

Оценка токсичности донных осадков из прибрежных районов залива Петра Великого (Японское море)

М. А. МАЗУР¹, Е. В. ЖУРАВЕЛЬ²

¹Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Пальчевского, 17
E-mail: proshinamarina94@gmail.com

²Дальневосточный федеральный университет
690922, Владивосток, о. Русский, пос. Аякс, 10

Статья поступила 04.05.2022

После доработки 01.07.2022

Принята к печати 07.07.2022

АННОТАЦИЯ

Исследована токсичность донных осадков из отдельных районов зал. Петра Великого с использованием биотестов с эмбрионами и личинками плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864). На основе расчета интегрального индекса токсичности (ITI) выявлена различная степень ингибирования раннего развития личинок в вытяжках из исследуемых донных осадков. Наиболее неблагоприятные условия отмечены в бух. Горностай (Уссурийский залив, прибрежная зона г. Владивостока) и бух. Козьмина (зал. Находка). В вытяжках донных отложений из этих районов личинки развивались со значительными аномалиями, а величины ITI соответствовали максимальному баллу (ITI = 10). Также высокий уровень аномально развитых личинок выявлен в пробе из бух. Подъяпольского (ITI = 6,08). Результаты исследования подтверждают снижение антропогенной нагрузки на акватории зал. Петра Великого, за исключением локальных районов, примыкающих к активно функционирующим портам и рекультивированному полигону твердых бытовых отходов.

Ключевые слова: донные осадки, загрязнения, биотестирование, эмбрионы и личинки морских ежей, залив Петра Великого.

Морские прибрежные зоны подвержены высокому уровню антропогенной нагрузки, что связано с активным индустриальным развитием, ростом добычи морских природных ресурсов, увеличением объемов бытовых и промышленных отходов и стоков.

Залив Петра Великого является крупнейшим в северо-западной части Японского моря. Береговая и прибрежная зоны залива занимают около 12 % территории Приморского края и являются его наиболее освоенной

частью. Именно здесь расположены крупные населенные пункты, морские порты Владивосток и Находка, большинство промышленных предприятий, связанных с добычей горных пород, судоремонтом, промыслом и переработкой морских биоресурсов, энергетикой, строительством, производством продуктов питания [Огородникова и др., 2001]. Кроме того, в данном районе широкое распространение получила сельскохозяйственная деятельность. В результате интенсивной работы пред-

приятый, а также жилищно-коммунального хозяйства в залив поступают сточные воды, которые содержат многокомпонентные смеси токсичных веществ как минерального, так и органического происхождения.

Загрязнение вод и донных осадков зал. Петра Великого было подробно изучено в начале 2000-х годов. Резкое снижение промышленного производства в Приморском крае в 1990-х годах способствовало улучшению экологической обстановки в прибрежных акваториях. К 2001 г. тренды содержания токсичных элементов в морской среде имели отрицательные значения [Белан и др., 2007]. В 2010 г. отмечено, что качество вод бух. Золотой Рог изменилось с VI класса (очень “грязные”) на V – “грязные”, а прол. Босфор Восточный – с V на IV (“загрязненные”). Воды Уссурийского залива были отнесены к IV классу, а зал. Находка – к III (“умеренно загрязненные”) [Лукьянова и др., 2012].

На основании исследования потенциальной токсичности донных отложений зал. Петра Великого, проведенного в 2016 г., по содержанию поллютантов в осадках выявлено, что “относительно чистыми” являются открытые районы Амурского и Уссурийского заливов, а внутренние (кутовые) части данных заливов – “умеренно загрязненными”. “Загрязненные” донные осадки находятся в акваториях вблизи ж/д станций “Вторая речка” и “Моргородок” г. Владивостока (Амурский залив), в бухтах Емар и Промежуточная (Уссурийский залив), а также в проливе Босфор Восточный и бух. Улисс [Мощенко и др., 2019]. В процессе оценки состояния акватории бух. Козьмина, проведенной в 2008 г., в донных осадках обнаружены повышенные концентрации нефтеуглеводородов, фенолов и хлорорганических пестицидов. Кроме того, отмечено усиление антропогенного воздействия на акватории бухты в связи с активным промышленным строительством в прибрежной зоне [Григорьева, Питрук, 2010; Гамаюнова и др., 2016].

Пограничная зона вода – донные отложения – это завершающее звено трансформации и захоронения большого количества химических соединений, находящихся в биосфере. Данная зона представляет собой область накопления, а также интенсивной трансформации химических веществ. Многие поллютанты активно накапливаются в осадках, и их концен-

трации могут выступать в роли интегрального показателя степени загрязнения прибрежных зон. Кроме того, поверхностный слой раздела вода – дно, а прежде всего сами донные осадки выступают в качестве постоянного активного источника вторичного загрязнения морской толщи, происходящего в результате взмучивания иловых масс при гидрологических явлениях, жизнедеятельности донных организмов (биологическое взмучивание) и антропогенной деятельности [Израэль, Цыбань, 2009]. Именно поэтому для анализа долгосрочного воздействия на прибрежные зоны наиболее показательным является анализ состояния донных осадков. Донные отложения менее чувствительны к краткосрочным колебаниям гидролого-гидрохимических параметров, тем самым более полно отражают истинное состояние морской среды [Ващенко и др., 2010; Журавель и др., 2015; Черкашин и др., 2019; Горбачева, 2020].

Для оценки непосредственного влияния загрязнения воды и донных осадков на гидробионтов активно применяются методы биодиагностики – биоиндикация и биотестирование [Черкашин, 2001; Тюрин, 2011]. Тесты на токсичность с использованием эмбрионов и личинок морских ежей нашли широкое применение по всему миру в качестве надежного, эффективного и недорогого инструмента оценки токсичности большого количества загрязняющих веществ, а также для анализа состояния морских прибрежных акваторий. Современные исследования подтверждают чувствительность личиночных стадий морских ежей к воздействию тяжелых металлов [Xu et al., 2011; Rouchon, Phillips, 2017], нефтеуглеводородов [Frances et al., 2017; DeMiguel-Jimenez et al., 2021], полиароматических углеводородов [Gregorin et al., 2021]. Высока актуальность использования биотестов с этими гидробионтами для оценки экологического состояния морских вод и донных отложений [Morrone et al., 2016; Arslan et al., 2017; Abessa et al., 2018; Moreira et al., 2019]. Эмбрионы и личинки морских ежей включены в российские [Временные методические рекомендации..., 2003], американские [U.S. EPA, 2009; ASTM, 2012], канадские [EPS1/RM/27, 2011] и бразильские [NBR/ABNT, 2012] нормативные документы в качестве рекомендуемых тест-объектов.

При проведении экотоксикологических исследований дальневосточных морей тради-

ционно большее внимание уделялось биотестированию вод [Маркина, Айздайчер, 2011; Черняев, Нигматулина, 2013; Лукьянова и др., 2015; Черкашин и др., 2019]. При этом проводились и различные виды тестов, основанных на анализе эмбрионального и личиночного развития морских ежей [Кашенко, 2000; Журавель, Подгурская, 2014; Лукьянова и др., 2014, 2015; Lukyanova et al., 2017]. Токсичность же донных осадков зал. Петра Великого с помощью методов биотестирования оценена недостаточно [Мензорова, Рассказов, 2007].

Целью данной работы является проведение оценки токсичности донных отложений из различных районов зал. Петра Великого с помощью биотестирования с плоским морским ежом *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Пробы донных осадков для проведения биотестирования отобраны легководолазным

методом с глубины 2,5–5 м (в бух. Козьмина, нефтепорт – 15 м) в августе 2017 г. на 13 станциях, расположенных в прибрежных зонах Амурского и Уссурийского заливов, а также зал. Находка и акваториях Дальневосточного морского заповедника (рис. 1). Донные отложения из верхнего 5-сантиметрового слоя отбирали с помощью тefлонового пробоотборника. Далее пробы замораживались и хранились при температуре -28°C .

Каждая из станций отличалась друг от друга по выраженности антропогенной нагрузки. Остров Фуругельма (ст. 1) входит в состав Дальневосточного морского биосферного государственного природного заповедника. Бухта Сивучья (ст. 2), также заповедная, несмотря на отсутствие местных источников загрязнения подвержена негативному влиянию от трансграничного атмосферного и водного переноса поллютантов, поступающих из густонаселенных и индустриально-развитых территорий Китая и Кореи [Христофорова и др., 2018].

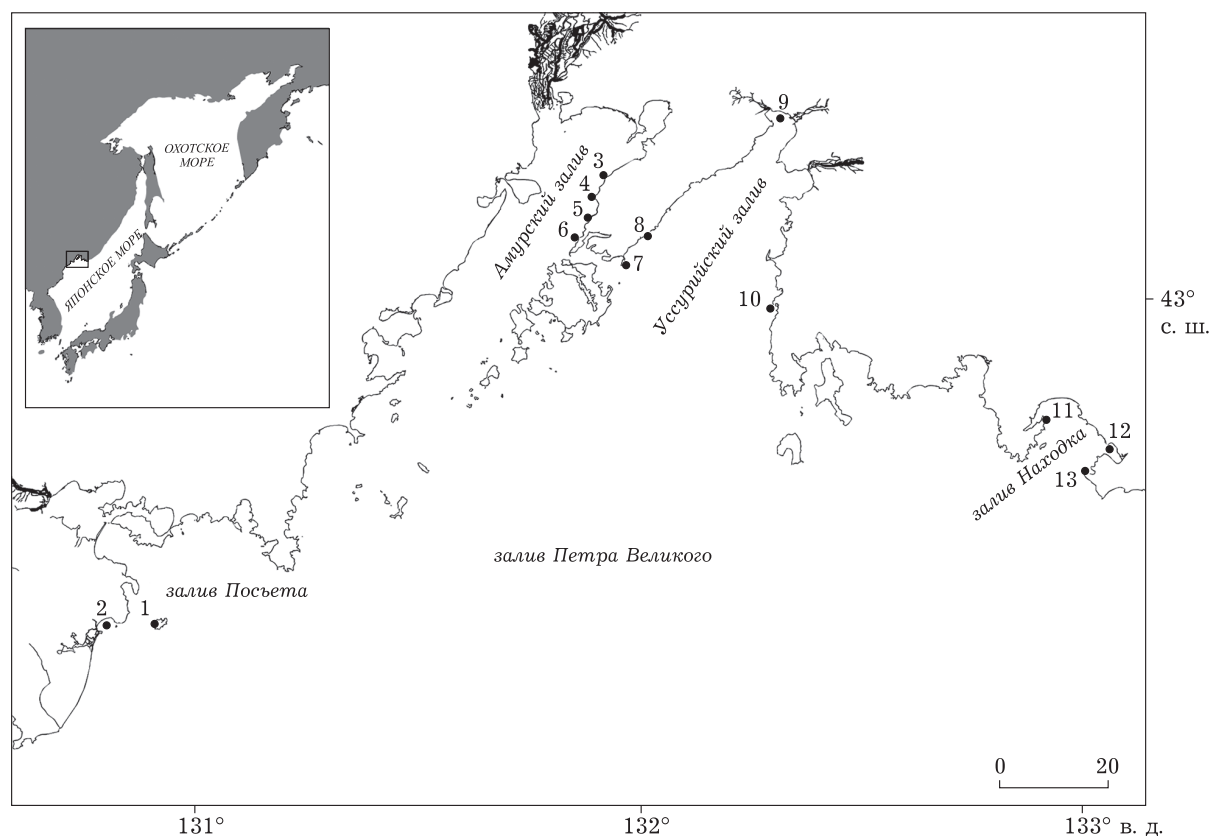


Рис. 1. Карта района отбора проб донных отложений для биотестирования: 1 – о. Фуругельма, бух. Западная; 2 – бух. Сивучья, о. Веры; 3 – м. Красный; 4 – м. Фирсова; 5 – м. Лагерный; 6 – м. Купера; 7 – м. Басаргина; 8 – бух. Горностай; 9 – бух. Муравьиная; 10 – м. Полосатик, бух. Подъяпольского; 11 – м. Шведова; 12 – бух. Врангеля, Береговое; 13 – бух. Козьмина, нефтепорт

Станции отбора донных осадков вдоль восточного побережья Амурского залива (ст. 3–6) в окрестностях г. Владивостока испытывают высокое антропогенное воздействие, связанное с активным поступлением загрязненных стоков с городской территории. Точки отбора донных отложений вдоль западного побережья Уссурийского залива в районе м. Басаргина (ст. 7) и бух. Горностай (ст. 8) характеризуются высоким техногенным загрязнением, вызванным поступлением загрязненных стоков с рекультивированного полигона твердых бытовых отходов г. Владивостока. Бухта Муравьиная (ст. 9), в кутовой части залива, является конечным приемником стока рек Кневичанка, Артемовка и Шкотовка, несущих в своих водах загрязнения с территории Артемовского и Шкотовского городских округов. В последние годы воды р. Кневичанка относились к категории “грязные-экстремально грязные” [Доклад..., 2018]. На побережье бух. Подъяпольского (ст. 10) с 1930 г. и по настоящий день свою деятельность осуществляет рыболовецкий колхоз “Приморец” [Христофорова и др., 2020]. С 2019 г. здесь функционирует угольный морской терминал “Порт Вера” [Доклад..., 2021].

Вдоль м. Шведова (ст. 11) на береговой территории расположены жилые кварталы и небольшой пляж, а севернее, в районе м. Астафьева – угольный терминал. На побережье бух. Врангеля (ст. 12) расположена территория порта “Восточный”, специализирующегося на высокотехнологичной перевалке угля. В бух. Козьмина (ст. 13) находится “Специализированный морской нефтеналивной порт Козьмино”, активно функционирующий с 2009 г.

Образцы донных осадков, высушенных до воздушно-сухого состояния, растирали в фарфоровой ступке. Гранулометрический состав донных осадков определяли ситовым анализом [Петелин, 1967]; устанавливали содержание илистой и глинистой (<0,1 мм), песчаной (0,1–2 мм) и гравийной (>2 мм) фракций. Концентрацию органического углерода ($C_{орг}$) определяли во фракции осадков с размером частиц менее 0,25 мм. $C_{орг}$ анализировали методом мокрого сжигания по Тюрину, основанным на окислении органических веществ раствором двуххромовокислого калия в серной кислоте [Потапова и др., 1980].

Для биотестирования морских ежей *S. mirabilis* собирали в бух. Средняя, зал. Восток (зал. Петра Великого, Японское море) с глубины 4–4,5 м. Для выращивания личинок морского ежа в контрольном эксперименте использовали морскую воду из зал. Восток (район морской биологической станции “Восток” Национального научного центра морской биологии им. А. В. Жирмунского ДВО РАН), отобранную с глубины 6 м с использованием системы аквариальной. Воду профильтровали через трехфракционный гравийный фильтр и обработали ультрафиолетом. Температурный режим во время проведения опытов поддерживали на уровне +18–19 °С.

Навески донных отложений для приготовления водных экстрактов помещали в конические колбы, заливали профильтрованной простерилизованной морской водой в соотношении 1 : 4, а затем, используя орбитальный шейкер Biosan PSU-20i (Латвия), интенсивно перемешивали в течение 2 ч [Beiras et al., 2003]. Далее пробы отстаивали и фильтровали через мембранный фильтр.

Нерест морских ежей стимулировали введением в перивисцеральную полость 0,2 мл 0,5 М раствора хлорида калия. Получение и подготовка яйцеклеток для эксперимента проходили с использованием стандартной методики. Проводили два варианта эксперимента. В ходе первого опыта (тест на спермиотоксичность – спермиотест), основанного на нарушении подвижности и оплодотворяющей способности сперматозоидов, последние подвергались экспозиции в тестируемых водных вытяжках из донных отложений, после чего оплодотворение проводили в чистой стерильной воде [Dinnel et al., 1982]. В дополнение к стандартной методике прослеживали развитие эмбрионов и личинок в течение двух суток. Во втором опыте (тест с эмбрионами и личинками – эмбриотест) оплодотворение проводили в чистой морской воде, затем полученные зиготы перемещали в тестируемые экстракты из донных осадков, в них же проходило дальнейшее развитие эмбрионов и личинок [Beiras et al., 2003]. Подсчет личинок на стадии гастролы и среднего плутеуса 1-й стадии проводили с использованием следующих категорий: N (normal) – нормально развивающиеся личинки; R (retarded) – отстающие в развитии личинки; P₁ – уродли-

вые личинки с нарушениями формирования и дифференциации пищеварительной системы или личиночного скелета; P_2 – личинки, развитие которых остановилось на ранних стадиях (бластулы, гастролы).

Каждый из опытов проводили в четырех повторностях с использованием гамет от трех родительских пар. Количественный учет нормально и аномально развитых эмбрионов и личинок проводили на стадиях образования оболочки оплодотворения, гастролы (через 18 ч после начала эксперимента) и среднего плутеуса 1-й стадии (через 48 ч после начала эксперимента). Токсичность донных осадков оценивали с использованием критериев, приведенных в табл. 1.

Кроме стандартного метода подсчета процента нормальных и аномальных личинок, произведен расчет интегрального индекса токсичности ITI [Morrone et al., 2016], базирующегося на детальном анализе ингибирования и нарушения развития личинок морских ежей:

$$ITI = \sum_{i=1}^n \frac{S_i F_i}{100},$$

где S_i – количество баллов, присвоенных каждой категории аномалий; F_i – количество аномалий; 100 – количество просчитанных личинок.

Результаты экспериментов обрабатывали с помощью пакетов программ Excel и Statistica: определяли среднее арифметическое, стандартное отклонение; достоверность различий между выборками оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа по критерию Даннетта.

Т а б л и ц а 1
Критерии для оценки токсичности пробы

Степень загрязнения [Кобаяси и др., 1994]	
Доля нормально развитых личинок, %	Степень загрязнения
96–100	Отсутствие ингибирования развития
71–95	Слабое загрязнение (ингибирование)
51–70	Среднее загрязнение (ингибирование)
0–50	Сильное загрязнение (ингибирование)

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного спермиотеста выявлено, что процесс формирования зигот в вытяжках из донных отложений со всех станций проходил так же успешно, как и в контрольном образце (рис. 2). Уровень оплодотворения в водных вытяжках со станций 4, 5, 7 и 11 достоверно отличался от контрольных значений, а в вытяжках из донных осадков из районов мысов Фирсова и Лагерного превышал уровень контроля. Наименьшая доля оплодотворенных яйцеклеток, достоверно отличающаяся от контроля – 95 %, отмечена на ст. 7. В течение двух суток с момента образования зигот отмечено небольшое достоверное отличие в развитии личинок на станциях 3–6 и 11, 12. Наибольший процент отстающих в развитии и аномально развитых личинок выявлен на станциях 4 и 5 – 8,4 и 8,6 % соответственно.

По результатам эмбриотеста выявлены значительные различия между станциями отбора проб (рис. 3). На этапе формирования гастролы (18 ч экспозиции) достоверные отличия от контрольных значений отмечены на всех исследуемых станциях, кроме станций 3 и 6. В вытяжках из донных отложений со станций 8 и 13 до стадии гастролы не развивался ни один из эмбрионов, развитие остановилось на стадии формирования бластулы. В водных вытяжках из донных отложений, отобранных в районе м. Басаргина, 87 % личинок развивалось с выраженными задержками; в экстрактах из бух. Подъяпольского 55 % личинок отставали в развитии от физиологических норм, а 40 % развивались аномально.

По достижении личинками морского ежа стадии среднего плутеуса (конец вторых суток эксперимента) доля нормально развитых личинок отличалась от контроля на всех станциях, за исключением станций 3 и 4. На большинстве исследуемых станций отмечен слабый уровень загрязнения донных осадков. Доля нормально развитых личинок в водных вытяжках из донных отложений со ст. 7 составляла менее 1 %. Количество нормально развитых личинок на ст. 10 увеличилось до 52 %, что свидетельствует о том, что, несмотря на задержку развития на стадии гастролы, личинки смогли пройти дальнейшее развитие до стадии среднего плутеуса. Донные отложе-

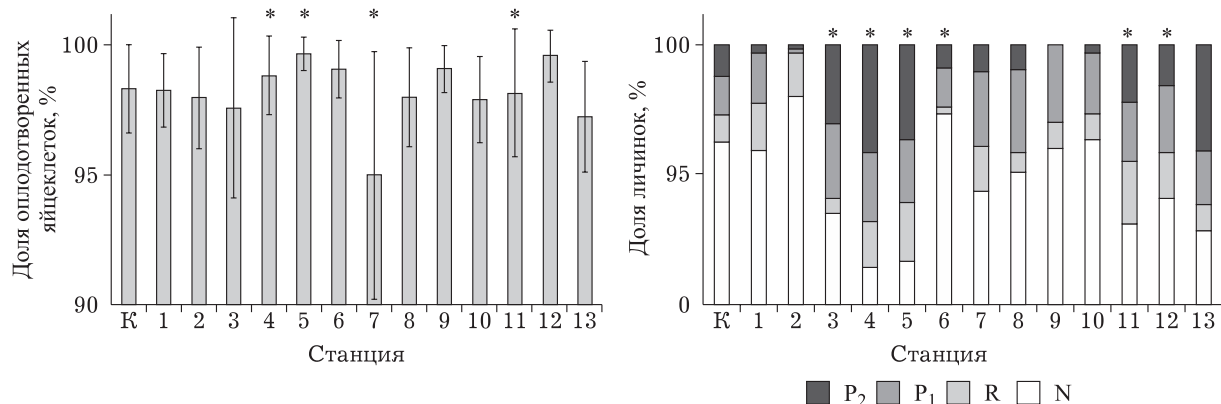


Рис. 2. Результаты оценки спермиотоксического воздействия водных вытяжек из донных осадков. N – нормально развивающиеся личинки; R – отстающие в развитии личинки; P₁ – уродливые личинки с нарушениями формирования и дифференциации пищеварительной системы или личиночного скелета; P₂ – личинки, развитие которых остановилось на ранних стадиях (бластулы, гастролы).* – отличие от контроля достоверно при $p \leq 0,05$

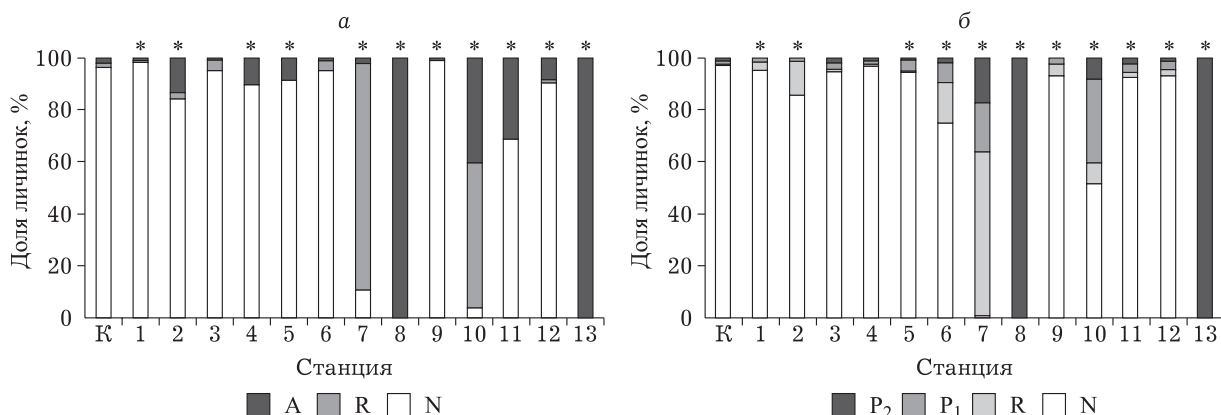


Рис. 3. Результаты оценки эмбриотоксического воздействия водных вытяжек из донных осадков. а – гастролы (18 ч экспозиции); б – плутеусы (48 ч экспозиции); N – нормально развивающиеся личинки; A – аномально развивающиеся гастролы; R – отстающие в развитии личинки; P₁ – уродливые личинки с нарушениями формирования и дифференциации пищеварительной системы или личиночного скелета; P₂ – личинки, развитие которых остановилось на ранних стадиях (бластулы, гастролы).* – отличие от контроля достоверно при $p \leq 0,05$.

ния со станций 7, 8 и 13, согласно стандартным критериям (см. табл. 1), оказали сильное ингибирующее воздействие на развитие личинок, со ст. 10 – среднее токсическое воздействие. Донные осадки со ст. 4 характеризовались отсутствием ингибирующих эффектов на личиночное развитие (нетоксичные осадки). Донные отложения с оставшихся станций отличались слабым ингибирующим воздействием.

Расчет интегрального индекса токсичности (ИТИ) донных осадков позволил дать количественную оценку разнокачественным аномалиям личиночного развития, выявленных в процессе проведения эмбриотеста с плоским морским ежом *S. mirabilis* (рис. 4). Высо-

кие значения индекса установлены для проб донных отложений со станций 8 (ИТИ = 10), 10 (ИТИ = 6,08) и 13 (ИТИ = 10), в которых подавляющее большинство личинок не просто отставало в развитии, а развивалось со значительными аномалиями. Наименьшее значение индекса получено для осадков со ст. 1 (ИТИ = 0,12).

Способность накапливать загрязняющие вещества напрямую зависит от физико-химических свойств донных осадков, например от их гранулометрического состава и содержания органического вещества (табл. 2). Самая высокая доля илстой и глинистой фракций обнаружена в пробах донных осадков из зал.

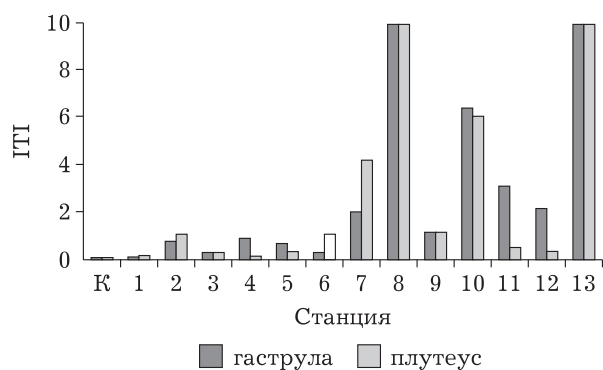


Рис. 4. Значения интегрального индекса токсичности донных осадков (ИТИ) из зал. Петра Великого

Находка. Наибольшее процентное содержание $C_{орг}$ также выявлено в грунтах со станций 11 (1,42 %) и 13 (1,33 %), расположенных в акватории зал. Находка. Содержание органическо-

го углерода в донных отложениях оставшихся станций варьировалось от 0,3 до 0,98 %.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные в ходе экспозиции сперматозоидов (спермиотест) в водных вытяжках из исследуемых донных осадков, показали отсутствие выраженного токсического или тератогенного эффекта на процессы личиночного развития на каждой из станций. Небольшой уровень аномалий и задержек в развитии (не более 7 %), вероятно, обусловлен снижением качества исходных гамет из-за экспозиции в вытяжке из донных осадков. Результаты эмбриотеста указывают на более высокую чувствительность данного подхода оценки токсичности донных осадков по срав-

Т а б л и ц а 2
Гранулометрический состав и содержание органического вещества в донных осадках зал. Петра Великого

№	Станция	Тип грунта (визуальная оценка)	C _{орг} , %	Гранулометрический состав, %		
				гравий (>2 мм)	песок (0,1–2 мм)	ил и глина (<0,1 мм)
Юго-западная часть (морской заповедник)						
1	о. Фуругельма, бух. Западная	Крупнозернистый песок с галькой	0,31 ± 0,07	70	30	0
2	бух. Сивучья, о. Веры	Крупнозернистый песок с галькой и ракушей	0,96 ± 0,14	80	19	0
Амурский залив						
3	м. Красный	Мелкозернистый песок с ракушей	0,55 ± 0,05	51	49	0
4	м. Фирсова	Мелкозернистый песок с галькой	0,43 ± 0,05	58	41	1
5	м. Лагерный	Крупнозернистый песок	0,94 ± 0,07	41	59	0
6	м. Купера	Крупнозернистый песок с крупной галькой	0,30 ± 0,10	69	31	0
Уссурийский залив						
7	м. Басаргина	Мелкозернистый песок с ракушей	0,37 ± 0,03	9	91	0
8	бух. Горностай	Мелкозернистый песок	0,57 ± 0,04	16	83	1
9	бух. Муравьиная	Мелкозернистый песок	0,70 ± 0,22	28	71	0
10	м. Полосатик, бух. Подъяпольского	Крупнозернистый песок с раку- шей	0,44 ± 0,05	78	22	1
Зал. Находка						
11	м. Шведова	Мелкозернистый заиленный песок	1,42 ± 0,08	41	56	3
12	бух. Врангеля, Береговое	Мелкозернистый песок	0,31 ± 0,03	0	96	3
13	бух. Козьмина, нефтепорт	Мелкозернистый заиленный песок	1,33 ± 0,04	5	79	15

нению со спермиотестом. Этот факт может быть связан с тем, что личиночные формы морских ежей являются более чувствительными к воздействию токсикантов по сравнению со сперматозоидами. Кроме того, во многих исследованиях подтвержден факт положительной корреляции между результатами эмбриотеста и содержанием загрязняющих веществ в донных отложениях [Losso et al., 2009; Carballeira et al., 2012].

По сравнению с классической шкалой оценки расчет интегрального индекса токсичности показал несколько отличные результаты. Так, донные отложения со ст. 7 по результатам расчета ИТИ на стадии среднего плутеуса характеризовались средним уровнем токсического воздействия, а со ст. 10 – высоким. В то же время при традиционном подходе к оценке донные осадки оказывали сильное (для ст. 7) и среднее (для ст. 10) ингибирующее воздействие. Данные отличия связаны с более детальным подходом к оценке состояния личинок при реализации интегрального метода. Так, для расчета индекса ИТИ необходим анализ личинок на предмет задержки развития либо серьезных морфологических изменений, с присвоением соответствующего балла (где 0 – отсутствие нарушений в развитии, а 10 – высокий уровень аномалий). При традиционном же подходе оценки используют две основные градации: процент нормально и аномально развитых личинок. Именно поэтому использование подсчета интегрального индекса токсичности в настоящее время является более предпочтительным для интерпретации результатов эмбриотеста, что подтверждается как работами зарубежных исследователей [Morrone et al., 2016; Duan et al., 2018], так и нашими результатами.

По результатам биотестирования в 2017 г. наиболее неблагоприятная ситуация для личиночного развития плоского морского ежа наблюдалась в экстрактах донных отложений из Уссурийского залива (бухты Горностай и Подъяпольского) и зал. Находка (бух. Козьмина, нефтепорт). Эти районы зал. Петра Великого известны высоким уровнем антропогенной нагрузки и загрязнения, поэтому привлекают внимание исследователей. Возможной причиной высокой токсичности донных осадков Уссурийского залива в 2017 г. являлось увеличение уровня загрязнения вод

и донных отложений акватории [Ежегодник..., 2018]. Так, в июле 2017 г. отмечена аномально высокая средняя концентрация нефтяных углеводородов в воде за период с 2012 по 2017 г. (более 9 ПДК), в 1,8 раза превышающая значения 2016 г. Также повышенное содержание НУ (1,8 ДК) выявлено и в донных отложениях. Кроме того, содержание ДДТ по сравнению с 2016 г. увеличилось в 2,3 раза, а максимальные концентрации этого токсиканта выявлены в донных осадках в районе между м. Басаргина и бух. Горностай. Таким образом, результаты нашего исследования соотносятся с данными о химическом загрязнении залива в период проведения исследований.

Анализ экологического состояния бух. Козьмина, проведенный в 2008 г., выявил высокие концентрации нефтеуглеводородов, фенолов и хлорорганических пестицидов в донных отложениях данной акватории [Григорьева, Питрук, 2010]. Биотест с морским ежом *S. mirabilis*, проведенный в 2009 г., показал низкий уровень оплодотворения яйцеклеток в воде, отобранной в районе м. Красного, бухт Врангеля и Козьмина; дальнейшее развитие эмбрионов было полностью подавлено [Журавель, Подгурская, 2014]. В донных осадках бух. Козьмина в 2017 г. выявлена повышенная концентрация НУ (2,7 ДК) [Ежегодник..., 2018], что может быть подтверждено высоким содержанием органического углерода в исследуемой нами пробе донных отложений из данной акватории (см. табл. 2). Положительная корреляция между содержанием C_{org} и таких органических загрязняющих веществ, как ПАУ, ПХБ и НУ, подтверждена во многих исследованиях [Wang et al., 2014; Arfaeina et al., 2017; Min et al., 2020; Baran et al., 2021]. Наличие поллютантов могло оказать негативное воздействие на личиночное развитие морских ежей в вытяжках из донных отложений с этой станции.

В целом полученные нами данные о токсичности донных отложений зал. Петра Великого подтверждают тренд к снижению антропогенного воздействия, вызванного спадом промышленного производства, и последующее улучшение экологической обстановки. В первую очередь это касается Амурского залива. Основную долю в общем объеме поступающих в него сточных вод традиционно занимали коммунально-бытовые стоки, содержащие

в большей степени малотоксичные органические и биогенные вещества [Лукьянова и др., 2012]. По результатам экотоксикологических исследований на протяжении 2003–2014 гг. здесь отмечалось улучшение экологического состояния [Черкашин и др., 2019]. Однако некоторые районы Уссурийского залива и зал. Находка подвержены высокому уровню нагрузки на природные среды. Акватория бух. Горностай испытывает влияние рекультивированного полигона твердых бытовых отходов г. Владивостока, особенно в период дождей. Подкисленная полигонная вода, насыщенная метаном, обладающая способностью к растворению соединений металлов, выносит загрязнения в прибрежные зоны [Яцук и др., 2012]. Активное хозяйственное и промышленное освоение бухт Козьмина и Врангеля способствует росту антропогенного влияния как на акваторию самих бухт, так и всего зал. Находка [Гамаюнова и др., 2016]. Ежегодный рост спроса на энергоносители (нефть и уголь) в странах Азиатско-Тихоокеанского региона порождает увеличение антропогенного прессы на экосистемы, примыкающие к портовым районам, таким как нефтепорт в бух. Козьмина и угольные порты.

ВЫВОДЫ

1. Донные отложения зал. Петра Великого с большинства исследуемых станций характеризовались низким уровнем токсичности, за исключением осадков, отобранных в околопортовых зонах (бухты Козьмина и Подъяпольского) и вблизи рекультивированного полигона твердых бытовых отходов г. Владивостока (бух. Горностай).

2. Тест с эмбрионами и личинками плоского морского ежа *S. mirabilis* (эмбриотест) является более чувствительным методом оценки воздействия загрязненных сред по сравнению с тестом на спермиотоксичность (спермиотест). Результаты эмбриотеста достоверно отражают негативные изменения в состоянии донных отложений.

3. Использование интегрального индекса токсичности ИТИ для интерпретации данных эмбриотеста является более предпочтительным, так как в отличие от стандартного метода оценки токсичности проб позволяет бо-

лее детально оценить степень и выраженность морфологических изменений личинок.

Авторы выражают благодарность д-ру биол. наук, профессору Международной кафедры ЮНЕСКО “Морская экология” Института Мирового океана ДВФУ Н. К. Христофоровой за организацию экспедиционных работ и предоставление проб донных осадков.

ЛИТЕРАТУРА

- Белан Т. А., Мощенко А. В., Липавская Т. С. Долговременные изменения уровня загрязнения морской среды и состава бентоса в заливе Петра Великого // Динамика морских экосистем и современные проблемы сохранения биологического потенциала морей России. Владивосток: Дальнаука, 2007. С. 50–74.
- Ващенко М. А., Жадан П. М., Альмяшова Т. Н., Ковалева А. Л., Слинько Е. Н. Оценка уровня загрязнения донных осадков Амурского залива (Японское море) и их потенциальной токсичности // Биология моря. 2010. Т. 36, № 5. С. 354–361 [Vashchenko M. A., Zhadan P. M., Almyashova T. N., Kovalyova A. L., Slinko E. N. Assessment of the contamination level of bottom sediments of Amursky bay (Sea of Japan) and their potential toxicity // Russian Journal of Marine Biology. 2010. Vol. 36, N 5. P. 359–366.]
- Временные методические рекомендации по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов загрязняющих веществ для морских вод. М.: Государственный Комитет Российской Федерации по рыболовству, 2003. 114 с.
- Гамаюнова О. А., Христофорова Н. К., Дроздовская О. А. Химико-экологическая и микробиологическая характеристика вод бухты Козьмина (залив Петра Великого, Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2016. Т. 187, № 3. С. 39–46.
- Горбачева Е. А. Экотоксикологические исследования донных отложений центральных и восточных районов Баренцева моря // Вестн. МГТУ. 2020. Т. 23, № 2. С. 122–130. doi: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-122-130
- Григорьева Н. И., Питрук Д. Л. Комплексная химико-экологическая оценка состояния бухт Козьмина – озеро Второе (залив Находка) // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 162. С. 225–241.
- Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2017 году. Владивосток: Администрация Приморского края, 2018. 233 с.
- Доклад об экологической ситуации в Приморском крае в 2020 году. Владивосток: Правительство Приморского края, 2021. 269 с.
- Ежегодник 2017. Качество морских вод по гидрохимическим показателям / сост. А. Н. Коршенко. М.: Наука, 2018. 281 с.
- Журавель Е. В., Подгурская О. В. Раннее развитие плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* в воде из различных районов залива Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 178. С. 206–216.
- Журавель Е. В., Черняев А. П., Соколова Л. И., Чудовская Е. М., Прошина М. А. Углеводороды и полихлорированные бифенилы в донных осадках зал. Находка (зал. Петра Великого, Японское море): оценка уров-

- ня загрязнения и потенциальной токсичности // Сиб. экол. журн. 2015. Т. 22, № 6. С. 931–940. doi 10.15372/SEJ20150613 [Zhuravel E. V., Chernyaev A. P., Sokolova L. I., Chudovskaya Ye. M., Proshina M. A. Hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in the bottom sediments from the Nakhodka Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan): Assessment of pollution level and potential toxicity // Contemporary Problems of Ecology. 2015. Vol. 8, N 6. P. 772–779.]
- Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М.: Изд-во “Флинта, Наука”, 2009. 532 с.
- Кашенко С. Д. Влияние воды из залива Находка (залив Петра Великого Японского моря) на раннее развитие морского ежа *Strongylocentrotus intermedius* // Биология моря. 2000. Т. 26, № 5. С. 320–323. [Kashenko S. D. Effect of water from Nakhodka Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) on early development of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* // Russian Journal of Marine Biology. 1994. Vol. 20, N 6. P. 351–360.]
- Кобаяси Н., Найдено Т. Х., Ващенко М. А. Стандартизация биотеста с использованием зародышей морского ежа // Биология моря. 1994. Т. 20, № 6. С. 457–464. [Kobayashi N., Naidenko T. K., Vashchenko M. A. Standardization of the biotest based on using of sea urchin embryos // Russian Journal of Marine Biology. 1994. Vol. 20, N 6. P. 351–360.]
- Лукиянова О. Н., Журавель Е. В., Чульчиков Д. Н., Мазур А. А. Экоотоксикологическая оценка качества вод западнокамчатского шельфа // Изв. ТИНРО. 2015. Т. 182, № 3. С. 190–196. doi: 10.26428/1606-9919-2015-182-190-196
- Лукиянова О. Н., Журавель Е. В., Чульчиков Д. Н., Подгурская О. В. Оценка экологического состояния северо-восточного шельфа острова Сахалин: гидрохимический анализ и биотестирование // Изв. ТИНРО. 2014. Т. 177. С. 182–192.
- Лукиянова О. Н., Черкашин С. А., Симоконов М. В. Обзор современного экологического состояния залива Петра Великого (2000–2010 гг.) // Вестн. ДВО РАН. 2012. Т. 162, № 2. С. 55–63.
- Маркина Ж. В., Айздайчер Н. А. Оценка качества вод Амурского залива Японского моря на основе биотестирования с применением одноклеточной водоросли *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. // Сиб. экол. журн. 2011. Т. 18, № 1. С. 99–105. [Markina Zh. V., Aizdaicher N. A. *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin bioassay of water quality of Amur bay (the Sea of Japan) // Contemporary Problems of Ecology. 2011. Vol. 4, N 1. P. 74–79.]
- Мензорова Н. И., Рассказов В. А. Использование различных тест-систем и биохимической индикации для мониторинга экологического состояния бухты Троицы (Японское море) // Биология моря. 2007. Т. 33, № 2. С. 144–149. [Menzorova N. I., Rasskazov V. A. Application of different test systems and biochemical indicators for environmental monitoring of the Troitsa bay, Sea of Japan // Russian Journal of Marine Biology. 2007. Vol. 33, N 6. P. 118–124.]
- Мощенко А. В., Белан Т. А., Борисов Б. М., Лишавская Т. С., Севастьянов А. В. Современное загрязнение донных отложений и экологическое состояние макрозообентоса в прибрежной зоне Владивостока (залив Петра Великого Японского моря) // Изв. ТИНРО. 2019. Т. 196. С. 155–181. doi: 10.26428/1606-9919-2019-196-155-181
- Огородникова А. А. Эколого-экономическая оценка воздействия береговых источников загрязнения на природную среду и биоресурсы залива Петра Великого. Владивосток: Изд-во “ТИНРО-центр”, 2001. 193 с.
- Петелин В. П. Гранулометрический анализ донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
- Потапова Л. И., Куприн П. Н., Фролова Л. В. Определение углерода органического вещества в донных осадках // Методы исследования органического вещества в океане. М.: Наука, 1980. С. 50–56.
- Тюрин А. Н. Методы биоиндикации качества морской среды // Биота и среда заповедников Дальнего Востока. 2011. № 1. С. 152–159.
- Христофорова Н. К., Кобзарь А. Д., Бойченко Т. В., Попова А. В. Биоиндикация состояния вод залива Посыета (залив Петра Великого, Японское море) // Биота и среда заповедных территорий. 2018. № 1. С. 92–99.
- Христофорова Н. К., Кобзарь А. Д., Григоров Р. А. Уссурийский залив: загрязнение прибрежных вод тяжелыми металлами и его оценка с использованием бурых водорослей // Вестн. ДВО РАН. 2020. Т. 211, № 3. С. 116–125. doi: 10.37102/08697698.2020.211.3.012
- Черкашин С. А. Биотестирование: терминология, задачи, основные требования и применение в рыбохозяйственной токсикологии // Изв. ТИНРО. 2001. Т. 128, № 3. С. 1020–1035.
- Черкашин С. А., Симоконов М. В., Пряжевская Т. С. Анализ экотоксикологического состояния Амурского залива (Японское море) на основе химических и токсикологических показателей // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46, № 3. С. 308–317. doi: 10.31857/S0321-0596463308-317 [Cherkashin S. A., Simokon' M. V., Pryazhevskaya T. S. Analysis of the ecotoxicological conditions of Amur bay, the Sea of Japan, by chemical and toxicological characteristics // Water Resources. 2019. Vol. 46, N 3. P. 432–442.]
- Черняев А. П., Нигматулина Л. В. Мониторинг качества прибрежных вод залива Петра Великого (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 230–238.
- Яцук А. В., Обжиров А. И., Гресов А. И., Коровицкая Е. В. Газогеохимия и геоэкология полигона твердых бытовых отходов г. Владивостока // Современное экологическое состояние залива Петра Великого Японского моря. Владивосток: Изд. дом ДВФУ, 2012. С. 426–437.
- Abessa D. M. S., Bicego M. C., Souza E. C. P. M., Zaroni L. Z., Rachid B. R. F., Arnalot E. C., Fillman G., Readm J., Depledge M. Using rapid assessment of marine pollution (RAMP) techniques to assess the quality of marine sediments // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018. Vol. 13. P. 99–106. doi: 10.5132/eec.2018.02.12
- Arfaeina H., Asadgol Z., Ahmadi E., Seifi M., Moradi M., Dobaradaran S. Characteristics, distribution and sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) in coastal sediments from the heavily industrialized area of Asalouyeh, Iran // Water Sci. Technol. 2017. Vol. 76, N 12. P. 3340–3350. doi: 10.2166/wst.2017.500
- Arsilan O. C., Parlak H., Boyacoglu M., Karaaslan M. A. Determination of sediment and water contamination by sea urchin embryotoxicity test with *Paracentrotus lividus* and *Arbacia lixula* // Fresenius Environ. Bull. 2017. Vol. 26, N 6. P. 3956–3962.
- ASTM. Guide for conducting static acute toxicity tests with Echinoid embryos. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2012. 23 p.

- Baran A., Klimkowicz-Pawlas A., Ukalska-Jaruga A., Mierzwa-Hersztek M., Gondek K., Szara-Bąk M., Tarnawski M., Spalek I. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the bottom sediments of a dam reservoir, their interaction with organic matter and risk to benthic fauna // *J. Soils Sediments*. 2021. Vol. 21, N 5. P. 2418–2431. doi: 10.1007/s11368-021-02968-1
- Beiras R., Bellas J., Fernandez N., Lorenzo J. I., Cobeño-García A. Assessment of coastal marine pollution in Galicia (NW Iberian Peninsula); metal concentrations in seawater, sediments and mussels (*Mytilus galloprovincialis*) versus embryo-larval bioassays using *Paracentrotus lividus* and *Ciona intestinalis* // *Mar. Environ. Res.* 2003. Vol. 56, N 4. P. 531–553. doi:10.1016/S0141-1136(03)00042-4
- DeMiguel-Jimenez L., Etxebarria N., Lekube X., Izaguirre U., Marigomez I. Influence of dispersant application on the toxicity to sea urchin embryos of crude and bunker oils representative of prospective oil spill threats in Arctic and Sub-Arctic seas // *Mar. Pollut. Bull.* 2021. Vol. 172. 112922. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112922
- Dinnel P. A., Stober Q. J., Crumley S. C., Nakatani R. E. Development of a sperm cell toxicity test for marine water // *Aquat. Toxicol.* 1982. Vol. 1, N 3. P. 82–98.
- Duan M., Xiong D., Yang M., Xiong Y., Ding G. Parental exposure to heavy fuel oil induces developmental toxicity in offspring of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. Vol. 159. P. 109–119. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.067
- Frances A. J., King C. K., Reichelt-Brushett A. J., Harrison P. L. Fuel oil and dispersant toxicity to the Antarctic sea urchin (*Sterechinus neumayeri*) // *Environ. Toxicol. Chem.* 2017. Vol. 36, N 6. P. 1563–1571. doi: 10.1002/etc.3679
- Gregorin C., Albarano L., Somma E., Costantini M., Zupo V. Assessing the Ecotoxicity of Copper and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Comparison of Effects on *Paracentrotus lividus* and *Botryllus schlosseri*, as Alternative Bioassay Methods // *Water*. 2021. Vol. 13, N 5. P. 711. doi: 10.3390/w13050711
- Min L., Xiaolin L., Chunyang L., Dongqi W., Dongyan L., Gan Z., Guibin J., Lingxin C. Human impacts on polycyclic aromatic hydrocarbon distribution in Chinese intertidal zones // *Nat. Sustain.* 2020. Vol. 3. P. 878–884. doi: 10.1038/s41893-020-0565-y
- Moreira L. B., Saes R. V. S. T., Peres T. F., Taniguchi S., Bicego M. C., Marins R. V., Abessa D. M. S. A. Toxicity of sediments and dredged material from a semi-arid coastal system to marine invertebrates // *Ecotoxicol. Environ. Contam.* 2019. Vol. 14, N 1. P. 79–89. doi: 10.5132/eec.2019.01.10
- Morroni L., Pinsino A., Pellegrini D., Regoli F., Matranga V. Development of a new integrative toxicity index based on an improvement of the sea urchin embryo toxicity test // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2016. Vol. 12. P. 1–5.
- NBR/ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT-NBR15350, Ecotoxicologia aquática – Toxicidade de crônica de curtaduração – Método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea), ABNT, Brasil. 2012. 31 p.
- Rouchon A. M., Phillips N. E. Acute toxicity of copper, lead, zinc and their mixtures on the sea urchin *Evechinus chloroticus* // *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* 2017. Vol. 51, N 3. P. 333–355. doi: 10.1080/00288330.2016.1239643
- EPS1/RM/27. Biological Test Method: Fertilization Assay Using Echinoids (Sea Urchins and Sand Dollars). Environment Canada, Ottawa, Ontario, 2011. 140 p.
- U. S. Environmental Protection Agency. Sperm cell toxicity tests using the sea urchin (*Arbacia punctulata*). EPA 833-C-09-001. Cincinnati, Ohio, 2009. 21 p.
- U. S. Environmental Protection Agency. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to west coast marine and estuarine organisms. EPA/600/R-95-136. Cincinnati, Ohio, 1995. 661 p.
- U. S. Environmental Protection Agency. Short-term methods for estimating the chronic toxicity of effluents and receiving waters to marine and estuarine organisms. EPA-821-R-02-014. Washington, DC, 2002. 486 p.
- Wang Z., Liu Z., Xu K., Mayer L. M., Zhang Z., Kolker A. S., Wu W. Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface coastal sediments of the northern Gulf of Mexico // *Geochem Trans.* 2014. Vol. 15, N 2. doi: 10.1186/1467-4866-15-2
- Xu X., Li Y., Wang Y., Wang Y. Assessment of toxic interactions of heavy metals in multi-component mixtures using sea urchin embryo-larval bioassay // *Toxicol. In Vitro*. 2011. Vol. 25, N 1. P. 294–300. doi: 10.1016/j.tiv.2010.09.007
- Losso C., Novelli A. A., Picone M., Ghetti P. F., Ghiardini A. V. Porewater as a matrix in toxicity bioassays with sea urchins and bivalves: evaluation of applicability to the Venice lagoon (Italy) // *Environ Int.* 2009. Vol. 35, N 1. P. 118–126. doi: 10.1016/j.envint.2008.09.010
- Carballeira C., Ramos-Gómez J., Martín-Díaz L., DelValls T. A. Identification of specific malformations of sea urchin larvae for toxicity assessment: Application to marine pisciculture effluents // *Marine Environmental Research*. 2012. Vol. 77. P. 12–22. doi: 10.1016/j.marenvres.2012.01.001

Assessment of toxicity of bottom sediments from coastal areas of Peter the Great Gulf (Sea of Japan)

M. A. MAZUR¹, E. V. ZHURAVEL²

¹*A. V. Zhirmunsky National Scientific Center of Marine Biology of FEB RAS
690041, Vladivostok, Palchevskogo str., 17
E-mail: proshinamarina94@gmail.com*

²*Far Eastern Federal University
690922, Vladivostok, Russky Island, Ajax Bay, 10*

Toxicity of bottom sediments from some areas of the Peter the Great Gulf has been studied using bioassay with embryos and larvae of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864). Based on the calculation of the integral toxicity index (ITI), different inhibition rates of early larval development are identified in elutriate from the bottom sediments. The effects are the most negative in the coastal zone of the Vladivostok in Gornostay Bay (Ussuriysky Bay) and in the Kozmina Bay (the Nakhodka Bay). Larvae in elutriate from the were characterized by significant anomalies, and the ITI was maximal (ITI = 10). A high percentage of abnormally developed larvae was detected in a sample from Podyapolsky Bay (ITI = 6.08). The results of the study confirm the decrease in the anthropogenic press on the Peter the Great Gulf, except for of local areas adjacent to sea ports and a reclaimed solid domestic waste landfill.

Key words: bottom sediments, pollution, bioassay, sea urchin embryos and larvae, Peter the Great Gulf.