

Раздел 2 ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ,
 ГИДРОХИМИЯ
Section 2 HYDROLOGY OF LAND, WATER RESOURCES,
 HYDROCHEMISTRY

УДК 502.7 + 577.4

**МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА АССИМИЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ
МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ МЕДИ В ВОДЕ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА**

А.А. Цхай¹, М.А. Романов²

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул,

E-mail: tskhai@iwep.ru, max.rom1@mail.ru

Объектом исследования является крупнейший пресноводный водоем Западной Сибири – Телецкое озеро (ТО). Целью работы является оценка особенностей удержания тяжелых металлов на примере меди (Cu) в воде ТО как результата их накопления, трансформации и ассимиляции. Из-за низкой температуры воды в течение всего года ТО отличается малым ресурсом самоочищения, что подтверждают расчеты. Приведено кинетическое уравнение для меди и вычислены предварительные значения коэффициентов удержания и скорости трансформации соединений Cu в поверхностных водах ТО. Оценены величины суммарной ассимиляции, допустимой нагрузки и допустимой концентрации меди в воде ТО для сохранения устойчивого состояния его экосистемы.

Ключевые слова: тяжелые металлы; медь; гидрология; лимнология; трансформация; ассимиляция; модель; Телецкое озеро.

DOI: 10.24412/2410-1192-2026-18105

Дата поступления: 14.01.2026. Принята к печати: 31.03.2026

Телецкое озеро – самый глубокий пресноводный водоем Западной Сибири, расположено в истоке одной из крупнейших рек мира – Оби. По принятой гидрологической классификации ТО относится к водоемам димиктического типа. Работа О.А. Алекина (1930) положила начало систематическому изучению качества воды в ТО. Существенный интерес вызывает поведение в ТО тяжелых металлов, в том числе меди Cu. Среди предшествующих работ с анализом данных полевых измерений Cu в воде ТО, следует выделить работы сотрудников Института водных и экологических проблем СО РАН [Мальгин, 1997; Кузнецова, 2012; Пузанов и др., 2015; Робертус и др., 2021 и т.д.]. Кроме того, материалы по упомянутой теме содержатся в публикациях исследователей из других организаций [Малолетко, 2009; Шевченко, 2010а; Бурцева, Александрова, 2022 и др.].

В природе медь часто встречается как в самородном состоянии, так и в виде сульфидов, арсенидов, хлоридов и карбонатов [Мур, Рамамурти, 1987]. В Горном Алтае имеются значительные запасы меди по типу полиметаллических сульфидных руд. Основным источником поступления меди в поверхностные воды здесь являются процессы химического выветривания горных пород и минералов, сопровождающиеся их растворением.

В данной работе рассматривается вопрос о процессе ассимиляции тяжелых металлов на примере меди (*Сu*) в водах ТО. Под ассимиляционным потенциалом водного объекта здесь и далее понимается его способность без потери для устойчивости разлагать загрязняющие вещества природного и антропогенного происхождения, устранять их вредное воздействие. Для рассмотрения случая ассимиляции азота и фосфора в ТО была выполнена работа [Цхай, Романов, 2024].

Соединения тяжелых металлов могут присутствовать в природных водах в растворённой, коллоидной и взвешенной формах. Соотношение между ними в значительной степени определяется величиной рН и составом воды. В лимнологических объектах Сибири роль взвешенных форм в миграции меди, от истоков рек к впадению в водоемы, резко снижается, и она обнаруживается в последних, в основном, в растворенном состоянии [Линник, Набиванец, 1986].

Обычно растворённые формы тяжелых металлов могут быть представлены как гидратированными ионами и гидроксокомплексами, так и комплексными

соединениями с минеральными и органическими веществами вод (преимущественно комплексными соединениями с гуминовыми и фульвокислотами). Медь относится к числу активных микроэлементов и ее повышенное содержание в воде оказывает токсическое воздействие на гидробионты и человека. В связи с этим содержание меди в поверхностных водах нормируется. ПДК растворённых форм меди в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования составляет 1 г/м³, рыбохозяйственного назначения – 0.001 г/м³ [Руководящий..., 1994].

Целью исследования является оценка особенностей удержания тяжелых металлов на примере меди в воде ТО как результата их накопления, трансформации и ассимиляции.

Материалы и методы

ТО – олиготрофный глубокий водоем тектонического происхождения, расположенный на юге Западной Сибири (рис. 1). Значения гидрологических характеристик ТО: площадь зеркала – 223 км², объем котловины – порядка 40 км³, глубины озера (максимальная – 325 м, средняя – 174 м) использовались в модельном расчете.

В мировой лимнологии используется понятие коэффициента удержания *R* (*coefficient of retention*) [Vollenweider, 1975; Dillon, Rigler, 1975]. Под этим термином понимается относительное снижение концентрации загрязняющего вещества в потоке речных вод в результате попадания в озеро.

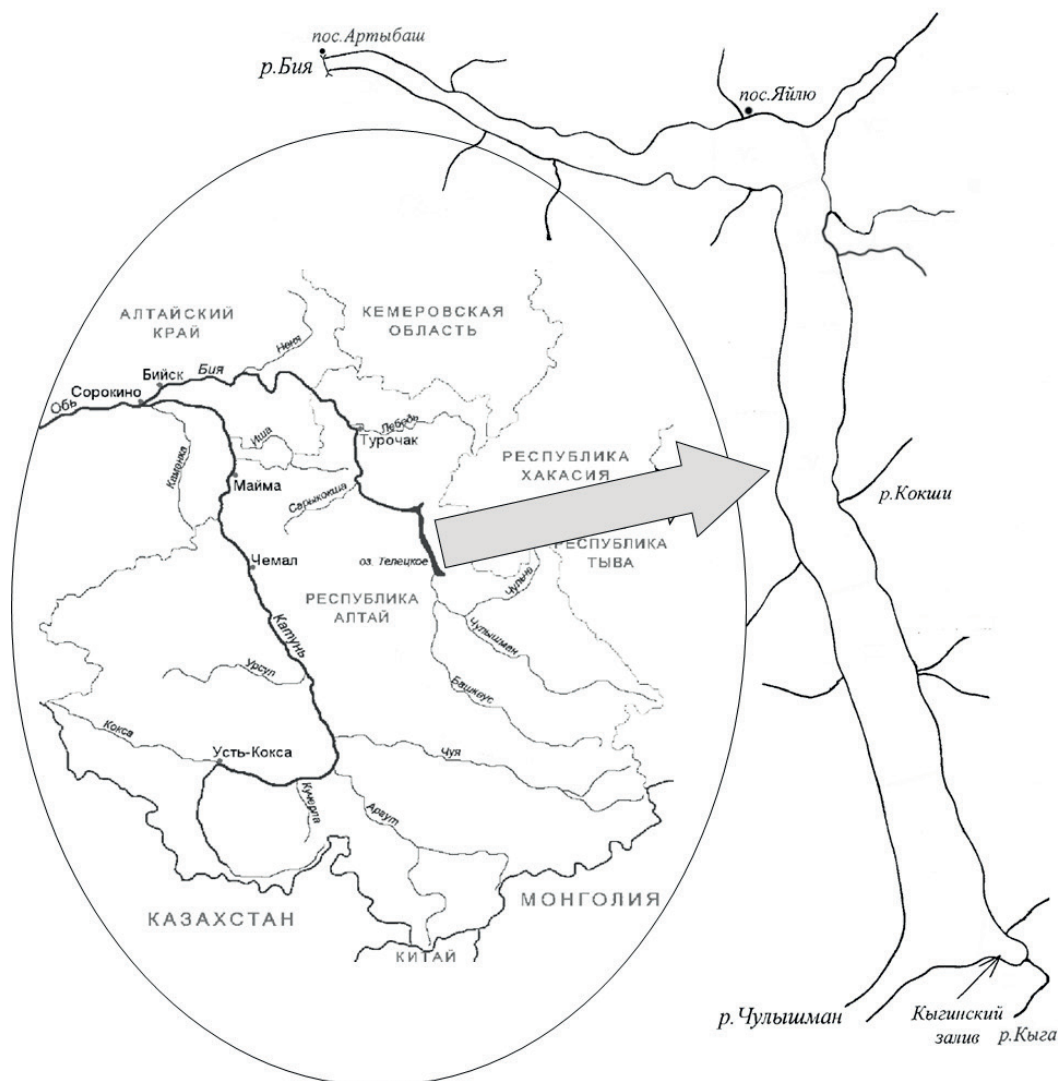


Рис. 1. Карта-схема Телецкого озера [Цхай и др., 2024]

Fig. 1. Cartography of Lake Teletskoye [Tskhai et al., 2024]

Удержание меди в озере происходит, в основном, за счет седиментации взвешенных веществ вследствие замедления скорости руслового потока. При этом растворенные формы меди, сорбированные на поверхности взвеси, вместе с оседающим материалом выпадают на дно. Еще одним фактором является меняющаяся интенсивность процессов биологического потребления меди водными организмами, особенно в период сезонного развития водорослей, либо их отмирания. Осадок, в т. ч. остатки отмерших организмов, составляют материал

для седиментации и накапливаются в ДО. Далее, в результате их частичного разложения и взмучивания, в водную толщу возвращается часть меди, однако, в силу большой глубины ТО, эффект «вторичного загрязнения» от дна незначителен.

ТО принадлежит к умеренному типу водных объектов по гидротермическим условиям. Вся толща воды в ТО в течение 7 месяцев охлаждена ниже 4°C , а температура свыше 10°C , достигается лишь в верхних 10–20 м: на поверхности – до 2.5 месяцев, на глубине 20 м – менее одной декады [Селегей, Селегей, 1978].

Для оценки ассимиляционного потенциала ТО в случае простейшей детализации используется условное разделение периодов года на «теплый» (июль-сентябрь) и «холодный» (октябрь-июнь) по среднесуточной температуре. В данном исследовании используются сценарные предположения о гидротермических условиях в ТО из работы [Цхай, Романов, 2025].

Также в работе использовались данные гидрохимического мониторинга за 12 лет, с 1985 по 1996 гг., по содержанию меди: в воде ТО – на примере пункта наблюдений (далее п. н.) Яйлю; в основном притоке ТО – в реке Чулышман, п. н. Балыкча; боковой приточности ТО – на примере п. н. Кыгинский залив. Мониторинг осуществлялся Государственной службой наблюдений Росгидромета в соответствии с действовавшей в то время версией методики выполнения измерений массовой концентрации меди в природных водах [Руководящий, 1994].

Результаты и обсуждение

Для обработки данных гидрохимического мониторинга была выполнена следующая процедура. Из общей совокупности данных в поверхностной приточности были выделены данные, полученные в п. н. Балыкча вблизи устья основного притока – реки Чулышман (порядка 70% от общей величины поступлений в ТО). Далее предполагалось, что оставшаяся часть поступала в ТО с оставшимися притоками и боковым распределенным стоком в ТО в пренебрежении доли остальных источников поступлений (с метеоосадками и проч.) (Шевченко, 2010b). В качестве содержания

загрязнений в боковой приточности (менее 30% от общей величины поступлений в ТО) использовалось распределение их концентраций в одном из боковых притоков – реке Кыга, где расположен пункт наблюдений.

Для выполнения модельных оценок было принято следующее упрощение. Каждая из двух полученных совокупностей мониторинговых данных была разделена на два периода года: «теплый» и «холодный». Каждый из них характеризовался средним за период года значением (см. предыдущий раздел статьи). На рис. 2 представлено такое распределение концентраций, в котором отрезками прямых, для определенности, в серединах месяцев соединены полученные значения.

На следующем этапе обработки входных данных для растворенных форм меди была использована процедура отсева грубых ошибок по критерию 3σ [Брандт, 2003]. В расчетах использовались средние концентрации меди в рассматриваемые периоды.

Среднее находилось по i -му периоду значение концентрации меди (г/м^3) C_i и среднеквадратическое отклонение σ . Далее из выборки отсеивались значения, которые не вошли в интервал $(C_i - 3\sigma, C_i + 3\sigma)$. Такая отбраковка повторялась до тех пор, пока после очередного отсеивания в выборке не оставались только те же самые исходные значения. С этого момента больше ни одно значение не отбрасывалось. Итоговое среднее значение считалось средним значением переменной за соответствующий i -тый период. Результаты на рис. 3 практически совпадают с их версией на рис. 2.

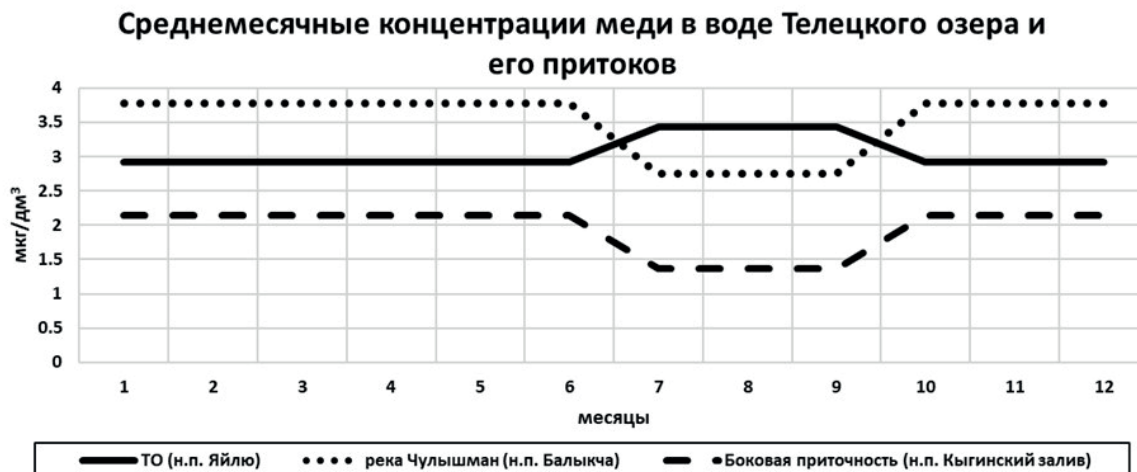
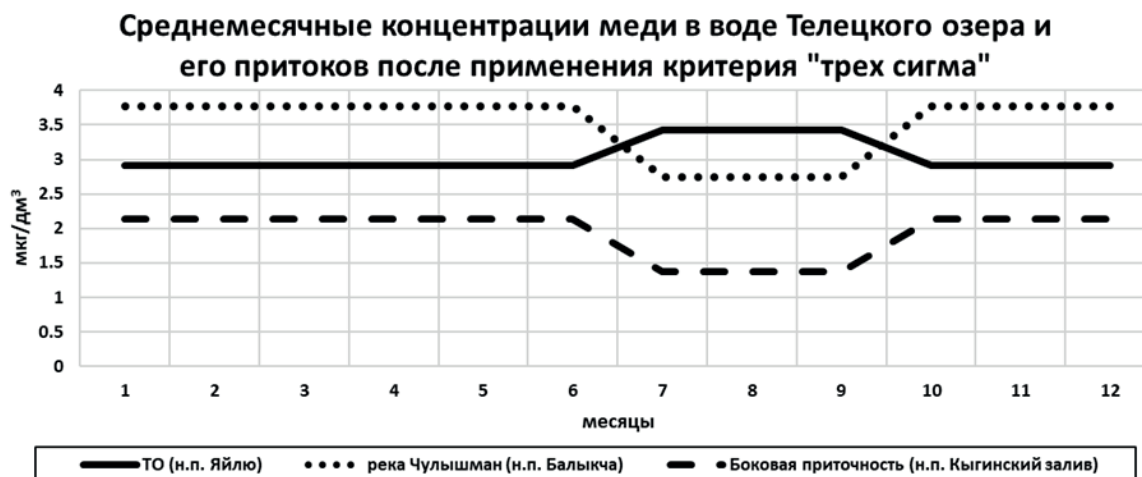


Рис. 2. Данные гидрохимического мониторинга 1985–1996 гг.

Fig. 2. Hydrochemical monitoring data from 1985–1996

Рис. 3. Данные гидрохимического мониторинга 1985–1996 гг. после отсева случайных реализаций, выходящих за рамки 3σ Fig. 3. Hydrochemical monitoring data from 1985–1996 after screening out random implementations beyond 3σ

Временной период сбора мониторинговых гидрохимических данных, использованных в данном исследовании, считается временем, ограниченного антропогенного воздействия на экологическое состояние природных вод, в том числе, ТО [Шевченко, 2010b]. По крайней мере, в это время состояние его экосистемы было стабильным, а нагрузка на ТО была приближена к фоновой. С этим предположением становится возможным оценить допустимую нагрузку, при которой уровень загрязнения вод ТО не меняется.

Пусть коэффициент R удержания (безразмерная величина) в водоеме, свидетельствующий об относительном понижении концентрации C_u в озере по сравнению с его средневзвешенным значением в поверхностной приточности

$$R = \frac{\bar{C}_{in} - \bar{C}_l}{\bar{C}_{in}}. \quad (1)$$

Здесь $\bar{C}_{in}$ и $\bar{C}_l$ – средневзвешенные по стоку концентрации меди (г/м^3) в поверхностной приточности и в водоеме соответственно.

Для расчета коэффициента K (год⁻¹) – показателя скорости трансформации загрязняющего вещества в природных водах используется кинетическое уравнение, предложенное П.А. Лозовиком с соавторами [2020] в виде:

$$K = \frac{R}{\tau(1 - R \cdot e^{-1/\tau})} \quad \tau = \frac{V_0}{V_{out}}, \quad (2)$$

где τ – временной период водообмена в ТО с размерностью (год); V_0 – объем воды в озере в начальный момент, м³; V_{out} – годовой водный сток из озера, м³/год.

В таблице для сравнения приведены характеристики меди в воде достаточно хорошо изученного Онежского озера и выполненные в данной работе соответствующие оценки для случая ТО.

Суммарная ассимиляция в озере As рассчитывается по формуле:

$$As = K \cdot C_l \cdot V_{out} \cdot (\tau + 1). \quad (3)$$

Здесь C_l – средневзвешенная по стоку концентрация растворенной меди в ТО.

Расчетная годовая ассимиляция растворенных форм меди в ТО составляет 1.7 т/год при общем поступлении с поверхностной приточностью в озеро 27.4 т/год и выносе из озера с рекой Бией 27.9 т/год. Таким образом, выполненные расчеты позволяют сделать

предварительный вывод о том, что ТО несколько очищает речной сток от меди.

Ассимиляционный потенциал ТО по отношению к растворенным формам меди – незначителен, практически на порядок меньше, чем в Онеге. Это объясняется относительно малым пребыванием рассматриваемого тяжелого металла в ТО – приблизительно в 4 раза меньшим, чем в Онежском озере. Кроме того, более холодная вода и сравнительно бедный состав фитопланктона замедляют процессы самоочищения экосистемы ТО в течение года по сравнению с Онежским озером.

Среднегодовая допустимая концентрация, соответствующая случаю допустимой нагрузки для сохранения устойчивости экосистемы ТО, равна $Cu = 0.003$ г/м³, т.е. выше наблюдаемой средневзвешенной по стоку концентрации меди 0.0029 г/м³ в период ограниченной антропогенной нагрузки. Таким образом, значение расчетной допустимой концентрации Cu – более чем в триста раз ниже ПДК_в = 1.0 г/м³ для растворённых форм меди в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, но выше, чем ПДК_{рх} = 0.001 г/м³ для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Таблица

Период водообмена, удерживающая способность озера, коэффициенты скорости трансформации веществ и суммарная ассимиляция

Table

Water exchange period, retention capacity of lakes, coefficients of the rate of transformation of substances and total assimilation

№	Озеро	τ, лет	Cu		
			R, б/р	K, год ⁻¹	As, т/год
1	Онежское [Лозовик и др., 2020]	15.6	0.05	0.04	11.7
2	Телецкое	4.35	0.02	0.01	1.7

Относительно высокий, по сравнению с ПДК_{рх}, уровень концентраций растворенных форм меди определяется природными факторами, в первую очередь, наличием в Горном Алтае месторождений полиметаллов на водосборе ТО.

Полученные значения свидетельствуют о существенной роли меди в составе аллохтонной взвеси, попадающей в объект исследований с водосбора. В случае проведения интенсивной промышленной разработки полиметаллических руд на водосборе ТО может возникнуть риск появления новых эффектов, в том числе неблагоприятных для экологической ситуации, поэтому требуется расширение мониторинговых исследований содержания как тяжелых металлов, так и органогенных веществ (нефтепродуктов, органических и биогенных веществ), с соответствующим анализом возникающих тенденций изменения качества вод.

Заключение

Выполнен расчет кинетического уравнения для меди в водной экосистеме и установлены предварительные значения коэффициентов удержания и скорости трансформации соединений Си в поверхностных водах ТО. Оценены

величины суммарной ассимиляции, допустимой нагрузки и допустимой концентрации меди для экосистемы ТО.

Получен и обоснован предварительный вывод о том, что ТО очищает речной сток от меди, поступающей с поверхностным притоком.

Расчетный ассимиляционный потенциал самоочищения ТО примерно на порядок меньше, чем в Онежском озере, что может быть объяснено более низкой температурой воды в течение года и сравнительно малым содержанием фитопланктона.

Медь является существенным составляющим аллохтонной взвеси, попадающей в ТО с его водосборного бассейна. Расчетная допустимая концентрация меди – выше наблюдавшейся средне-взвешенной годовой концентрации Си в период ограниченной антропогенной нагрузки. Ввиду перспективной возможности промышленной разработки полиметаллических руд на водосборе ТО, актуальным является расширение мониторинговых исследований содержания как тяжелых металлов, так и органогенных веществ, с соответствующим анализом возникающих тенденций изменения качества вод.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН и плана инициативных работ в АлтГТУ им. И. И. Ползунова.

Список литературы

- Алёкин О.А. На Алтай, к Телецкому озеру (Путевой очерк). Л., 1930. 46 с.
- Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. Москва: Мир, 2003. 686 с.

Бурцева Л.В., Александрова М.С. Анализ данных мониторинга состояния загрязнения тяжелыми металлами атмосферных осадков и поверхностных вод на территории Алтайского государственного биосферного заповедника // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2022. № 4. С. 127–136. doi: 10.52245/26867109_2022_4_127

Кузнецова О.В. Медь в основных компонентах ландшафтов бассейна Телецкого озера // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 5(36). С. 317–320.

Линник П.Н., Набиванец П.Н. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 270 с.

Лозовик П.А., Лозовик П.А., Кулик Н.В., Ефременко Н.А. Литофильные элементы и тяжелые металлы в Онежском озере: источники поступления, содержание и трансформация // Тр. Кар. НЦ РАН. 2020. № 4. С. 62–74.

Малолетко А.М. Телецкое озеро по исследованиям 1973–1975 гг. Томск: Томский государственный университет, 2009. 224 с.

Мальгин М.А. Биогеохимические особенности бассейна Верхней Оби: Автореф. дис. ... доктора биологических наук. Барнаул-Новосибирск, 1997. 48 с.

Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 286 с.

Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В. Содержание и распределение основных макро- и микроэлементов в поверхностных водах Алтая // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 3. С. 298–310. doi: 10.7868/S0321059615030165

Руководящий документ 52.24.465-95. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации меди в водах денситометрическим методом с реактивной индикаторной бумагой. Роскомгидромет. Ростов-на-Дону: Гидрохимический институт. 1994. 9 с.

Робертус Ю.В., Кивацкая А.В., Любимов Р.В. Экологическое состояние воды Телецкого озера в XXI веке // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2021. № 3. С. 182–189. doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182

Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Ленинград: Гидрометеиздат, 1978. 143 с.

Цхай А.А., Романов М.А., Куприянов В.А. Модель ассимиляционного потенциала озерной экосистемы на примере биогенных загрязнений // Компьютерные исследования и моделирование. 2024. №6. С. 1447–1465. doi: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1447-1465

Цхай А.А., Романов М.А. Математическое моделирование трансформации соединений азота, фосфора и кислородного режима в экосистеме Телецкого озера // Водные ресурсы. 2025. Т. 52, №5. С. 14–27. doi: 10.7868/S0321059625050025

Шевченко Г.А. Характер пространственного распределения микроэлементов в воде Телецкого озера (Горный Алтай) // Проблемы региональной экологии. 2010а. № 5. С. 90–94.

Шевченко Г.А. Геоэкологическое состояние акватории и прибрежной зоны Телецкого озера (Горный Алтай): Дис. ... канд. геолого-минерал. наук. Томск, 2010b. 149 с.

Dillon P.J., Rigler F.N. A Simple Method for Predicting the Capacity of a Lake for Development Based on Lake Trophic Status // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. Vol. 32 (9). P. 1519–1531.

Vollenweider R.A. Input-Output Models with Special Reference to the Phosphorus Loading Concept in Limnology // Zielsetzungen des Gewässerschutzes. 1975. Vol. 57(1). P. 53–84.

References

Alyokin O.A. Na Altaj, k Teleczkomu ozeru (Putevoj ocherk) [To Altai, to Lake Teletskoye (Travelogue)]. L., 1930. 46 p. (in Russian).

Brandt Z. Analiz dannyh. Statisticheskie i vychislitel'nye metody dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov [Data analysis: Statistical and computational methods for scientists and engineers]. Moscow: Mir, 2003. 686 p. (in Russian).

Burceva L.V. Aleksandrova M. S. Analiz danny'x monitoringa sostoyaniya zagryazneniya tyazhely'mi metallami atmosfery'x osadkov i poverxnostny'x vod na territorii Altajskogo gosudarstvennogo biosfernogo zapovednika [Analysis of monitoring data on the contamination of precipitation and surface water with heavy metals in the Altai State Biosphere Reserve] // Field research in the Altai Biosphere Reserve. 2022. № 4. P. 127–136. (in Russian). doi: 10.52245/26867109_2022_4_127

Kuzneczova O.V. Med' v osnovny'x komponentax landshaftov bassejna Teleczkogo ozera [Copper in the main components of the landscapes of Lake Teletskoye basin] // The world of science, culture and education. 2012. No. 5(36). P. 317–320. (in Russian).

Linnik P.N., Nabivanecz P.N. Formy' migracii metallov v presny'x poverxnostny'x vodax [Forms of metal migration in fresh surface waters]. L.: Gidrometeoizdat, 1986. 270 p. (in Russian).

Lozovik P.A., Lozovik P.A., Kulik N.V., Efremenko N.A. Litofil'ny'e i tyazhely'e metally' v Onezhskom ozere: istochniki postupleniya, sodержание i transformaciya [Lithophilic elements and heavy metals in Lake Onega: sources of entry, content, and transformation] // Proceedings of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. No. 4. P. 62–74. (in Russian).

Maloletko A.M. Teleczkoe ozero po issledovaniyam 1973–1975 gg. [Lake Teletskoye according to research conducted in 1973–1975]. Tomsk: Tomsk State University. 2009. 224 p. (in Russian).

Mal'gin M.A. Biogeoхимические особенности бассейна Верхней Оби [Biogeochemical features of the Upper Ob basin]: Biol.) Summary of DSc (Dr. of Biol.) thesis. Barnaul-Novosibirsk, 1997. 48 p. (in Russian).

Mur Dzh.V., Ramamurti S. Tyazhely'e metally' v prirodny'x vodax. Kontrol' i ocenka vliyaniya [Heavy metals in natural waters. Control and assessment of the impact]. Moscow: Mir, 1987. 286 p. (in Russian).

Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V. Soderzhanie i raspredelenie osnovny`x makro- i mikroelementov v poverxnostny`x vodax Altaya [Content and distribution of major macro- and microelements in the surface waters of Altai] // Water resources. 2015. Vol. 42, no. 3. P. 298–310. (in Russian). doi: 10.7868/S0321059615030165

Rukovodyashhij dokument 52.24.465-95. Metodicheskie ukazaniya. Metodika vy`polneniya izmerenij massovoj koncentraciya medi v vodax densitometricheskim metodom s reaktivnoj indikatornoj bumagoj. [Guidelines 52.24.465-95. Methodological instructions. Method for measuring the mass concentration of copper in water using the densitometric method with reactive indicator paper]. Roskomhydromet. Rostov-on-Don: Hydrochemical Institute. 1994. 9 p. (in Russian).

Robertus Yu.V., Kivaczkaya A.V., Lyubimov R.V. E`kologicheskoe sostoyanie vody` Teleczkogo ozera v XXI veke [Problems of Regional Ecology the Ecological State of Lake Teletskoye in the 21st Century] // Field research in the Altai Biosphere Reserve. 2021. No. 3. P. 182–189. (in Russian). doi:10.52245/26867109_2021_12_3_182

Selegej V.V., Selegej T.S. Teleckoe ozero [Teletskoye Lake]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978. 143 p. (in Russian).

Tskhai A.A., Romanov M.A., Kuprijanov V.A. Model` assimiljacionnogo potenciala ozernoj jekosistemy na primere biogennyh zagryaznenij [Model of assimilation potential in lake ecosystem on the example of biogenic pollutants] // Computer Research and Modeling. 2024. No. 6. P. 1447–1465. (in Russian). doi: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1447-1465

Tskhai A.A., Romanov M.A. Matematicheskoe modelirovanie transformacii soedinenij azota, fosfora i kislorodnogo rezhima v e`kosisteme Teleczkogo ozera [Mathematical modeling of nitrogen, phosphorus, and oxygen transformation in the Teletskoye Lake ecosystem] // Water resources. 2025. Vol. 52, no. 5. P. 14–27. (in Russian). doi: 10.7868/S0321059625050025

Shevchenko G.A. Xarakter prostranstvennogo raspredeleniya mikroelementov v vode Teleczkogo ozera (Gorny`j Altaj) [Spatial distribution of trace elements in the water of Lake Teletskoye (Gorny Altai)] // Problems of regional ecology. 2010a. No. 5. P. 90–94. (in Russian).

Shevchenko G.A. Geojekologicheskoe sostojanie akvatorii i pribrezhnoj zony Teleckogo ozera (Gornyj Altaj): [Geoecological condition of the water area and coastal zone of Lake Teletskoye (Gorny Altai)]: DSc (PhD of Geol.-mineral.) thesis. Tomsk, 2010b. 149 p. (in Russian).

Dillon P.J., Rigler F.N. A Simple Method for Predicting the Capacity of a Lake for Development Based on Lake Trophic Status // Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1975. Vol. 32 (9). P. 1519–1531.

Vollenweider R.A. Input-Output Models with Special Reference to the Phosphorus Loading Concept in Limnology // Zielsetzungen des Gewässerschutzes. 1975. Vol. 57(1). P. 53–84.

MODEL ASSESSMENT OF HEAVY METAL ASSIMILATION USING THE EXAMPLE OF COPPER IN THE WATER OF LAKE TELETSKOYE

A.A. Tskhai¹, M.A. Romanov²

¹*Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul,*

²*Polzunov Altai State Technical University, Barnaul,*

E-mail: tskhai@iwep.ru, max.rom1@mail.ru

The object of the study is the largest freshwater reservoir in Western Siberia, Lake Teletskoy (LT). The aim of the study is to evaluate the features of heavy metal retention using the example of copper (Cu) in water of LT as a result of their accumulation, transformation and assimilation. Due to the low water temperature throughout the year, LT has a low self-cleaning resource, which is confirmed by calculations. The kinetic equation for copper is given and the preliminary values of the retention coefficients and the rate of transformation of Cu compounds in surface waters are calculated. The values of total assimilation, permissible load and permissible concentration of copper in the water of LT for maintaining the stable state of its ecosystem are estimated.

Keywords: heavy metals; copper; hydrology; limnology; transformation; assimilation; model; Lake Teletskoye.

Received: January 14, 2026. Accepted: March 31, 2026

Сведения об авторах

Цхай Александр Андреевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1 ORCID: 0000-0003-3892-1502. E-mail: tskhai@iwep.ru.

Романов Максим Анатольевич – преподаватель кафедры прикладной математики Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.

Information about the authors

Tskhai Aleksandr Andreevich – Dr Sc in Technics, Professor, chief researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya Str., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-3892-1502. E-mail: tskhai@iwep.ru.

Romanov Maxim Anatol'evich – Lecturer of the Applied Mathematics Chair of the Altai State Technical University. 46, Lenin Av., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.