

УДК 502.7 + 577.4

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В ТЕЛЕЦКОМ ОЗЕРЕ

А.А. Цхай^{1,2}, М.А. Романов²¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул,² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул,

E-mail: tskhai@iwep.ru

Объектом исследования является Телецкое озеро (ТО). Целью исследования является оценка гидрологических особенностей удержания кремния (Si) как результата накопления, трансформации и ассимиляции этого элемента в экосистеме ТО. Из-за низкой температуры воды в течение всего года ТО отличается малым ресурсом самоочищения, что подтверждают расчеты. Приведено кинетическое уравнение для кремния и вычислены предварительные значения коэффициентов удержания и скорости трансформации соединений Si в поверхностных водах ТО. Оценены величины суммарной ассимиляции, допустимой нагрузки и допустимой концентрации кремния в воде Телецкого озера.

Ключевые слова: кремний; гидрология; лимнология; трансформация; ассимиляция; модель; Телецкое озеро.

DOI:10.24412/2410-1192-2025-17605

Дата поступления: 27.01.2025. Принята к печати: 28.02.2025

Объектом исследования является концентрация кремния, необходимая Телецкое озеро, как и в предшествующих работах сотрудников ИВЭП СО РАН (например, [Зарубина и др., 2005; Puzanov et al, 2020]).

Как известно, содержание биогенных элементов, является лимитирующим фактором жизнедеятельности и развития водных экосистем. Одним из самых распространенных биогенных элементов в природе является кремний, содержание которого в литосфере составляет около 30% [Мокиенко, 2020]. Больше всего в природе силикатов и алюмосиликатов, на их долю приходится порядка 80% массы земной коры [Рыжаков и др., 2019].

Кремний участвует в построении тканей диатомовых водорослей. Минимальная

для их роста, 0.2 г/м³ [Офицеров, 2002]. Исследование содержания биогенов в 2010–2011 гг. [Митрофанова, Третьякова, 2013] показало, что средняя концентрация кремния в воде ТО (2.65 ± 0.10 г/м³), т.е. выше лимитирующего значения более чем в 13 раз. Поэтому кремний не является лимитирующим элементом для экосистемы ТО, в которой основной вид фитопланктона — это диатомовые водоросли. В статье [Цхай, Романов, 2023] была проанализирована исходная информация для моделирования трансформации биогенных веществ в экосистеме ТО.

Целью данной работы является оценка гидрологических особенностей удержания кремния как результата накопления,

трансформации и ассимиляции этого элемента в экосистеме ТО.

Материалы и методы

ТО – олиготрофный глубокий водоем тектонического происхождения, расположенный на юге Западной Сибири (рис. 1). Существенные для исследования гидрологические особенности ТО: площадь зеркала – 223 км², объем котловины – порядка 40 км³, глубины озера (максимальная – 325 м, средняя – 174 м). Отчетливо выражены характерные периоды: относительно быстрое (40–50 дней) половодье; длительная (около 140 дней) летне-осенняя межень (июнь–октябрь), с частыми дождевыми паводка-

ми, затем устойчивая продолжительная (порядка 155 дней) зимняя межень (конец октября – начало апреля). ТО принадлежит к умеренному типу водных объектов по гидротермическим условиям. Вся толща воды в ТО в течение 7 месяцев охлаждена ниже 4 градусов Цельсия, а температура свыше 10 градусов Цельсия достигается лишь в верхних 10–20 метрах: на поверхности – до 2.5 месяцев, на глубине двадцати метров – менее одной декады [Селегей, Селегей, 1978].

Такие природные условия совместно с низкой температурой воды обусловили малую самоочищающую способность экосистемы ТО.

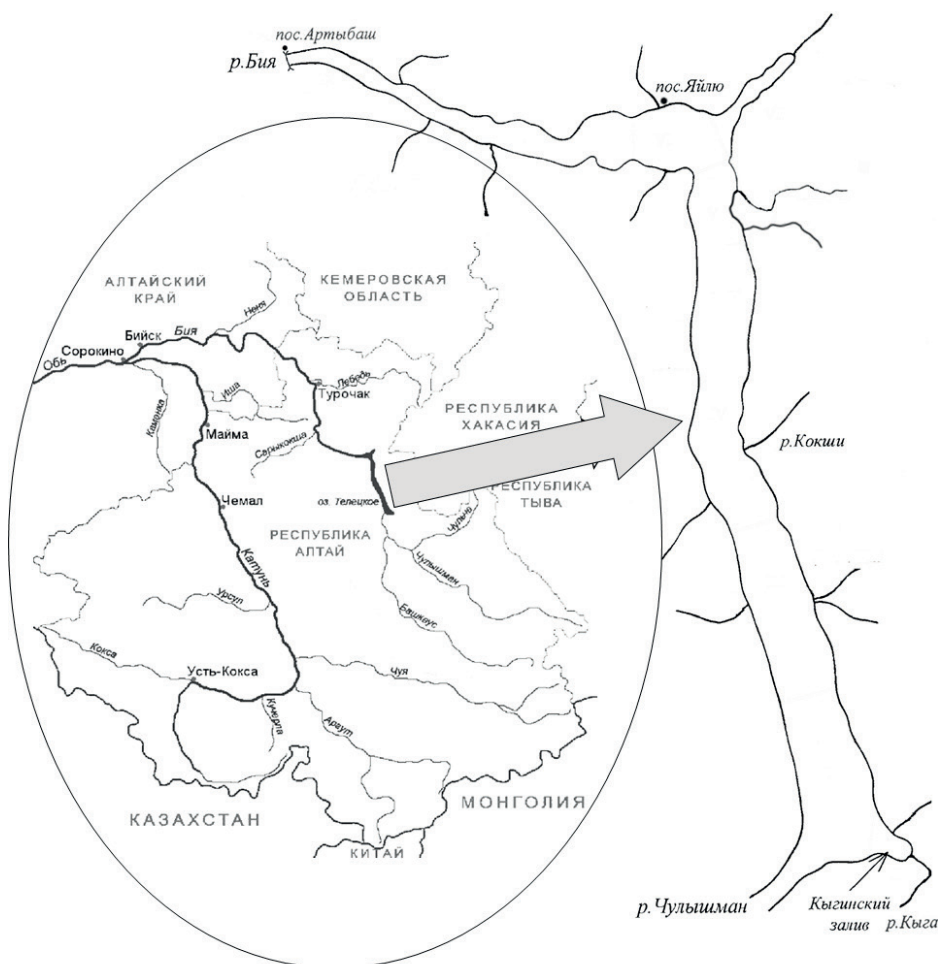


Рисунок. Географическое положение Телецкого озера [Цхай и др., 2024]
Figure. Geographical position Teletskoye Lake [Tskhai, et al., 2024]

Химический элемент Si в ТО и его притоках встречается в растворённых, взвешенных и коллоидных формах. Основные факторы, определяющие их конкретное соотношение: температура, состав вод, pH и др. Главный источник поступления Si в ТО и его водотоки – химическое выветривание и растворение минералов, содержащих Si .

Кремниевые кислоты, продукты их диссоциации и ассоциации, а также кремнийорганические соединения составляют спектр растворённых форм Si [РД, 2018].

С 70-х годов прошлого века в лимнологии широко 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. Удержание кремния в озере происходит вследствие седиментации взвешенных форм из-за замедления скорости русловых потоков. По мере изменения физико-химических факторов и накопления растворённых форм кремния, последние могут коагулировать с последующим выпадением в виде осадка в донные отложения (ДО). Еще одним фактором является меняющаяся интенсивность процессов биологического потребления кремния водными организмами, особенно в период сезонного развития диатомовых водорослей, либо их отмирания. Остатки отмерших диатомовых организмов составляют материал для осаждения и накопления Si в ДО. Далее в результате их частичного растворения в водную толщу возвращается часть кремния в виде его растворённых форм.

В данной работе использовались данные мониторинга за 18 лет: с 1985 по 2003 гг. (например, [Шевченко, 2010]) по содержанию кремния в основном притоке – реке Чулышман (пункт наблюдений Балыкча), боковых притоках р. Кыга и р. Кокши, а также в нижней части ТО (пункты наблюдения Яйлю и Артыбаш).

Для подготовки файлов входных данных была использована процедура отсева случайных реализаций по критерию 3σ [Брандт, 2003]. В расчетах использовались средние концентрации кремния в теплый (июль-сентябрь) и холодный (октябрь-июнь) периоды.

Находилось среднее по i -му периоду значение концентрации кремния ($г/м^3$) 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. После этого итоговое среднее значение считалось средним значением переменной за соответствующий i -тый период.

Результаты и обсуждение

Пусть коэффициент R удержания (безразмерная величина) в водоеме, свидетельствующий об относительном понижении концентрации Si в озере по сравнению с его содержанием в приточности.

$$R = \frac{\bar{C}_n - \bar{C}_l}{\bar{C}_n} \quad (1)$$

Здесь $\bar{C}_n$ и $\bar{C}_l$ – средневзвешенные концентрации кремния в приточности и в водоеме, $г/м^3$, соответственно.

Для расчета коэффициента K (год⁻¹) – показателя скорости трансформации загрязняющего вещества в природных водах используется кинетическое уравнение в виде:

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

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 [Лозовик и др., 2011].

В таблице для сравнения приведены характеристики ряда озер Северо-Западной части РФ [Лозовик и др., 2011] и выполненные в данной работе соответствующие оценки для случая ТО. Для расчетов использованы исходные данные, оцененные в работе [Цхай, Романов, 2023].

Водные объекты расположены в порядке убывания одной из важнейших гидрологических характеристик озер – периода водообмена. Сравнение данных, приведенных в таблице, демонстрирует, что наибольшие значения коэффициента удержания наблюдаются для больших озер: Онежского и Ладожского (τ от 12 до 16 лет) в силу длительного пребывания Si в озере и, соответственно, более продолжительной возможности коагуляции с оседанием вещества, а также для малых с периодом водообмена τ от 0.5 до 0.8 года в связи со сравнительно более интенсивным оборотом форм Si с последующей седиментацией. Телецкое озеро попадает в среднюю группу озер по длительности периода водообмена и имеет промежуточное

значение R , что обуславливается относительно низкой температурой воды, замедляющей оборот Si в физико-химических взаимодействиях и активность планктонного звена в экосистеме ТО.

Трансформация соединений Si происходит по-разному. В озерах Остер и Селецкое концентрация кремния в приточности не отличается от его содержания в озере. В названных озерах трансформация кремния практически отсутствует, скорее всего из-за поступления кремния в чашу озера с подземными водами. Вероятно, по той же причине очень низкое значение скорости трансформации кремния и в оз. Сегозеро (0.05 год⁻¹) по сравнению с 0.27 год⁻¹ в Ладожском и 0.20 год⁻¹ в Онежском озерах.

Таблица

Период водообмена, коэффициенты удержания и скорости трансформации Si в озерных экосистемах

Table

Water exchange period, retention coefficients, and rates of silicon transformation in lake ecosystems

№	Озеро	τ , лет	Si	
			R , $\bar{b}/p$	K , $год^{-1}$
1	Онежское	15.6	0.85	0.27
2	Ладожское	11.7	0.74	0.20
3	Сегозеро	9.95	0.33	0.05
4	Телецкое	4.41	0.13	0.03
5	Сямоозеро	3.13	0.58	0.32
6	Исо-Пюхьярви	1.26	0.39	0.37
7	Остер	1.16	0.06	0.06
8	Селецкое	0.95	0.03	0.04
9	Крошноезеро	0.88	0.57	0.80
10	Пряжинское	0.79	0.74	1.17
11	Водлозеро	0.5	0.57	1.23

Для эвтрофных озер (Водлозеро, Пряжинское и Крошнозеро) показатели скорости трансформации кремния заметно выше ($0.80\text{--}1.23 \text{ год}^{-1}$). В названных озерах более интенсивно протекает фотосинтез и двуокись кремния активно потребляется фитопланктоном. Из-за малой глубины озер ($h_{cp} = 2.8\text{--}5.7 \text{ м}$) кремний из фитопланктона не успевает полностью восстановиться в водной массе и остается в донных отложениях, в отличие от более глубоких олиготрофных озер Остер, Селецкое, Сегозеро ($h_{cp} = 9\text{--}29 \text{ м}$) и, тем более, Телецкого озера со средней глубиной 174 м.

Суммарная ассимиляция в озере *As* рассчитывается по формуле (например, [Цхай и др., 2024]):

$$As = K \cdot C_1 \cdot V_{out} \cdot (\tau + 1) \quad (3)$$

Временной период сбора мониторинговых гидрохимических и гидробиологических данных, использованных в данном исследовании – 1985–2003 гг - считается временем, ограниченного антропогенного воздействия на экологическое состояние природных вод, в том числе, ТО [Шевченко, 2010]. 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 биогенную нагрузку, при которой уровень загрязнения вод ТО

не меняется.

Из результатов выполненных расчетов получаем, что величина суммарной ассимиляции в исследованный период кремния на ТО *As* – это 4140 т в год, а допустимая средняя концентрация *Si* в ТО составляет 2.93 г/м^3 при средневзвешенных концентрациях 2.53 г/м^3 – в озере и 2.92 г/м^3 - в приточности.

Заключение

Выполнен расчет кинетического уравнения для кремния в водной экосистеме и установлены предварительные значения коэффициентов удержания и скорости трансформации соединений *Si* в поверхностных водах ТО. Оценены величины суммарной ассимиляции, допустимой нагрузки и допустимой концентрации кремния для экосистемы ТО.

Полученные значения свидетельствуют о существенной роли кремния в составе аллохтонной взвеси, попадающей в объект исследований с водосбора. Дальнейшее увеличение поступления взвешенного материала при тех же гидрологических условиях, что может иметь место в результате, например, проведения интенсивных горнодобывающих работ на водосборе ТО, может повлечь за собой изменение геохимического класса вод и появление новых эффектов, неблагоприятных для экологической ситуации.

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 (по проекту «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий») и инициативных работ в АлтГТУ им. И. И. Ползунова.

Список литературы

Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. Москва: Мир, 2003. 686 с.

Зарубина Е.Ю., Яныгина Л.В., Бурмистрова О.С., Митрофанова Е.Ю., Ким Г.В., Котовщиков А.В., Крылова Е.Н., Ковешников М.И. Литоральные биоценозы как один из факторов устойчивости экосистемы Телецкого озера // Ползуновский вестник. 2005. № 4–2. С. 201–207.

Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды Карельского научного центра РАН. 2011. №4. С. 21–28.

Митрофанова Е. Ю., Третьякова Е. И. Тератологические формы диатомовых водорослей в альгофлоре Телецкого озера (Русский Алтай) // Вода: химия и экология. 2013. № 10(64). С. 112–119.

Мокиенко А. В. Кремний в воде. Гигиенические и медико-биологические аспекты. Одесса: Феникс. 2020. 206 с.

Офицеров Е.Н. Кремний в биосфере // Химия и жизнь. 2002. № 7. С. 32–35.

РД 52.24.433–2018. Массовая концентрация кремния в водах. Методика измерений фотометрическим методом в виде желтой формы молибдокремниевой кислоты Роскомгидромет. Ростов-на-Дону: ФГБУ «Гидрохимический институт». 2018. 29 с.

Рыжаков А. В., Вапиров В. В., Степанова И. А. Кремний в поверхностных водах гумидной зоны (на примере водных объектов Карелии) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 3. С. 52–60. doi: 10.17076/lim942

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

Цхай А. А., Романов М. А. Об условиях протекания циклов биогенных элементов в Телецком озере: анализ данных для моделирования // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2023. 71(4). С. 40–60. doi: 10.24412/2410-1192-2023-17104

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

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

Puzanov A.V., Bezmaternykh D.M., Kirillov V.V., Mitrofanova E.Yu., Yanygina L.V. Ecosystem features and environmental problems of lake Teletskoye (Republic of Altai) // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No 4. P. 624–625. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-624.

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

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).

Zarubina E.Ju., Janygina L.V., Burmistrova O.S., Mitrofanova E.Ju., Kim G.V., Kotovshnikov A.V., Krylova E.N., Koveshnikov M.I. Litoral'nye biocenozy kak odin iz faktorov ustojchivosti jekosistemy Teleckogo ozera [Littoral biocenoses as one of the factors of ecosystem stability of Lake Teletskoye] // Polzunovskij vestnik. 2005. № 4–2. P. 201–207. (in Russian).

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv v prirodnykh vodakh [The processes of transformation, circulation and formation of substances in natural waters] // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2011. №4. P. 21–28. (in Russian).

Mitrofanova E.Ju., Tret'jakova E.I. Teratologicheskie formy diatomovyh vodoroslej v al'goflore Teleckogo ozera (Russkij Altaj) [Teratological forms of diatoms in the algoflora of Lake Teletskoye (Russian Altai)] // Voda: himija i jekologija. 2013. № 10(64). P. 112–119. (in Russian).

Mokienko A.V. Kremnij v vode. Gigienicheskie i mediko-biologicheskie aspekty [Silicon in water. Hygienic and biomedical aspects]. Odessa: Feniks. 2020. 206 p. (in Russian).

Oficerov E.N. Kremnij v biosfere [Silicon in the biosphere] // Himija i zhizn'. 2002. № 7. P. 32–35 (in Russian).

GD 52.24.433–2018. Massovaja koncentracija kremnija v vodah. Metodika izmerenij fotometricheskim metodom v vide zheltoj formy molibdokremnievoj kisloty [The mass concentration of silicon in the waters. Photometric measurement method in the form of yellow form of molybdosilicic acid]. Roskomgidromet. Rostov-na-Donu: FGBU “Gidrohimicheskij institut”. 2018. 29 p. (in Russian).

Ryzhakov A.V., Vapirov V. V., Stepanova I.A. Kremnij v poverhnostnyh vodah gumidnoj zony (na primere vodnyh ob#ektov Karelii) [Silicon in the surface waters of the humid zone (using the example of Karelian water bodies)] // Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. № 3. 2019. P. 52–60. doi: 10.17076/lim942 (in Russian).

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

Tskhai A. A., Romanov M. A. Ob uslovijah protekanija ciklov biogennyh jelementov v Teleckom ozere: analiz dannyh dlja modelirovaniya [On the conditions of the cycles of biogenic elements in Lake Teletskoye: data analysis for modeling] // Bulletin of the Altai Branch of the Russian Geographical Society. 2023. 71(4). P. 40–60. doi: 10.24412/2410-1192-2023-17104 (in Russian).

Tskhai A.A., Romanov M.A., Kuprijanov V.A. Model' assimiljacionnogo potentsiala ozernoj jekosistemy na primere biogennyh zagriznenij [Model of assimilation potential in lake ecosystem on the example of biogenic pollutants] // Computer Research and Modeling. 2024. №6. P. 1447–1465. doi: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1447-1465 (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)]: PhD (Cand. of Geol.-mineral.) thesis. Tomsk, 2010. 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.

Puzanov A.V., Bezmaternykh D.M., Kirillov V.V., Mitrofanova E.Yu., Yanygina L.V. Ecosystem features and environmental problems of lake Teletskoye (Republic of Altai) // Limnology and Freshwater Biology. 2020. No 4. P. 624–625. doi: 10.31951/2658-3518-2020-A-4-624.

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.

HYDROLOGICAL FEATURES OF SILICON RETENTION IN THE LAKE TELETSKOYE

A.A. Tskhai^{1,2}, 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

The object of the study is the Lake Teletskoye (LT). The aim of the study is to evaluate the hydrological features of the silicon (Si) retention as a result of the accumulation, transformation and assimilation of this element in LT ecosystem. Due to the low water temperature throughout the year, LT has a low self-cleaning resource, which is confirmed by calculations. Due to the low water temperature throughout the year, IT has a low self-cleaning resource, which is confirmed by calculations. The kinetic equation for silicon is given and the preliminary values of the retention coefficients and the rate of transformation of Si compounds in surface waters are calculated. The values of total assimilation, permissible load, and permissible silicon concentration in LT water are estimated.

Keywords: hydrology; limnology; transformation; model; Teletskoye Lake.

Received January 27, 2025. Accepted: February 28, 2025

Сведения об авторах

Цхай Александр Андреевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ИВЭП СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1; профессор

кафедры высшей математики Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Россия, 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. 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 RF. Professor of the High Mathematics Chair of the Altai State Technical University. 46, Lenin Av., 656038 Barnaul RF. 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, RF. ORCID: 0000-0001-5010-6469. E-mail: max.rom1@mail.ru.