеркала, км ²	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м
Фон 1	0,430	0,192	0,080	1,2	0,7
Фон 2	0,453	0,219	0,097	0,7	0,6
Фон 3	0,394	0,206	0,080	0,7	0,6
Город 1	1,057	0,188	0,184	0,9	0,8
Город 2	0,980	0,192	0,164	1,3	0,8

Примечание: сокращенные обозначения озер указаны в табл. 1.

Note: designations of the lakes are given in Table 1.

Гидрохимия озер

Питание термокарстовых озер осуществляется в основном за счет талых снеговых вод (до 75 % стока), дождевые воды имеют подчиненное значение (15–20% стока), доля подземных вод составляет 5–10 % либо отсутствует [6]. Статистические характеристики физико-химических параметров и химического состава озерных, ДО и талых снеговых вод представлены в табл. 3, 4, 5 и 6.

Таблица 3

Статистические характеристики физико-химических параметров вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
Statistical characteristics of physicochemical parameters of background (numerator) and urban (denominator) lakes of Nadym

Показатель	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
pH, ед.	$\frac{4,90 (4,20 - 5,40) ***}{6,34 (6,20 - 6,82)}$	$\frac{7,6}{3,7}$
Удельная электропроводность, $\mu S/cm$	$\frac{12,0 (9,6 - 12,6) ***}{71,1 (52,2 - 81,6)}$	$\frac{11,7}{20,7}$
Солесодержание, ppt	$\frac{7,6 (6,0 - 8,0) ***}{47,7 (39,6 - 55,5)}$	$\frac{0,9}{7,0}$
Окислительно-восстановительный потенциал, mV	$\frac{256 (160 - 266) ***}{38 (11 - 63)}$	$\frac{56}{10}$
Растворенный кислород, мг/дм ³	$\frac{9,2 (7,8 - 10,2) ***}{6,6 (6,0 - 7,3)}$	$\frac{9,6}{9,3}$
Мутность, ед.	$\frac{2,4 (2,3 - 3,2) *}{1,9 (1,9 - 2,6)}$	$\frac{13,1}{11,2}$
Цветность, град.	$\frac{120 (110 - 130) ***}{68 (55 - 80)}$	$\frac{7}{20}$

Примечание: различия достоверны при * P < 0,05; *** P < 0,001.

Note: differences are significant at * P < 0.05; *** P < 0.001.

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Таблица 4

Статистические характеристики основных геохимических показателей фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
 Statistical characteristics of the main geochemical indicators of background (numerator) and urban (denominator) lakes of Nadym

Показатель	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	$\frac{21 (16 - 21) *}{10 (9 - 10)}$	$\frac{15}{7}$
Ионный состав, мг/дм ³		
NO ₃ ⁻	$\frac{0,236 (0,212 - 0,325)}{0,295 (0,136 - 0,453)}$	$\frac{23}{76}$
SO ₄ ²⁻	$\frac{0,66 (0,30 - 0,95) **}{3,99 (3,36 - 4,62)}$	$\frac{51}{22}$
HCO ₃ ⁻	$\frac{<6,1 **}{33,5 (26,8 - 40,3)}$	<u>Не определен</u> 24,6
Cl ⁻	$\frac{0,59 (0,39 - 1,48)}{1,53 (1,37 - 1,69)}$	$\frac{71}{15}$
PO ₄ ³⁻	$\frac{<0,05}{0,06 (<0,05 - 0,09)}$	$\frac{4}{80}$
K ⁺	$\frac{0,25 (0,24 - 0,26) *}{1,43 (1,06 - 1,79)}$	$\frac{4}{36}$
Na ⁺	$\frac{1,44 (1,19 - 1,97) *}{3,60 (3,44 - 3,75)}$	$\frac{26}{6}$
Mg ²⁺	$\frac{2,84 (0,52 - 3,28)}{1,64 (1,59 - 1,68)}$	$\frac{67}{4}$
Ca ²⁺	$\frac{8,4 (7,9 - 10,7)}{6,5 (4,7 - 8,5)}$	$\frac{16}{41}$
Сумма катионов	$\frac{12,7 (12,4 - 13,9)}{13,3 (15,72 - 7,58)}$	$\frac{6}{36}$
Сумма анионов	$\frac{4,4 (4,3 - 5,7) **}{39,4 (31,7 - 47,2)}$	$\frac{17}{38}$
Сухой остаток	$\frac{<50*}{67 (51 - 84)}$	<u>Не определен</u> 35
Содержание нефтепродуктов в воде, мг/дм ³		
Сумма ИК	$\frac{0,05 (0,03 - 0,06)}{0,21 (0,12 - 0,30)}$	$\frac{33}{59}$
Сумма ФЛ	$\frac{0,04 (0,03 - 0,04)}{0,218 (0,10 - 0,34)}$	$\frac{13}{79}$
Сумма аренов	$\frac{\text{Менее } 0,01}{0,04 (0,01 - 0,06)}$	<u>Не определен</u> 0,01
Содержание нефтепродуктов в ДО, мг/кг		
Сумма ИК	$\frac{26 (6 - 74) *}{282 (225 - 338)}$	$\frac{99}{28}$
Гидрохимическая формула Круглова		
Фон	$M_{17,78} \frac{HCO_3 69 SO_4 14 Cl 13 [NO_3 4]}{Ca 65 Mg 22 Na 11 [K 2]}$	Класс гидрокарбонатных, группа кальциевых, 3-й тип
Город	$M_{70,36} \frac{HCO_3 85 SO_4 11 [Cl 4]}{Ca 50 Na 27 Mg 12 K 11}$	Класс гидрокарбонатных, группа кальциевых, 1-й тип

Примечание: различия достоверны при * – P < 0,05; ** – при P < 0,01.

Note: differences are significant at * – P < 0.05; ** – at P < 0.01.

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Таблица 5

Статистические характеристики физико-химических параметров талых снеговых вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
Statistical characteristics of physicochemical parameters of snow melt water of background (numerator) and urban (denominator) lakes of Nadym

Показатель	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
pH	<u>8,03</u> (7,87 – 8,04) * 7,73 (7,72 – 7,73)	<u>1,2</u> 1,0
Удельная электропроводность, $\mu S/cm$	<u>6,4</u> (4,6 – 6,4) * 8,6 (8,0 – 9,1)	<u>14,7</u> 9,1
Солесодержание, ppm	<u>4,2</u> (3,2 – 4,3) * 5,9 (5,6 – 6,1)	<u>15,6</u> 6,0
Окислительно-восстановительный потенциал, mV	<u>162</u> (158 – 167) * 178 (177 – 178)	<u>3</u> 10

Примечание: различия достоверны при * P < 0,05.

Note: differences are significant at * P < 0,05.

Таблица 6

Статистические характеристики основных геохимических показателей талых снеговых вод фоновых (числитель) и городских (знаменатель) озер Надыма
Statistical characteristics of the main geochemical parameters of snow melt water of background (numerator) and urban (denominator) lakes of Nadym

Показатель	Медиана (min – max)	Коэффициент вариации, %
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	<u>1,1</u> (0,4 – 1,5) 0,5 (0,3 – 0,7)	<u>56</u> 54
Ионный состав, мг/дм ³		
NO ₃ ⁻	<u>0,95</u> (0,78 – 1,16) 1,09 (1,02 – 1,15)	<u>20</u> 8
SO ₄ ²⁻	<u>0,56</u> (<0,50 – 0,57) 0,39 (<0,50 – 0,53)	<u>40</u> 51
HCO ₃ ⁻	<u><6,1</u> <6,1	<u>Не определен</u> Не определен
Cl ⁻	<u><0,5</u> 0,44 (<0,50 – 0,62)	<u>Не определен</u> 60
PO ₄ ³⁻	<u><0,25</u> <0,25	<u>Не определен</u> Не определен
K ⁺	<u><0,5</u> <0,5	<u>Не определен</u> Не определен
Na ⁺	<u><0,5</u> 0,58 (<0,5 – 0,90)	<u>Не определен</u> 80
Mg ²⁺	<u><0,25</u> 0,41 (<0,25 – 0,69)	<u>Не определен</u> 98
Ca ²⁺	<u>0,71</u> (0,52 – 0,79) 0,92 (0,90 – 0,93)	<u>21</u> 2
Сумма катионов	<u>1,34</u> (1,15 – 1,42) <u>2,15</u> (1,56 – 2,74)	<u>11</u> 39
Сумма анионов	<u>5,44</u> (4,96 – 5,66) 6,10 (5,20 – 7,00)	<u>7</u> 21
Сухой остаток	<u>5,0</u> (4,2 – 5,1) 7,5 (6,4 – 8,6)	<u>10</u> 21

Вода исследованных озер ультрапресная (минерализация воды не превышает 70 мг/дм³, сухой остаток 70 мг/дм³, общее солесодержание 55,5 ppm). Максимальная УЭП не превышает 81,6 $\mu S/cm$. Кислотность характеризуется от кислой до слабокислой и близкой

к нейтральной (рН от 4,20 до 6,82). Значения ОВП в пределах от 11 до 266 mV свидетельствуют как о переходной, так и об окислительной окислительно-восстановительной ситуации в различных озерах. Отмечаются достоверные различия физико-химических параметров поверхностных вод фоновых и городских озер. Фоновые воды существенно кислее, значительно менее минерализованы и, как следствие, в 6 раз имеют более низкие значения УЭП. Вода фоновых озер более окрашена и содержит больше взвеси, более насыщена кислородом, что создает значительный ОВП окислительной реакции. Вода городских озер имеет близкую к нейтральной реакцию, более минерализована, содержит незначительную часть растворенного кислорода (и, как следствие, переходную окислительно-восстановительную среду с неустойчивым геохимическим режимом), менее окрашена и более прозрачна.

Талые снеговые воды характеризуются слабощелочной реакцией (до 8,04 ед. рН), низкими содержанием (до 9,1 ppm) и значениями УЭП (до 9,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$), окислительно-восстановительная ситуация близка к окислительной (ОВП до 178 mV). Медианы указанных параметров территорий снегонакопления фоновых и городских озер достоверно отличаются (при $P < 0,05$), талые снеговые воды близлежащих к городу озер немного кислее и более минерализованные (табл. 5).

Содержание главных ионов в воде озер Надыма довольно низкое, основным анионом является гидрокарбонат-ион, а катионом – ион кальция (табл. 4). Озера группы кальциевых гидрокарбонатного класса с низкоминерализованными водами и высокими значениями ПО наиболее типичны для севера Западной Сибири [9; 10; 18; 19; 28]. Вода фоновых озер отличается значительно более низкой общей минерализацией по сравнению с городскими озерами (17,78 и 52,67 мг/дм³), меньшими значениями сухого остатка. Отмечается достоверное более низкое содержание в поверхностных водах фоновых озер по сравнению с городскими таких ионов, как HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ и Na^+ , вследствие чего в воде городских озер сульфаты, хлориды и нитраты практически полностью заменяются гидрокарбонатами, обуславливающими изменение кислой реакции среды на нейтральную. По величине перманганатной окисляемости можно косвенно судить об относительных количествах легко окисляемых органических соединений в природных водах. Уровень ПО воды фоновых озер вдвое превышает ПО в городских озерах, что, наряду с большей цветностью, свидетельствует о более высоком содержании органического углерода в воде фоновых озер [9; 18].

Содержание нефтепродуктов в воде и донных отложениях городских озер значительно превосходит аналогичные значения для фоновых: более чем в 4 и 11 раз соответственно (табл. 4).

Анализ снеговых талых вод не выявил существенных различий в геохимии снега, отобранного со льда фоновых и контрольных озер (табл. 6). При этом физико-химические параметры достоверно различаются, талые снеговые воды городских озер по сравнению с фоновыми немного более кислые, содержат больше солей и, соответственно, более высокую электропроводность (табл. 5).

Обсуждение

Термокарстовые озера, составляя абсолютное большинство на севере Западной Сибири, образуют густую сеть малых озер размером в поперечнике от 0,1–0,2 до 1–2 км. Эти озёра образуются при вытаивании высокольдистых многолетнемерзлых пород в депрессиях рельефа, заполняемых водой [28; 38]. Мерзлые почвы исторически считались препятствием для мобильности загрязняющих веществ, обеспечивая их консервацию [32]. Предполагается, что в результате термокарстовых процессов химический состав пресной воды арктических водоемов может существенно измениться при миграции веществ с поверхностным стоком из мерзлых грунтов в поверхностные воды [31; 34].

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Известно, что основными природными источниками питания термокарстовых озер в Арктике, формирующих минеральный состав воды, являются атмосферные осадки и пресная вода из многолетнемерзлых пород при их сезонном оттаивании [19]. Котловины озер врезаны в сильно перемытые минеральные четвертичные отложения, что обуславливает низкую минерализацию [4]. Для Карелии показано, что химический состав поверхностных вод формируется в основном за счет процессов выщелачивания на водосборной территории, и вклад самих атмосферных осадков северных регионов может быть несущественен [13]. Сочетание значительной кислотности, сильной окрашенности и высокой перманганатной окисляемости термокарстовых озерных вод объясняется комплексом природных факторов северных гумидных зон, в том числе повышенным содержанием гумусовых кислот и органических анионов, также поступающих с водосборов [9; 17; 18]. Значительная кислотность воды обусловлена верховым торфом травяно-моховой группы, формирующим берега и донные отложения, кислотность которого составляет от 2,9 до 4,1 [12].

Большинство озер севера Западной Сибири, как и включенные в наше исследование, имеют низкие значения удельной электропроводности, общего солесодержания и концентрации основных ионов, что подтверждает обусловленность минерального состава озерных вод осадками и талыми снеговыми водами для подпитки в отличие от миграции подземных вод [16; 35]. В данном исследовании результаты корреляционного анализа показали положительную значимую связь между кислотностью и цветностью ($r=0,91$ при $p < 0,05$) и отрицательную – между кислотностью и гидрокарбонатами, хлоридами и катионом натрия ($-0,98$, $-0,88$ и $-0,96$ при $p < 0,05$ соответственно).

В рассматриваемых озерах слабощелочные снеговые талые воды не компенсируют кислотность фоновых озерных вод. Следовательно, значительное повышение значений pH вплоть до нейтральной реакции в воде городских озер, скорее всего, носит техногенный характер.

Корреляционный анализ сходства снеговых талых вод по всем показателям, отобранных проб снега с поверхности льда показал полное сходство между всеми изученными озерами (табл. 8), со значительно меньшим Евклидовым расстоянием, по сравнению с различиями озерных вод (рис. 2 и 3). Городские и фоновые озера образуют два достоверно различаемых кластера, что подтверждается корреляционным анализом (рис. 2, табл. 7).

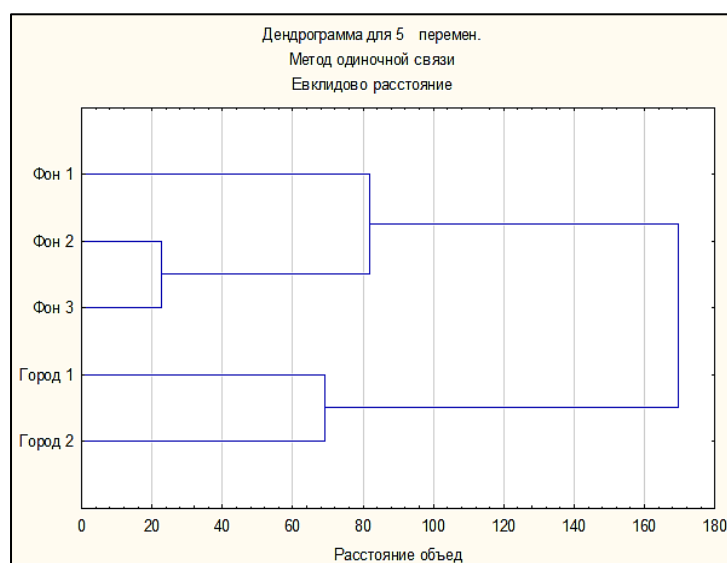


Рис. 2. Дендрограмма объединения (типизации) фоновых и городских озер города Надыма (по материалам табл. 3 и 4)

Fig. 2. Dendrogram of the association (typification) of background and urban lakes in the town of Nadym (based on Tables 3 and 4)

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

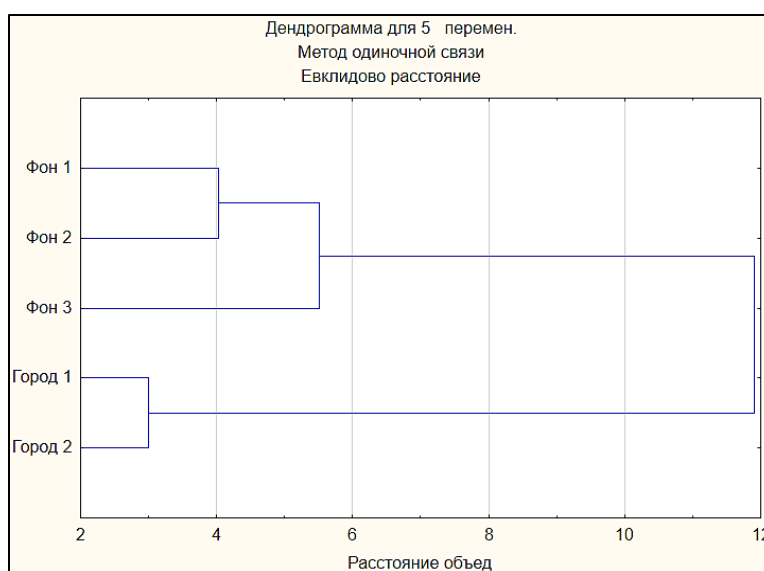


Рис. 3. Дендрограмма объединения (типизации) фоновых и городских озер города Надыма (по материалам табл. 5 и 6)

Fig. 3. Dendrogram of the association (typification) of background and urban lakes in the town of Nadym (based on Tables 5 and 6)

Таблица 7

Корреляционная матрица сходства гидрохимических показателей воды исследованных озер (по материалам табл. 3 и 4)

Correlation matrix of similarity of hydrochemical indicators of the water in the studied lakes (based on Tables 3 and 4)

Озера	Фон 1	Фон 2	Фон 3	Город 1	Город 2
Фон 1	1,000				
Фон 2	0,989***	1,000			
Фон 3	0,973***	0,997***	1,000		
Город 1	0,439	0,339	0,288	1,000	
Город 2	0,504	0,465	0,448	0,808***	1,000

Примечание: *** корреляции значимы на уровне $p < 0,001$.Note: *** correlations are significant at $p < 0.001$.

Таблица 8

Корреляционная матрица сходства гидрохимических показателей снеговых талых вод исследованных озер (по материалам табл. 5 и 6)

Correlation matrix of similarity of hydrochemical parameters of snow melt water in the studied lakes (based on Tables 5 and 6)

Озера	Фон 1	Фон 2	Фон 3	Город 1	Город 2
Фон 1	1,000				
Фон 2	0,996***	1,000			
Фон 3	0,984***	0,973***	1,000		
Город 1	0,948***	0,931***	0,937***	1,000	
Город 2	0,989***	0,979***	0,977***	0,980***	1,000

Примечание: *** корреляции значимы на уровне $p < 0,001$.Note: *** correlations are significant at $p < 0.001$.

Представляется, что эффект повышения щелочности вод городских озер напрямую связан с абсолютным преобладанием гидрокарбонатов по сравнению с анионами сильных кислот – хлоридами, сульфатами, фосфатами и нитратами. Известно, что основными природными источниками гидрокарбонатов в поверхностных водах являются карбонатные породы (известняки, мергели, доломиты), а также процессы биохимического распада органического вещества в воде и донных отложениях. Также есть данные об увеличении концентрации кальция и бикарбоната в поверхностных водах с увеличением глубины оттаивания [33]. Однако вторая надпойменная терраса, на которой расположены исследованные озера, сложена песчаными эоловыми отложениями, перекрытыми органическими осадками. В настоящее время основным источником избыточного содержания гидрокарбонатов в воде городских озер является строительный мусор, в большом количестве разбросанный по берегам озер промзоны Надыма. Вполне вероятно, что отмеченное техногенное повышение концентрации гидрокарбонатов является следствием работы городского домостроительного комбината в прошлом, загрязнявшего близлежащую территорию цементной пылью.

Попытка объяснения влияния атмосферных осадков на геоэкологию городских озер Якутска предпринята в исследовании В.Н. Макарова (2016). Установлено снижение общей минерализации воды на 50%, что, по мнению автора, произошло в результате положительного тренда атмосферных осадков. Отмечен феномен высокой щелочности вод городских озер (до 9,37) при кислых и слабокислых осадках, который автор объясняет минимальным поступлением их в предыдущие годы [14]. При этом остается открытым вопрос об исходных факторах, формирующих щелочную реакцию поверхностных вод города. В нашем случае многолетняя динамика количества атмосферных осадков являлась одним из прочих равных условий для всех озер.

Вторым очевидным отличием вод фоновых и городских озер Надыма является содержание нефтепродуктов (НП). Содержание нефтепродуктов в воде городских озер, как при использовании в аналитике ИК-спектрометрии и флуориметрии, многократно превышает значения для фоновых (табл. 4). Также значительно повышено содержание ароматических соединений. Основным источником поступления НП воды озер города являются поверхностные стоки с территорий гаражных кооперативов и свалок, расположенных в непосредственной близости (практически на берегах). Хроническое нефтяное загрязнение подтверждается 10-кратным превышением концентраций НП в донных отложениях озер города. Содержание (медиана) НП в донных отложениях фоновых озер Надыма вполне соответствует фону НП в донных осадках озер тундры и северной тайги – медиана 50,7 мг/дм³ [23].

С помощью факторного анализа методом главных компонент, который позволяет объединить различные показатели качества природных вод Надымских озер в группы, было выделено три основных фактора (табл. 9). Первый фактор, обусловленный пространственным расположением озер, объединил показатели, взаимная корреляция которых обеспечивает наибольшую долю общей дисперсии – 65,3 %. Природные особенности воды термокарстовых озер, такие как высокие кислотность, ОВП, цветность, имеют высокую достоверную связь с удаленностью от города, а сухой остаток, содержание основных анионов и катионов, нефтепродукты в воде и в донных отложениях обусловлены близостью к городской черте.

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Таблица 9

Результаты факторного анализа по физико-химическим и геохимическим параметрам озер Надыма
(матрица факторных нагрузок)
Factor analysis on physical, chemical and geochemical parameters of Nadym lakes
(factor loading matrix)

Показатель	Факторные нагрузки		
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
рН, ед. рН	-0,982	-0,159	0,029
УЭП мкСм/см ³	-0,956	-0,276	-0,071
Солесодержание, ppm	-0,487	0,844	0,212
Сухой остаток, мг/дм ³	-0,901	0,430	0,057
ОВП, mV	0,943	-0,104	-0,130
Кислород	0,894	-0,306	0,134
Мутность	0,697	0,389	0,281
Цветность	0,914	0,223	0,314
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	-0,330	0,857	-0,326
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	-0,971	0,206	0,013
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	-0,955	-0,270	-0,102
Cl ⁻ , мг/дм ³	-0,707	-0,365	0,428
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	-0,624	0,769	0,122
K, мг/дм ³	-0,921	-0,367	-0,113
Na, мг/дм ³	-0,979	0,027	0,168
Mg, мг/дм ³	0,248	-0,237	0,939
Ca ²⁺ , мг/дм ³	0,636	-0,518	-0,566
Перманганатная окисляемость, мгО/дм ³	0,349	0,269	-0,894
НП вода, мг/дм ³	-0,809	-0,566	-0,069
НП донные, мг/кг	-0,958	-0,266	-0,106
Удаленность от центра города, м	0,980	-0,009	0,165
Доля общей дисперсии, %	65,3	18,1	12,7

Примечание: жирным шрифтом отмечены нагрузки >0,700.

Note: loads >0.700 are in bold.

Заключение

По итогам проведенного исследования можно выделить два основных вида антропогенной трансформации химического состава поверхностных вод термокарстовых озер арктического города, не имеющего развитой промышленности и предназначенного для постоянного проживания населения, обеспечивающего деятельность нефтегазодобывающего комплекса:

– загрязнение строительными материалами и цементной пылью в пределах городской черты обусловило повышение щелочности городских озер;

*Экология и природопользование**Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.*

– поверхностный сток с территорий промзоны привел к хроническому загрязнению городских водоемов нефтепродуктами.

В значительной степени этому способствует отсутствие работоспособной ливневой канализации, которая занесена песком и фактически не обслуживается коммунальными службами города. Дальнейшее изучение трансформации естественных окислительно-восстановительных градиентов под действием антропогенных факторов позволит моделировать подвижность токсичных металлов и других загрязняющих веществ в водных экосистемах арктического региона. При этом геоэкологический анализ должен учитывать не только нейтральные или возрастающие эффекты естественных факторов, но и местные условия и исторический аспект антропогенного воздействия.

Список источников

1. *Абатурова И.В., Емельянова И.А.* Прогноз изменения инженерно-геологических условий с использованием интегральной оценки для условий строительства в криолитозоне (на примере г. Надым) // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. 37–41.
2. *Бузмаков С.А.* Геоэкологические закономерности техногенной трансформации наземных экосистем под воздействием эксплуатации месторождений нефти: автореф. дис. ... д-ра. географ. наук / Перм. гос.ун-т. Пермь, 2005. 44 с.
3. *Грива Г.И.* Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук. Томск, 2006. 48 с.
4. *Даувальтер В.А., Хлопцева Е.В.* Гидрологические и гидрохимические особенности озер Большеземельской тундры // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2008. Т. 11. № 3. С. 407–414.
5. *Иванов П.В.* Классификация озёр мира по величине и по средней глубине // Научный Бюллетень ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.
6. *Иванова И.С., Король И.С., Широкова Л.С., Покровский О.С.* Структурно-групповой состав растворенного органического вещества в водах термокарстовых озер Большеземельской тундры // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 7. С. 6–16.
7. *Касимов Н.С.* Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В. 2013. 208 с.
8. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. М.: Наука, 1984. 208 с.
9. *Кремлева Т.А., Южанина А.А., Печкин А.С., Агбалян Е.В.* Экологическое состояние и основные факторы формирования химического состава малых озер Надымского района // Вестник Тюменского государственного университета. 2018. № 4. С. 33–50.
10. *Кремлева Т.А.* Геохимические факторы устойчивости водных систем к антропогенным нагрузкам: автореф. дис.... д-ра хим. наук. Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2015. 50 с.
11. *Линник П.Н., Набиванец Б.И.* Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
12. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукса З.А., Толпышев А.Т., Шведчикова Н.К.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение под ред. д.б.н. проф. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
13. *Лозовик П.А., Потанова И.Ю.* Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 1. С. 111–118.
14. *Макаров В.Н.* Влияние атмосферных осадков на геохимию городских озерных систем: мат. Всерос. конф. с межд. участием "Эволюция биосферы и техногенез". 2016. С. 44–46.
15. *Манасыпов Р.М., Покровский О.С., Широкова Л.С.* Экспериментальное

*Экология и природопользование**Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.*

моделирование изменения химического состава термокарстовых озер северной тайги западной Сибири // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. Томск : Изд. Дом Томск. гос. ун-та 2017. С. 161–163.

16. *Моисеенко Т.И.* Эволюция экосистем в условиях антропогенных нагрузок: через дезорганизацию к самоорганизации // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 10. С. 939–948.

17. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Кремлева Т.А.* Особенности закисления вод на европейской территории России и в Западной Сибири // *Доклады академии наук*. 2015. Т. 5. № 462. С. 582–582.

18. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Хорошавин В.Ю., Кремлева Т.А.* Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в гумидных регионах // *Геохимия*. 2017. № 1. С. 41–56.

19. *Моисеенко Т.И., Дину М.И., Гашкина Н.А., Кремлева Т.А., Хорошавин В.Ю.* Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 6. С. 521–532.

20. *Моисеенко Т.И.* Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. М.: Наука, 2003. 276 с.

21. *Моисеенко Т.И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики // *Апатиты: Изд-во КНЦ РАН*, 1997. 261 с.

22. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с

23. *Паничева Л.П., Кремлева Т.А., Волкова С.С.* Аккумуляция нефтепродуктов донными отложениями в фоновых водоемах Западной Сибири // *Вестник Тюменского государственного университета*. 2013. № 12. С. 204–211.

24. *Покровский О.С., Широкова Л.С., Кирпотин С.Н.* Микробиологические факторы, контролирующие цикл углерода в термокарстовых водных объектах Западной Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2012. № 3(19). С. 199–217.

25. *Полищук Ю.М., Богданов А.Н.* (2015). Зоны активного термокарста на территории многолетней мерзлоты и их выявление по космическим снимкам // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2015. Т. 326. № 12. С. 104–114.

26. *Романовский Н.Н.* Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Наука, 1977. 215 с.

27. *Сизов О.С.* Геоэкологические аспекты современных эоловых процессов северотаежной подзоны Западной Сибири. Новосибирск: Гео, 2015. 121 с.

28. *Смоляков Б.С.* Проблема кислотных выпадений на севере Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2000. № 1. С. 21–30.

29. *Солнцева Н.П.* Общие закономерности трансформации почв в районах добычи нефти (формы проявления, основные процессы, модели). // *Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем*. М.: Наука, 1988. С. 23–41.

30. *Трутнев А., Зорин Л.* Надым – город газовиков. М.: Недра., 1983. 133 с.

31. *Chételat J., Amyot M., Arp P., Blais J.M., Depew D., Emmerton C.A., Evans M., Gamberg M., Gantner N., Girard C., Graydon J., Kirk J., Lean D., Lehnher I., Muir D., Nasr M., Poulain A.J., Power M., Roach P., Stern G., Swanson H., and van der Velden, S.* Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: Recent advances on its cycling and fate. *Science of the total environment*. 2015. No. 509. Pp. 41–66.

32. *Grannas A.M., Bogdal C., Hageman K.J., Halsall C., Harner T., Hung H., Kallenborn R., Klán P., Klánová J., Macdonald R.W., Meyer T., and Wania, F.* The role of the global cryosphere in the fate of organic contaminants. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013. No. 13(6). Pp. 3271–3305.

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

33. Keller K., Blum J.D., Kling G.W. Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in an arctic watershed. *Chemical Geology*. 2010. No. 273(1–2). Pp. 76–81.
34. Kokelj S.V., Jenkins R.E., Milburn D., Burn C.R., Snow N. The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. No. 16(4). Pp. 343–353.
35. Larsen A.S., O'Donnell J.A., Schmidt J.H., Kristenson H.J., Swanson D.K. Physical and chemical characteristics of lakes across heterogeneous landscapes in arctic and subarctic Alaska. *JGR: Biogeosciences*. 2017. No. 122(4). Pp. 989–1008.
36. Roe J., Barnes L., Napoli N.J., Thibodeaux J. The restorative health benefits of a tactical urban intervention: an urban waterfront study. *Frontiers in Built Environment*. 2019. No. 5. 71 p.
37. Steeneveld G.J., Koopmans S., Heusinkveld B.G., Theeuwes N.E. Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect. *Landscape and Urban Planning*. 2014. No. 121. Pp. 92–96.
38. Vonk J.E., Tank S.E., Bowden W.B., Laurion I., Vincent W.F., Alekseychik P., Amyot M., Billet M.F., Canário J., Cory R.M., Deshpande B.N., Helbig M., Jammet M., Karlsson J., Larouche J., MacMillan G., Rautio M., Walter Anthony K.M., Wickland K.P. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems. *Biogeosciences*. 2015. No. 12(23). Pp. 7129–7167.

References

1. Abaturova, I.V., Emelianova, I.A. (2014), Prognoz izmeneniia inzhenerno-geologicheskikh uslovii s ispolzovaniem integralnoi otsenki dlia uslovii stroitelstva v kriolitozone (na primere g. Nadym), *Razvedka i okhrana nedr*, no. 7, pp. 37–41. (in Russian).
2. Buzmakov, S.A. (2005), Geoekologicheskie zakonomernosti tekhnogennoi transformatsii nazemnykh ekosistem pod vozdeistviem ekspluatatsii mestorozhdenii nefii. avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora geograficheskikh nauk, *Perm State University*, Perm (in Russian).
3. Griva, G.I. (2006), *Geoekologicheskie usloviia razrabotki gazovykh mestorozhdenii poluostrova Yamal* [Geoecology dissertation abstract for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences Tomsk] (in Russian).
4. Dauvalter, V.A., Khloptceva, E.V. (2008), Gidrologicheskie i gidrokhimicheskie osobennosti ozer Bolshezemelskoi tundry, *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, vol. 11, no. 3 (in Russian).
5. Ivanov, P.V. (1948), Klassifikatsiia ozer mira po velichine i po srednei glubine, *Nauchnyi Biulleten LGU*, no. 21, pp. 29–36 (in Russian).
6. Ivanova, I.S., Korol, I.S., Shirokova, L.S., Pokrovskii, O.S. (2018), Strukturno-grupповoi sostav rastvorennogo organicheskogo veshchestva v vodakh termokarstovykh ozer Bolshezemelskoi tundry, *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geoesursov*, vol. 329, no. 7 (in Russian).
7. Kasimov N.S. (2013), *Ekogeokhimiia landshaftov*, [Ecogeochemistry of landscapes], IP Filimonov M.V., Moscow (in Russian).
8. Kitaev, S.P. (1984), *Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer razlichnykh prirodnykh zon* [Ecological foundations of bioproductivity of lakes in various natural zones], Nauka, Moscow (in Russian).
9. Kremleva, T.A., Iuzhanina, A.A., Pechkin, A.S., Agbalian, E.V. (2018), Ekologicheskoe sostoianie i osnovnye faktory formirovaniia khimicheskogo sostava malyykh ozer Nadym'skogo raiona, *Vestnik Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 4, pp. 33–50 (in Russian).
10. Kremleva, T.A. (2015), Geokhimicheskie faktory ustoichivosti vodnykh sistem k antropogennym nagruzkam: avtoref. dis. d-ra khim. nauk. Tiumen: Izd-vo Tiimenskogo gos. un-ta.
11. Linnik, P.N., Nabivanetc, B.I. (1986), *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh*. Gidrometeoizdat, Leningrad (in Russian).

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

12. Liss, O.L., Abramova, L.I., Avetov, N.A., Berezina, N.A., Inisheva, L.I., Kurnishkova, T.V., Sluka, Z.A., Tolpyshev, A.T., Shvedchikova, N.K. (2001), *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog systems of Western Siberia and their conservation value], Pod red. d.b.n. professora V.B. Kuvaeva, Grif i K, Tula (in Russian).
13. Lozovik, P.A., Potapova, I.Iu. (2006), Postuplenie khimicheskikh veshchestv s atmosferynymi osadkami na territoriiu Karelii, *Vodnye resursy*, vol. 33, no. 1, pp. 111–118 (in Russian).
14. Makarov, V.N. (2016), Vliianie atmosferynykh osadkov na geokhimiuu gorodskikh ozernykh sistem, *Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Evolutsiia biosfery i tekhnogenez"*, pp. 44–46 (in Russian).
15. Manasyrov, R.M., Pokrovskii, O.S., Shirokova, L.S. (2017), Eksperimentalnoe modelirovanie izmeneniia khimicheskogo sostava termokarstovykh ozer severnoi taigi zapadnoi Sibiri V sbornike: Zapadno-Sibirskie torfianiki i tsikl ugleroda: proshloe i nastoiashchee, *Materialy Piatogo mezhdunarodnogo polevogo simpoziuma.*, pp. 161–163 (in Russian).
16. Moiseenko, T.I. (2020), Evolutsiia ekosistem v usloviakh antropogennykh nagruzok: cherez dezorganizatsiiu k samorganizatsii, *Geokhimiia*, vol. 65, no. 10, pp. 939–948 (in Russian).
17. Moiseenko, T.I., Gashkina, N.A., Dinu, M.I., Kremleva, T.A. (2015), Osobennosti zakisleniia vod na evropeiskoi territorii Rossii i v Zapadnoi Sibiri, *Doklady Akademii Nauk*, vol. 5, no. 462, pp. 582–582 (in Russian).
18. Moiseenko, T.I., Gashkina, N.A., Dinu, M.I., Khoroshavin, V.Iu., Kremleva, T.A. (2017), Vliianie prirodnykh i antropogennykh faktorov na protsessy zakisleniia vod v gumidnykh regionakh, *Geokhimiia*, no. 1, pp. 41–56 (in Russian).
19. Moiseenko, T.I., Dinu, M.I., Gashkina, N.A., Kremleva, T.A., Khoroshavin, V.Iu. (2020), Geokhimicheskie zakonomernosti rasprostraneniia elementov v vodakh ozer arkticheskikh regionov, *Geokhimiia*, vol. 65, no. 6, pp. 521–532 (in Russian).
20. Moiseenko, T.I. (2003), *Zakislenie vod: faktory, mekhanizmy i ekologicheskie posledstviia* [Water acidification: factors, mechanisms and environmental consequences], Nauka, Moscow (in Russian).
21. Moiseenko, T.I. (1997), *Teoreticheskie osnovy normirovaniia antropogennykh nagruzok na vodoemy Subarktiki* [Theoretical foundations of regulation of anthropogenic loads on water bodies of the Subarctic], Apatity, KNTc RAN (in Russian).
22. Moiseenko, T.I., Gashkina, N.A. (2010), *Formirovanie khimicheskogo sostava vod ozer v usloviakh izmeneniia okruzhaiushchei sredy* [Formation of the chemical composition of lake waters under conditions of environmental change], Nauka, Moscow (in Russian).
23. Panicheva, L.P., Kremleva, T.A., Volkova, S.S. (2013), Akkumulatsiia nefteproduktov donnymi otlozheniiami v fonovykh vodoemakh Zapadnoi Sibiri, *Vestnik Tiimenskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 12, pp. 204–211 (in Russian).
24. Pokrovskii, O.S., Shirokova, L.S., Kirpotin, S.N. (2012), Mikrobiologicheskie faktory, kontroliruiushchie tsikl ugleroda v termokarstovykh vodnykh obektakh Zapadnoi Sibiri, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. Biologiya, no. 3(19) (in Russian).
25. Polishchuk, Iu.M., Bogdanov, A.N. (2015), Zony aktivnogo termokarsta na territorii mnogoletnei merzloty i ikh vyivlenie po kosmicheskim snimkam, *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, no. 326(12) (in Russian).
26. Romanovskii, N.N. (1977), *Formirovanie poligonalno-zhilnykh struktur* [Formation of polygonal-vein structures], Nauka, Novosibirsk (in Russian).
27. Sizov, O.S. (2015), *Geoekologicheskie aspekty sovremennykh eolovykh protsessov severotaezhnoi podzony Zapadnoi Sibiri* [Geocological Aspects of Recent Eolian Protesses of the North Taiga Subzone of Western Siberia], Geo, Novosibirsk, Russia.
28. Smoliakov, B.S. (2000), Problema kislotnykh vypadenii na severe Zapadnoi Sibiri, *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, no. 1, pp. 21–30 (in Russian).

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

29. Solntceva, N.P. (1988), *Obshchie zakonomernosti transformatsii pochv v raionakh dobychi nefi (formy proiavleniia, osnovnye protsessy, modeli), Vosstanovlenie neftezagriaznennykh pochvennykh ekosistem*, Nauka, Moscow, pp. 23–41 (in Russian).

30. Trutnev, A., Zorin, L. (1983), *Nadym –gorod gazovikov* [Nadym – the city of gas workers], Nedra, Moscow (in Russian).

31. Chételat, J., Amyot, M., Arp, P., Blais, J.M., Depew, D., Emmerton, C.A., Evans, M., Gamberg, M., Gantner, N., Girard, C., Graydon, J., Kirk, J., Lean, D., Lehnerr, I., Muir, D., Nasr, M., Poulain, A.J., Power, M., Roach, P., Stern, G., Swanson, H., and van der Velden, S. (2015), Mercury in freshwater ecosystems of the Canadian Arctic: Recent advances on its cycling and fate, *Science of the total environment*, no. 509, pp. 41–66.

32. Grannas, A.M., Bogdal, C., Hageman, K.J., Halsall, C., Harner, T., Hung, H., Kallenborn, R., Klán, P., Klánová, J., Macdonald, R.W., Meyer, T., and Wania, F. (2013), The role of the global cryosphere in the fate of organic contaminants, *Atmospheric Chemistry and Physics*, no. 13(6), pp. 3271–3305.

33. Keller, K., Blum, J.D., Kling, G.W. (2010), Stream geochemistry as an indicator of increasing permafrost thaw depth in an arctic watershed, *Chemical Geology*, no. 273(1–2), pp. 76–81.

34. Kokelj, S.V., Jenkins, R.E., Milburn, D., Burn, C.R., Snow, N. (2005), The influence of thermokarst disturbance on the water quality of small upland lakes, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada, *Permafrost and Periglacial Processes*, no. 16(4), pp. 343–353.

35. Larsen, A.S., O'Donnell, J.A., Schmidt, J.H., Kristenson, H.J., Swanson, D.K. (2017), Physical and chemical characteristics of lakes across heterogeneous landscapes in arctic and subarctic Alaska, *JGR: Biogeosciences*, no. 122(4), pp. 989–1008.

36. Roe, J., Barnes, L., Napoli, N.J., Thibodeaux, J. (2019), The restorative health benefits of a tactical urban intervention: an urban waterfront study, *Frontiers in Built Environment*, no. 5, pp. 71.

37. Steeneveld, G.J., Koopmans, S., Heusinkveld, B.G., Theeuwes, N.E. (2014), Refreshing the role of open water surfaces on mitigating the maximum urban heat island effect, *Landscape and Urban Planning*, no. 121, pp. 92–96.

38. Vonk, J.E., Tank, S.E., Bowden, W.B., Laurion, I., Vincent, W.F., Alekseychik, P., Amyot, M., Billet, M.F., Canário, J., Cory, R.M., Deshpande, B.N., Helbig, M., Jammet, M., Karlsson, J., Larouche, J., MacMillan, G., Rautio, M., Walter Anthony, K.M., Wickland, K.P. (2015), Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems, *Biogeosciences*, no. 12(23), pp. 7129–7167.

Статья поступила в редакцию: 19.05.22; одобрена после рецензирования: 24.05.22; принята к опубликованию: 07.06.22

The article was submitted: 19 May 2022; approved after review: 24 May 2022; accepted for publication: 07 June 2022.

Информация об авторах

Information about the authors

Андрей Владимирович Соромотин

директор НИИ экологии и рационального использования природных ресурсов, Тюменский государственный университет; 625003, Россия, г. Тюмень ул. Володарского, 6

Angrey V. Soromotin

Director of the Research Institute of Ecology and Natural Resource Management, Tyumen State University; 6, str. Volodarsky, Tyumen, 625003, Russia

e-mail: asoromotin@mail.ru

Экология и природопользование

Соромотин А.В., Приходько Н.В., Сизов О.С., Дайзель А.В., Кудрявцев А.А., Закирова М.Р.

Николай Владиславович Приходько

начальник отдела ГИС и ДЗЗ, Тюменский государственный университет;
625003, Россия, г. Тюмень ул. Володарского, 6
e-mail: prihnick@yandex.ru

Nikolay V. Prikhodko

Master's Student, Institute of Earth Sciences, Tyumen State University;
6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia

Олег Сергеевич Сизов

научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук;
119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, дом 3
e-mail: kabanin@yandex.ru

Oleg S. Sizov

Researcher, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences;
3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia

Александр Владимирович Дайзель

магистрант Института наук о Земле, Тюменский государственный университет;
625003, Россия, г. Тюмень ул. Володарского, 6
e-mail: a.v.dajzel@utmn.ru

Aleksandr V. Dayzel

Master's student at the Institute of Earth Sciences, Tyumen State University;
6, str. Volodarsky, Tyumen, 625003, Russia

Александр Алексеевич Кудрявцев

инженер, Тюменский государственный университет;
625003, Россия, г. Тюмень ул. Володарского, 6
e-mail: a.a.kudryavcev@utmn.ru

Aleksandr A. Kudryavtsev

Engineer, Tyumen State University;

6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia

Милена Римовна Закирова

магистрант Института наук о Земле, Тюменский государственный университет;
625003, Россия, г. Тюмень ул. Володарского, 6
e-mail: milenaarslan8@gmail.com

Milena R. Zakirova

Master's Student, Institute of Earth Sciences, Tyumen State University;

6, Volodarskogo st., Tyumen, 625003, Russia

Вклад авторов

Соромотин А.А. – идея, обработка материала, написание статьи, научное редактирование текста.

Приходько Н.В. – сбор материала, обработка материала, работа с ГИС.

Сизов О.С. – обработка материала, работа с ГИС.

Дайзель А.В. – обработка материала.

Кудрявцев А.А. – научное редактирование текста.

Закирова М.Р. – сбор материала, обработка материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Soromotin A.A. – the idea; processing of the material; writing of the article; scientific editing of the text.

Prikhodko N.V. – collection and processing of the material; work with GIS.

Sizov O.S. – processing of the material; work with GIS.

Daisel A.V. – processing of the material.

Kudryavtsev A.A. – scientific editing of the text.

Zakirova M.R. – collection and processing of the material.

The authors declare no conflict of interest.