

Научная статья
УДК 504.4.054
doi: 10.17223/7783494/3/7

Разработка проекта норматива допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в донных отложениях после восстановительных работ на водных объектах Красноярского края

Данил Сергеевич Воробьев¹, Юлия Александровна Франк², Александр Николаевич Блохин³, Валерий Валентинович Суслияев⁴, Фёдор Николаевич Родиков⁵, Максим Сергеевич Денисенко⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ danilvorobiev@yandex.ru

² yulia.a.frank@gmail.com

³ bansoil@mail.ru

⁴ sturwal@mail.ru

⁵ teodoro2014@mail.ru

⁶ maxden1198@ya.ru

Аннотация. Статья описывает результаты исследований по разработке проекта норматива допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в донных отложениях после восстановительных работ на водных объектах Красноярского края. В основу работы положены анализ данных по содержанию органического вещества и суммарному содержанию нефтепродуктов в 170 водных объектах; определение биоиндикационных показателей сообществ макрозообентоса; моделирование сорбции сырой нефти разнотипными отложениями и биотестирование.

Ключевые слова: водные объекты, донные отложения, нефть, нефтепродукты, Красноярский край

Благодарности: исследование выполнено по заказу Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края, Государственный контракт № Ф.2022.008154. Авторы благодарят АО «ТомскНИПИнефть» за помощь в сборе архивных материалов.

Для цитирования: Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Блохин А.Н., Суслияев В.В., Родиков Ф.Н., Денисенко М.С. Разработка проекта норматива допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в донных отложениях после восстановительных работ на водных объектах Красноярского края // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 3. С. 56–66. doi: 10.17223/7783494/3/7

Original article
doi: 10.17223/7783494/3/7

Development of a draft standard for the permissible residual content of petroleum hydrocarbons in bottom sediments after restoration work on water bodies of Krasnoyarsk Krai

Danil S. Vorobiev¹, Yulia A. Frank², Alexander N. Blokhin³, Valeriy V. Suslyayev⁴, Fedor N. Rodikov⁵, Maksim S. Denisenko⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ danilvorobiev@yandex.ru

² yulia.a.frank@gmail.com

³ bansoil@mail.ru

⁴ sturwal@mail.ru

⁵ teodoro2014@mail.ru

⁶ maxden1198@ya.ru

Abstract. Analytical and experimental studies were carried out to collect information on the state of water bodies of Krasnoyarsk Krai, on the background content of petroleum hydrocarbons, and on the toxicity of crude oil for aquatic organisms. Analysis of stock materials for monitoring licensed areas (245 sites), the mineral nature of the vast majority of bottom sediments was revealed, the scatter values of the total hydrocarbon content ranged from <5 to 712 mg/kg, of which almost half were <50 mg/kg. Quantitative chemical analysis of 306 sediment samples collected in Krasnoyarsk Krai as a part of the current work also showed the predominance of mineral sediments (> 75%). The largest proportion of samples (67.7%) was represented by bottom sediments

containing from 50 to 250 mg/kg of petroleum hydrocarbons. The Spearman correlation between the total hydrocarbon concentration in bottom sediments and the content of organic matter was strong and significant ($r_s = 0.75, p < 0.01$). Experiments to determine the sorption characteristics of different types of bottom sediments to crude oil of Krasnoyarsk Krai (Kuyumbinskoe and Yurubcheno-Tokhomskoe fields) showed that mineral sediments had the minimum sorption capacity, in which the residual hydrocarbon content was 14.4 g/kg oil. In mixed and organic sediments this was 73.1 and 91.2 g/kg, respectively. There is a significant strong correlation between the content of organic matter and residual hydrocarbons in bottom sediments ($r_s = 0.84, p < 0.01$). It was discovered that in the surveyed areas the concentration of hydrocarbons does not affect the benthic communities, and the variation in bioindicators is due to natural causes. The statistical calculations showed that there is no reliable correlation between the total content of hydrocarbons in bottom sediments and bioindication indices (Shannon and oligochaete indices). Biotests to determine the range of organism tolerance to crude oil showed that in mineral sediments it does not have acute toxicity to the *Scenedesmus quardricauda* (Turp.) Breb. Algae in concentrations up to 1000 mg/kg, and on the crustacean *Daphnia magna* Straus – up to 500 mg/kg; no chronic toxicity was noted for *Limnodrilus* worms up to 2000 mg/kg. Crude oil contained in organic sediments did not have a toxic effect on all test objects at concentrations up to 20,000 mg/kg. The average hydrocarbon content in organic sediments, safe for macrozoobenthos, calculated based on our results and published data was 5013 mg/kg. A draft standard “Permissible residual content of crude oil and petroleum hydrocarbons in bottom sediments after restoration work on water bodies of Krasnoyarsk Krai” was proposed based on the current work results. It is proposed to introduce a diversified standard for different types of bottom sediments: 5000 mg/kg for organic sediments, 200 mg/kg for mineral sediments; for mixed bottom sediments, set the standard using a calculation method based on the content of organic matter.

Keywords: water bodies, bottom sediments, crude oil, petroleum hydrocarbons, Krasnoyarsk Krai

Acknowledgments: The study was funded by the Ministry of Ecology and Rational Natural Resources Management of Krasnoyarsk Territory, State Contract No. F.2022.008154. The authors thank JSC TomskNIPIneft for their assistance in collecting archival materials.

For citation: Vorobiev, D.S., Frank, Yu.A., Blokhin, A.N., Suslyayev, V.V., Rodikov, F.N. & Denisenko M.S. (2023) Development of a draft standard for the permissible residual content of petroleum hydrocarbons in bottom sediments after restoration work on water bodies of the Krasnoyarsk Krai. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedejatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 3. pp. 56–66. doi: 10.17223/7783494/3/7 (In Russian).

Введение

Красноярский край – один из наиболее водообеспеченных регионов России. Среднегодовое количество осадков составляет 740 мм в год [1]. Густая и полноводная речная сеть края принадлежит бассейну Северного Ледовитого океана, преимущественно Карского моря (за исключением рек Хатанга и Попигаи, впадающих в море Лаптевых). Основная река края – Енисей с многочисленными притоками [2]. Часть рек юго-западной части региона относится к бассейну р. Обь (крупнейшие – Чулым, Кеть). На севере – бассейны рек Пясины, Верхняя Таймыра, Нижняя Таймыра и др. На территории края находятся крупные водохранилища: Богучанское, Красноярское, Хантайское, Саяно-Шушенское, Курейское. Озёра наиболее распространены на Северо-Сибирской низменности (крупнейшие – Таймыр, Пясино) и в западной равнинной части (Маковское, Большое Советское и др.).

Многие водотоки и водоемы на территории края находятся под прессом антропогенного воздействия, источником которого являются предприятия топливно-энергетического комплекса, химической промышленности и цветной металлургии. Как следствие, поверхностные воды загрязнены нефтепродуктами, фенолами, соединениями меди, цинка, железа, алюминия, марганца, мышьяка и т.д. [3]. Для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения

Красноярского края важны как защита уязвимых водных экосистем, так и своевременное восстановление загрязненных водотоков и водоемов. Анализ ежегодных государственных докладов о состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае позволяет сделать заключение о том, что концепция ведения мониторинга поверхностных вод суши в Красноярском крае построена на приоритете проведения наблюдений на участках с повышенным антропогенным воздействием в форме лабораторно-аналитических работ с отбором проб воды. На территории края ведется непрерывный мониторинг экологического состояния водных ресурсов, сосредоточенный преимущественно на качестве поверхностных вод. Однако имеющиеся данные о различных показателях качества воды не могут быть взяты в основу оценки качества донных отложений, т. к. между уровнем загрязнения воды и уровнем загрязнения донных отложений редко находятся достоверные связи. Государственный норматив допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в донных отложениях отсутствует, а региональный норматив для Красноярского края до настоящего времени не был разработан и установлен.

Цель работы – разработка обоснованного норматива допустимого остаточного содержания нефти и нефтепродуктов в донных отложениях для оценки качества проведения восстановительных работ на нефтезагрязненных водных объектах Красноярского края.

Материалы и методы

Работа проведена в 2022–2023 гг. в два этапа. Исследования первого этапа были направлены на сбор данных для систематизации информации о состоянии водных объектов Красноярского края, а также на выявление территорий Красноярского края, наиболее подверженных загрязнению нефтью и нефтепродуктами (с учетом объектов добычи, транспортировки и переработки нефти и нефтепродуктов). Выполнены аналитические исследования, а именно обзор литературных источников и фондовых материалов для сбора информации о состоянии водных объектов Красноярского края, фоновом содержании нефтепродуктов и биоразнообразии

гидробионтов. Проведены натурное обследование 170 водных объектов на территории края (рис. 1) и отбор проб донных отложений по ГОСТ 17.1.5.01-80 [4]. Отобрано 306 проб донных отложений для проведения количественного химического анализа. Основными контролируруемыми показателями были процентное содержание органического вещества, определенное как потери при прокаливании (ППП, %) ГОСТ 27800-93 [5], и суммарное содержание углеводородов, определенное методом ИК-спектрометрии [6]. Для отнесения донных отложений к тому или иному типу использовали следующие критерии: 1) минеральные отложения с ППП от 0 до 10%; 2) органогенные отложения с ППП 60–100%; 3) смешанные отложения с ППП 10–60%.

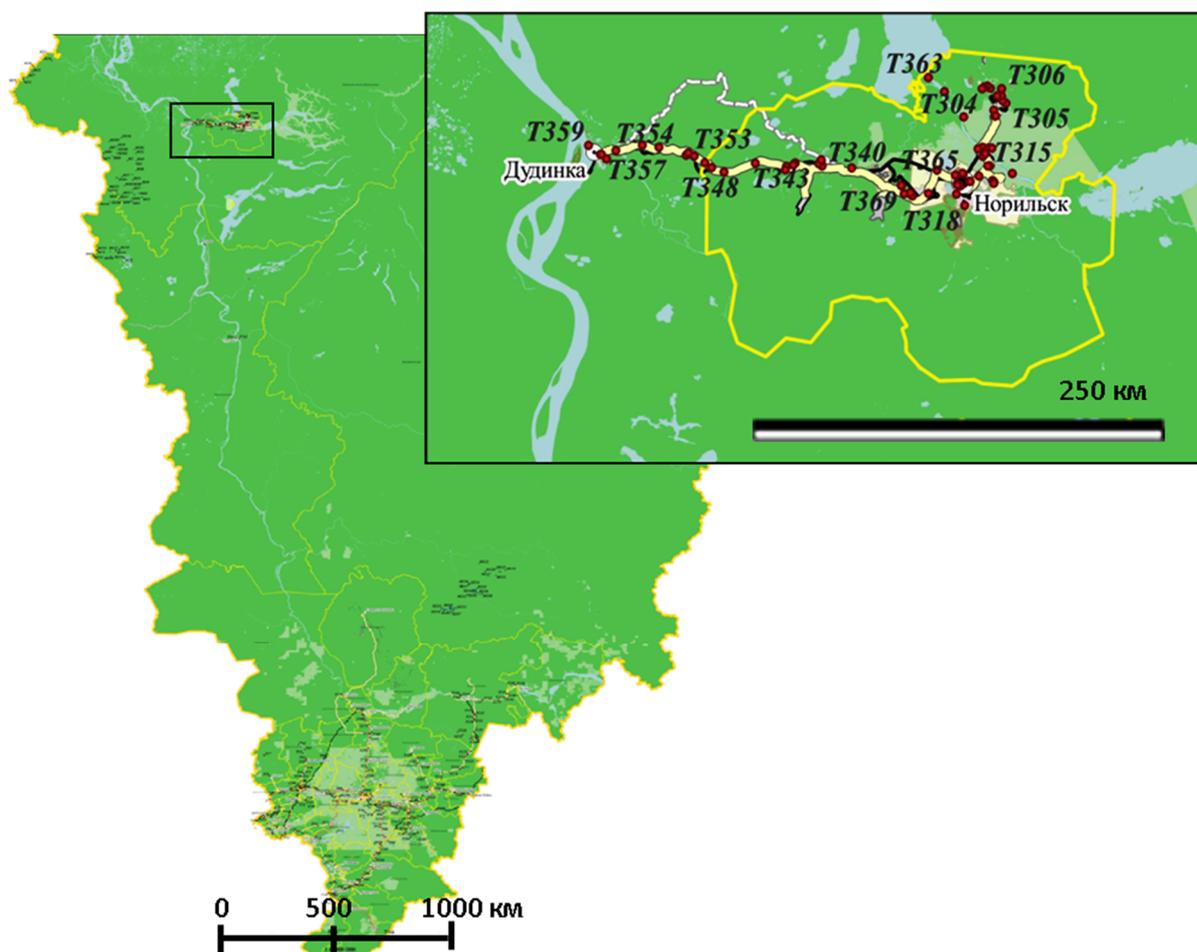


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных водных объектов Красноярского края

Fig. 1. Schematic map of the studied water bodies of the Krasnoyarsk Krai

Также в осенний период 2022 г. были отобраны пробы организмов зообентоса для анализа состояния сообществ (27 проб). Для взятия проб зообентоса использовали дночерпатель системы Петерсена с площадью захвата 1/80 м². Взятую пробу отмывали от мелких фракций ила в промывочном мешке, изготовленном из мельничного газа № 28. Оставшееся

содержимое разбирали с помощью лупы и пинцета для извлечения организмов зообентоса. Организмов фиксировали 70%-ным этиловым спиртом в стеклянных емкостях и этикетировали.

В рамках второго этапа были проведены камеральные работы и аналитические исследования. Выполнен количественный химический анализ

поверхностных вод и донных отложений объектов Красноярского края. Обработку и анализ проб макрозообентоса проводили в соответствии с общепринятыми гидробиологическими методиками [7]. Для оценки экологического состояния обследованных участков и определения качества донных отложений по состоянию сообществ макрозообентоса использовались биоиндикационные показатели – индексы Гуднайта–Уитлея и Шеннона [8–9].

Проведены эксперименты для определения сорбционно-десорбционных характеристик разнотипных донных отложений по отношению к нефти и модельные биотесты для определения диапазона толерантности гидробионтов к нефти. В экспериментах использовали 3 типа донных отложений: минеральные – песок без органического вещества, смешанные отложения (ППП 35%) и органогенные (торф) с показателем ППП 95,5%. В навеску воздушно-сухого грунта добавляли расчётное количество сырой нефти красноярских месторождений (Юрубчено-Тохомского и Куюмбинского 1:1 v/v). Суммарное содержание природных углеводородов в пробе торфа составило 3 875 мг/кг, что учитывали при моделировании нефтяного загрязнения донных отложений. Для количественной оценки сорбции нефти разнотипными донными отложениями в каждую навеску воздушно-сухого грунта добавляли определенное количество смеси сырой нефти и выдерживали 7 сут для прохождения процессов сорбции в герметичном состоянии экспериментальных ёмкостей. Далее в ёмкости добавляли 200 мл воды и интенсивно перемешивали в течение 1 мин, отстаивали 6 ч и промывали водой в течение 2 мин с использованием мельничного газа № 49. Отмытый грунт переносили в чистые ёмкости и высушивали до воздушно-сухого состояния и передавали в аналитическую лабораторию для определения концентрации нефтепродуктов. Эксперимент выполняли в 3 повторностях, после промывки получали объединенную пробу. Биотестирование образцов донных отложений разных типов, искусственно загрязненных сырой нефтью (как описано выше), проводили с использованием организмов фитопланктона *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb., зоопланктона *Daphnia magna* Straus и зообентоса *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparède, 1862. В случае *S. quadricauda* и *D. magna* биотесты проводили в ОГУ «Облкомприрода» г. Томска с применением стандартизованных методов [10–11]. Для оценки токсичности нефти по отношению к малощетинковым червям фиксировали выживаемость и изменение средней массы тела по отношению к контрольной группе в течение 30 сут.

По итогам вышеописанных исследований обоснован и предложен проект норматива «Допустимое

остаточное содержание нефти и нефтепродуктов в донных отложениях после проведения восстановительных работ на водных объектах Красноярского края».

Результаты и обсуждение

Характеристика донных отложений водных объектов Красноярского края по результатам анализа фондовых материалов и экспериментальных исследований

Анализ фондовых материалов позволил установить разброс фоновых концентраций нефтепродуктов в донных отложениях. Были систематизированы сведения о фактическом содержании нефтепродуктов в 245 точках мониторинга, расположенных в границах лицензионных участков на территориях Таймырского Долгано-Ненецкого, Туруханского и Эвенкийского районов Красноярского края (рис. 2, А). Разброс значений суммарного содержания нефтепродуктов в пробах донных отложений по данным фондовых материалов составил от <5 до 712 мг/кг. Выявлено, что почти в половине всех проб (47,2%) концентрации нефтепродуктов не превышали 50 мг/кг, 34,6% исследованных проб донных отложений содержали от 50 до 100 мг/кг, а 15,9% – от 101 до 250 мг/кг. Доля проб донных отложений с более высокими концентрациями нефтепродуктов составила 2,4%, из них в 0,8% донных отложений зафиксировано содержание нефтепродуктов от 251 до 500 мг/кг, а в 1,6% – от 501 до 712 мг/кг. В целом, в точках мониторинга, расположенных в границах Юрубчено-Тохомского, Куюмбинского и Терско-Камовского участков в Эвенкии выявлено наибольшее число проб с высокими концентрациями нефтепродуктов (до 712 мг/кг). Среди проб с концентрацией нефтепродуктов >100 мг/кг почти половина была представлена суглинистыми донными отложениями, имеющими минеральную или смешанную (органоминеральную) природу, за ними следовали песчаные минеральные отложения (34,8%).

В ходе анализа выявлена минеральная природа подавляющего большинства исследованных проб донных отложений (> 75%), смешанные донные отложения обнаружены в 73 пробах из 306 (почти 24%), на долю органогенных отложений приходилось < 1% (рис. 2, В). Как видно из рис. 2, В, в 9,8% проб донных отложений содержание нефтепродуктов по результатам ИК-спектрометрии было ниже предела обнаружения (< 50 мг/кг). На долю донных отложений, содержащих от 50 до 250 мг/кг нефтепродуктов, приходилось в общей сложности 67,7% проб, а в категорию «от 251 до 750 мг/кг» попало 17,3%. По 1% пришлось

на долю донных отложений водных объектов Красноярского края, в которых зафиксировано 751–1000 и

более 1000 мг нефтепродуктов на килограмм сухой массы (рис. 2, В).

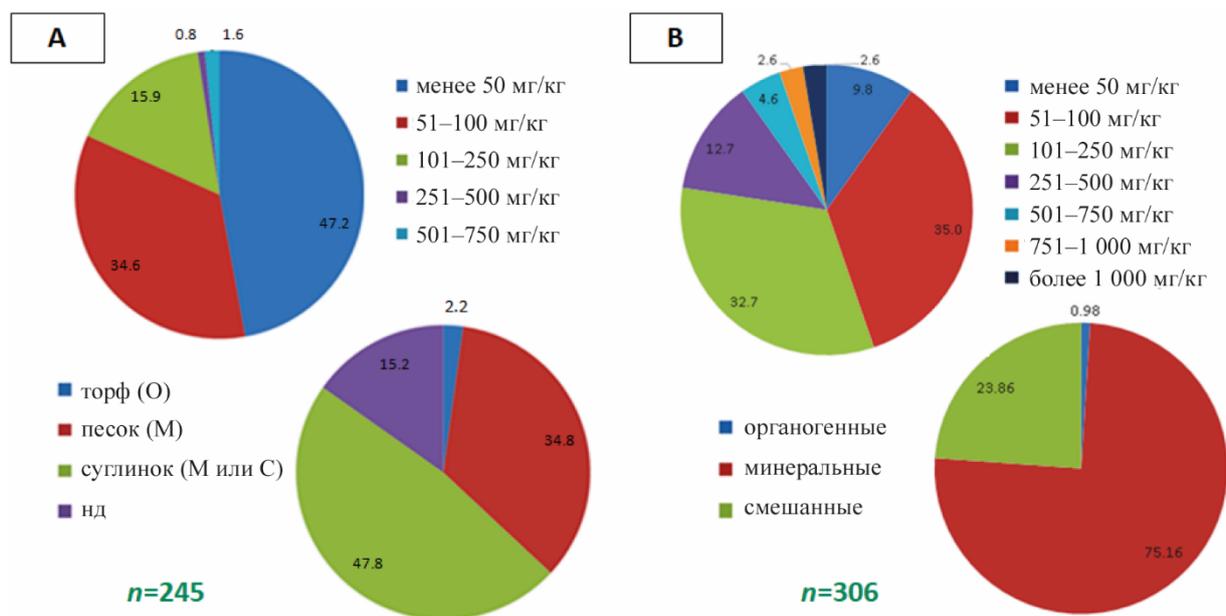


Рис. 2. Тип донных отложений водных объектов Красноярского края и суммарное содержание НП по данным мониторинга в пределах лицензионных участков (А) и по данным количественного химического анализа 2022 г. (В): О – органогенные донные отложения, М – минеральные, С – смешанные; n = количество точек мониторинга (для А) и точек отбора проб (для В)

Fig. 2. Type of bottom sediments in water bodies of the Krasnoyarsk Krai and the total content of petroleum hydrocarbons according to monitoring data within the licensed areas (A) and quantitative chemical analysis in 2022 (B): O – organic bottom sediments, M – mineral, C – mixed; n = number of monitoring points (for A) and sampling points (for B)

На 27 обследованных участках, где отбирались пробы макрозообентоса, содержание нефтепродуктов варьировало от минимального порога определения (<50 мг/кг) до 509 мг/кг. Проведенный корреляционный анализ (ранговый коэффициент корреляции Спирмэна) между содержанием нефтепродуктов в донных отложениях и потерями при прокаливании показал высокую положительную достоверную ($p < 0,01$) связь, где $r = 0,75$. Проведенные статистические расчёты показали, что между суммарным содержанием нефтепродуктов в донных отложениях и биоиндикационными индексами отсутствует достоверная корреляционная связь (коэффициент ранговой корреляции Спирмэна): нефтепродукты – индекс Шеннона ($r = -0,05, p > 0,05$), нефтепродукты – олигохетный индекс ($r = 0,08, p > 0,05$). Следовательно, на обследованных участках концентрация нефтепродуктов не влияет на биоиндикационные показатели сообществ донных организмов, а вариация показателей обусловлена естественными причинами. Достоверно установлено, что связь между содержанием углеводородов в донных отложениях и количественными и биоиндикационными показателями макрозообентоса отсутствует.

Результаты модельного лабораторного эксперимента по оценке сорбционной емкости донных отложений по отношению к сырой нефти

В результате эксперимента минимальной сорбционной способностью обладали минеральные грунты, в которых содержание сорбированной нефти составило 14,4 г/кг воздушно-сухого грунта (рис. 3). В смешанных и органогенных грунтах этот показатель составил соответственно 73,1 и 91,2 г/кг. Проведенный корреляционный анализ (коэффициент ранговой корреляции Спирмэна) между содержанием органического вещества и показателем остаточной нефти показал достоверную зависимость 0,84 ($p < 0,01$).

Достоверные отличия зафиксированы в группах «минеральные отложения» – «смешанные отложения» ($p < 0,01$), «минеральные отложения» – «органогенные отложения» ($p < 0,01$). Между смешанными и органогенными отложениями достоверных отличий по показателю остаточного содержания нефти после десорбционных манипуляций не выявлено, что подтверждает значимое влияние органической части отложений на показатели сорбционной способности донных отложений.

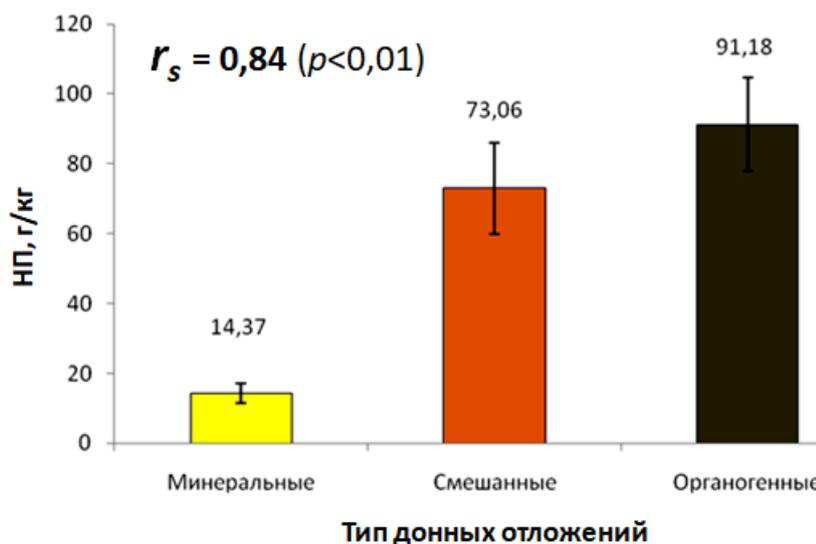


Рис. 3. Среднее содержание нефтепродуктов (\pm стандартная ошибка) в отложениях после десорбции в модельном эксперименте

Fig. 3. Average content of hydrocarbons (\pm standard error) in sediments after desorption in the model experiment

Полученные результаты сорбционно-десорбционных характеристик разнотипных донных отложений по отношению к нефти и проведенная математико-статистическая обработка данных подтвердили необходимость дифференциации норматива в зависимости от содержания органического вещества в донных отложениях.

Результаты биотестирования

В ходе выполнения биотестов с использованием организмов фитопланктона установлено, что сырая нефть месторождений Красноярского края (Юрубчено-Тохомского и Курумбинского) оказывает токсическое воздействие на протококковые водоросли *Scendesmus quardricauda* за 72 ч экспозиции только в случае минеральных донных отложений и только при концентрации 2,0 г/кг (табл. 1). Ракообразные зоопланктона оказались более чувствительными к нефтяному загрязнению донных отложений. Обнаружено вредное воздействие искусственно загрязненных грунтов на *Daphnia magna* за 72 ч экспозиции в случае минеральных донных отложений при концентрациях 1,0 и 2,0 г/кг. В случае смешанных донных отложений водная вытяжка из образцов с максимальными концентрациями нефти (6,0 и 8,0 г/кг) оказывала воздействие на *D. magna* только при отсутствии разведения (см. табл. 1).

В настоящей работе минеральные, смешанные и органогенные донные отложения, содержащие до 2,0; 8,0 и 20,0 г/кг сырой нефти месторождений Красноярского края, не оказывали токсического действия на малощетинковых червей даже через 30 сут. Однако

для разработки адекватного нормативного значения ДОСНП необходимо учитывать и литературные данные. Для установления нормативного значения углеводородов в органогенных отложениях были использованы концентрации углеводородов, не оказывающие летального эффекта по опубликованным данным (табл. 2).

Было получено среднее арифметическое значение 5 013 мг/кг. В расчёте не применялись максимальные значения (20 000 мг/кг), которые не оказывали токсического эффекта. С учётом округления данного значения предлагается установить норматив для органогенных грунтов на уровне 5 000 мг/кг. Во всех случаях данная концентрация углеводородов (5 000 мг/кг) в гомогенизированном состоянии в составе органогенных отложений не оказывает токсического действия на основные группы бентоса.

Аналогичные расчёты были проведены для минеральных отложений, где не были учтены значения, полученные в результате тех же тестирований: отсутствие острой токсичности для зеленых протококковых водорослей *Scendesmus quardricauda* (Turp.) Vreb. – 1 000 мг/кг; отсутствие острой токсичности для ракообразных дафний *Daphnia magna* Straus – 500 мг/кг; отсутствие хронической токсичности для лимнодрилусов – 2 000 мг/кг. Среднее арифметическое значение для минеральных отложений составило 190,5 мг/кг, с учётом округления данного значения – 200 мг/кг.

В силу зависимости содержания (определения) углеводородов в пробе от содержания органического вещества (ППП, %) нормативное содержание нефтепродуктов в смешанных донных отложениях рекомендуется

определять по линейному уравнению, которое устанавливает зависимость между величинами норматива для минеральных отложений и органических от величин потерь при прокаливании (рис. 4).

Таблица 1

Токсичность донных отложений, искусственно загрязненных нефтью месторождений Красноярского края, для тест-объектов в модельных экспериментах

Тип ДО	НП, г/кг	Токсичность для тест-объектов					
		Микроводоросли <i>S. quadricauda</i> 72 ч		Зоопланктон <i>D. magna</i> 72 ч		Зообентос <i>L. hoffmeisteri</i> 30 сут	
		Кр = 1	Кр <10000	Кр = 1	Кр <10000	Кр = 1	Кр <10000
Минеральные	0,00	–	–	–	–	–	–
	0,25	–	–	–	–	–	–
	0,50	–	–	–	–	–	–
	1,00	–	–	Да	–	–	–
	2,00	Да	Да	Да	–	–	–
Смешанные	1,42	–	–	–	–	–	–
	2,00	–	–	–	–	–	–
	4,00	–	–	–	–	–	–
	6,00	–	–	Да	–	–	–
	8,00	–	–	Да	–	–	–
Органогенные	3,88	–	–	–	–	–	–
	5,00	–	–	–	–	–	–
	10,00	–	–	–	–	–	–
	15,00	–	–	–	–	–	–
	20,00	–	–	–	–	–	–

Примечание. Кр – коэффициент разведения.

Таблица 2

Сводные данные по содержанию углеводородов в донных отложениях и их токсичности для беспозвоночных (инфауны)

Критерий	Минеральные отложения ППП 0%–до 10%	Смешанные отложения ППП 10%–60%	Органогенные отложения ППП более 60%	Источник/ примечание
Средние концентрации нефтепродуктов, мг/кг	131,7 ± 9,8 (25,0–1588,0) n = 252	283,0 ± 31,4 (25,0–2514,0) n = 128	988,3 ± 116,4 (772,0–1171,0) n = 3 3875 мг/кг *	Данная работа
Средние концентрации нефтепродуктов, мг/кг	60,0	131,6	240,9	Результаты мониторинга лицензионных участков (архивы)
Острая токсичность свежей нефти** для протококковых водорослей <i>S. quadricauda</i>	До 1 000 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 72 ч	До 8 000 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 72 ч	До 20 000 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 72 ч	Данная работа
Острая токсичность свежей нефти** для ракообразных дафний <i>D. magna</i>	До 500 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 96 ч	До 6 000 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 96 ч	До 20 000 мг/кг нет острого токсичного эффекта за 96 ч	Данная работа
Хроническая токсичность свежей нефти** для лимнодрилусов	До 2000 мг/кг нет достоверного летального эффекта за 30 сут	До 8 000 мг/кг нет достоверного летального эффекта за 30 сут	До 20 000 мг/кг нет достоверного летального эффекта за 30 сут	Данная работа
Содержание углеводородов в донных отложениях после проведения очистных работ на водных объектах	–	3 300 мг/кг – донные отложения озера заселялись бентосом – олигохеты, личинки хирономид, двустворчатые моллюски		[12]
	70,2 мг/кг	–		[13]
	–	–	2000 г/кг	[14]
Влияние нефти на количественные показатели бентоса	500–5 000 мг/кг – преобладают виды рода <i>Chironomus</i> , массовое развитие олигохет рода <i>Limnodrilus</i> ; > 5 000 мг/кг – снижение видового разнообразия, встречаются только устойчивые гидробионты			[15]

Критерий	Минеральные отложения ППП 0%–до 10%	Смешанные отложения ППП 10%–60%	Органогенные отложения ППП более 60%	Источник/ примечание
	–	6 000 мг/кг – концентрация нефти в донных отложениях, при которой тубифициды имели высокие количественные показатели		[16]
	–	< 7 000 мг/кг наблюдались максимальные показатели выживаемости, плодovitости, а также отсутствие поведенческих отклонений		[17]
	–	16 720 мг/кг – не вызывает гибель лимнодрилусов за 30 сут, отмечено появление молоди		[18]

Примечание. * – содержание углеводов в органогенных условно чистых отложениях (торф), ППП = 95,5%; ** – смесь сырой нефти Куюмбинского и Юрубчено-Тохомского месторождений в соотношении 1:1.

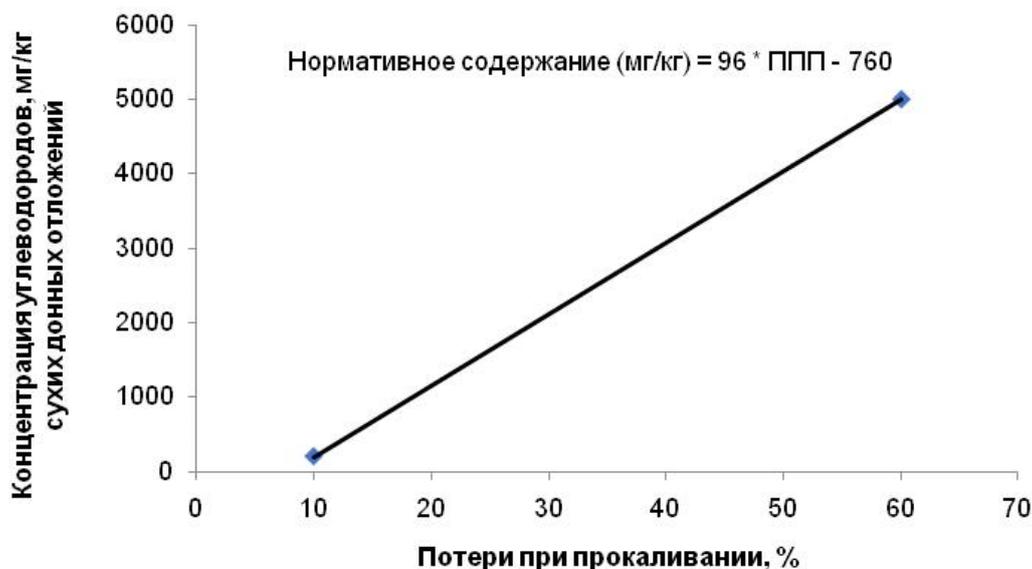


Рис. 4. Линейное уравнение для определения нормативного содержания углеводов в смешанных донных отложениях (ППП от 10 до 60%)

Fig. 4. Linear equation for determining the standard hydrocarbon content in mixed bottom sediments (loss on ignition from 10 to 60%)

Заклучение

На основании полученных материалов предложено ввести дифференцированный норматив ДОСНП для трёх типов донных отложений: минеральные (ППП < 10%); смешанные (ППП 10–60%); органогенные (ППП > 60%). Необходимость дифференциации норматива в зависимости от содержания органического вещества в донных отложениях была достоверно подтверждена математико-статистической обработкой результатов эксперимента по сорбционно-десорбционным характеристикам разнотипных отложений по отношению к нефти, а также данными биотестов.

Предлагаемые нормативные значения составляют для минеральных донных отложений 200 мг/кг, для органогенных донных отложений 5 000 мг/кг, а для смешанных отложений значение определяется исходя из показателя ППП по формуле

$$x = 96 \times \text{ППП} - 760, \quad (1)$$

где x – значение ДОСНП, мг/кг; ППП – потери при прокаливании, %.

Предложенные значения ДОСНП для водных объектов Красноярского края определены с использованием метода ИК-спектрии для анализа суммарного содержания углеводов в воздушно-сухих донных отложениях.

Сформулированы требования для сдачи-приемки восстановительных работ на водных объектах, которые должны быть соблюдены в обязательном порядке наряду с установленными нормативными значениями ДОСНП, включая отсутствие мобильной нефти на поверхности водного объекта и в составе донных отложений. Допускается превышение нормативного значения содержания нефти и нефтепродуктов в отдельных точках, но среднее арифметическое значение концентраций по всем точкам обследования по водному объекту (участку

очистки) должно соответствовать нормативному значению.

Разработанный норматив позволит обратить внимание специалистов на проблематику комплексной

очистки нефтезагрязненных водных объектов, включая донные отложения, и ввести требования к природопользователям по восстановлению водных экосистем.

Список источников

1. *Виноградова Л.И.* Ресурсы поверхностных вод в Красноярском крае // Современные проблемы землеустройства, кадастров и природообустройства. Красноярск : Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2020. С. 128–132.
2. *Корытный Л.М.* Реки Красноярского края. Красноярск : Красноярское книжное изд-во, 1991. 157 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2022 году». Красноярск : КГБУ «ЦРМПиООС», 2023. 367 с.
4. ГОСТ 17.1.5.01–80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. Дата введения: 01.01.1982 г.
5. ГОСТ 27800–93. Глинозем. Методы определения потери массы при прокаливании. Дата введения: 01.01.1995 г.
6. ПНД Ф 16.1:2.2.22–98. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М., 1998.
7. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов / под ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовского. М. : Наука, 1975. 240 с.
8. *Рябов Ф.П., Дыга А.К., Кириленко А.С. и др.* Оценка качества воды индексом удельного биотического разнообразия // Самоочищение и биоиндикация загрязненных вод. М. : Наука, 1980. С. 227–231.
9. *Макрушин А.В.* Биологический анализ качества вод. Л. : АН СССР. Зоол. ин-т. Всесоюз. гидробиол. о-во, 1974. 60 с.
10. ФР.1.39.2007.03223. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей (тест-объект зеленые протокочковые водоросли *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Vreb.). М. : АКВАРОС, 2007.
11. ПНД Ф Т 14.1:2:4.12–06. Методика определения острой токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по смертности дафний (*Daphnia magna* Straus). М., 2011. 30 с.
12. *Лушников С.В., Воробьев Д.С.* Очистка донных отложений от нефти: результаты экспериментальных работ // Экология и промышленность России. 2006. № 10. С. 11–13.
13. *Воробьев Д.С., Лушников С.В., Фадеев В.Н., Лушников В.С., Франк Ю.А.* Опыт комплексной очистки обводненных карьеров от нефти // Экология и промышленность России. 2008. № 4. С. 26–28.
14. *Frank Y.A., Vorobiev D.S., Merzlyakov O.E. et al.* Cleaning of oil-polluted bottom sediments of the boreal lake, Samotlor oil field, North Russia: case report // Water Science & Technology. 2020. Vol. 82 (12). P. 3062–3073.
15. *Михайлова Л.В., Исаченко-Бома Е.А.* Разработка и апробация норматива содержания нефти в донных отложениях поверхностных водных объектов // Водные ресурсы. 2012. Т. 39, № 5. С. 530–542.
16. *Цветкова Л.И.* О роли тубифицид в кислородном балансе водоемов // Водные малощетинковые черви (систематика, экология, исследования фауны СССР) // Труды ВГБО. М. : Наука, 1972. Т. 17. С. 118–125.
17. *Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Залозный Н.А., Лушников С.В., Сидорская С.Н.* Перемещение *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) в нефтезагрязненных илах // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2008. № 1 (2). С. 82–89.
18. *Воробьев Д.С.* Биологические основы очистки донных отложений от нефти и нефтепродуктов : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Томск, 2013. 46 с.

References

1. Vinogradova, L.I. (2020) Resursy poverkhnostnykh vod v Krasnoyarskom Krae [Surface water resources in the Krasnoyarsk Krai]. In: *Sovremennye problem zemleustrojstva, kadastron i pripodoobustrojstva* [Modern problems of land management, cadastral and environmental management]. Krasnoyarsk : KSAU. pp. 128–132.
2. Korytnyj, L.M. (1991) *Reki Krasnoyarskogo Kraja* [Rivers of the Krasnoyarsk Krai]. Krasnoyarsk : Krasnoyarsk book publishing house.
3. *Gosudarstvennyj doklad "O sostojanii i okhrane okruzhayushej sredy v Krasnoyarskom Krae v 2022 godu"* [State Report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2022"]. Krasnoyarsk : Regional State Budgetary Institution "Center for Implementation of Activities for Nature Management and Environmental Protection of the Krasnoyarsk Territory", 2023.
4. n.a. (1982) *GOST 17.1.5.01-80. Okhrana prirody. Gidrosfera. Obschie trebovanija k otboru prob donnykh otlozhenij dlja analiza na zagryaznennost'* [State Standard 17.1.5.01-80. Protection of Nature. Hydrosphere. General requirements for sampling of bottom sediments of water bodies for pollution analysis]. Moscow.
5. n.a. (1995) *GOST 27800-93. Glinozjem. Metody opredelenija poteri massy pri prokalivanii* [State Standard 27800-93. Alumina. Methods for determining mass loss on ignition]. Moscow.
6. n.a. (1998) *PND F 16.1:2.2.22-98. Kolichestvennyj khimicheskyj analiz pochv. Metodika vypolnenija izmerenij massovoj doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organomineral'nykh pochvah i donnykh otlozhenijah metodom IK-spektrometrii* [PND F 16.1:2.2.22-98. Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organic, organomineral soils and bottom sediments using the IR spectrometry method]. Moscow.
7. Mordukhaj-Boltovskij, F.D. (Ed.) (1975) *Metodika izuchenija biogeotsenozov vnutrennikh vodoemov* [Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies]. Moscow : Nauka.

8. Ryabov, F.P., Dyga, A.K., Kirilenko, A.S., et al. (1980) Otsenka kachestva vody indeksom udel'nogo bioticheskogo raznoobrazija [Assessment of water quality using the specific biotic diversity index]. In: *Samoochischnenie i bioindikatsiya zagryaznennykh vod* [Self-purification and bioindication of contaminated waters]. Moscow : Nauka. pp. 227–231.
9. Makrushin, A.V. (1974) *Biologicheskij analiz kachestva vod* [Biological analysis of water quality]. Leningrad : Academy of Science USSR.
10. n.a. (2007) *FR.1.39.2007.03223. Metodika opredeleniya toksichnosti vod, vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod I otdobov po izmeneniju urovnja fluorescencii khlorofilla I chislennosti rletok vodoroslej (test-objekty zelenye protokokkovye vodorosli Scenedesmus quadricauda (Turp.) Breb.)* [FR.1.39.2007.03223. Methodology for determining the toxicity of water, water extracts from soils, sewage sludge and waste by changes in the level of chlorophyll fluorescence and the number of algae cells (test object green protococcal algae Scenedesmus quadricauda (Turp.) Breb.)]. Moscow : AQUAROS.
11. n.a. (2011) *PND F T 14.1:2:4.12-06. Metodika opredeleniya ostroj toksichnosti pitjevykh, presnykh prirodnykh I stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz pochv, osadkov stochnykh vod I otkhodov po smertnosti dafnij (Daphnia magna Straus)* [PND F T 14.1:2:4.12-06. Methodology for determining the acute toxicity of drinking, fresh natural and waste waters, water extracts from soils, sewage sludge and waste by mortality of Daphnia (*Daphnia magna* Straus)]. Moscow.
12. Lushnikov, S.V. & Vorobiev, D.S. (2006) *Ochistka donnykh otlozhenij ot nefiti: rezultaty experimental'nykh rabot* [Cleaning bottom sediments from crude oil: Experimental work results]. *Ekologija I promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*. 10. pp. 11–13.
13. Vorobiev, D.S., Lushnikov, S.V., Fadeev, V.N., Lushnikov, V.S. & Frank, Y.A. (2008) Opyt kompleksnoj ochistki obvodnennykh karjerov ot nefiti [Experience in comprehensive cleaning of watered quarries from oil]. *Ekologija I promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*. 4. pp. 26–28.
14. Frank, Y.A., Vorobiev, D.S., Merzlyakov, O.E., et al. (2020) Cleaning of oil-polluted bottom sediments of the boreal lake, Samotlor oil field, North Russia: case report. *Water Science & Technology*. 82 (12). pp. 3062–3073
15. Mikhailova, L.V. & Isachenko-Bome, E.A. (2012) Razrabotka i aprobatsiya normativa sodержaniya nefiti v donnykh otlozheniyakh poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov [Development and testing of standards for oil content in bottom sediments of surface water bodies]. *Vodnye Resursy – Water Resources*. 39 (5). pp. 530–542.
16. Tsvetkova, L.I. (1972) O roli tubificid v kislородном balance vodoemov [On the role of tubificids in the oxygen balance of water bodies]. In: *Vodnye maloschetinkovye chervi (sistematika, ekologiya, issledovaniya fauny SSSR): trudy VGBO* [Aquatic oligochaete worms (systematics, ecology, studies of the fauna of the USSR) : Proceedings of the All-Russian Hydrobiological Society]. Moscow : Nauka. 17. pp. 118–125.
17. Vorobiev, D.S., Frank, Y.A., Zaloznyj, N.A., Lushnikov, S.V. & Sidorskaja, S.N. (2008) Перемещение *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) в нефтезагрязненных илах [Movement of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Oligochaeta, Tubificidae) in oil-contaminated silts]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 1(2). pp. 82–89.
18. Vorobiev, D.S. (2013) *Biologicheskiye osnovy ochistki donnykh otlozhenij ot nefiti I nefteproduktov* [Biological basis for cleaning bottom sediments from crude oil and petroleum hydrocarbons]. Abstract of Biology Dr. Diss. Tomsk.

Информация об авторах:

Воробьев Данил Сергеевич – доктор биологических наук, директор Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: danilvorobiev@yandex.ru

Франк Юлия Александровна – кандидат биологических наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yulia.a.frank@gmail.com

Блохин Александр Николаевич – младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории инженерных изысканий и технологий природопользования Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: bansoil@mail.ru

Суслев Валерий Валентинович – младший научный сотрудник научно-производственной лаборатории инженерных изысканий и технологий природопользования Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sturwal@mail.ru

Родиков Фёдор Николаевич – лаборант научно-производственной лаборатории инженерных изысканий и технологий природопользования Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: teodoro2014@mail.ru

Денисенко Максим Сергеевич – лаборант научно-производственной лаборатории инженерных изысканий и технологий природопользования Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: maxden1198@ya.ru

Вклад авторов: Разработка концепции и методологии исследования – Воробьев Д.С., Франк Ю.А.; общее руководство работой – Воробьев Д.С.; натурные изыскания, отбор проб – Блохин А.Н., Суслев В.В.; камеральные исследования и модельные эксперименты – Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Родиков Ф.Н., Денисенко М.С.; анализ и статистическая обработка данных – Воробьев Д.С., Франк Ю.А., Блохин А.Н., Родиков Ф.Н.; подготовка иллюстраций и рукописи публикации – Воробьев Д.С., Франк Ю.А.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vorobiev Danil S., Dr. Sc. (Biology), director of the Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: danilvorobiev@yandex.ru

Frank Yulia A., Cand. Sc. (Biology), associate professor, Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yulia.a.frank@gmail.com

Blokhin Alexander N., junior researcher, Research and Production Laboratory of Engineering Surveys and Environmental Technologies, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bansoil@mail.ru

Suslyayev Valeriy V., junior researcher, Research and Production Laboratory of Engineering Surveys and Environmental Technologies, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sturwal@mail.ru

Rodikov Fedor N., laboratory assistant, Research and Production Laboratory of Engineering Surveys and Environmental Technologies, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: teodoro2014@mail.ru

Denisenko Maksim S., laboratory assistant, Research and Production Laboratory of Engineering Surveys and Environmental Technologies, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: maxden1198@ya.ru

Contribution of the authors: Conceptualization and methodology of the study – Vorobiev D.S., Frank Y.A.; Supervision – Vorobiev D.S.; Field studies and sampling – Blokhin A.N., Suslyayev V.V.; Laboratory investigations and model experiments – Vorobiev D.S., Frank Y.A., Rodikov F.N., Denisenko M.S.; Data analysis and statistics – Vorobiev D.S., Frank Y.A.; Writing and visualization – Vorobiev D.S., Frank Y.A., Blokhin A.N.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 4.10.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 13.11.2023

The article was submitted 4.10.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 13.11.2023