



УДК 574.64+574.24+57.044+595.142.35
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.35.86>

О влиянии ПАВ на байкальскую олигохету *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901

Г. О. Жданова¹, К. Д. Зюзина¹, С. Э. Сергиенко^{1,2}, М. Н. Саксонов¹,
А. Э. Балаян¹, В. Ж. Цыренов⁴, Д. И. Стом^{1,2,3}

¹ Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

³ Байкальский музей ИНИЦ СО РАН, пос. Листвянка, Россия

⁴ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия

E-mail: stomd@mail.ru

Аннотация. В условиях эксперимента исследовано воздействие на выживаемость эндемичных байкальских олигохет *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901 трёх широко используемых поверхностно-активных соединений разных типов: анионного – лаурилсульфата натрия, катионного – бромид цетилтриметиламмония и неионогенного – твин-80. Проанализировано воздействие широкого диапазона концентраций ПАВ на тест-объект, построены ряд токсичности испытуемых ПАВ.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, лаурилсульфат натрия, цетрилметиламмония бромид, твин-80, олигохеты, Байкал, *Mesenchytraeus bungei*.

Для цитирования: О влиянии ПАВ на байкальскую олигохету *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901 / Г. О. Жданова, К. Д. Зюзина, С. Э. Сергиенко, М. Н. Саксонов, А. Э. Балаян, В. Ж. Цыренов, Д. И. Стом // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2021. Т. 35. С. 86–96. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.35.86>

Введение

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) относятся к числу наиболее распространённых загрязнителей. Их используют для изготовления различных моющих средств, повышения нефтеотдачи [Surfactants for enhanced oil recovery ..., 2020; The study on the properties..., 2020], плёнокообразования, стабилизации эмульсии, получения стабильных пен, солубилизации, гидрофобизации поверхностей, ингибирования коррозии [Corrosion inhibition ..., 2001; Migahed, Al-Sabagh, 2009], пеногашения [Cationic-anionic fluorinated..., 2018], гашения волн, замедления испарения, флотации, смачивания, антистатического действия, деэмульгирования и диспергирования [Polymeric surfactants ..., 2018; Kumar, Tyagi, 2014].

Начиная с определенных концентраций ПАВ способны оказывать негативное действие на организмы, приводя к различным нарушениям как у животных, так и у растений [Prediction of acute inhalation toxicity ..., 2018]. Они

деформируют клетки, приводят к сбоям в осморегуляции. Некоторые ПАВ могут вызывать канцерогенез [Sharma, Chadha, 2018] либо оказывать острое токсическое воздействие даже в крайне малых (0,0005–0,003 мг/л) концентрациях [Васильев, Гусарова, 2013; Борис, 2015; Comparative assessment ... , 2016]. Из-за амфифильного строения молекулы ПАВ адгезируются прежде всего на клеточных поверхностях, мембранах, что приводит к деполаризации мембран и, как следствие, к острым и хроническим отклонениям [Ecotoxicological Characterization ... , 2018; Quaternary ammonium surfactant ... , 2016].

Как правило, ПАВ подразделяют на четыре основных класса в зависимости от химической природы: анионные, АПАВ (гидрофильная группа несёт отрицательный заряд); катионные, КПАВ (гидрофильная группа несёт положительный заряд); цвиттер-ионные, ЦПАВ (гидрофильная группа имеет группировки, позволяющие молекуле иметь как положительный, так и отрицательный заряд) и неионогенные, НПАВ (гидрофильная группа не несёт заряда) [Tiwari, Mall, Solanki, 2018].

Загрязнение ПАВ актуально в том числе и для оз. Байкал. Здесь до ближайшего времени наблюдался постоянный рост туристической отрасли, в числе прочих воздействий повлёкший за собой увеличение сброса этих загрязнителей в водоём. В первую очередь в контакт с поллютантами вступают организмы из сообществ прибрежья, в которых заметное место занимают олигохеты [Семерной, 2004; Особенности экологии ... , 2012]. Энхитреида *Mesenchytraeus bungei* массово распространена повсюду от уреза воды до самых больших глубин, что обуславливает возможность рассматривать этот вид олигохет как перспективный индикаторный объект для экологического мониторинга оз. Байкал.

Целью настоящей работы явилось исследование воздействия ПАВ разных классов – анионного (лаурилсульфат натрия), катионного (бромид цетилтриметиламмония), неионогенного (твин-80) на выживаемость байкальской эндемичной олигохеты *Mesenchytraeus bungei*.

Материалы и методы

Объекты исследования байкальские олигохеты *M. bungei* собраны в июле – августе 2020 г. в заплесковой зоне оз. Байкал в районе пос. Бол. Коты (Южный Байкал, 51°54'25" с. ш., 105°04'14" в. д.). Сбор червей осуществляли у уреза воды вручную, раскапывая грунт при помощи пластикового шпателя.

После адаптирования к лабораторным условиям (2 суток при аэрации воды с помощью микрокомпрессора) дальнейшее инкубирование осуществляли в стеклянных или пластиковых садках с нестерильной байкальской водой при температуре 8–10 °С и освещённости 250–300 люкс. На дно помещали речной песок, толщина слоя которого составляла 0,8–1,5 см.

В работе анализировали воздействие на выживаемость олигохет таких ПАВ, как:

1. Натрия лаурилсульфат (натрия лаурилсульфат ЛСН, $C_{12}H_{25}SO_4Na$) – натриевая соль лаурилсерной кислоты. Представитель анионоактивных ПАВ. Используется в качестве сильного детергента в промышленности, фармакологии, косметологии. Анализировали воздействие ЛСН в концентрациях 0,001; 0,003; 0,006; 0,0125; 0,025; 0,05 и 0,1 мМ.

2. Цетилтриметиламмония бромид (СТАВ, $C_{19}H_{42}BrN$) – катионоактивное ПАВ, представляет собой четвертичное аммониевое поверхностно-активное вещество. Это один из компонентов местного антисептика цетримида: катион цетримония (гексадецилтриметиламмония) является эффективным антисептическим средством против бактерий и грибов. Он широко используется в синтезе наночастиц золота (например, сфер, стержней, бипирамид), наночастиц мезопористого кремнезёма (например, МСМ-41) и продуктов для кондиционирования волос. ПАВ применяется для функционализации поверхности различных материалов, в том числе цеолитов [Adsorption of cetyltrimethylammonium bromide ..., 2019]. В эксперименте использовали концентрации 0,0001; 0,001; 0,0025; 0,005; 0,01 и 0,1 мМ.

3. Твин-80 (Tween-80, полисорбат-80, $C_{64}H_{126}O_{124}$) – полиоксиэтилен, производный от сорбитана и олеиновой кислоты. Это неионогенное ПАВ является эмульгатором и солюбилизатором жиров. Используется в косметической, пищевой промышленности, применяется в процессах ремедиации нефтезагрязненных почв и пр. Оценивали воздействие ПАВ в концентрациях 1; 10; 20; 30; 40; 50 и 60 мМ.

Для изучения действия ПАВ на выживаемость байкальских олигохет в чашку Петри наливали 20 мл приготовленного на байкальской воде раствора ПАВ заданной концентрации. В каждую чашку помещали по 10 особей олигохет длиной 18–20 мм. Экспонирование экспериментальных чашек осуществляли при тех же условиях, в которых происходила адаптация олигохет перед опытами.

Исследование проводили в пяти независимых экспериментах по три повторности в каждом опыте. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $P \geq 0,95$. Статистическую обработку данных проводили с помощью Excel из пакета программ MS Office 2016.

Результаты и обсуждение

Лаурилсульфат натрия в концентрациях 0,001 и 0,003 мМ не оказывал негативного действия на жизнеспособность байкальских олигохет. При добавлении 0,006 мМ этого ПАВ за 3 сут. эксперимента доля погибших животных составляла 40 %, при 0,0125 мМ – 60 %, при 0,025 мМ – 90 %. Гибель все особи энхитреид наблюдали в пробах, содержащих 0,05 мМ ЛСН (рис. 1).

Цетилтриметиламмония бромид начинал снижать выживаемость *M. bungei* в концентрации 0,005 мМ. В этом случае смертность олигохет составляла 40 %. Повышение концентрации СТАВ вдвое – до 0,01 мМ – приводило к гибели всех червей (рис. 2).

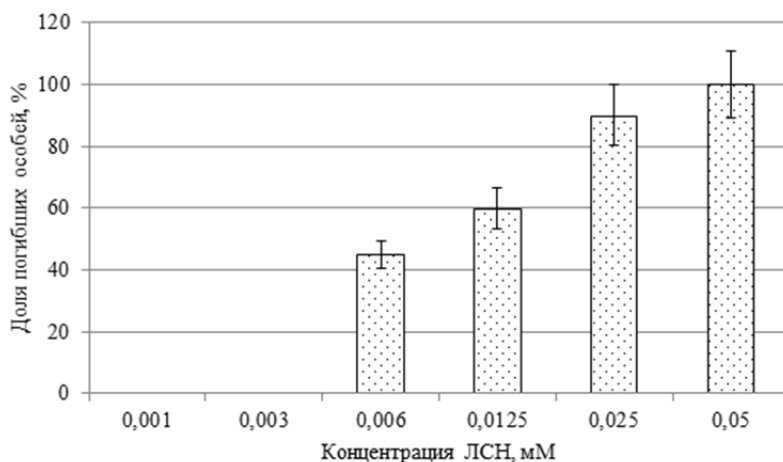


Рис. 1. Влияние лаурилсульфата натрия в разных концентрациях на выживаемость байкальских олигохет *Mesenchytraeus bungei*

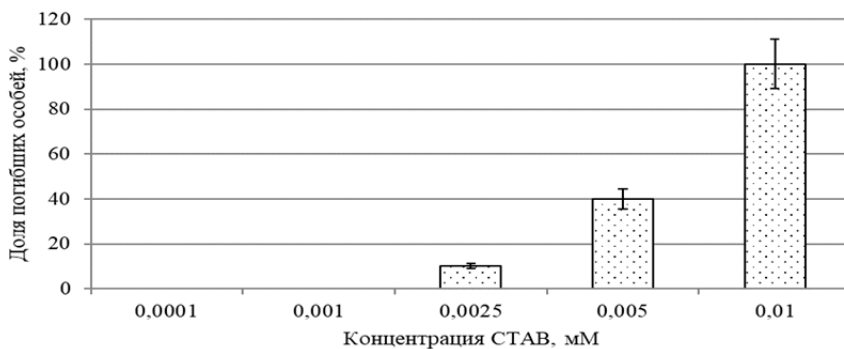


Рис. 2. Влияние цетилтриметиламмония бромид в разных концентрациях на выживаемость байкальских олигохет *Mesenchytraeus bungei*

Твин-80 не оказывал токсического эффекта на байкальских олигохет во всём исследуемом диапазоне концентраций (1 мМ, 10 мМ, 20 мМ, 30 мМ, 40 мМ, 50 мМ, 60 мМ).

Полученное соотношение токсичности исследуемых ПАВ, относящихся к трём разным типам (катионный СТАВ, анионный лаурилсульфат натрия и неионогенный твин-80), коррелирует с данными, полученными другими авторами на других тест-организмах. Так, например, С. Ли и соавторы [Acute toxicity of different ... , 2013] изучали острую токсичность 3 катионных, 39 неионогенных и 6 анионных ПАВ по отношению к *D. magna*. Они показали, что наибольший токсический эффект вызвали катионные ПАВ, наименьший – неионогенные, а большинство анионных поверхностно-активных веществ обладали средней токсичностью. Между тем такое соотношение токсичности между классами ПАВ отражает тенденцию большин-

ства, но не всех представителей этих классов. Например, аналитические исследования М. Джексона с соавторами [Comprehensive review ... , 2016], которые проводили анализ имеющихся сведений по токсичности разных ПАВ для морских экосистем и их отдельных представителей, позволили построить несколько другой ряд токсичности анализируемых групп ПАВ. По убыванию токсичности испытанные в их экспериментах ПАВ располагались в таком порядке: анионные алкилсульфаты (AS) > анионные линейные алкилбензолсульфонаты (LAS) > неионогенные этоксилаты спирта (AE) > анионные этоксисульфаты спиртов (AES) > катионный диталлоу диметиламмоний хлорид (DTDMAC).

К. Масакорала с соавторами [Masakorala, Turner, Brown, 2011] изучали токсичность додецилсульфата натрия (SDS) (анионный ПАВ), Triton X-100 (TX) (неионогенный ПАВ) и бромида гексадецилтриметиламмония (HDTMA) (катионный ПАВ) по отношению к морским макроводорослям. Все эти ПАВ, начиная с определенных концентраций, снижали эффективность фотосинтетических процессов макроводорослей, при этом SDS проявлял меньшую фитотоксичность по сравнению с TX и HDTMA.

М. Воган и Р. ван Эгмонд [Vaughan, van Egmond, 2010] тестировали острую токсичность анионных, катионных и неионных ПАВ на эмбрионах и взрослых особях рыбок данио. Их исследование показало, что эмбрионы столь же чувствительны к катионным и неионным ПАВ, как и взрослые рыбы, но могут быть более чувствительны к анионным ПАВ.

В исследовании Я. Вана с соавторами [Exploring the effects ..., 2015] оценено влияние анионных (додецилсульфат натрия (SDS)), катионных (додецилдиметилбензиламмоний хлорид (1227)) и неионогенных (полиоксиэтиленовый эфир жирного спирта (АЕО)) ПАВ на поведение личинок данио. Авторы регистрировали состояния покоя или бодрствования личинок и такие поведенческие параметры, как число периодов отдыха и их продолжительность, общая активность и активность бодрствования. Результаты показали, что додецилдиметилбензиламмоний хлорид (1227) и АЕО в концентрации 1 мкг/мл были токсичными для двигательной активности личинок, а SDS не оказал значительного воздействия. Кроме того, оценка влияния этих трёх ПАВ на развивающиеся эмбрионы данио показала наличие токсического эффекта АЕО. Этот ПАВ приводил к уменьшению размера головы, размера глаза и развитию меньшей длины тела по сравнению с SDS и 1227.

Выводы

Байкальские олигохеты *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901 оказались чувствительны к анионоактивному ПАВ – лаурилсульфату натрия и катионоактивному – цетилтриметиламмония бромиду при их содержании 0,005–0,006 мМ. Неионогенный ПАВ твин-80 не оказывал негативного воздействия на байкальские олигохеты в диапазоне концентраций от 1 до 60 мМ.

Испытанные ПАВ по уменьшению степени их воздействия на выживаемость олигохет можно расположить в следующий ряд: цетилтриметилам-

мония бромид ($LC_{100} = 0,01$ мМ) > лаурилсульфат натрия ($LC_{100} = 0,05$ мМ) > твин-80 (безвреден до 60 мМ включительно).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-29-05213 мк). В исследованиях использованы материалы Центра коллективного пользования «Коллекция» Байкальского музея ИНЦ СО РАН (<http://ckprf.ru/ckpr/495988/>).

Список литературы

Борис О. А. Изучение токсичности поверхностно-активных веществ на гидробионтах и почвенных беспозвоночных // Республиканская научно-практическая конференция с международным участием, посвященная 50-летию медико-профилактического факультета : сб. науч. тр. Минск, 22 апр. 2015 г. Минск : Белорус. гос. мед. ун-т, 2015. С. 10–13.

Васильев А. В., Гусарова Д. В. Биотестирование степени токсичности смазочно-охлаждающих жидкостей и анализ основных методов снижения их негативного воздействия // Известия Самарского НЦ РАН. 2013. Т. 15, № 3, С. 542–545.

Особенности экологии *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen (Annelida, Oligochaeta) – массового вида олигохет зоны заплеска озера Байкал / Ю. М. Зверева, О. А. Тимошкин, Е. П. Зайцева, О. В. Попова, А. Г. Лухнёв, И. В. Томберг, Н. Н. Куликова, В. С. Вишняков // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2012. Т. 5, № 3. С. 123–135.

Семерной В. П. Олигохеты озера Байкал. Новосибирск : Наука, 2004. 528 с.

Acute toxicity of different type pesticide surfactants to *Daphnia magna* / X. H. Li, H. Li, C. Y. Chen, J. T. Li, F. Liu // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao (J. Appl. Ecol.). 2013. Vol. 24, N 8. P. 2319–2324.

Adsorption of cetyltrimethylammonium bromide on zeolite surface / A. M. Spiridonov, E. V. Aprosimova, V. I. Zabolotskii, V. I. Fedoseeva, A. A. Okhlopkova, M. D. Sokolova // Russ. J. Phys. Chem. A. 2019. Vol. 93, N 5. P. 9722–9729 <https://doi.org/10.1134/S0036024419050285>

Cationic-anionic fluorinated surfactant mixtures based on short fluorocarbon chains as potential aqueous film-forming foam / Y. H. He, Q. Sun, H. Xing, Y. Wu, J. X. Xiao // J. Disper. Sci. Technol. (Online). 2018. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1468262>

Comparative assessment of toxic effects of surfactants using biotesting methods / E. V. Evsyunina, D. O. Taran, D. I. Stom, M. N. Saksonov, A. E. Balayan, M. A. Kirillova, E. N. Esimbekova, V. A. Kratasyuk // Inland Water Biol. 2016. Vol. 9. P. 196–199. <https://doi.org/10.1134/S1995082916020061>

Comprehensive review of several surfactants in marine environments: Fate and Ecotoxicity / M. Jackson, Ch. Eadsforth, D. Schowanek, T. Delfosse, A. Riddle, N. Budgen // Env. Toxicol. Chem. 2016. Vol. 35, N 5, P. 1077–1086. <https://doi.org/10.1002/etc.3297>

Corrosion inhibition of iron in 1 M HCl by some gemini surfactants in the series of alkanediyl- α,ω -bis-(dimethyl tetradecyl ammonium bromide) / M. El Achouri, S. Kertit, H. M. Gouttaya, B. Nciri, Y. Bensouda, L. Perez, M. R. Infante, K. Elkacemi // Progress in Organic Coatings. 2001. Vol. 43, N 4. P. 267–273. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00208-9)

Ecotoxicological Characterization of Surfactants and Mixtures of Them / F. Rios, A. Fernandez-Arteaga, M. Lechuga, M. Fernandez-Serrano // Toxicity and Biodegradation Testing / E. D. Bidoia, R. N. Montagnolli (Eds.). Humana Press, 2018. P. 311–330. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7425-2>

Exploring the Effects of Different Types of Surfactants on Zebrafish Embryos and Larvae / Y. Wang, Y. Zhang, X. Li, M. Sun, Zh. Wei, Y. Wang, A. Gao, D. Chen, X. Zhao, X. Feng // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. 10107. <https://doi.org/10.1038/srep10107>

Kumar N., Tyagi R. Industrial applications of dimeric surfactants: A review // J. Dispers. Sci. Technol. 2014. Vol. 35, N 2. P. 205–214. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00208-9)

Masakorala K., Turner A., Brown M. T. Toxicity of Synthetic Surfactants to the Marine Macroalga, *Ulva lactuca* // Water Air Soil Pollut. 2011. Vol. 218. P. 283–291. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0641-4>

Migahed M. A., Al-Sabagh A. M. Beneficial role of surfactants as corrosion inhibitors in petroleum industry: a review article // Chemical Engineering Communications. 2009. Vol. 196, N 9. P. 1054–1075. <https://doi.org/10.1080/00986440902897095>

Polymeric surfactants and emerging alternatives used in the demulsification of produced water: A review / F. Shehzad, I. A. Hussein, M. S. Kamal, W. Ahmad, A. S. Sultan, M. S. Nasser // Polymer Rev. 2018. Vol. 58, N 1. P. 63–101. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1340308>

Prediction of acute inhalation toxicity using in vitro lung surfactant inhibition / J. B. Sørli, Y. Huang, E. Da Silva, J. S. Hansen, Y. Y. Zuo, M. Frederiksen, A. W. Nørgaard, N. E. Ebbenhøj, S. T. Larsen, K. S. Hougaard // ALTEX – Alternatives to animal experimentation. 2018. Vol. 35, N 1. P. 26–36. <https://doi.org/10.14573/altex.1705181>

Quaternary ammonium surfactant structure determines selective toxicity towards bacteria: mechanisms of action and clinical implications in antibacterial prophylaxis / Â. S. Inácio, N. S. Domingues, A. Nunes, P. T. Martins, M. J. Moreno, L. M. Estronca, R. Fernandes, A. J. M. Moreno, M. J. Borrego, J. P. Gomes, W. L. C. Vaz, O. V. Vieira // J. Antimicrobial Chemotherapy. 2016. Vol. 71, iss. 3. P. 641–654. <https://doi.org/10.1093/jac/dkv405>

Surfactants for Enhanced Oil Recovery Applications / M. Sagir, M. Mushtaq, M. S. Tahir, M. B. Tahir, A. R. Shaik // Springer Nature Switzerland, 2020. 129 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18785-9>

The study on the properties of the newly extended Gemini surfactants and their application potentials in the petroleum industry / M. Mpelwa, Sh. Tang, L. Jin, R. Hu, Ch. Wang, Y. Hu // J. Petrol. Sci. Engin. 2020. Vol. 186. 106799. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106799>

Tiwari S., Mall Ch., Solanki P. P. Surfactant and its applications: A review // Int. J. Engin. Res. Applic. 2018. Vol. 8, Is. 9 (Part I). P. 61–66. <https://doi.org/10.9790/9622-0809016166>

Sharma M., Chadha P. Toxicity of non-ionic surfactant 4-nonylphenol an endocrine disruptor: A review // Int. J. Fish. Aquat. Stud. 2018. Vol. 6, N 2. P. 190–197.

Vaughan M., van Egmond R. The Use of the Zebrafish (*Danio rerio*) Embryo for the Acute Toxicity Testing of Surfactants, as a Possible Alternative to the Acute Fish Test // Altern. Lab. Anim. (ATLA). 2010. Vol. 38. P. 231–238. <https://doi.org/10.1177/026119291003800310>

On the Effect of Surfactants on the Baikal Oligochaete *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901

G. O. Zhdanova¹, K. D. Zyuzina¹, S. E. Sergienko^{1,2}, M. N. Saksonov¹,
A. E. Balayan¹, V. Zh. Tsyrenov⁴, D. I. Stom^{1,2,3}

¹ Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

³ Baikal Museum ISC SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

⁴ East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation

Abstract. Pollution of natural objects with surfactants is relevant, including for the lake Baikal. Here, until the near future, there was a constant increase in the tourist flow and, as a result, the ingress of these pollutants into the reservoir. First of all, the inhabitants of the littoral zone come into contact with the incoming pollutants. In this regard, the work evaluated the

effect of surfactants on the survival rate of the Baikal endemic oligochaetes *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901. These enchytraeids are a common species. They are widespread throughout the lake from the water's edge to the deepest depths. Therefore, *M. bungei* is recommended as an indicator object for ecological monitoring of the lake Baikal. The tested compounds are representatives of different types of surfactants: anionic – sodium lauryl sulfate, cationic – cetyltrimethylammonium bromide and nonionic – tween-80. Baikal oligochaetes *M. bungei* Michaelsen, 1901 were collected in July – August 2020 in the splash zone of Lake Baikal in settlement Bolshiye Koty (South Baikal). Enchytraeid about 1.8-2.0 cm long was used in the experiments. After adaptation to laboratory conditions (2 days with water aeration using a microcompressor), further incubation was carried out in glass or plastic cages with non-sterile Baikal water at a temperature of 8–10 °C and an illumination of 250-300 lux. River sand was placed at the bottom, the layer thickness of which was 0.8-1.5 cm. Baikal oligochaetes *M. bungei* Michaelsen, 1901 turned out to be sensitive to the anionic surfactant sodium lauryl sulfate and cationic cetyltrimethylammonium bromide at a content of 0.005-0.006 mM. So, with the addition of 0.006 mM sodium lauryl sulfate for 3 days of the experiment, the proportion of dead individuals of the test object was 40%, at 0.0125 mM – 60%, at 0.025 mM – 90%, and at 0.05 mM complete death of all enchytraeid individuals was observed. Adding CTAB at a concentration of 0.005 mM increased the proportion of dead oligochaetes to 40%. TAB twice – up to 0.01 mM – led to the death of all worms. The nonionic surfactant tween-80 did not have a negative effect on the Baikal oligochaetes in the concentration range from 1 to 60 mM. The tested surfactants to reduce the degree of their effect on the survival of oligochaetes can be arranged in the following row: cetyltrimethylammonium bromide (LC₁₀₀ = 0.01 mM) > sodium lauryl sulfate (LC₁₀₀ = 0.05 mM) > tween-80 (harmless up to 60 mM inclusive).

Keywords: surfactants, cetyltrimethylammonium bromide, sodium lauryl sulfate, tween-80, oligochaetes, Baikal, *Mesenchytraeus bungei*.

For citation: Zhdanova G.O., Zyuzina K.D., Sergienko S.E., Saksonov M.N., Balayan A.E., Tsyrenov V.Zh., Stom D.I. On the Effect of Surfactants on the Baikal Oligochaete *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen, 1901. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2021, vol. 35, pp. 86-96. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.35.86> (in Russian)

References

Boris O.A. Izuchenie toksichnosti poverkhnostno-aktivnykh veshchestv na gidrobiontakh i pochvennykh bespozvonochnykh [Study of the toxicity of surfactants on hydrobionts and soil invertebrates]. *Respubl. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, posv. 50-letiiu mediko-profilakticheskogo fakulteta: sb. nauch. tr., Minsk, 22 apr. 2015* [Rep. Sci. Conf. to 50th Anniv. Fac. Med.: Minsk, Belarus]. Minsk, Belarus St. Med. Univ. Publ., 2015, pp. 10-13. (in Russian)

Vasiliev A.V., Gusarova D.V. Biotestirovanie stepeni toksichnosti smazochno-okhlazhdaiushchikh zhidkostei i analiz osnovnykh metodov snizheniia ikh negativnogo vozdeistviia [Biotesting of the degree of toxicity of cutting fluids and analysis of the main methods of reducing their negative impact]. *Bull. Samara SC RAS*, 2013, vol. 15, no. 3, pp. 542-545. (in Russian)

Semernoy V.P. *Oligokhety ozera Baikal* [Oligochetes of Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 528 p. (in Russian)

Zvereva Yu.M., Timoshkin O.A., Zaitseva E.P., Popova O.V., Lukhnev A.G., Tomberg I.V., Kulikova N.N., Vishniakov V.S. Osobennosti ekologii *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen (Annelida, Oligochaeta) – massovogo vida oligokhet zony zapleska ozera Baikal [Ecological features of *Mesenchytraeus bungei* Michaelsen (Annelida, Oligochaeta) – a mass species of oligochaetes in the splash zone of Lake Baikal]. *The Bull. Irkutsk St. Univ. Ser. Biol. Ecol.*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 123-135. (in Russian)

Li X.H., Li H., Chen C.Y., Li J.T., Liu F. Acute toxicity of different type pesticide surfactants to *Daphnia magna*. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* (J. Appl. Ecol.), 2013, vol. 24, no. 8, pp. 2319-2324. (in Chinese)

Spiridonov A.M., Aprosimova E.V., Zabolotskii V.I., Fedoseeva V.I., Okhlopkova A.A., Sokolova M.D. Adsorption of cetyltrimethylammonium bromide on zeolite surface. *Russ. J. Phys. Chem. A*, 2019, vol. 93, no. 5, pp. 9722-9729 <https://doi.org/10.1134/S0036024419050285>

He Y.H., Sun Q., Xing H., Wu Y., Xiao J.X. Cationic-anionic fluorinated surfactant mixtures based on short fluorocarbon chains as potential aqueous film-forming foam. *J. Disper. Sci. Technol.*, 2018. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1468262>

Evsyunina E.V., Taran D.O., Stom D.I., Saksonov M.N., Balayan A.E., Kirillova M.A., Esimbekova E.N., Kratasyuk V.A. Comparative assessment of toxic effects of surfactants using biotesting methods. *Inland Water Biol.*, 2016, vol. 9, pp. 196-199. <https://doi.org/10.1134/S1995082916020061>

Jackson M., Eadsforth Ch., Schowanek D., Delfosse T., Riddle A., Budgen N. Comprehensive review of several surfactants in marine environments: Fate and Ecotoxicity. *Env. Toxicol. Chem.*, 2016, vol. 35, no. 5, pp. 1077-1086. <https://doi.org/10.1002/etc.3297>

El Achouri M., Kertit S., Goultaya H.M., Nciri B., Bensouda Y., Perez L., Infante M.R., Elkacemi K. Corrosion inhibition of iron in 1 M HCl by some gemini surfactants in the series of alkanediyl- α,ω -bis-(dimethyl tetradecyl ammonium bromide). *Progress in Organic Coatings*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 267-273. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00208-9)

Rios F., Fernandez-Arteaga A., Lechuga M., Fernandez-Serrano M. Ecotoxicological Characterization of Surfactants and Mixtures of Them. *Toxicity and Biodegradation Testing*. E.D. Bidoia, R.N. Montagnolli (eds.). Humana Press, 2018, pp. 311-330. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7425-2>

Wang Y., Zhang Y., Li X., Sun M., Wei Zh., Wang Y., Gao A., Chen D., Zhao X., Feng X. Exploring the Effects of Different Types of Surfactants on Zebrafish Embryos and Larvae. *Sci. Rep.*, 2015, no. 5, 10107. <https://doi.org/10.1038/srep10107>

Kumar N., Tyagi R. Industrial applications of dimeric surfactants: A review. *J. Disper. Sci. Technol.*, 2014, vol. 35, no. 2, pp. 205-214. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(01)00208-9)

Masakorala K., Turner A., Brown M.T. Toxicity of Synthetic Surfactants to the Marine Macroalga, *Ulva lactuca*. *Water Air Soil Pollut.*, 2011, vol. 218, pp. 283-291. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0641-4>

Migahed M.A., Al-Sabagh A.M. Beneficial role of surfactants as corrosion inhibitors in petroleum industry: a review article. *Chem. Engin. Comm.*, 2009, vol. 196, no. 9, pp. 1054-1075. <https://doi.org/10.1080/00986440902897095>

Shehzad F., Hussein I.A., Kamal M.S., Ahmad W., Sultan A.S., Nasser M.S. Polymeric surfactants and emerging alternatives used in the demulsification of produced water: A review. *Polymer Rev.*, 2018, vol. 58, no. 1, pp. 63-101. <https://doi.org/10.1080/15583724.2017.1340308>

Sørli J.B., Huang Y., Da Silva E., Hansen J.S., Zuo Y.Y., Frederiksen M., Nørgaard A.W., Ebbenhøj N.E., Larsen S.T., Hougaard K.S. Prediction of acute inhalation toxicity using in vitro lung surfactant inhibition. *ALTEX – Alternatives to animal experimentation*, 2018, vol. 35, no. 1, pp. 26-36. <https://doi.org/10.14573/altex.1705181>

Inácio Á.S., Domingues N.S., Nunes A., Martins P.T., Moreno M.J., Estronca L.M., Fernandes R., Moreno A.J.M., Borrego M.J., Gomes J.P., Vaz W.L.C., Vieira O.V. Quaternary ammonium surfactant structure determines selective toxicity towards bacteria: mechanisms of action and clinical implications in antibacterial prophylaxis. *J. Antimicrobial Chemotherapy*, 2016, vol. 71, is. 3, pp. 641-654. <https://doi.org/10.1093/jac/dkv405>

Sagir M., Mushtaq M., Tahir M.S., Tahir M.B., Shaik A.R. *Surfactants for Enhanced Oil Recovery Applications*. Springer Nature Switzerland Publ., 2020, 129 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-18785-9>

Mpelwa M., Tang Sh., Jin L., Hu R., Wang Ch., Hu Y. The study on the properties of the newly extended Gemini surfactants and their application potentials in the petroleum industry. *J. Petrol. Sci. Engin.*, 2020, vol. 186, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106799>

Tiwari S., Mall Ch., Solanki P.P. Surfactant and its applications: A review. *Int. J. Engin. Res. Applic.*, 2018, vol. 8, is. 9 (P. I), pp. 61-66. <https://doi.org/10.9790/9622-0809016166>

Sharma M., Chadha P. Toxicity of non-ionic surfactant 4-nonylphenol an endocrine disruptor: A review. *Int. J. Fish. Aquat. Stud.*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 190-197.

Vaughan M., van Egmond R. The Use of the Zebrafish (*Danio rerio*) Embryo for the Acute Toxicity Testing of Surfactants, as a Possible Alternative to the Acute Fish Test. *Altern. Lab. Anim. (ATLA)*, 2010, vol. 38, pp. 231-238. <https://doi.org/10.1177/026119291003800310>

Жданова Галина Олеговна
ведущий инженер
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: zhdanova86@yandex.ru

Zhdanova Galina Olegovna
Lead Engineer
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: zhdanova86@yandex.ru

Зюзина Ксения Даниловна
лаборант-исследователь
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: kzuzina109@gmail.com

Zyuzina Ksenia Danilovna
Research Assistant
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: kzuzina109@gmail.com

Сергиенко Светлана Эдуардовна
лаборант-исследователь,
Иркутский государственный университет
Россия, 66400, г. 3 Иркутск, ул. К. Маркса, 1
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83
e-mail: amygdifford@gmail.com

Sergienko Svetlana Eduardovna
Research Assistant,
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
Undergraduate Student
Irkutsk National Research Technical
University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
e-mail: amygdifford@gmail.com

Саксонов Михаил Наумович
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: msaksonov@mail.ru

Saksonov Mikhail Naumovich
Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: msaksonov@mail.ru

Балаян Алла Эдуардовна
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: 7balla@mail.ru

Balayan Alla Eduardovna
Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: 7balla@mail.ru

Цыренов Владимир Жигжитович
доктор биологических наук, профессор
Восточно-Сибирский государственный
университет технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40В, стр. 1
e-mail: vtsyrenov@gmail.com

Tsyrenov Vladimir Zhigzhhitovich
Doctor of Sciences (Biology), Professor
East-Siberian State University of Technology
and Management
40B, bld. 1, Klyuchevskaya St., Ulan-Ude,
Russian Federation, 670013
e-mail: vtsyrenov@gmail.com

Стом Дэвард Иосифович
доктор биологических наук, профессор,
зав. лабораторией
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
профессор
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
Россия, 664074, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 83
главный научный сотрудник
Байкальский музей ИНЦ СО РАН
Россия, 664520, п. Листвянка,
ул. Академическая, 1
e-mail: stomd@mail.ru

Stom Devard Iosifovich
Doctor of Sciences (Biology),
Professor, Head of Laboratory
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
Professor
Irkutsk National Research Technical
University
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation
Principal Research Scientist
Baikal Museum ISC SB RAS
1, Akademicheskaya St., Listvyanka Settl.,
664520, Russian Federation
e-mail: stomd@mail.ru

Дата поступления: 23.10.2020
Received: Oktober, 23, 2020