



DOI 10.23859/estr-230412

EDN REPXCQ

УДК 556: 556.314: 550.47

Научная статья

Никель в водах притоков Телецкого озера по результатам многолетних исследований

С.В. Бабошкина*^{}, А.В. Пузанов^{},

Т.А. Рождественская^{}, Д.Н. Балыкин^{}, И.А. Трошкова^{},

С.Н. Балыкин^{}, А.В. Салтыков^{}

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул,
ул. Молодежная, д. 1*

*svetlana@iwep.ru

Аннотация. В период с 2026 по 2021 гг. изучено содержание никеля в водах притоков озера Телецкого. Согласно результатам исследования, общее содержание никеля в водах притоков озера колебалось от 0.12 до 4.6 мкг/дм³, в среднем составляя 1.8 ± 0.1 мкг/дм³. Содержание растворенных форм никеля в водах рек бассейна варьировало от 0.1 до 4.4 мкг/дм, не превышало ПДК, согласовывалось с литературными данными для природных вод Сибири, однако заметно превосходило среднемировые значения. Установлено, что в водах западных притоков меридиональной части оз. Телецкого концентрации растворенного Ni заметно выше, чем в водах восточных притоков, что объясняется большей зрелостью почв западных берегов и более существенным присутствием в них железа, препятствующего комплексообразованию, а также наличием большого количества осадочных отложений и более высоким антропогенным воздействием на левобережные ландшафты. В июне 2022 г. впервые за несколько лет наблюдений зафиксировано превышение ПДК_{рх} никеля в водах западных притоков озера, что предположительно объясняется, в том числе, усиливающейся антропогенной нагрузкой на экосистему водосборов. Установлено, что максимальное количество никеля в оз. Телецкое привносится водами р. Чулышман: до 3.5 т никеля в период весенне-летнего половодья и 0.8 т – в период осенней межени, в то время как вклад других притоков в поступление Ni в озеро как минимум на 1-2 порядка ниже. Величина модуля стока никеля в летний полноводный период с водосборных площадей разных по величине притоков оз. Телецкого практически не различается (0.19–0.21 кг/мес. с км²), в период осенней межени вынос никеля существенно определяется внутриводосборными процессами на водосборе.

Ключевые слова: малые реки, ICP-MS, Ni, водосбор, модуль стока

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН по проекту FUFZ-2021-0003, с использованием научного оборудования ЦКП научно-исследовательскими судами ИВЭП СО РАН.

ORCID:С.В. Бабошкина, <https://orcid.org/0000-0001-9904-991X>А.В. Пузанов, <https://orcid.org/0000-0002-1340-486X>Т.А. Рождественская, <https://orcid.org/0000-0001-8487-2495>Д.Н. Балькин, <https://orcid.org/0000-0003-3076-360X>И.А. Трошкова, <https://orcid.org/0000-0003-2809-8022>С.Н. Балькин, <https://orcid.org/0000-0001-5598-0470>А.В. Салтыков, <https://orcid.org/0000-0003-1515-3061>

Для цитирования: Бабошкина, С.В. и др., 2024. Никель в водах притоков Телецкого озера по результатам многолетних исследований. *Трансформация экосистем* 7 (4), 69–84. <https://doi.org/10.23859/estr-230412>

Поступила в редакцию: 12.04.2023

Принята к печати: 11.05.2023

Опубликована онлайн: 06.12.2024

DOI 10.23859/estr-230412

EDN REPXCQ

UDC 556: 556.314: 550.47

Article

Nickel in the waters of Lake Teletskoye tributaries (the results of long-term studies)

S.V. Baboshkina* , A.V. Puzanov ,T.A. Rozhdestvenskaya , D.N. Balykin , I.A. Troshkova ,S.N. Balykin , A.V. Saltykov 

Institute for Water and Environmental Problems, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Molodezhnaya St. 1, Barnaul, 656038 Russia

**svetlana@iwep.ru*

Abstract. Ecological and biogeochemical studies carried out in the Lake Teletskoye basin in 2016–2021 showed that the total nickel content in the waters of the lake's tributaries ranged from 0.12 to 4.6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$, an average of $1.8 \pm 0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$. The content of dissolved forms of nickel in rivers of the basin varied as 0.1–4.4 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$. It was within the maximum permissible concentration (MPC), being consistent with the published data for natural waters of Siberia. However, this indicator significantly exceeded the global average. It was established that in the waters of western tributaries of the meridional part of Lake Teletskoye the concentrations of dissolved Ni were significantly higher than in the waters of eastern tributaries. This may be explained by higher soil maturity of the western coast and iron presence, as well as greater sedimentary deposits and stronger anthropogenic impacts. In June 2022, the excess of MPC for nickel in the waters of western tributaries was recorded for the first time in several years of observations that may be explained, among other things, by increasing anthropogenic loads on the ecosystem of the catchments. The waters of the Chulyshman River bring up to 3.5 tons of nickel into Lake Teletskoye during spring-summer floods and 0.8 tons in the autumn low water periods, while the contribution of other tributaries to Ni input to the lake is at least 1–2 orders less. In the summer

high-water period, the value of the module of nickel runoff from the catchment areas of different-size tributaries of Lake Teletskoye practically does not differ (0.19–0.21 kg/month from km²). During autumn low water, the nickel removal is more determined by intra-soil processes occurred in the catchment.

Keywords: Lake Teletskoye, water, Ni, catchment area, runoff

Funding. The work was carried out as a part of State Task of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (project FUFZ-2021-0003) using scientific equipment of the Center for Collective Use of Research Vessels of IWEF SB RAS.

ORCID:

S.V. Baboshkina, <https://orcid.org/0000-0001-9904-991X>

A.V. Pozanov, <https://orcid.org/0000-0002-1340-486X>

T.A. Rozhdestvenskaya, <https://orcid.org/0000-0001-8487-2495>

D.N. Balykin, <https://orcid.org/0000-0003-3076-360X>

I.A. Troshkova, <https://orcid.org/0000-0003-2809-8022>

S.N. Balykin, <https://orcid.org/0000-0001-5598-0470>

A.V. Saltykov, <https://orcid.org/0000-0003-1515-3061>

To cite this article: Baboshkina, S.V. et al., 2024. Nickel in the waters of Lake Teletskoye tributaries (the results of long-term studies). *Ecosystem Transformation* 7 (4), 69–84. <https://doi.org/10.23859/estr-230412>

Received: 12.04.2023

Accepted: 11.05.2023

Published online: 06.12.2024

Введение

Водная миграция микроэлементов является важнейшим этапом перемещения веществ на поверхности земли. Содержание микроэлементов и их форм в природных водах во многом зависит от условий их миграции в системе почва–вода в пределах водосборного бассейна. Химический состав поверхностных вод отражает природно-климатические свойства бассейна, его геологию, рельеф, водный баланс и режимы, наличие агроландшафтов, селитебных территорий, промышленных зон и их воздействие на окружающую природную среду водосбора.

Дефицит чистой пресной воды заставляет обращать внимание мирового научного сообщества на недостаточную изученность естественных озерных и речных водных ресурсов. Исследование химического состава природных вод особо охраняемых территорий Горного Алтая в настоящее время особенно актуально. В связи с бурным развитием туризма на Алтае, ежегодным увеличением количества отдыхающих и строительством новых туристических объектов в районе Телецкого озера существует необходимость контроля экологического состояния его водосборного бассейна.

Соединения Ni часто присутствуют в природных водах, хотя сам элемент мало распространен в земной коре – его кларк равен 58 мг/кг, а среднее содержание в почвах мира составляет 40 мг/кг (Саэт и др., 1990). В почвах никель главным образом находится в форме сульфидов и арсенидов, способен замещать Fe в железомagneзиальных отложениях, ассоциироваться с оксидами Mn и Fe, фосфатами, карбонатами и силикатами. В природных водах уровень содержания Ni зависит от его концентрации в дренируемых породах и почвах, от гидрохимического режима водоема или водотока, биогеохимических характеристик водосборной площади, климатических особенностей в бассейне. В щелочной среде никель образует гидроксиды и основные соли, а в кислых и нейтральных водах легко мигрирует (Добровольский, 1998). Кроме величин pH и Eh, на количество и формы нахождения никеля в природных водах влияет присутствие гуминовых и фульвокислот, образующих с ним комплексы (Коршунова и Чарыкова, 2018; Моисеенко и др., 2013), а также содержание растворенного кислорода, H₂S, CO₂, наличие микроорганизмов (Кашин и Иванов, 1997). Среднее значение коэффициента водной миграции никеля невысокое (0.81), что свидетельствует о слабой интенсивности его вовлечения в этот процесс, наряду со Pb, Mn, Cr, V, Si (K_v= 0.1 n) (Добровольский, 1998).

В кислых породах (гранитах) содержится всего 5–15 мгNi/kg, тогда как в ультраосновных породах обнаруживаются наиболее высокие концентрации этого элемента (1400–2000 мг/kg) (Войткевич и др., 1990, Добровольский, 1998). Поэтому в водах, дренирующих карбонатные отложения, содержание никеля часто повышено. Например, в поверхностных водах Кугдинского ультраосновного щелочного массива (Красноярский край, Анабарское плато) содержание никеля достигает 12.8 мкг/дм³, что дало основание авторам классифицировать геохимическую специализацию территории как медно-никелевую (Солдатов и др., 2022).

В микродозах никель является биологически важным микроэлементом, но в высоких концентрациях многие его соединения токсичны для живых организмов. Находясь в воде, Ni оказывает ингибирующее действие на гидробионты даже в следовых количествах (Savorelli et al., 2017). Считается, что растворенные формы металла могут быть более токсичны, чем взвешенные или осажденные (Shotyk et al., 2017). Увеличению содержания растворимых форм никеля способствуют необработанные промышленные и бытовые сбросы (Chirila et al., 2014; Zuzolo et al., 2017). В программе глобальной системы мониторинга окружающей среды, принятой ООН еще в 1980 г., никель наряду с Hg, Cr, Cd, Pb, Cu, Zn, As причислен к основным ее загрязнителям (Кашин и Иванов, 1997).

В 2008 г. агентством по охране окружающей среды¹ (США) заявлен среднемировой уровень содержания никеля в водах суши 0.3 мкг/дм³. Однако в природных водах концентрации никеля часто значительно выше приведенной величины. Например, согласно исследованиям Т.А. Кремлевой с соавторами (2012), среди малых озер Западной Сибири, не подверженных прямому антропогенному воздействию, наиболее высокое содержание никеля (определенное методом ICP-MS) обнаруживалось в отфильтрованных пробах вод озер северо-таежной зоны: от < 0.2 до 16.3 мкг/дм³, в среднем 0.73 мкг/дм³. В зоне южной тайги в водах озер содержалось от < 0.2 до 4.54 мкг/дм³ никеля, в среднем 0.46 мкг/дм³, а в зоне лесостепи – от 0.2 до 0.84 мкг/дм³, в среднем 0.59 мкг/дм³. В водах рек Западного Забайкалья в 1986–1993 гг. (Кашин и Иванов, 1997) общее содержание Ni, определенного методом ААС, варьировало в пределах 1.8–12.5 мкг/дм³, а средневзвешенное количество составляло 6.5 мкг/дм³; в водах крупных рек авторами отмечались более высокие концентрации никеля, чем в водах горных ручьев, которые менее минерализованы и в меньшей степени загрязнены. В пресных озерах Западного Забайкалья содержание никеля изменялось от 5 до 9.8 мкг/дм³ (Кашин и Иванов, 1997).

В горных реках других регионов страны содержание никеля может существенно варьировать. Так, в водах рек Северного Кавказа концентрации никеля (определенные методом ААС с электротермической атомизацией на приборе МГА-915) в среднем течении составляют 3 мкг/дм³, а к замыкающим створам убывают до 0.01–0.06 мкг/дм³ (Жинжакова и Чередник, 2020). По данным других авторов, в водах р. Катехчай со слабоминерализованными водами содержание Ni в устьевой части достигает 8.9 мкг/дм³ (Салимова, 2012).

По данным сербских исследователей, в водах р. Дунай содержание никеля, определенное методом оптической спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES), весной 2010 г. достигало 25.8 мкг/дм³, что было признано авторами очень высоким, но в притоках Дуная – реках Тиса и Великая Морава – было обнаружено всего 1 и 2 мкгNi/дм³ соответственно (Despotovic и др., 2019).

Северо-восточная часть Горного Алтая перспективна в плане обнаружения здесь бокситов, золота, никеля. В наших предыдущих исследованиях (Пузанов и др., 2015) мы отмечали, что содержание никеля – элемента II класса опасности – в поверхностных водах бассейна оз. Телецкого (от 1 до 6 мкг/дм³) выше, чем среднемировые концентрации в водах суши по расчетам В.В. Добровольского (1998) – 2.5 мкг/дм³. По данным зарубежных исследователей (Gaillardet et al., 2003), среднемировое содержание никеля в речных водах составляет всего 0.8 мкг/дм³. Вопрос о естественном уровне содержания никеля в природных водах бассейна оз. Телецкого до настоящего времени оставался открытым.

Целью настоящей работы было исследование уровня содержания растворенных и взвешенных форм никеля в водах притоков оз. Телецкого в связи со спецификой биогеохимической обстановки водосборного бассейна.

¹ EPA 822-F-18-001. 2012 Edition of the drinking water standards and health advisories.

Материалы и методы

Характеристика объекта исследования

Озеро Телецкое (Рис. 1) – крупнейший пресноводный водоем Алтая и одно из самых глубоких озер России. С 1998 г. буферная зона озера относится к объектам Всемирного природного наследия ЮНЕСКО². Озеро расположено в Северо-Восточной Алтайской горной провинции среди высоких горных хребтов на высоте 434 м н.у.м., имеет руслообразную форму и представляет собой глубокий ледниковый трог, заполненный 40 км³ чистой пресной воды. Озеро питают более 70 рек, но более 80% воды приносит р. Чулышман – около 5 км³ в год. Акваторию озера условно делят на две части: южную, или меридиональную часть (от устья р. Чулышман до мыса Купоросный, 50 км), и северо-западную, или широтную (до истока р. Бия, 28 км) (Малолетко и Шестакова, 1979; Селегей и Селегей, 1978).

Бассейн Телецкого озера является одним из основных туристических и рекреационных районов Алтая. В летний период бассейны рек Б. Чили, М. Чили, Чулышман, поселки Артыбаш и Яйлю подвергаются растущей с каждым годом антропогенной нагрузке. В бассейнах рек северной части озера (Самыш, Колдор) происходят вырубки леса, что усиливает эрозионные процессы на водосборах рек. В настоящее время строится турбаза в устье р. Самыш. Восточная часть водосборной территории озера входит в Алтайский государственный природный заповедник, здесь воздействие на окружающую среду минимально, но проявляется на участке возле водопада Корбу.

Соотношение площади водного зеркала оз. Телецкого и площади его водосборной территории составляет 1:90, чем определяется существенность влияния бассейна озера на гидрологию и гидрохимию его воды (для сравнения, у Байкала это соотношение составляет всего 1:17) (Селегей и Селегей, 1978). Озеро окружено горами высотой 600–2400 м, берега его в основном скальные и обрывистые, сложены крупными валунами и обломочным материалом гранитного и сланцевого состава. Лишь в устьях рек Чулышман, Кыга, Кокши, Колдор, Самыш встречаются песчаные и галечные берега. Бухт и заливов мало (Камгинский, Кыгинский). Преобладающими горными породами бассейна оз. Телецкого являются метаморфические и кристаллические сланцы; значительно меньшие пространства заняты выходами гранитов (хребет Корбу восточного берега, южная часть озера), гранодиоритов и диоритов. Местами обнаружены известняки. Основные породы местами покрыты ледниковыми отложениями в виде остатков террас, моренных гряд, холмов.

Ландшафт бассейна оз. Телецкого более чем на 50% представлен лесными сообществами, причем залесенность бассейна озера с юга на север увеличивается. На севере преобладают кедрово-пихтовые леса с примесью сосны, а на юге – кедрово-лиственничные. Обширные территории бассейнов некоторых притоков оз. Телецкого заболочены, что является существенным фактором формирования их химического состава. В ландшафтной структуре меридиональной части на западном берегу водоема чаще встречаются кедрово-таежные лесные сообщества с горно-лесными бурыми типичными и оподзоленными, реже дерново-подзолистыми и серыми лесными почвами на мощных переработанных осадочных породах. Восточные (правые) притоки озера преимущественно дренируют экзарационно-денудационные склоновые поверхности с каменистыми примитивными горно-тундровыми и горно-луговыми почвами (Черных и Самойлова, 2011).

Объектами нашего исследования являлись притоки оз. Телецкого разной величины: реки Чулышман и Кыга – притоки южной оконечности озера; реки Камга, Колдор и Самыш – широтной части озера; реки Большие и Малые Чили, малая река Чедор – западного берега; крупная река Кокши, малые реки Корбу и Челюш, ручей В. Камелик – восточного берега меридиональной части озера. Реки Чулышман, Кыга, Камга, Колдор, Самыш в устьевой части образуют конусы выноса и сразу за береговой полосой заболочены. Также пробы воды отбирались в р. Бия (единственной реке, вытекающей из озера) и в самом озере – в его северной (широтной) части у поселка Яйлю.

² Golden Mountains of Altai. Documents, Nomination 768rev (inscribed) Интернет-ресурс. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/768/documents/> (дата обращения: 12.02.2023).



Рис. 1. Схема расположения района исследования: **А** – Алтай на карте России, **В** – озеро Телецкое на карте Республики Алтай.

Методы исследования

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП научно-исследовательскими судами ИВЭП СО РАН. Исследования микроэлементного состава притоков оз. Телецкого проводились в 2016–2021 гг., а также летом 2022 г. Пробы воды отбирались на открытой воде в зоне течения с глубины 0.5 м в чистую новую полиэтиленовую посуду. Пробы фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм, при этом фильтровальную установку предварительно промывали несколькими порциями пробы. Необходимый объем фильтрата консервировали очищенной азотной кислотой марки ос. ч. (ГОСТ 56219-2014)³.

³ ГОСТ Р 56219-2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

Содержание никеля в нефилтрованных (общее содержание) и фильтрованных (растворимые формы) образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в Аналитическом центре ИГиМ СО РАН (г. Новосибирск) по ПНД Ф 14.1:2:4.139-98⁴ и по методике НСАМ № 450 – С⁵, а также (наряду с другими микроэлементами) – в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе ICAP-Qc «Thermo Scientific» (США), согласно ГОСТ Р 56219-2017², относительная погрешность не превышала 10%. Достоверность полученных данных подтверждается хорошей сходимостью результатов определения разными методами.

Статистическую обработку данных проводили стандартными методами: рассчитывали среднее арифметическое, ошибку среднего, коэффициенты вариации и коэффициенты корреляции.

Интенсивность выноса никеля с разных по величине речных бассейнов оценивали по количеству его растворимых форм, переносимых с единицы площади водосборного бассейна (км²) в единицу времени по следующей формуле:

$$M_{Ni} = (Q/F) \times C_{Ni}$$

где Q – расход воды (л/с), F – площадь водосбора (км²), C – концентрация никеля (мкг/дм³). Для расчетов использовались также данные о среднесуточных расходах воды (м³/с)⁶.

Результаты и обсуждение

По результатам наших исследований, общее содержание никеля в водах притоков оз. Телецкого с 2016 по 2021 г. изменяется от 0.12 до 4.6 мкг/дм³, в среднем составляя 1.8 ± 0.3 мкг/дм³ (Сv = 58%), среднее геометрическое значение равно 1.4 мкг/дм³, медианное – 1.6 мкг/дм³. Наиболее высокое среднее общее содержание никеля обнаружено в водах рек Самыш и Кыга. Заметно меньше Ni содержат воды рек восточного берега озера Кокши, Корбу, Челюш и Чири (0.12–2.3 мкг/дм³). Воды западных притоков – Колдор, Малые и Большие Чили, а также реки Чулышман содержат сравнительно более высокие концентрации общего никеля (0.7–4.6 мкг/дм³).

В воде самого озера общее содержание никеля в 2016–2021 г. варьировало от 0.6 (2016 г.) до 2.3 мкг/дм³ (2021 г.), что не превышает содержания Ni в поверхностных водах Западного Забайкалья (1.8–12.5 мкг/дм³) (Кашин и Иванов, 1997) и сопоставимо с его содержанием в озере Селигер – от 0.27 до 4.0 мкг/дм³, в среднем 1.48 мкг/дм³ (Бреховских и др., 1997). По данным Ю.В. Робертуса с соавторами (2009), в 2009 г. в водах оз. Телецкого содержание Ni изменялось в более узких пределах – от 0.34 (в районе с. Артыбаш до 0.43 мкг/дм³ (в районе впадения р. Челюш и у мыса Кырсай); авторы отмечали проявление продольной латеральной зональности в пространственном распределении микрокомпонентов в водах озера, обусловленное изменением объема поступающего речного стока и особенностями природных условий в бассейнах рек.

По данным А.П. Малолетко и Т.П. Шестаковой (1979), в 1972 г. в водах оз. Телецкого (в районе водопада Корбу) никель был установлен в количествах 0.58 мкг/дм³, на глубине 316 м; к поверхности водоема этот показатель уменьшался до 0.25 мкг/дм³. Этими же авторами в пробах вод в пределах цинково-свинцово-серебряного гидрогеохимического района (залив Камгинский) было обнаружено от 1 до 1.5 мкг/дм³ никеля, в р. Колдор ими было зафиксировано значение 1.02 мкг/дм³, в р. Чедор – 1.51 мкг/дм³. Высоким содержанием никеля отличались тогда воды р. Камелик (13.2 мкг/дм³), ручей Барчик в пос. Беле (7.1 мкг/дм³) (Малолетко и Шестакова, 1979). По результатам нашего исследования, воды р. Камелик, напротив, характеризуются очень невысоким содержанием никеля: от 0.39 до 1.8 мкг/дм³, в среднем 0.8 мкг/дм³. В водах р. Колдор общее содержание никеля в 2021 г. составляло 4.2 мкг/дм³, в р. Чедор – 3.5 мкг/дм³, в заливе Камгинском – 4.3 мкг/дм³. Содержание растворенных форм никеля в реках бассейна оз. Телецкого в

⁴ ПНД Ф 14.1:2:4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовых концентраций железа, кобальта, марганца, меди, никеля, серебра, хрома и цинка в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

⁵ Методика НСАМ № 450–С. Определение микроколичеств бериллия, таллия, свинца, висмута, кадмия, меди, марганца, кобальта, никеля, хрома атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией пробы в природных объектах. Отраслевая методика III категории точности.

⁶ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), 2021. Интернет-ресурс. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 21.02.2022).

Табл. 1. Среднемноголетние (2016–2021 гг.) концентрации растворенных форм никеля в притоках оз. Телецкого, мкг/дм³. $X_{ср} \pm x$ – среднее арифметическое и его ошибка, *lim* – пределы колебаний, *Cv* – коэффициент вариации, %РФ от ОС – доля растворенных форм от общего содержания.

Река	$X_{ср} \pm x$	<i>lim</i>	<i>Cv</i> , %	% РФ от ОС	Вариабельность
Западные притоки (с севера на юг)					
Самыш	3.1 ± 0.4	2.9–4.2	18	90 ± 1	0.4
Чедор	2.6 ± 0.2	1.9–3.1	23	87 ± 3	0.5
М. Чили	1.1 ± 0.2	0.5–2.2	36	83 ± 2	1.2
Б. Чили	2.2 ± 0.4	1.1–4.5	50	83 ± 3	1.5
Чулышман	1.5 ± 0.2	0.7–2.5	40	81 ± 2	1.2
Восточные притоки (с севера на юг)					
Камга	2.2 ± 0.4	1.1–3.8	46	81 ± 2	1.2
Корбу	0.2 ± 0.1	0.1–0.7	84	72 ± 2	2.2
Кокши	1.2 ± 0.4	0.2–3.4	88	62 ± 3	2.3
Челюш	0.8 ± 0.2	0.2–2.0	74	73 ± 3	2.2
Камелик	0.5 ± 0.1	0.3–0.9	45	72 ± 5	1.3
Чири	0.8 ± 0.2	0.3–1.9	63	68 ± 5	2.1
Кыга	3.0 ± 0.2	2.5–3.5	16	84 ± 2	0.33
Вода в самом озере в районе пос. Яйлю (северная часть озера)					
Озерная вода	1.3 ± 0.2	0.6 – 2.3	39	75 ± 6	1.0
ПДК _{р.х.} ⁷			10		
ПДК _{в.х.} ⁸			20		
<i>X_{ср}</i> в водах суши (по: Добровольский, 1998)			2.5		

⁷ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 22.08.2023) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203).

⁸ ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования.

Табл. 2. Среднее содержание никеля в поверхностных водах западных и восточных берегов оз. Телецкого в период весенне-летнего половодья 2021 г., мкг/дм: среднее арифметическое \pm ошибка среднего, в скобках – коэффициент вариации.

Формы содержания Ni	Западные притоки	Восточные притоки
Общее содержание	3.3 \pm 0.5 (28%)	0.5 \pm 0.2 (78%)
Растворимые формы	3.1 \pm 0.4 (43%)	0.4 \pm 0.1 (51%)

2016–2021 гг. не превышало ПДК для вод рыбохозяйственного и культурно-бытового назначения (СанПиН 1.2.3685-21⁹): оно изменялось от 0.1 до 4.4 мкг/дм³, в среднем составляя 1.5 \pm 0.1 мкг/дм³ (Cv = 77%). Для сравнения, в водах озер южно-таежной зоны Западной Сибири (Кремлева и др., 2012) содержания никеля в отфильтрованных пробах, определенные методом ICP-MS, колебались в этих же пределах – от < 0.2 до 4.5 мкг/дм³. В малых реках Надым-Пуровского междуречья (на севере Западной Сибири), берущих свое начало в болотах, общее содержание никеля (определенного методами атомной адсорбции и масс-спектрометрии) в 2017–2018 гг. было ниже и изменялось от < 0.20 до 1.8 мкг/дм³ (Соромотин и др., 2019). Отметим, что, по нашим данным, в водах р. М. Чили, долина которой в среднем течении сильно заболочена, содержание никеля самое низкое среди западных притоков озера (Табл. 1). В поверхностной воде р. Обь в 2018 г., изученной также методом ICP-MS на приборе ICAP-Qc (“Thermo Scientific”) в химико-аналитическом центре ИВЭП СО РАН (Эйрих и др., 2018), содержание растворенных форм никеля варьировало в пределах 2.2–4.0 мкг/дм³, что согласуется с нашими результатами.

Наиболее высоким содержанием растворенного никеля отличаются воды р. Самыш: от 2.9 до 4.2 мкг/дм³, в среднем 3.1 \pm 0.4 мкг/дм³ (Табл. 1), что совпадает с результатами наших прошлых исследований – 3 мкг/дм³ (Пузанов и др., 2015). В водах р. Чулышман отмечено некоторое снижение содержания растворенного никеля в последние годы: 0.7–2.5 мкг/дм³ за 2016–2021 гг. по сравнению с 3 мкг/дм³ в 2009 г. За последние 6 лет содержание растворенного никеля снизилось и в водах рек Б. Чили (не более 4.5 мкг/дм³) и Кыга (не более 3.5 мкг/дм³ в период осенней межени 2021 г.) по сравнению с 2009 г. (5 и 6 мкг/дм³ соответственно). Содержание растворенного никеля в р. Бия (единственной реке, вытекающей из озера), в районе с. Артыбаш (1.5–2.5 мкг/дм³) совпало с нашими данными десятилетней давности – 2 мкг/дм³.

Большая часть никеля в водах притоков оз. Телецкого мигрирует в форме растворенных соединений, на их долю приходится 62–90% от общего содержания Ni. Согласно литературным данным, в 2018 г. в водах р. Обь в форме растворенных соединений находилось 90% никеля (Эйрих и др., 2018), хотя, по мнению В.В. Добровольского (1998), 92% никеля переносится на взвесах, в форме взвешенного вещества речных вод.

Для содержаний никеля в водах притоков оз. Телецкого характерна значительная пространственная неоднородность распределения (Табл. 1), причем более изменчивы концентрации никеля в водах восточных притоков меридиональной части озера (Корбу, Кокши, Челюш, Чири) (Табл. 2).

Установлено, что в водах западных притоков меридиональной части озера (рек Чедор, Большие Чили, Самыш) содержание никеля (и растворенных и взвешенных форм) заметно выше, чем в водах восточных притоков (рек Корбу, Кокши, Челюш, Чири, Камга) (Табл. 1, 2, Рис. 2). Особенно выражена эта разница в период весенне-летнего половодья, когда в водах восточных притоков концентрации никеля не превышают 1 мкг/дм³.

Повышенное содержание никеля в водах, дренирующих западные берега озера, объясняется в том числе зрелостью почвенного покрова водосбора, в котором активные биогеохимические процессы стимулируют образование миграционноспособных растворимых форм никеля и, соответственно, его активное поступление в речную сеть. Дополнительной причиной более высокого содержания растворенных форм никеля в водах западных берегов является преобладание здесь осадочных карбонатных пород – есть данные, что из них высвобождение никеля происходит наи-

⁹ СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

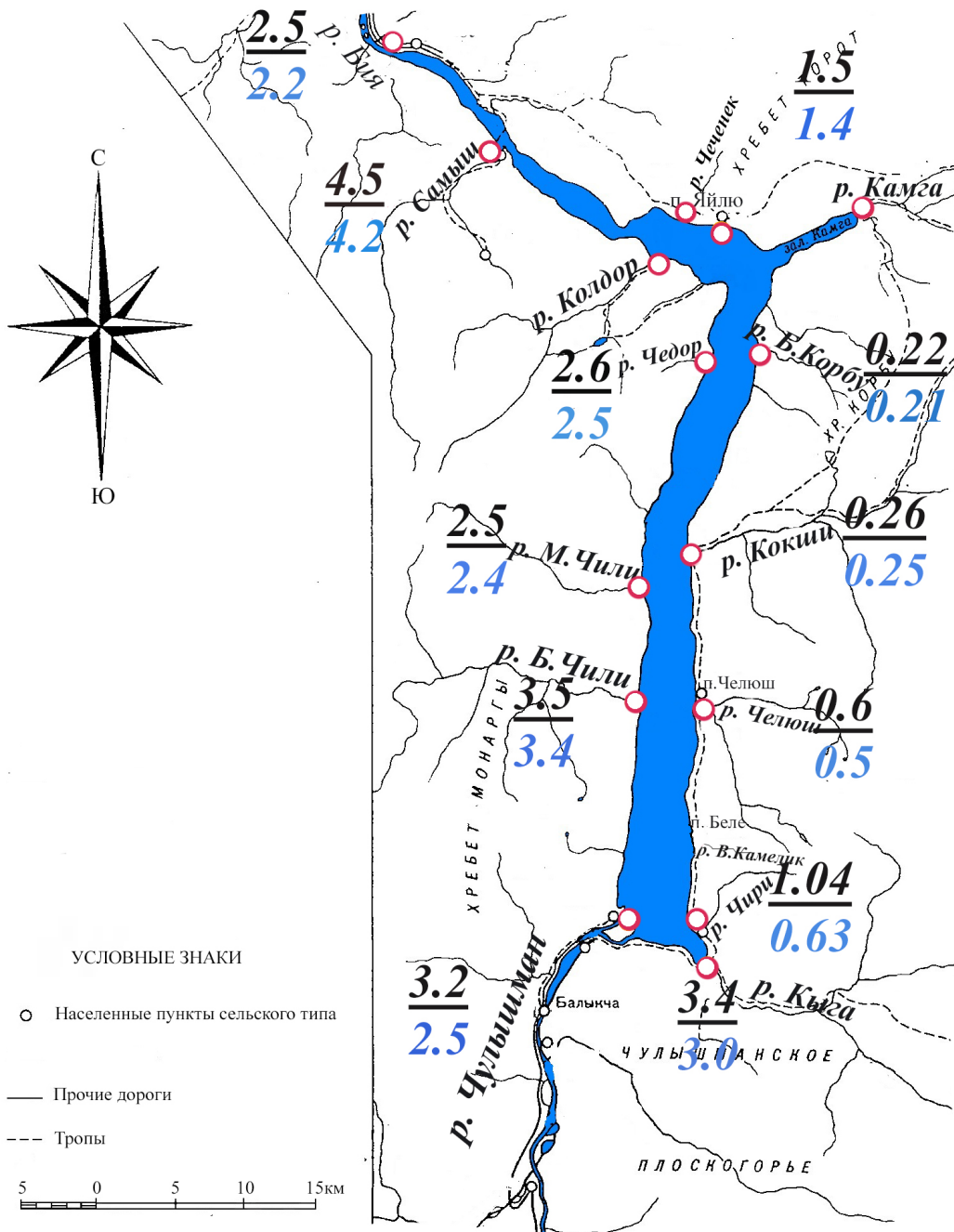


Рис. 2. Карта-схема содержания никеля в водах притоков оз. Телецкого и р. Бия в период весенне-летнего половодья 2021 года, мкг/дм³. В числителе указано общее содержание, в знаменателе – концентрация растворимых форм.

более интенсивно (Солдатов и др., 2022). Долевое содержание растворенных форм никеля в водах западных притоков (83–90%) также выше, чем в водах рек восточного берега (62–73%) (Табл. 1). На восточных берегах больше распространены каменистые примитивные почвы, поэтому процессы образования подвижных форм никеля, его растворение и поступление в речную сеть здесь менее существенны, чем с западной стороны озера.

Известно, что наибольший вклад в инактивацию металлов в природных водах вносит процесс их комплексообразования с гуминовыми и фульвокислотами, причем комплексообразование никеля в водах лесных ландшафтов зависит от наличия в водной среде Fe, Al, Cu: в их отсутствие степень связывания Ni существенно возрастает (Моисеенко и др., 2013). Содержание гуминовых и фульвокислот в горно-лесных бурых почвах западного берега озера, вследствие большей их гумификации, очевидно, значительно выше, чем в каменистых примитивных почвах с восточной

стороны озера. Кислая среда болот, представленных в ландшафтах западных берегов (в среднем течении рек Большие и Малые Чили), способствует образованию водорастворимых форм железа. Fe образует комплексы с гуминовыми и фульвокислотами, препятствуя здесь комплексобразованию никеля, который при этом может более интенсивно поступать в водоток в форме растворимых соединений. Отметим, что в водах р. Обь в 2018 г. никель на 90% был представлен водорастворимыми соединениями, тогда как основная масса железа присутствовала в форме взвеси (89%) (Эйрих и др., 2018).

Воды восточных притоков меридиональной части озера (рек Корбу и Кокши), берущих свое начало с вершины гранитного массива и дренирующих в основном каменистые примитивные почвенные образования, содержат сравнительно низкие концентрации растворенного никеля, поскольку гранитные породы отличаются самым низким его содержанием (Войткевич и др., 1990, Добровольский, 1998). Долевое содержание растворимых форм Ni в водах рек Корбу, Кокши, Челюш ниже, чем в водах западных притоков (Табл. 1), только 27–38% никеля в них находится в форме взвешенных соединений – возможно, это объясняется в том числе и меньшей здесь конкуренцией для никеля за связывание и образование нерастворимых комплексов.

Отметим, что в 2016–2020 гг. в водах некоторых притоков оз. Телецкого содержание железа могло достигать 340 мкг/дм³ (р. Чулышман, малая река Чири и ручей Камелик в июне 2018 г.), но при столь высокой концентрации его большая часть находилась в форме взвешенных соединений (77–85%). Возможно, именно конкурентное присутствие железа было причиной того, что никель в водах перечисленных рек в этот период был представлен преимущественно водорастворимой формой (80–89%).

Табл. 3. Гидрологические характеристики различных по величине притоков оз. Телецкого и расчетные величины стока никеля в разные гидрологические периоды 2018 г. Над чертой указаны данные за июнь, под чертой – за сентябрь.

Показатель	Река		
	Чулышман	Кокши	Чири
Площадь водосбора, км ²	17200	472	37
Средняя высота водосбора, м	2040	1540	1630
Длина реки, м	241	37	11
Уклон реки, %	8.6	18	150
Среднегодовой расход воды, м ³ /с	175.8	16.2	0.69
Объем стока, км ³ за год	5.5	0.51	0.02
Среднемесячный расход воды, м ³ /с	<u>728.0</u> 133.6	<u>46.5</u> 22.9	<u>2.9</u> 0.59
Объем стока за месяц, км ³	<u>1.95</u> 0.36	<u>0.125</u> 0.061	<u>0.0077</u> 0.0016
Общее содержание никеля в воде, мкг/дм ³ , 2018 г.	<u>1.8</u> 2.2	<u>0.8</u> 2.7	<u>0.9</u> 0.7
Среднемесячный модуль стока, л/с · км ²	<u>42.3</u> 7.8	<u>98.6</u> 48.1	<u>77.2</u> 16.2
Сток никеля, кг/мес.	<u>3510</u> 787	<u>99</u> 164	<u>6.9</u> 1.1
Модуль стока никеля, кг/мес. с км ² водосбора	<u>0.20</u> 0.046	<u>0.21</u> 0.35	<u>0.19</u> 0.03

В водах р. Кыга в 2021 г. установлен один из наиболее высоких показателей общего и растворимого никеля (Рис. 2). За 2016–2021 гг. содержание растворимых форм никеля в р. Кыга также было максимальным из всех изученных притоков оз. Телецкого – 3.0 ± 0.2 мкг/дм³ (Табл. 1), что составляло 78–88% от общего содержания. Отметим, что в наших ранних исследованиях именно в р. Кыга также было обнаружено наиболее высокое содержание растворенного никеля – 6 мкг/дм³ (Пузанов и др., 2015). При этом воды р. Кыга из года в год, как правило, характеризуются и одним из самых высоких показателей долевого содержания взвешенных форм железа (70–85%). Возможно, поэтому Ni, способность к комплексообразованию которого в присутствии железа снижена, в большей степени находится в водах р. Кыга в форме водорастворимых соединений.

На долю растворимых форм никеля в р. Самыш приходится от 85 до 93%. Высокая степень растворимости Ni в водах этой реки объясняется природным рудопоявлением в водосборном бассейне, а также присутствием в них железа преимущественно в форме взвеси (53–85% от общего, по результатам исследований 2016–2021 гг.).

В июне 2022 г. впервые за несколько лет наблюдений нами были обнаружены повышенные (до 1.1 ПДК_{р.х.}) концентрации Ni в водах рек бассейна оз. Телецкого, причем в водах западных притоков, водосборы которых в большей степени подвержены антропогенной нагрузке, содержание растворенных форм Ni было существенно выше (9.1–11.0 мкг/дм³), чем в водах восточных притоков (1.0–1.2 мкг/дм³), протекающих по территории Алтайского заповедника. Наиболее высоким общим содержанием никеля летом 2022 г. отличались воды рек северной части западного побережья озера: Самыш, Колдор, Чедор. Высокое содержание Ni в водах р. Самыш (Табл. 1) объясняется осложненной геологией бассейна – наличием золотоносного месторождения в долине реки (прииска Калычак, действовавшего до середины XX в.): как известно, никель является сопутствующим золотому оруднению элементом (Коршунова и Чарыкова, 2018; Саэт и др., 1990). Кроме того, в 2022 г. здесь активно велось строительство туристической базы.

На основании имеющихся данных (АИС ГМВО, 2021¹⁰; Селегей и Селегей, 1978) о расходах воды и площадях бассейнов рек, на которых существуют гидрологические посты, были рассчитаны сток никеля и величины его выноса в 2018 г. с единицы водосборной площади бассейнов (Табл. 3).

Установлено, что сток никеля водами притоков оз. Телецкого напрямую зависит от расхода воды в реке. Наибольшее количество Ni привносится в воды озера рекой Чулышман: в период весенне-летнего половодья – до 3.5 т, в период осенней межени и падения объема водного стока в 5 раз – 0.8 т (Табл. 3). При этом водами р. Бия (единственной реки, вытекающей из Телецкого озера) с концентрацией Ni в осенний период 2.5 мкг/дм³ и расходе 452 м³/с в сентябре выносятся 2.9 т никеля. С водами р. Чири в оз. Телецкое поступает всего 6.7 кг Ni в период весенне-летнего половодья и 1.1 кг Ni – в период осенней межени. Водами р. Кокши в период осенней межени (когда большую роль в водной миграции элементов играет почвенный покров) привносится никеля больше (164 кг), чем летом (99 кг), что объясняется большим влиянием почвенного покрова бассейна на процесс формирования химического состава воды р. Кокши.

Вынос никеля с единицы водосборной площади в меньшей степени определяется гидрологическими параметрами реки – ее величиной, расходом воды и объемами стока. В летний паводковый период интенсивность выноса никеля с водосборных площадей разных по величине притоков оз. Телецкого практически не различается, составляя 0.19–0.21 кг/км² в месяц. В период осенней межени в связи со снижением водности и расходов воды в реках вынос микроэлементов в большей степени определяется внутрипочвенными процессами на водосборе, при этом наименьший модуль стока никеля отмечен для водосбора малой реки с наибольшим уклоном (р. Чири), что является следствием кратковременности соприкосновения вод с породами и почвами.

На основе среднесуточной концентрации никеля в водах самого озера (1.7 ± 0.1 , $C_v = 26\%$) и общего объема воды в озере (40 км³) рассчитано суммарное содержание в нем растворенных и взвешенных форм Ni, которое составляет около 68 т. Исходя из среднегодового значения расхода воды в р. Бия 472 м³/с и содержания никеля в ее водах 1.5–2.5 мкг/дм³, вынос никеля этой рекой достигает 22–37 т в год, в то время как годовое поступление Ni с водами р. Чулышман в среднем в 2–3 раза меньше и составляет около 10 т в год (среднегодовой сток – 158 м³/с, среднесуточная концентрация – 2 мкг/дм³). Таким образом, в отличие от объема водного стока в оз. Телецкое,

¹⁰ Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), 2021. Интернет-ресурс. URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 21.02.2022).

который более чем на 2/3 представлен водами р. Чулышман, содержание никеля в озере только наполовину определяется его поступлением с водами самой крупной водной артерии.

Заключение

Содержание никеля в водах притоков оз. Телецкого с 2016 по 2021 г. изменяется от 0.12 до 4.6 мкг/дм³, не превышает ПДК_{в.х.} и ПДК_{р.х.}, согласуется с данными по другим рекам Западной Сибири, однако выше среднемировых величин. Концентрации никеля в водах самого озера также не превосходят ПДК, но выше значений 50-летней давности, что может объясняться как различиями методик определения, так и нарастающим антропогенным воздействием на окружающую среду.

В водах западных притоков меридиональной части оз. Телецкого концентрации и доли растворенных форм Ni выше, чем в водах восточных притоков. Это объясняется биогеохимическими и геологическими особенностями их водосборных бассейнов: в хорошо сформированных и зрелых горно-лесных бурых почвах западных берегов процессы образования водорастворимых форм никеля и его поступление в речную сеть идут интенсивнее, чем в примитивных каменистых почвах восточных берегов озера. Еще одним фактором служит преобладание осадочных карбонатных пород на западных берегах и гранитов – на восточных.

Повышенную растворимость никеля в водах западных притоков можно также объяснить более заметным присутствием железа в горно-лесных бурых местами заболоченных почвах; этот элемент конкурирует с никелем за связывание с гуминовыми и фульвокислотами, снижая способность Ni к комплексообразованию.

В июне 2022 г. впервые за несколько лет наблюдений в водах западных притоков озера установлены повышенные (до 11 мкг/дм³) концентрации никеля, что составляет 1.1 ПДК_{р.х.} Это можно объяснить как большей подверженностью западных берегов антропогенной нагрузке (строительством туристических баз, вырубками леса, усиливающими эрозионные процессы на водосборе), так и спецификой геохимической обстановки (наличием золотоносного месторождения в бассейне р. Самыш и размытием отходов ранее функционирующей золотодобывающей отрасли).

Рассчитан массоперенос Ni с водосборов притоков оз. Телецкого. В период весенне-летнего половодья водами р. Чулышман привносится в озеро до 3.5 т никеля, в период осенней межени – 0.8 т. Вклад остальных притоков в поступление никеля в озеро на один-два порядка меньше. Содержание никеля в воде оз. Телецкого не более чем наполовину определяется привносом элемента с водами самого крупного притока.

Список литературы

Бреховских, В.Ф., Волкова, З.В., Золотарева, Н.С., 1977. Современное экологическое состояние оз. Селигер. *Водные ресурсы* 24 (3), 344–351.

Войткевич, Г.В., Кокин, А.В., Мирошников, А.Е., Прохоров, В.Г., 1990. Справочник по геохимии. Недр, Москва, Россия, 480 с.

Добровольский, В.В., 1998. Основы биогеохимии. Высшая школа, Москва, Россия, 413 с.

Жинжакова, Л.З., Чередник, Е.А., 2020. Пространственное распределение концентраций токсичных металлов Ni, Cr, Cd, Pb в водах горных рек. *Modern Science* 2 (1), 16–19.

Кашин, В.К., Иванов, Г.М., 1997. Никель в природных водах Забайкалья. *Водные ресурсы* 24 (3), 311–314.

Коршунова, В.А., Чарыкова, М.В., 2018. Металлоорганические формы золота и элементов-спутников в подзолистых почвах на территории золотого месторождения Новые Пески (Южная Карелия). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле* 63 (1), 22–35. <http://www.doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.102>

Кремлева, Т.А., Моисеенко, Т.И., Хорошавин, В.Ю., Шавнин, А.А., 2012. Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав. *Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование* 12, 80–89.

- Малолетко, А.М., Шестакова, Т.П., 1979. Материалы к гидрохимии бассейна Телецкого озера. В: Земцов, А.А. (ред.), *Вопросы географии Сибири*. Издательство ТГУ, Томск, СССР. 110–126.
- Моисеенко, Т.И., Дину, М.И., Гашкина, Н.А., Кремлева, Т.А., 2013. Формы нахождения металлов в природных водах в зависимости от их химического состава. *Водные ресурсы* 40 (4), 375–385.
- Пузанов, А.В., Бабошкина, С.В., Горбачев, И.В., 2015. Содержание и распределение основных макро- и микроэлементов в поверхностных водах Алтая. *Водные ресурсы* 42 (3), 298–310.
- Робертус, Ю.В., Шевченко, Г.А., Кивацкая, А.В., 2009. Уровни присутствия микроэлементов в воде Телецкого озера и его притоков. *Природные ресурсы Горного Алтая* 1 (10), 87–90.
- Саэт, Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин, Е.П., Смирнова, Р.С., Башаркевич, И.Л. и др., 1990. Геохимия окружающей среды. Недр, Москва, Россия, 335 с.
- Салимова, Ш.Д., 2012. Микроэлементы в природных водах бассейна реки Катехчай (Азербайджанская республика). *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета* 2 (14), 22–25.
- Селегей, В.В., Селегей, Т.С., 1978. Телецкое озеро. Гидрометеоиздат, Ленинград, СССР, 80 с.
- Солдатова, Е.А., Торопов, А.С., Сидкина, Е.С., Коньшев, А.А., Иванова, И.С., 2022. Химический состав вод малых водотоков Кугдинского массива и его обрамления (Восточная Сибирь). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов* 333 (3), 111–125.
- Соромотин, А.В., Кудрявцев, А.А., Ефимова, А.А., Гертер, О.В., Фефилов, Н.Н., 2019. Фоновое содержание тяжелых металлов в воде малых рек Надым-Пуровского Междуречья. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология* 2, 48–55. <http://www.doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55>
- Черных, Д.В., Самойлова, Г.С., 2011. Ландшафты Алтая (Республика Алтай и Алтайский край). Карта. Масштаб 1:500000. Новосибирская картографическая фабрика, Новосибирск, Россия.
- Эйрих, А.Н., Серых, Т.Г., Степанец, В.Н., Папина, Т.С., 2018. Микроэлементный состав воды реки Оби в районе города Барнаула. *Известия Алтайского отделения Русского географического общества* 3 (50), 64–67.
- Chirila, E., Draghici, C., Puhacel, A., 2014. Total and dissolved metals occurrence in municipal wastewater treatment plant effluents. *Environmental Engineering and Management Journal* 13 (9), 2211–2218. <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2014.246>
- Despotovic, S.G., Prokic, M.D., Gavric, J.P., Gavrilovic, B.R., Radovanovic, T.B. et al., 2019. Evaluation of the river snail viviparus acerosus as a potential bioindicator species of metal pollution in freshwater ecosystems. *Archives of Biological Sciences* 71 (1), 39–47.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B., 2003. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry* 5 (9), 225–272. <http://www.doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05165-3>
- Savorelli, F., Manfra, L., Croppo, M., Tornambè, A, Palazzi, D. et al., 2017. Fitness evaluation of *Ruditapes philippinarum* exposed to Ni. *Biological Trace Element Research* 177 (2), 384–393.
- Shotyk, W., Bicalho, B., Cuss, C.W., Donner, M.W., Grant-Weaver, I. et al., 2017. Trace metals in the dissolved fraction (< 0.45 µm) of the lower Athabasca River: Analytical challenges and environmental implications. *Science of The Total Environment* 580, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.012>

Zuzolo, D., Cicchella, D., Catani, V., Giaccio, L., Guagliardi, I., Esposito, L., De Vivo, B., 2017. Assessment of potentially harmful elements pollution in the Calore River basin (Southern Italy). *Environmental Geochemistry and Health* **39**, 531–548.

References

- Brekhovskikh, V.F., Volkova, Z.V., Zolotareva, N.S., 1997. The present-day ecological condition of lake Seliger. *Water Resources* **24** (3), 317–324.
- Chernykh, D.V., Samoilova, G.S., 2011. Landshafty Altaya (Respublika Altai i Altaiskii Krai) [Landscapes of Altai (Altai Republic and Altai Krai)]. Map. Scale 1:500000. Novosibirsk Cartographic Factory, Novosibirsk, Russia. (In Russian).
- Chirila, E., Draghici, C., Puhacel, A., 2014. Total and dissolved metals occurrence in municipal wastewater treatment plant effluents. *Environmental Engineering and Management Journal* **13** (9), 2211–2218. <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2014.246>
- Despotovic, S.G., Prokic, M.D., Gavric, J.P., Gavrilovic, B.R., Radovanovic, T.B. et al., 2019. Evaluation of the river snail viviparus acerosus as a potential bioindicator species of metal pollution in freshwater ecosystems. *Archives of Biological Sciences* **71** (1), 39–47.
- Dobrovolsky, V.V., 1998. *Osnovy biogeohimii [Fundamentals of biogeochemistry]*. Vysshaya shkola, Moscow, USSR, 413 p. (In Russian).
- Eirikh, A.N., Serykh, T.G., Stepanets, V.N., Papina, T.S., 2018. Mikroelementnyi sostav vody reki Obi v raione goroda Barnaula [The trace element composition of water in the Ob river near Barnaul]. *Izvestiya Altaiskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva [Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society]* **3** (50), 64–67. (In Russian).
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B., 2003. Trace elements in river waters. *Treatise on Geochemistry* **5** (9), 225–272. <http://www.doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/05165-3>
- Kashin, V.K., Ivanov, G.M., 1997. Nickel in natural waters of Transbaikalia. *Water Resources* **24** (3), 285–288.
- Korshunova, V.A., Charykova, M.V., 2018. Metalloorganicheskie formy zolota i elementov-sputnikov v podzolistykh pochvakh na territorii zolotogo mestorozhdeniia Novye Peski (Iuzhnaia Kareliia) [Gold and pathfinders metalloorganic forms in podzol soil at the area of Novye Peski gold deposit (South Karelia)]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle [Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences]* **63** (1), 22–35. (In Russian). <http://www.doi.org/10.21638/11701/spbu07.2018.102>
- Kremleva, T.A., Moiseyenko, T.I., Khoroshavin, V.Y., Shavnin, A.A., 2012. Geochemical features of natural waters of West Siberia: microelement composition. *Tyumen State University Herald* **12**, 71–80.
- Maloletko, A.M., Shestakova, T.P., 1979. Materialy k gidrokhimii basseina Teletskogo ozera [Materials for hydrochemistry of the Teletskoye Lake basin]. In: Zemtsov, A.A. (ed.), *Voprosy geografii Sibiri [Questions of geography of Siberia]*, Tomsk State University, Tomsk, Russia, 110–126. (In Russian).
- Moiseenko, T.I., Dinu, M.I., Gashkina, N.A., Kremleva, T.A., 2013. Occurrence forms of metals in natural waters depending on water chemistry. *Water Resources* **40** (4), 407–416.
- Puzanov, A.V., Baboshkina, S.V., Gorbachev, I.V., 2015. Concentration and distribution of major macro- and microelements in surface waters in the Altai. *Water Resources* **42** (3), 340–351.

- Robertus, Yu.V., Shevchenko, G.A., Kivatskaia, A.V., 2009. Urovni prisutstviya mikroelementov v vode Teleckogo ozera i ego pritokov [Presence levels of the trace elements in the water of Lake Teletskoye and its tributaries]. *Prirodnye resursy Gornogo Altaia [Natural resources of Gorny Altai]* 1 (10), 87–90. (In Russian).
- Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., Smirnova, R.S., Basharkevich, I.L. et al., 1970. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy [Geochemistry of the environment]*. Nedra, Moscow, USSR, 335 p. (In Russian).
- Salimova, Sh.D., 2012. Mikroelementy v prirodnykh vodakh basseina reki Katekhchai (Azerbaidzhanskaya respublika) [Trace elements in the natural waters of the Katekhchay River basin (Republic of Azerbaijan)]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotehnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University]* 2 (14), 22–25. (In Russian).
- Savorelli, F., Manfra, L., Croppo, M., Tornambè, A., Palazzi, D. et al., 2017. Fitness evaluation of *Ruditapes philippinarum* exposed to Ni. *Biological Trace Element Research* 177 (2), 384–393.
- Selegei, V.V., Selegei, T.S., 1978. Teletskoe ozero [Teletskoye Lake]. Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR, 80 p. (In Russian).
- Shotyk, W., Bicalho, B., Cuss, C.W., Donner, M.W., Grant-Weaver, I. et al., 2017. Trace metals in the dissolved fraction ($< 0.45 \mu\text{m}$) of the lower Athabasca River: Analytical challenges and environmental implications. *Science of The Total Environment* 580, 660–669. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.012>
- Soldatova, E.A., Toropov, A.S., Sidkina, E.S., Konyshov, A.A., Ivanova, I.S., 2022. Khimicheskii sostav vod malykh vodotokov Kugdinskogo massiva i ego obramleniya (Vostochnaya Sibir') [Chemical composition of the small watercourses of the Kugda massif and its margin (Eastern Siberia)]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring eoresursov [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]* 333 (3), 111–125. (In Russian).
- Soromotin, A.V., Kudryavtsev, A.A., Efimova, A.A., Gerter, O.V., Fefilov, N.N., 2019. Fonovoe sodержanie tyazhelykh metallov v vode malykh rek Nadym-Purovskogo Mezhdurech'ya [The background content of heavy metals in the water of small rivers in the Nadym-Pur interfluvial area]. *Geoekologiya. Inzhenernaia geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya [Geoecology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology]* 2, 48–55. (In Russian). <http://www.doi.org/10.31857/S0869-78092019248-55>
- Voitkevich, G.V., Kokin, A.V., Miroshnikov, A.E., Prokhorov, V.G. M., 1990. Spravochnik po geohimii [Handbook of Geochemistry]. Nedra, Moscow, Russia, 480 p. (In Russian).
- Zhinzhakova, L.Z., Cherednik, E.A., 2020. Prostranstvennoe raspredelenie kontsentratsiy toksichnykh metallov Ni, Cr, Cd, Pb v vodakh gornyykh rek [Spatial distribution of concentrations of toxic metals Ni, Cr, Cd, Pb in the waters of mountain rivers]. *Modern Science* 2 (1), 16–19. (In Russian).
- Zuzolo, D., Cicchella, D., Catani, V., Giaccio, L., Guagliardi, I., Esposito, L., De Vivo, B., 2017. Assessment of potentially harmful elements pollution in the Calore River basin (Southern Italy). *Environmental Geochemistry and Health* 39, 531–548.