Научная статья
УДК 597.593.4:24
EDN: IGKNBG

Оценка токсичности двух видов буровых растворов для раннего развития русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii*

И. И. Руднева [1] *, В. Г. Шайда [2], М. В. Медянкина [3],

[1] *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

[2] *ООО «ЭкоСервис-А», Москва, Россия*

[3] *МГУТУ Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), Москва, Россия*

* *e-mail: svg-41@mail.ru*

Аннотация

Гидробионты на ранних онтогенетических стадиях в наибольшей степени подвержены воздействию загрязнителей. Буровые растворы токсичны для водной среды и могут нарушать рост, развитие и выживаемость водных организмов. Исследовали действие двух буровых растворов на водной основе (*WBF* 1 и *WBF* 2) в концентрации 0.025, 0.05, 0.1, 0.5 и 1 мг/л на выживаемость оплодотворенной икры и предличинок русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii*, а также на динамику их вылупления в пресной и соленой (5 ‰) воде в течение 5 сут. Исследуемые буровые растворы проявляли различную токсичность. Выживаемость эмбрионов в контрольных группах в пресной воде и экспонированных в среде с *WBF* 1 при концентрации 0.1–0.5 мг/л не различалась, но при концентрации 1 мг/л все эмбрионы погибли. В соленой воде при концентрации *WBF* 1 0.025 мг/л и выше наблюдали сокращение выживаемости на 87 % ($p < 0.01$). *WBF* 2 не повлиял на выживаемость эмбрионов осетра. В обеих контрольных группах вылупление личинок произошло в первые сутки, но эмбрионы, экспонированные в среде с *WBF* 1 при концентрации 0.025–0.5 мг/л, вылупились только на вторые сутки. Количество предличинок в среде со всеми тестируемыми концентрациями было меньше, чем в контроле. При концентрации 1 мг/л предличинки не вылупились. Достоверные различия в выживаемости предличинок в опытных группах по сравнению с контрольными были обнаружены при концентрации *WBF* 1 1 мг/л. Установлена высокая отрицательная корреляция между концентрацией токсиканта и выживаемостью предличинок рыб ($R^2 = 0.87$). Различий между выживаемостью предличинок в контрольной и опытной группах, содержащихся в *WBF* 2, не выявлено. На основании проведенных исследований можно заключить, что *WBF* 2 не оказал токсического действия на предличинок рыб в тестируемых концентрациях; следовательно, этот раствор является более экологически безопасным, чем *WBF* 1. Эмбрионы рыб являются адекватными биоидикаторами для оценки токсичности буровых растворов и могут быть использованы для определения экологического статуса прибрежных акваторий в районах разработки нефтегазовых месторождений на шельфе.

© Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Ключевые слова: буровые растворы, загрязнение воды, икра рыб, предличинки, биотестирование, русский осетр, *Acipenser gueldenstaedtii*

Благодарности: авторы выражают искреннюю благодарность работникам Темрюкского рыбоводного завода за предоставление экспериментального материала, помощь и консультации в проведении экспериментальных исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «ЭкоСервис-А».

Для цитирования: *Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В.* Оценка токсичности двух видов буровых растворов для раннего развития русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2026. № 3. С. 125–138. EDN IGKNBG.

Assessment of Toxicity of Two Drilling Fluids on the Early Development of Russian Sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*

I. I. Rudneva [1], **V. G. Shayda** [2], **M. V. Medyankina** [3]

[1] *Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

[2] *Company "EcoService-A", Moscow, Russia*

[3] *Moscow State University of Technology and Management K. G. Razumovsky (First Cossack University), Moscow, Russia*

* *e-mail: svg-41@mail.ru*

Abstract

Early ontogenetic stages of aquatic organisms are most susceptible to the effects of pollutants. Drilling fluids are toxic for aquatic environment and can impair the growth, development and survival of aquatic organisms. The paper studies the effect of two water-based drilling fluids (WBF 1 and WBF 2) at concentrations of 0.025, 0.05, 0.1, 0.5 and 1 mg/L on the survival of fertilized eggs and prelarvae of Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii* as well as the dynamics of their hatching in fresh and 5‰ saline water for 5 days. The studied drilling fluids exhibited varying toxicity. The survival of embryos in the control groups in fresh water and exposed to a medium with WBF 1 at a concentration of 0.1–0.5 mg/L did not differ, but at a concentration of 1 mg/L, all the embryos died. In salt water, at WBF 1 concentrations of 0.025 mg/L and higher, a decrease in survival by 87% was observed ($p < 0.01$). WBF 2 did not affect the survival of the sturgeon embryos. In both control groups, larval hatching occurred on the first day, but embryos exposed to the medium with WBF 1 at a concentration of 0.025–0.5 mg/L hatched only on the second day. The number of prelarvae in the medium with all tested concentrations was less than in the control. At a concentration of 1 mg/L, prelarvae did not hatch. Significant differences in the survival rate of prelarvae in the experimental groups compared to the control were found at a WBF 1 concentration of 1 mg/L. A high positive correlation was established between the concentration of the toxicant and the mortality of fish prelarvae ($R^2 = 0.87$). No differences were found between the survival rates of fish prelarvae in the control and experimental groups maintained in WBF 2. Based on these studies, it can be concluded that WBF 2 had no toxic effect on fish prelarvae at the tested concentrations and is therefore more environmentally safe than WBF 1. Fish embryos are adequate bioindicators for assessing the toxicity of drilling fluids and can be used to assess the ecological status of coastal waters in offshore oil and gas fields.

Keywords: drilling fluids, fish eggs, fish prelarvae, pollution, bioassay, Russian sturgeon, *Acipenser gueldenstaedtii*

Acknowledgements: The authors express their sincere gratitude to the employees of the Temryuk fish hatchery for providing experimental material, assistance and consultations in conducting experimental studies. The work was carried out with the financial support of EcoService-A LLC.

For citation: Rudneva, I.I., Shayda, V.G. and Medyankina, M.V., 2026. Assessment of Toxicity of Two Drilling Fluids on the Early Development of Russian Sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 125–138.

Введение

Разработка месторождений нефти и газа на шельфе морей и океанов ведется с применением буровых растворов, сведения о токсичности которых для морских обитателей ограниченны и противоречивы [1–3]. Буровые растворы представляют собой смеси разных химических компонентов, а также воды, суспензий, эмульсионных и аэрированных жидкостей, органических растворителей, тяжелых металлов, глины и используются для промывки скважин при бурении. В зависимости от жидкой фазы буровые растворы делятся на три группы: на водной основе (*WBF*), на нефтяной основе (*OBF*) и на основе синтетических жидкостей, в основном эфира (*SBF*) [1)]. Наиболее часто используются *WBF*, в состав которых входит барит (более 90 %), бентонит, бурый уголь, лигносульфонат и тяжелые металлы, другие компоненты составляют 8–12 % [4]. Отработанные буровые растворы относятся к промышленным отходам и подлежат утилизации, так как многие из них являются токсикантами, мутагенами и канцерогенами [1, 5, 6]. Попадая в водную среду, эти вещества могут вызывать негативные явления, изменять физико-химические свойства среды обитания гидробионтов, нарушать их жизнедеятельность, поведение, обменные процессы, воспроизводство, рост и развитие, приводить к гибели организмов, а также модифицировать структуру водных сообществ [7]. Поэтому исследование токсичности буровых растворов, их воздействия на биоту и установление допустимых уровней их концентрации в водных объектах имеют важное практическое и теоретическое значение. Для этих целей используются различные токсикологические тесты, позволяющие оценить опасность этих веществ, понять механизмы их воздействия на водные экосистемы и определить экологический риск с помощью реакций тест-объектов и их биомаркеров [8].

Эмбрионы и личинки рыб чувствительны к действию различных токсикантов, поэтому они широко используются в качестве тест-объектов для анализа качества воды. Тест на эмбриотоксичность для рыб является обязательным при определении допустимых уровней загрязняющих веществ как в рыбохозяйственных водоемах, так и в морских водах в районах активной хозяйственной деятельности [8]. С учетом интенсивной разработки нефте- и газовых

[1)] *Deka B.* Oil-based drilling fluid's composition. Chapter 2 // Theory of Drilling Fluid / edited by K. Hazarika. India, Noida : CIIR Scientific Publications, 2023. P. 3–6.

месторождений на шельфе морей и океанов, а также рисков, обусловленных этой деятельностью, загрязнение морской среды буровыми растворами может привести к катастрофическим последствиям для экосистемы и ее обитателей [9]. В настоящее время биологические эффекты буровых растворов остаются недостаточно исследованными, что делает определение их токсичности для водных организмов особенно значимым.

Русский осетр *Acipenser gueldenstaedtii* (Brandt & Ratzeberg, 1833) – донный анадромный эвригалинный вид рыб, нерест которого происходит в реках, после чего молодь мигрирует в море для роста и созревания, а затем возвращается в реки для размножения [10]. В весенне-летний сезон осетровые рыбы обитают на шельфе моря, а икру откладывают в реках на глубине от 3 до 10 м, предпочитают участки, временно затопленные весенними паводковыми водами. Развитие оплодотворенной икры происходит в течение 8–10 дней, после чего личинки разносятся вниз по течению нерестовых рек и попадают в солоноватую водную среду. Осетр распространен в Каспийском, Азовском и Черном морях, где соленость воды ниже, чем в океане. Оплодотворенная икра и последующие стадии эмбрионального развития очень чувствительны к изменениям среды обитания и наличию в ней поллютантов, которые отрицательно действуют на развитие зародышей, вылупление и выживание личинок [11].

Целью данного исследования является определение токсичности двух видов буровых растворов *WBF* 1 и *WBF* 2 в концентрациях 0.025, 0.05, 0.1, 0.5 и 1 мг/л для оплодотворенной икры и предличинок русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii*.

Материал и методика

Оплодотворенная икра русского осетра на стадии 31–35 (с хорошо различимыми эмбрионом и глазными пузырями) была получена на Темрюкском рыбоводном заводе в мае 2021 г. Икринки помещали в стеклянные емкости (по 10 оплодотворенных икринок в каждую из расчета одна икринка на 15 мл соответствующей среды) и инкубировали при температуре окружающей среды от 16.3 до 18.0 °C в течение всего периода эмбриогенеза. Воду меняли один раз в два дня. Все эксперименты проводили в трех повторностях [2)] продолжительностью 5 сут.

В качестве контрольной и фоновой среды в экспериментах была использована природная пресная вода р. Кубани, прошедшая специальную водообработку на рыбоводном заводе. Искусственную морскую воду готовили на той же пресной основе с добавлением морской соли в концентрации 5 ‰, что соответствует средней солености воды Азовского моря, где обитает осетр. Таким образом, в эксперимент были включены две контрольные группы – пресная вода (Контроль 1) и вода соленостью 5 ‰ (Контроль 2).

[2)] Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : приказ Федерального агентства по рыболовству от 26.05.2025 № 296 : зарегистрировано Минюстом России 02.06.2025 № 82497. URL: https://www.law.ru/npd/doc/docid/1312976080/modid/99 (дата обращения: 28.08.2026).

Использовали два буровых раствора на водной основе:

– *WBF* 1 представляет собой прозрачную жидкость с температурой кипения более 100 °С, pH 3.1–3.3 и относительной плотностью 1.4 г/мл. Растворим в воде, стабилен при обычных условиях, используется в нефтегазовой промышленности как биоцид, в состав которого входят аммонийные соли нитрилотриуксусной кислоты;

– *WBF* 2 – прозрачная жидкость с запахом аммиака, содержащая бис[тетракис(гидроксиметил)фосфоний]сульфат. Температура кипения 100 °С, pH 7.5–9.9, относительная плотность 1.15 г/мл.

Концентрации буровых растворов составили 0.025, 0.05, 0.1, 0.5 и 1 мг/л.

В ходе эксперимента регистрировали процент живых эмбрионов в конце эмбриогенеза, динамику вылупления предличинок и их выживаемость. Результаты обрабатывали статистически: рассчитывали среднее значение и ошибку среднего ($M \pm m$). Индекс выживаемости определяли как отношение количества живых эмбрионов и предличинок в опытных группах к контрольным значениям. Достоверность различий устанавливали с помощью критерия Манна – Уитни при $p < 0.05$. Для определения взаимосвязи между концентрацией бурового раствора и показателями выживаемости эмбрионов и предличинок использовали компьютерную программу *CURUEFIT* (версия 2.10-*L*).

Результаты

Инкубация эмбрионов в присутствии двух буровых растворов в течение 5 сут показала разные результаты. Не обнаружено достоверных различий между выживаемостью эмбрионов осетра в пресной и соленой (5 ‰) воде. Не установлено различий между выживаемостью эмбрионов в контрольной группе в пресной воде и эмбрионов, экспонированных в *WBF* 1 при концентрации 0.1–0.5 мг/л, достоверное ($p < 0.01$) снижение данного показателя отмечено при концентрации 1 мг/л (табл. 1). В соленой воде существенные различия были обнаружены уже при концентрации токсиканта 0.025 мг/л.

Установлена умеренная отрицательная корреляция между концентрацией *WBF* 1 токсиканта и выживаемостью эмбрионов рыб в пресной и соленой воде ($y = 15.5 - 17.4x$, $R^2 = 0.37$). Индекс выживаемости эмбрионов рыб при различных концентрациях *WBF* 1 по отношению к контролю в пресной и соленой воде имел сходную динамику: различия были незначительны в двух контрольных группах, показатели имели тенденцию к снижению по мере увеличения концентрации токсиканта (рис. 1, *a*).

WBF 2 не оказал существенного влияния на выживаемость эмбрионов осетра (табл. 1), индекс выживаемости варьировал незначительно (рис. 1, *b*). Корреляции между концентрациями бурового раствора *WBF* 2 и выживаемостью эмбрионов не установлены.

В обеих контрольных группах вылупление предличинок происходило на первые сутки инкубации. При концентрации *WBF* 1 от 0.025 до 0.5 мг/л предличинки начали вылупляться только на вторые сутки (рис. 2). При концентрации 1 мг/л вылупления не было. При концентрации 0.025 и 0.05 мг/л вылупление продолжалось на третьи сутки, а при ее повышении прекращалось. Количество вылупившихся предличинок во всех опытных группах было меньше, чем в контрольных. Начало вылупления предличинок из икры, экспонированной в *WBF* 2, происходило одновременно с контрольной группой.

Таблица 1. Влияние буровых растворов на выживаемость эмбрионов осетра (n = 30 эмбрионов для каждой группы)

Table 1. The influence of drilling fluids on the embryos survival rate (n = 30 embryos for each group)

Условия эксперимента / Experiment conditions	Доля ($M \pm m$) выживших эмбрионов, % / Embryos survival percentage ($M \pm m$)	
	WBF 1	*WBF* 2
Контроль 1 / Control 1	26.7 ± 3.4	26.7 ± 5.4
Контроль 2 / Control 2	33.3 ± 2.7	33.3 ± 2.7
Концентрация, мг/л / Concentration, mg/L		
0.025	10.0 ± 0.0 *	23.3 ± 7.2
0.05	10.0 ± 0.0 *	23.3 ± 10.9
0.1	6.7 ± 2.7 *	20.3 ± 7.9
0.5	6.7 ± 2.4 *	20.3 ± 6.9
1.0	0 ± 0 **	23.3 ±10.9

* Статистически значимые различия по отношению к контролю в воде соленостью 5 ‰ ($p \leq 0.01$).

** Статистически значимые различия по отношению к контролю в пресной воде ($p \leq 0.01$) и в воде соленостью 5 ‰ ($p \leq 0.01$).

* Significant difference relative to control in fresh water ($p \leq 0.01$).

** Significant difference relative to control in fresh water ($p \leq 0.01$) and in 5 ‰ saline water ($p \leq 0.01$).

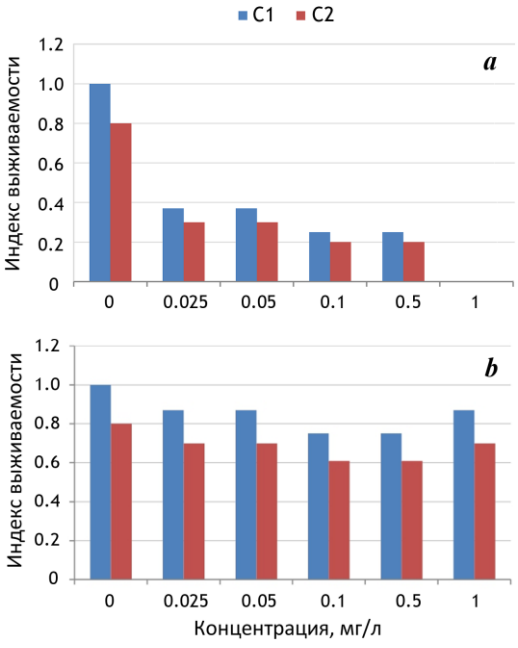


Рис. 1. Индекс выживаемости эмбрионов рыб относительно контроля в пресной воде (C1) и воде соленостью 5 ‰ (C2) с буровым раствором *WBF* 1 (*a*) и *WBF* 2 (*b*)

Fig. 1. Index of survival rate of fish embryos relative to control in fresh water (C1) and in 5‰ saline water (C2) with drilling fluid WBF 1 (*a*) and WBF 2 (*b*)

Таблица 2. Влияние буровых растворов на выживаемость предличинок осетра (n = 30 эмбрионов для каждой группы)

Table 2. Effect of drilling fluids on survival rate of sturgeon prelarvae (n = 30 embryos for each group)

Условия эксперимента / Experiment conditions	Доля ($M \pm m$) выживаемости предличинок, %/ Prelarvae survival percentage ($M \pm m$)	
	WBF 1	*WBF* 2
Контроль 1 / Control 1	75.0 ± 11.8	75.0 ± 11.8
Контроль 2 / Control 2	66.7 ± 6.8	66.7 ± 6.8
Концентрация, мг/л / Concentration, mg/L		
0.025	66.7 ± 0.5	58.3 ± 6.8
0.05	66.7 ± 7.7	66.7 ± 3.7
0.1	25.0 ± 17.7 *	66.3 ± 12.8
0.5	20.0 ± 16.3 *	63.5 ± 4.6
1.0	0 ± 0 **	66.7 ± 13.6

* Статистически значимые различия по отношению к контролю в пресной воде ($p \leq 0.01$) и в воде соленостью 5 ‰ ($p \leq 0.01$).

** Статистически значимые различия по отношению к контролю в пресной воде ($p \leq 0.01$).

* Significant difference relatively to control in fresh water ($p \leq 0.01$) and in 5 ‰ saline water ($p \leq 0.01$).

** Significant difference relatively to control in fresh water ($p \leq 0.01$).

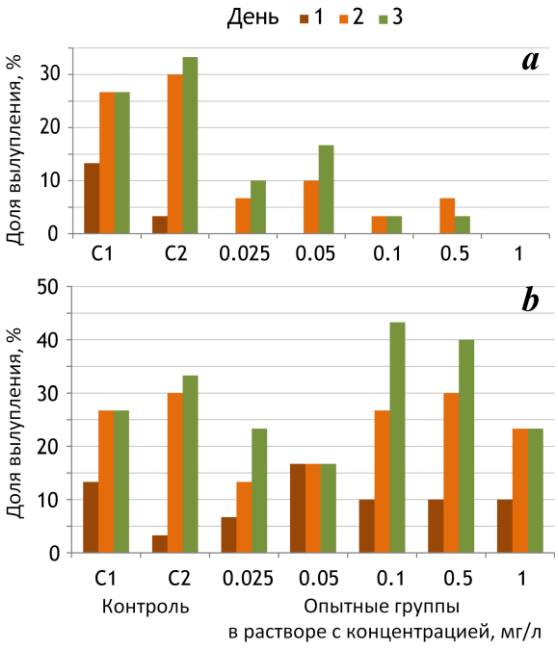
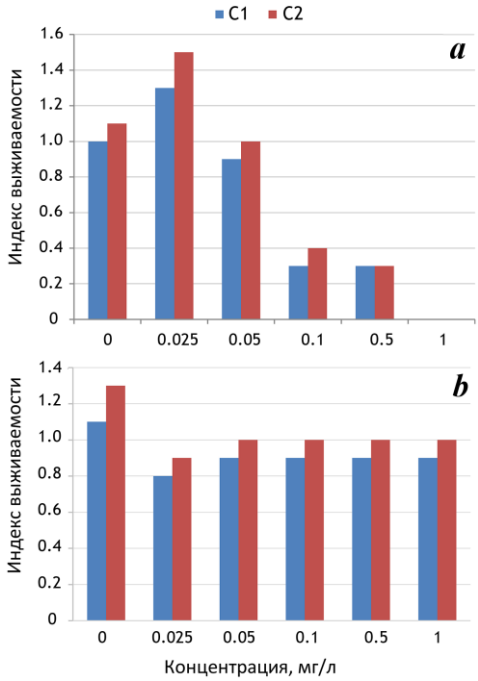


Рис. 2. Динамика вылупления эмбрионов, экспонированных в буровых растворах *WBF* 1 (*a*) и *WBF* 2 (*b*) в контрольных (C1 – в пресной воде; C2 – в воде соленостью 5 ‰) и опытных группах при концентрации 0.025–1 мг/л на первые, вторые и третьи сутки выклева

Fig. 2. The dynamics of the embryos hatching exposed in the drilling fluids *WBF* 1 (*a*) and *WBF* 2 (*b*) in the control groups (C1 – in fresh water; C2 – in 5‰ saline water) and experimental groups at concentrations of 0.025–1 mg/L on days 1, 2 and 3 of hatching



Р и с . 3 . Показатель выживаемости предличинок рыб относительно контроля в пресной воде (C1) и воде соленостью 5 ‰ (C2) с буровым раствором *WBF* 1 (*a*) и *WBF* 2 (*b*)

F i g . 3 . Index of fish prelarvae survival relative to control in fresh water (C1) and in 5‰ saline water (C2) with drilling fluid *WBF* 1 (*a*) and *WBF* 2 (*b*)

Максимальное вылупление отмечено на третьи сутки при концентрации бурового раствора 0.1–0.5 мг/л. Концентрация токсиканта *WBF* 2, не влияющая на динамику вылупления предличинок из икры, составила 0.05 мг/л.

Выживаемость предличинок осетровых рыб при действии буровых растворов в различных концентрациях представлена в табл. 2. Достоверные различия выживаемости предличинок в опытных и контрольных группах были обнаружены при использовании *WBF* 1 в концентрации 0.1–0.5 мг/л, а при концентрации 1 мг/л предличинки погибли. Установлена сильная положительная корреляция между концентрацией токсиканта и смертностью предличинок рыб ($y = 1.1 - 0.01x$, $R^2 = 0.87$). Никаких различий между выживаемостью предличинок в контрольных и опытных группах, подвергшихся воздействию *WBF* 2, не выявлено.

Значения индекса выживаемости предличинок рыб при исследуемых концентрациях *WBF* 1 в пресной и в соленой воде различались незначительно в двух контрольных группах, а в опытных группах имели тенденцию к снижению при увеличении концентрации токсиканта до 0.05 мг/л и выше (рис. 3, *a*). Индекс выживаемости предличинок, экспонированных в среде с *WBF* 2, варьировал незначительно (рис. 3, *b*).

Обсуждение результатов исследований

Результаты изучения влияния двух буровых растворов на водной основе на выживаемость эмбрионов и предличинок осетровых рыб и их вылупление показали, что *WBF* 1 более токсичен по сравнению с *WBF* 2. Анадромные рыбы, к которым относится осетр, размножаются в пресных водоемах и возвращаются в море для дальнейшего роста и развития. Они представляют особый интерес для экотоксикологических исследований, так как позволяют сравнить

действие токсикантов на одни и те же виды рыб в пресной и в соленой воде [12]. Поскольку нерестилища русского осетра формируются в низовьях рек, то волновое воздействие и сгонно-нагонные явления могут вызывать изменения солености в районах нереста и влиять на выживаемость, вылупление предличинок из икры и их дальнейшее развитие. Помимо этого, колебания уровня моря вследствие глобального изменения климата могут изменить экологическую ситуацию в низовьях рек и повлиять на развитие морских обитателей, включая осетровых рыб [13, 14]. Токсиканты могут быстро перемещаться из районов бурения скважин по течению рек, что представляет значительную угрозу для развития икры и личинок рыб и их воспроизводства [15]. В связи с этим мы проанализировали две контрольные группы эмбрионов осетра – в пресной воде и в воде соленостью 5 ‰.

Выживаемость эмбрионов осетра под влиянием растворов *WBF* 1 в различных концентрациях существенно отличалась от контроля. При концентрации токсиканта 1 мг/л как в пресной, так и в соленой воде зародыши погибали. В соленой воде достоверные различия с контролем обнаружены уже при концентрации токсиканта 0.025 мг/л, что свидетельствует о более высокой токсичности *WBF* 1 в соленой воде. Ранее другие исследователи отмечали, что соленая вода негативно влияет на раннее развитие икринок кеты [14]. Таким образом, в пресной воде *WBF* 1 в концентрации 0.5 мг/л не оказал влияния на выживаемость эмбрионов, тогда как в соленой воде пороговая концентрация снижалась до 0.025 мг/л. Для *WBF* 2 различий между опытными и контрольными группами не установлено.

Наши результаты согласуются с данными других авторов, которые показали, что в половых железах самок тиляпии *Tilapia guineensis*, содержащихся в среде с 2.5%-ной концентрацией бурового раствора *XP*-07, обнаружена дегенерация (атрезия) созревающих яйцеклеток, приводящая к их полному исчезновению и дальнейшему нарушению процесса воспроизводства рыб [16]. В работе [17] на эмбрионах данио исследовали токсичность бурового раствора на нефтяной основе (*oil-based drilling mud, OBDM*), в состав которого входят тяжелые металлы. Каждые сутки в течение 96 ч определяли смертность эмбрионов, сердечный ритм и скорость вылупления личинок. Летальная 96-часовая концентрация *OBDM,* при которой погибают 50 % подопытных тест-организмов ($ЛК_{50}$), составила 0.005 мг/мл (5 *ppm*). При возрастании концентрации *OBDM* скорость вылупления личинок и частота сердечных сокращений у эмбрионов в опытной группе снижались. Полученные результаты свидетельствовали о высокой токсичности *OBDM* и его тератогенном действии на эмбрионы рыб, которое зависело от концентрации поллютанта [17]. Таким образом, зародыши рыб и ранние стадии развития различных гидробионтов являются удобной и адекватной моделью для оценки токсичности буровых растворов [18–21].

Следующим информативным тестом, характеризующим токсичность изучаемых буровых растворов, явилась скорость вылупления предличинок из икры. В обеих контрольных группах вылупление произошло в первые сутки, а в опытных группах в среде с *WBF* 1 в концентрации 0.025–0.5 мг/л – только на вторые сутки. При этом число вылупившихся личинок было меньше, чем в контроле, а при концентрации 1 мг/л вылупление не произошло.

WBF 2 не влиял на этот процесс: как в опытных, так и в контрольных группах вылупление происходило одновременно при всех изученных концентрациях.

Инкубация эмбрионов и ранних личиночных стадий атлантической трески в растворах пластовой воды (ПВ) и сбросах буровых отходов также не выявила влияния на выживаемость личинок и их вылупление. Однако при минимальных концентрациях токсиканта в икре трески обнаружены нарушения в цитоскелетных и сигнальных белках, регулирующих развитие мышц, функцию палочек сетчатки, клеточную передачу сигналов и целостность тканей мальков, которые необходимы при плавании и спасении от хищников. После вылупления у большинства личинок были выявлены аномалии развития: в результате деформаций челюстей рыбы, содержащиеся в 1%-ном растворе ПВ, не могли питаться и погибали от голода. Кроме того, при инкубации в ПВ этой концентрации обнаружены отклонения в нормальной пигментации личинок рыб. При воздействии 0.1%-ной и 0.01%-ной ПВ негативных эффектов отмечено не было [22].

Выживаемость предличинок снижалась при инкубации в растворе с концентрацией *WBF* 1 0.1–0.5 мг/л, тогда как выживаемость рыб при действии тестируемых концентраций *WBF* 2 существенно не изменялась и не отличалась от контроля. Таким образом, изученные буровые растворы по-разному влияют на ранние стадии онтогенеза осетра, что согласуется с данными других авторов [22]. Следует отметить положительное влияние отходов буровых растворов на водной основе (*WBM*) в концентрациях 1–10 мг/л на эффективность питания, рост и выживаемость личинок трески после 14-дневного воздействия, которые, как предположили, были вызваны частицами определенного размера, стимулирующими пищевую активность [23].

Отдельные компоненты буровых растворов оказывали негативное воздействие на рыб, причем их токсичность отличалась от действия их смеси. Это может быть обусловлено как синергическими, так и антагонистическими взаимодействиями между компонентами [24]. Бентосные рыбы и беспозвоночные, непосредственно контактирующие с токсикантами, больше всего страдают от ксенобиотиков, попадающих в водную среду [25]. Эксперименты, проведенные на тиляпии *Tilapia mossambica*, кефали *Mugil persia* и донных моллюсках *Boleopthalmus boddarti*, показали, что водонерастворимые компоненты действуют на эти организмы в меньшей степени, чем водорастворимые буровые растворы [24].

Негативные последствия попадания буровых растворов в воду были отмечены в открытом море, где даже на расстоянии 5 км от нефтяной платформы был нанесен значительный вред донным организмам, в основном двустворчатым моллюскам, причем наиболее серьезные повреждения были выявлены на расстоянии 0.5–1 км от нефтяной скважины [23]. Исследования на рыбах (пикше и сельди) из природных популяций в районах интенсивной нефтедобычи показали значительную индукцию защитных систем организма, повышение активности ферментов семейства цитохрома *P*-450 в печени, повреждение и изменение ДНК и состава жирных кислот, что указывает на комплексное негативное воздействие нефти и связанных с ней компонентов, используемых на нефтяных промыслах при бурении скважин [26].

При этом основную опасность представляют большие объемы, высокие концентрации и выбросы водорастворимых буровых растворов. Однако быстрая миграция этих растворов на большие расстояния и осаждение твердых компонентов на глубине 80 м могут снижать предполагаемый вред. Отмечено влияние этих веществ на донные организмы-фильтраторы, но негативных последствий для эпибентической фауны и рыб вблизи мезотрофного рифа не установлено [27].

Токсическое действие буровых растворов на водные экосистемы может реализоваться посредством трех механизмов [28]: а) изменения физико-химических свойств воды в результате попадания буровых растворов в морскую среду; б) образования на поверхности воды пленки, препятствующей нормальному газообмену, что создает гипо- и аноксические условия, приводящие к гибели гидробионтов; в) образования аноксических зон вследствие разложения органических компонентов микробными консорциумами [29]. В результате этого ухудшение условий обитания, аккумуляция твердых частиц на поверхности оболочки икры и задержка вылупления, прямое токсическое воздействие токсикантов, особенно тяжелых металлов, входящих в состав бурового раствора, а также развитие окислительного стресса создают крайне неблагоприятные условия для жизнедеятельности икринок и зародышей рыб [30]. Негативные последствия попадания буровых растворов в морскую среду отмечены нами также для обитателей бентосного сообщества шельфовой зоны – зостеры и амфипод [31].

Таким образом, важнейшей задачей анализа токсичности буровых растворов на ранних стадиях онтогенетического развития гидробионтов является оценка риска для водных организмов и здоровья человека, а также анализ качества воды и разработка критериев оценки предельно допустимых уровней содержания токсикантов.

Заключение

Эмбрионы и предличинки осетра показали себя адекватными моделями для оценки токсичности буровых растворов. Реакция тестируемых стадий развития осетра на действие буровых растворов зависела от времени воздействия, концентрации и вида токсиканта. Наиболее чувствительными тестами оказались выживаемость эмбрионов осетра и динамика выклева предличинок из икры. Выживаемость эмбрионов в контрольных группах в пресной воде и экспонированных в среде с *WBF* 1 при концентрации 0.1–0.5 мг/л не различалась, но при концентрации 1 мг/л все эмбрионы погибли. В соленой воде при концентрации *WBF* 1 0.025 мг/л и выше наблюдали сокращение выживаемости на 87 % ($p < 0.01$). *WBF* 2 не повлиял на выживаемость эмбрионов осетра. В обеих контрольных группах вылупление личинок произошло в первые сутки, но эмбрионы, экспонированные в среде с *WBF* 1 при концентрации 0.025–0.5 мг/л, вылупились только на вторые сутки. Количество предличинок в среде со всеми тестируемыми концентрациями было меньше, чем в контроле. При концентрации 1 мг/л предличинки не вылупились. Достоверные различия в выживаемости предличинок в опытных группах по сравнению с контрольными были обнаружены при концентрации *WBF* 1 1 мг/л.

Представленные результаты тестирования токсичности буровых растворов на ранних стадиях развития осетровых рыб могут иметь практическое значение для оценки последствий климатических катаклизмов и штормовых явлений, при которых возможен заток морской воды, содержащей буровые растворы, в реки в районах нерестилищ осетровых, что может привести к негативным последствиям для данного вида.

Эмбрионы и личинки рыб можно использовать в диагностических тестах в качестве тест-объектов. Результаты этого исследования найдут применение при разработке методов оценки токсичности буровых растворов, а также создании экологически безопасных буровых растворов и новых технологий. Следует учитывать, что для окончательного вывода о токсичности буровых растворов необходимы дополнительные исследования на других таксономических группах, в частности планктонных организмах, водной растительности и бентосных моллюсках и ракообразных.

Список литературы

1. *Antia M., Ndidiamaka A., Ezejiofor A., Obasi C. N. et al.* Environmental and public health effects of spent drilling fluid: an updated systematic review // Journal of Hazardous Materials Advances. 2022. Vol. 7. 100120. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100120
2. *Hossain E. M., Apaleke A.* An overview of mud technology and challenges toward greening of drilling fluid // Environmental engineering and management journal. 2015. Vol. 14, iss. 12. P. 2837–2848. https://doi.org/10.30638/eemj.2015.300
3. *Yalman E., Federer-Kovacs G., Depci T., Al Khalaf H. et al.* Development of novel inhibitive water-based drilling muds for oil and gas field applications // Journal of Petroleum Sciences and Engineering. 2022. Vol. 210. 109907. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109907
4. *Ejileughaa Ch., Ezejiofor A. N., Ezealisiji K. M., Orisakwe O. E.* Metal oxide nanoparticles in oil drilling: Aquatic toxicological concerns // Journal Hazardous. Materials Advances. 2022. Vol. 7. 100116. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100116
5. *Pereira L. B., Sad C. M. S., Castro E. V. R., Filgueiras P. R. et al.* Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review // Fuel. 2022. Vol. 310, Part B. 122301. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301
6. *Xiong D., Han X.* Particular pollutants, human health risk and ecological risk of oil-based drilling fluid: a case study of Fuling shale gas field // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45, iss. 3. P. 981–995. https://doi.org/10.1007/s10653-022-01259-z
7. *Руднева И. И.* Реакции гидробионтов на загрязнение морской среды буровыми растворами и шламами // Биология моря. 2025. Т. 51, № 1. С. 3–19. EDN GJYZUE. https://doi.org/10.7868/s3034526x25010012
8. *Beyer J., Trannum H. C., Bakke T., Hodson P. V. et al.* Environmental effects of the Deepwater Horizon oil spill: A review // Marine Pollution Bulletin. 2016. Vol. 110, iss. 1. P. 28–51. http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.027
9. *Иванютин Н. М., Пасынков А. А.* Система мониторинга районов эксплуатации залежей углеводородов в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 37–51. EDN BVTDPL. https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-3-37-51
10. *Вилкова О. Ю.* Анадромные осетры России: перспективы промысла // Труды ВНИРО. 2022. Т. 190. С. 14–21. EDN PCYZCX. https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-190-14-21

11. *Minaz M., Kurtoğlu İ. Z.* Long-term exposure of endangered Danube sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) to bisphenol A (BPA): growth, behavioral, histological, genotoxic, and hematological evaluation // Environmental Science Pollution Research. 2024. Vol. 31, iss. 21. P. 30836–30848. https://doi.org/10.1007/s11356-024-33168-2
12. *Foley M., Askin N., Belanger M. P., Wittnich C*. Anadromous fish as biomarkers for the combined impact of marine and freshwater heavy metal pollution // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2022. Vol. 230. 113153. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113153
13. *Almar R., Ranasinghe R., Bergsma E. W., Diaz H. et al.* A global analysis of extreme coastal water levels with implications for potential coastal overtopping // Nature Communications. 2021. Vol. 12. 3775. https://doi.org/10.1038/s41467-021-24008-9
14. *Park J. W., Kim B. S., Kim J. K., Jung H. K. et al.* Influence of salinity on the survival rate of fertilized Chum Salmon (*Oncorhynchus keta*) eggs // Journal of Marine Sciences and Engineering. 2024. Vol. 12, iss. 1. 39. https://doi.org/10.3390/jmse12010039
15. *Zhou Z., Wu F., Tong Y., Zhang S. et al.* Toxicity and chemical characterization of shale gas wastewater discharged to the receiving water: Evidence from toxicity identification evaluation // Science of the Total Environment. 2024. Vol. 912. 69510. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169510
16. *Vincent-Akpu I. F., Allison M. E*. Effect of chronic exposure to drilling fluid XP-07 on gonad histology in *Tilapia guineensis* // Toxicology and environmental chemistry. 2010. Vol. 92, iss. 2. P. 271–277. https://doi.org/10.1080/02772240902927502
17. *Sridewi N., Nurbariah S., Ahmad S*. Heavy metal content analysis and toxicity assessment of oil-based drilling mud using Zebrafish embryos // Transactions on Maritime Sciences. 2021. Vol. 10, iss. 2. P. 390–395. https://doi.org/10.7225/toms.v10.n02.w06
18. *Тарасова С. С., Гаевая Е. В.* Исследования токсичности буровых шламов и возможности их утилизации // Проблемы региональной экономики. 2021. № 3. С. 75–79. EDN TBSLWO. https://doi.org/10.24412/1728-323X-2021-3-75-79
19. *Мазлова Е. А., Малина Н. В., Семенычев В. Г.* Изучение влияния отходов бурения на планктонные и бентосные организмы Черного моря // Химия и технология топлив и масел. 2019. № 1. С. 43–51. EDN YXTNZR.
20. *Somashekaraiah R., Suvin P. S., Gnanadhas D. P., Kailas S. V. et al.* Eco-friendly, non-toxic cutting fluid for sustainable manufacturing and machining processes // Tribology Online. 2016. Vol. 11, iss. 5. P. 566–567. https://doi.org/10.2474/trol.11.556
21. *Jimoh M. O., Arinkoola A. O., Salawudeen T. O., Daramola M. O.* Environmental challenges of natural gas extraction and production technologies // Advances in natural gas: formation, processing, and applications. Volume 1. Natural gas formation and extraction / edited by M. R. Rahimpour, M. A. Makarem, M. Meshksar, Elsevier, 2024. P. 75–101. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19215-9.00009-8
22. *Meier S., Morton H. C., Nyhammer G., Grøsvik B. E. et al.* Development of Atlantic cod (*Gadus morhu*a) exposed to produced water during early life stages effects on embryos, larvae, and juvenile fish // Marine Environmental Research. 2010. Vol. 70, iss. 5. P. 383–394. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2010.08.002
23. *Bakke T., Klungsøyr J., Sanni S.* Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry // Marine Environmental Research. 2013. Vol. 92. P. 154–169. http://doi.org/10.1016/j.marenvres.2013.09.012
24. *Sil A., Wakadikar K., Kumar S., Babu S. S. et al.* Toxicity characteristics of drilling mud and its effect on aquatic fish populations // Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste. 2010. Vol. 16, iss. 1. P. 51–57. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000092

25. *Ekpo M. A., Uzegbu M. L.* The effect of the petroleum drilling mud additive (Chromelignosulphonate) on the microbiology and survival of periwinkle (*Pachymelania spp*. and *Tympanotonus spp*.) // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2004. Vol. 20, iss. 6. P. 559–562. https://doi.org/10.1023/B:WIBI.0000043161.02154.57
26. *Balk L., Hylland K., Hansson, T., Berntssen M. H. G. et al.* Biomarkers in natural fish populations indicate adverse biological effects of offshore oil production // PLoS One. 2011. Vol. 6, iss. 5. e19735. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019735
27. *Jones R., Wakeford M., Currey-Randall L., Miller K. et al.* Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 72. 112717. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717
28. *Ismail A. R., Alias A. H., Sulaiman W. R. W., Jaafar M. Z. et al.* Drilling fluid waste management in drilling for oil and gas wells // Chemical Engineering Transactions. 2017. Vol. 56. P. 1351–1356. https://doi.org/10.3303/CET1756226
29. *Rasti A., Ameri A., Riahi M. A.* Aerobic degradation of oil-based mud drilling fluid by in situ bacteria in the Hawizeh Marshes // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2021. Vol. 11, iss. 10. P. 3775–3783. https://doi.org/10.1007/s13202-021-01263-6
30. *Rudneva I. I.* Interspecies peculiarities of biomarkers response of marine fish embryos to oil pollution // Pollution. 2023. Vol. 9, iss. 1. P. 243–253. https://doi.org/10.22059/poll.2022.345522.1530
31. *Руднева И. И., Шайда В. Г., Медянкина М. В., Шайда О. В.* Влияние бурового раствора и тампонажной жидкости на виды-индикаторы морских прибрежных бентосных экосистем // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 81–95. EDN TUWYZA.

Поступила 24.02.2026 г.; одобрена после рецензирования 10.03.2026 г.;
принята к публикации 30.06.2026 г.; опубликована 30.09.2026 г.

Об авторах:

Руднева Ирина Ивановна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор биологических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-9623-9467**, **Scopus Author ID: 9266541700**, **ResearcherID: L-3758-2016**, **SPIN-код: 9817-2796**, *svg-41@mail.ru*

Шайда Валентин Григорьевич, инженер-исследователь, ООО «ЭкоСервис-А» (107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, 17А, стр. 1Б, оф. 8)

Медянкина Мария Владимировна, доцент кафедры экологии и природопользования факультета биотехнологий и рыбного хозяйства, Московский государственный университет технологий и управления МГУТУ им. К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (119049, Москва, ул. Шаболовская, д. 14, стр. 9), кандидат биологических наук, **SPIN-код: 9127-2022**, **ORCID ID: 0000-0002-9195-0399**, *mediankina@mail.ru*

Заявленный вклад авторов:

Руднева Ирина Ивановна – разработка концепции и формулировка и постановка задачи

Шайда Валентин Григорьевич – разработка методик и проведение экспериментальных исследований

Медянкина Мария Владимировна – обработка и описание результатов исследования

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.