

УДК 574.24(265.5)

О.Н. Лукьянова^{1,2}, Е.В. Журавель^{2,3}, Д.Н. Чульчечков¹, А.А. Мазур^{2*}¹ Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4;² Дальневосточный федеральный университет,
690600, г. Владивосток, ул. Октябрьская, 27;³ Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН,
690059, г. Владивосток, ул. Пальчевского, 17

ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД ЗАПАДНОКАМЧАТСКОГО ШЕЛЬФА

Проведено исследование качества морских вод на западнокамчатском шельфе в начале лета 2014 г. Распределение температуры и солености было типичным для данного района и сезона. На основе результатов эмбриотеста с плоским морским ежом *Scaphechinus mirabilis* показано нарушение эмбрионального и личиночного развития тест-объекта в морской воде на отдельных станциях. Мозаичное распределение токсичности воды может быть связано с влиянием отходов топлива рыбодобывающего и транспортного флота в данном районе.

Ключевые слова: Охотское море, западнокамчатский шельф, гидрохимический анализ, биотестирование, морские ежи, нефтедобыча.

Lukyanova O.N., Zhuravel E.V., Chulchekov D.N., Mazur A.A. Ecotoxicological assay of seawater quality on the western Kamchatka shelf // Izv. TINRO. — 2015. — Vol. 182. — P. 190–196.

Ecotoxicological assay of seawater quality along the shelf of West Kamchatka, including the areas of oil and gas deposits, was conducted in the summer of 2014. Temperature and salinity conditions were usual for summer season, as well as the field of density currents. For introduction of modern and representative bioassay methods in practice of environmental monitoring in the regions of oil and gas production and transportation, embryogenesis of sand dollar *Scaphechinus mirabilis* was used for biotesting. The stations with high number of the embryos and larvae abnormalities had mosaic distribution — this effect may be connected with shipping of fishing and merchant vessels.

Key words: Okhotsk Sea, shelf of West Kamchatka, chemical analysis, bioassay, sea urchin, oil processing.

* Лукьянова Ольга Николаевна, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ТИНРО-центра, e-mail: olga.lukyanova@tinro-center.ru; Журавель Елена Владимировна, кандидат биологических наук, доцент ДВФУ, научный сотрудник ИБМ ДВО РАН, e-mail: zhrvl@rambler.ru; Чульчечков Денис Николаевич, младший научный сотрудник, e-mail: denis.chulchekov@tinro-center.ru; Мазур Андрей Александрович, студент, e-mail: kaktus93@bk.ru.

Lukyanova Olga N., D.Sc., leading researcher, e-mail: olga.lukyanova@tinro-center.ru; Zhuravel Elena V., Ph.D., assistant professor, researcher, e-mail: zhrvl@rambler.ru; Chulchekov Denis N., junior researcher, e-mail: denis.chulchekov@tinro-center.ru; Mazur Andrey A., student, e-mail: kaktus93@bk.ru.

Введение

Шельфовые воды западной Камчатки относятся к одним из наиболее рыбопродуктивных районов Мирового океана. Промысловые запасы рыб, моллюсков, ракообразных, морских млекопитающих и водорослей представляют собой значительную часть биоресурсов Охотского моря и треть всей сырьевой базы российского рыболовства на Дальнем Востоке. Камчатский и другие виды крабов, лососевые, сельдь, камбалы, треска, минтай, навага — все биоразнообразие региона является уникальной частью природного капитала России. По оценкам 2014 г. стоимость биоресурсов составила 2706980 тыс. долл. — 11,5 % общей стоимости биоресурсов Охотского моря (Лукьянова, Огородникова, 2015).

Шельфовые воды западной Камчатки, как и вся основная акватория Охотского моря, не испытывают существенного антропогенного загрязнения. По данным 2004 г. уровень загрязнения донных отложений значительно ниже того, при котором наблюдается негативное воздействие на биоту (Ширков и др., 2006). Однако в ближайшие годы ситуация может измениться. В этом районе разведаны значительные запасы углеводородов — более 6000 млн т в нефтяном эквиваленте, что с учетом сложившейся в России извлекаемости запасов в 36 % приближается к 2200 млн т условного топлива. 60 % запасов составляет нефть, 37 % — газ и 3 % — конденсат (Глухова, Кудинов, 2003). Лицензионные участки нефтедобычи находятся на акватории Западно-Камчатской и Камчатско-Курильской рыбопромысловых подзон. Изыскательские работы в этом районе в последнее время активизировались.

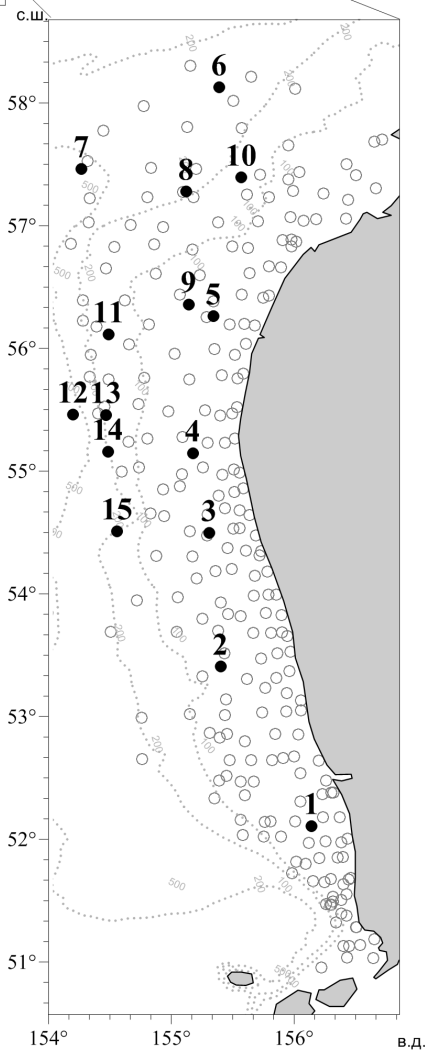
Для оценки экологической ситуации в районах нефтедобычи используются различные химические и биологические показатели. Одним из способов интегральной оценки качества среды является метод биотестирования, который учитывает синергизм и антагонизм взаимодействия различных загрязняющих веществ, присутствующих в морской воде. В дальневосточных морях для биотестирования используют различные виды тестов с эмбрионами и личинками морских ежей (Кашенко, 2009; Журавель, Подгурская, 2014; Лукьянова и др., 2014), которые отличаются высокой чувствительностью к различным поллютантам и позволяют выявить загрязнение среды при поступлении токсикантов из разнообразных источников. Токсические вещества оказывают тератогенное действие на эмбриогенез, влияя на биосинтез нуклеиновых кислот и белков, окисление липидов и проницаемость мембран. Изменения на молекулярном уровне вызывают морфологические патологии. Наблюдаемые аномалии, степень задержки развития и процент гибели эмбрионов дают количественную характеристику воздействия как физико-химических параметров среды (соленость, температура), так и загрязняющих веществ различной природы (тяжелых металлов, нефтепродуктов, детергентов и т.д.) (Rial et al., 2014). Эмбрионы и личинки морских ежей включены в качестве рекомендуемых тест-объектов в нормативные документы Российской Федерации*.

Целью данной работы является оценка качества вод шельфа западной Камчатки методом биотестирования с использованием эмбрионов и личинок плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis*.

Материалы и методы

Пробы воды для экотоксикологических исследований были отобраны во время комплексной экспедиции ТИНРО-центра на НИС «ТИНРО» 8–24.06.2014 г. вдоль западнокамчатского шельфа по заданным изобатам (от 10 до 50 м) в северном направлении от мыса Лопатка до мыса Утколокского. С 26.06 по 18.07.2014 г. проходил второй этап работ на изобатах от 50 до 460 м в южном направлении от горловины зал. Шелихова до 51°40' с.ш. (рис. 1). Временной промежуток между соседними станциями на разрезе, расстояние между которыми составляло 5–10 миль, не превышал суток. Одновремен-

* Временные методические рекомендации по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов загрязняющих веществ для морских вод. М.: Государственный Комитет Российской Федерации по рыболовству, 2003. 114 с.



но измеряли содержание кислорода и соленость воды по вертикальному профилю, используя гидрологический комплекс Sea Bird Electronics (USA), который включал в себя гидрологический зонд SBE Sealogger CTD model 25, пробоотборник Carousel SBE model 32 и бортовой блок управления пробоотборником Deck Unit SBE model 33. Данная конфигурация обеспечивала сбор гидрологической информации в режиме реального времени.

Рис. 1. Карта-схема района исследования: ○ — гидрологические станции; ● — станции отбора проб воды для биотестирования
 Fig. 1. Scheme of the surveyed area: ○ (white dots) — oceanographic stations; ● (black dots) — water sampling for bioassay

Для биотестирования пробы воды были отобраны из поверхностного слоя на 15 станциях (рис. 1), заморожены и хранились при температуре $-18...-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ до начала периода нереста морских ежей *S. mirabilis* (начало августа), когда было проведено их биотестирование. Возможность проведения биотестирования в пробах воды после замораживания показана ранее (Beiras, Saco-Alvares, 2006).

Морских ежей *S. mirabilis* для проведения биотестирования собирали в бухте Средней зал. Восток (зал. Петра Великого, Японское море) на глубине 4,0–4,5 м. В контрольном опыте использовали профильтрованную и обработанную ультрафиолетом морскую воду из зал. Восток. Нерест взятых в опыт животных стимулировали введением в перивисцеральную полость 0,2 мл 0,5 М КСl. Яйцеклетки получали и готовили к эксперименту по стандартной методике (Бузников, Подмарев, 1975). Для проведения биотестирования использовали методику эмбриотеста, разработанную Кобаяси (Kobayashi, 1977; Кобаяси и др., 1994). Качество половых клеток предварительно проверяли с помощью оплодотворения и последующего определения процента

нормальных зигот. Яйцеклетки с уровнем оплодотворения ниже 95 % не использовали. Экспозиции в тестируемой воде (1 час) подвергали как яйцеклетки, так и сперматозоиды. После оплодотворения подсчет нормальных и аномальных эмбрионов и личинок проводили под микроскопом на основных индикаторных стадиях: 1 — образование оболочки оплодотворения; 2 — бластула; 3 — гастрюла; 4 — ранний плутеус 1-й стадии; 5 — средний плутеус 1-й стадии.

Опыты проводили в трех повторностях, используя гаметы от трех родительских пар, в каждом опыте просчитывали эмбрионы и личинки в четырех полях зрения. В ходе эмбриогенеза оценивали количество аномалий на всех стадиях развития, степень отставания развития и выживание личинок. Для подсчета фиксировали часть зигот, эмбрионов и личинок 0,02 %-ным раствором глутаральдегида.

Число нормальных эмбрионов и личинок пересчитывали в проценты по отношению к контролю. Результаты экспериментов обрабатывали с помощью пакетов программ Excel и Statistica: определяли среднее арифметическое, стандартное отклонение, достоверность различий между выборками по критерию Стьюдента.

Результаты и их обсуждение

В период съемки в северо-восточной части Охотского моря наблюдалась синоптическая ситуация, характерная для летнего периода. Температура воды и соленость на поверхности исследуемой акватории изменялись от 4 до 13 °С и от 24,50 до 32,75 епс (рис. 2). Низкие значения термогалинных характеристик наблюдались в период проведения первого этапа съемки (8–24 июня) в прибрежной полосе (до 50-метровой изобаты, станции 1–5). Вдоль берега наблюдался распресненный (24,5–31,5 епс) относительно холодный (5–8 °С) поверхностный слой воды.

По сравнению со среднемноголетними значениями температура воды на поверхности повсеместно была выше климатической нормы. Аномалии температуры изменялись в пределах от 2 до 8 °С.

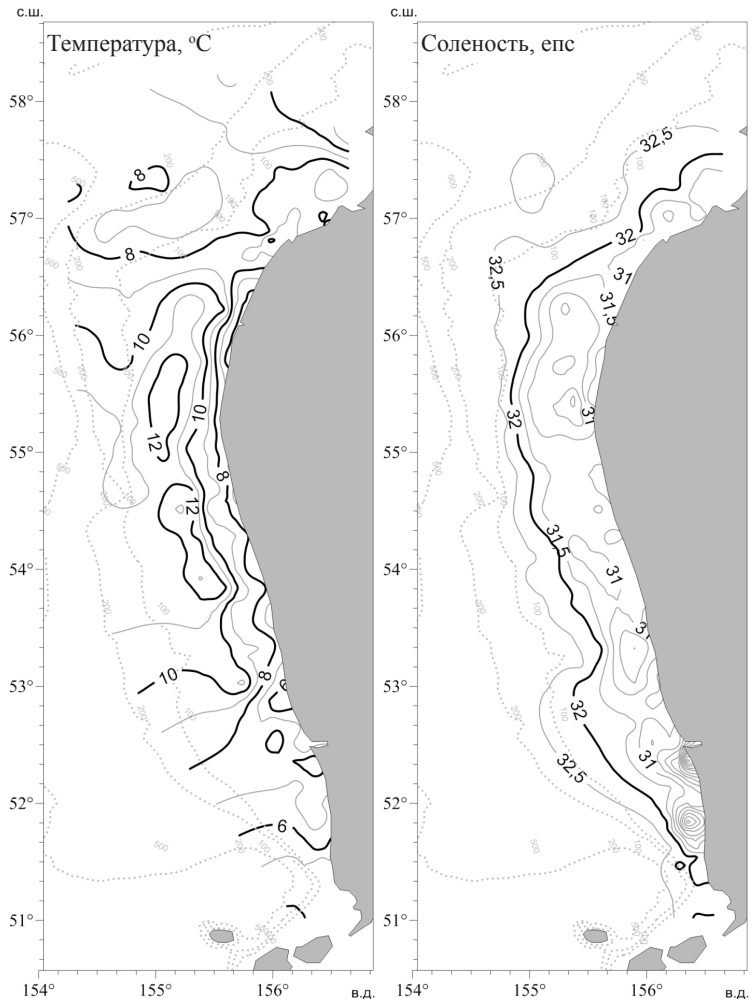


Рис. 2. Горизонтальное распределение температуры и солёности в Охотском море на шельфе западной Камчатки в июне-июле 2014 г.

Fig. 2. Spatial distribution of temperature and salinity at the sea surface layer on the shelf of West Kamchatka in June-July, 2014

Более высокие значения термогалинных характеристик наблюдались в период проведения второго этапа съемки (26 июня — 18 июля) над материковым склоном. За счет интенсивного притока тепла солнечной радиации температура воды на поверхности увеличилась в среднем на 2–4 °С и изменялась от 7,2 до 13,0 °С (рис. 2). Распределение солености носило более выраженный меридиональный характер и изменялось в узком диапазоне — от 32,60 до 32,75 епс с максимальными значениями более 32,75 епс в мористой части съемки (рис. 2).

Соленость является более консервативной характеристикой, чем температура. Если область распресненных вод обозначить изогалиной 32 епс, то на поверхности достаточно хорошо прослеживается фронтальная зона между солеными морскими и распресненными прибрежными водами (рис. 2). Влияние материкового стока на поверхности повсеместно наблюдалось над 50-метровой изобатой, а южнее 54° с.ш. еще мористее. Такая ситуация могла возникнуть вследствие маловетреной погоды, когда менее плотные распресненные воды растекаются по поверхности, практически не перемешиваясь с нижележащими более плотными водами.

В целом распределение солености в период съемки было обусловлено речным стоком и динамическими факторами (адвекцией, приливным и ветровым перемешиванием). В области распространения прибрежных вод соленость на поверхности была на 1–2 епс ниже среднесуточных значений. По мере удаления от берега аномалии солености уменьшались (рис. 2). Отрицательные аномалии солености в прибрежной зоне могли быть обусловлены тем, что весной и в начале лета материковый сток был выше среднесуточного.

В данном районе хорошо прослеживается Западно-Камчатское течение, стрезень которого проходит по внешней границе шельфа. Компенсационное течение представлено цепью вдольбереговых антициклонических вихрей. Эти факторы оказывают влияние на распределение загрязняющих веществ.

Результаты экотоксикологических экспериментов показали, что эмбриональное развитие морских ежей в пробах воды с каждой станции происходило по-разному. Только на четырех станциях (7, 11, 12, 14) количество нормальных эмбрионов и личинок практически не отличалось от контроля (98–100 %) или было даже выше контрольных показателей на всех стадиях развития — оплодотворение, бластула, гастрюла, ранний и средний плутеусы (рис. 3).

Наибольшие отклонения от контроля на стадии оплодотворения наблюдались на станциях 2 — только 56 % нормальных оплодотворенных яйцеклеток, 8 — 77 %, 9 — 74 %, 10 — 63 %, 13 — 19 % и 15 — 23 %. В нормальных условиях показатель оплодотворения близок к 100 %. Эта стадия весьма чувствительна к внешним воздействиям, и в тест-системе американского исследователя П.А. Диннела (1995), основанной на оплодотворяющей способности сперматозоидов (ОСС-тест), все биотестирование проводят за 30 мин, определяя только процент оплодотворенных яйцеклеток. Аномалии на стадии оплодотворения, как правило, вызывают остановку развития и гибель эмбрионов. Однако в наших экспериментах на последующих стадиях показатель аномалий в основном не превышал 5–10 %, т.е. выжившие эмбрионы в дальнейшем развивались нормально.

Следующая стадия, на которой отмечено наибольшее отклонение от контроля, — это стадия плутеуса. Экспериментально установлено, что плутеусы 1-й стадии (с двумя парами рук) наиболее чувствительны как к изменению природных факторов (температуры и солености), так и к загрязнению. Исследователи связывают это со значительными перестройками организма при формировании личиночного скелета и переходе к экзогенному питанию (Бузников, Подмарев, 1975; Кашенко, 2009). Достоверные отклонения от контроля отмечены на станциях 1 — 7 %, 2 — 12 %, 3 — 6 %, 4 — 11 %, а наибольшие отличия на станции 5 — 29 %. Рядом со станцией 5 находится станция 9, на которой отмечено 26 % аномалий на стадии оплодотворения.

Такая мозаичная картина качества морской воды в обследованном районе, скорее всего, отражает влияние загрязнения среды нефтепродуктами в результате активности судов рыболовного и транспортного флота, количество которых на минтаевой и других

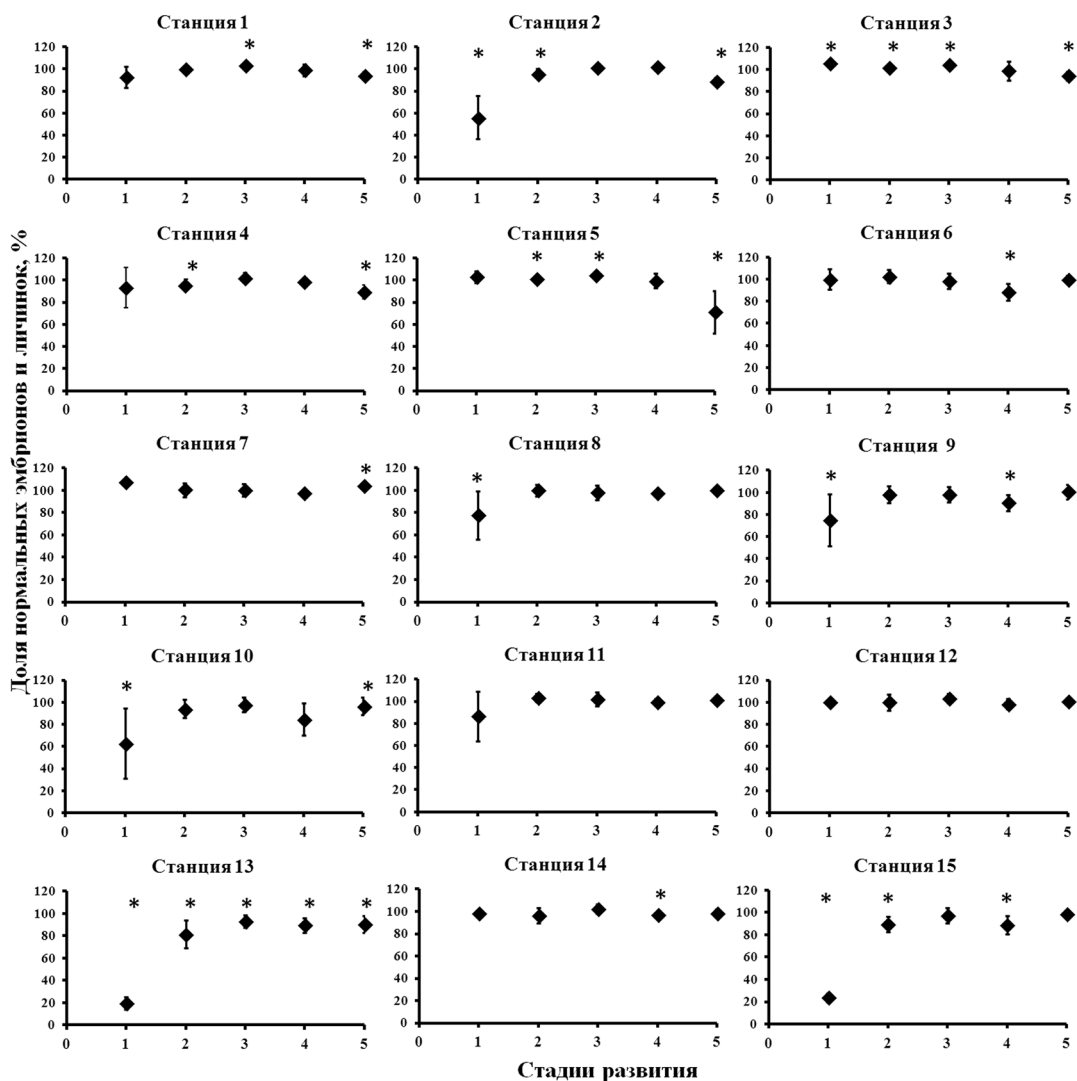


Рис. 3. Результаты биотестирования поверхностных вод шельфа западной Камчатки (среднее \pm станд. откл., $n = 12$). * — отличие от контроля достоверно при $p \leq 0,05$. Стадии развития: 1 — образование оболочки оплодотворения; 2 — бластула; 3 — гастрюла; 4 — ранний плутеус 1-й стадии; 5 — средний плутеус 1-й стадии

Fig. 3. Results of bioassay for water samples collected on the shelf of West Kamchatka (mean \pm standard deviation, $n = 12$). The stages of sand dollar embryo development: 1 — formation of fertilization membrane; 2 — blastula; 3 — gastrula; 4 — 2-armed pluteus; 5 — 4-armed pluteus. * — significant difference with the control samples for $p \leq 0.05$

путиах ежегодно составляет по несколько сотен (Исаков, 2007). Связывать загрязнение среды с активностью береговых источников в нашем случае не приходится, так как по статистическим данным на побережье находится всего девять населенных пунктов с числом жителей от 600 до 4100 чел. (Ширков и др., 2006), где производственная деятельность незначительна.

Возможное влияние на результаты биотестирования оказывает и распределение поверхностных вдольбереговых вод до 24 епс вследствие поверхностного стока, особенно сильного в начале лета (см. рис. 2). Соленость способна оказать существенное влияние на течение эмбриогенеза морских ежей (Кашенко, 2009).

Ранее нами было проведено биотестирование качества вод шельфа северо-восточного Сахалина по аналогичной методике (Лукьянова и др., 2014). Пробы были собраны в 2012 г. после нескольких лет активной нефтедобычи в данном районе.

Результаты биотестирования показали достоверное замедление эмбрионального развития и высокую долю аномалий в районах буровых установок, на стадии плутеуса составлявшую от 19 до 36 %. Эти данные подтверждались высокой долей нарушений в развитии ихтиопланктона — икры минтая и желтополосой камбалы (Давыдова, Черкашин, 2007). Развитие эмбрионов в пробах с шельфа Камчатки показало меньшее количество аномалий, при этом они были неявно выражены. Такие аномалии, как экзогаструла, неполное развитие пары рук, не наблюдались совсем, отмечена только задержка развития.

Заключение

Ситуация на западнокамчатском шельфе еще далека от сахалинского сценария, и наши результаты дают представление о фоновом состоянии акватории, испытывающей антропогенную нагрузку пока только от водного транспорта. Регулярное проведение биотестирования в данном районе позволит оперативно оценивать обстановку по мере усиления антропогенного воздействия и прогнозировать экологические последствия для биоресурсов и экосистем в целом.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (соглашение № 14-50-00034).

Список литературы

- Бузников Г.А., Подмарев В.К.** Морские ежи // Объекты биологии развития. — М. : Наука, 1975. — С. 188–216.
- Глухова М.В., Кудинов Ю.С.** Топливо-энергетический комплекс Российской Федерации и экологическая безопасность : моногр. — М. : Издат. дом «Новый век», 2003. — 172 с.
- Давыдова С.В., Черкашин С.А.** Ихтиопланктон восточного шельфа острова Сахалин и его использование как индикатора состояния среды // Вопр. ихтиол. — 2007. — Т. 47, № 4. — С. 494–505.
- Диннел П.А.** Эволюция и современный статус биотеста, основанного на оценке оплодотворяющей способности сперматозоидов морского ежа (sea urchin sperm test) // Биол. моря. — 1995. — Т. 21, № 6. — С. 390–397.
- 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.
- Исаков А.Я.** О загрязнении нефтепродуктами Охотского моря // Науч. журн. КубГАУ. — 2007. — № 26(2). <http://ej.kubagro.ru/2007/02/pdf/13.pdf>.
- Кашенко С.Д.** Влияние экстремальных изменений температуры и солености морской воды на развитие плоского морского ежа *Scaphechinus mirabilis* // Биол. моря. — 2009. — Т. 35, № 4. — С. 277–285.
- Кобаяси Н., Найдено Т.Х., Ващенко М.А.** Стандартизация биотеста с использованием зародышей морского ежа // Биол. моря. — 1994. — Т. 20, № 6. — С. 457–464.
- Лукьянова О.Н., Журавель Е.В., Чульчков 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.
- Лукьянова О.Н., Огородникова А.А.** Биоэкономическая оценка биоресурсов Охотского моря // Приморские зори-2015. Междунар. науч. чтения : сб. науч. тр. — Владивосток : ДВФУ, 2015. — С. 82–85.
- Ширков Э.И., Ширкова Е.Э., Дьяков М.Ю.** Экономическая оценка природного потенциала шельфа западной Камчатки : моногр. — Петропавловск-Камчатский : Камчатпресс, 2006. — 54 с.
- Beiras R., Saco-Alvares L.** Toxicity of seawater and sand affected by the Prestige fuel-oil spill using bivalve and sea urchin embryogenesis bioassays // Water, Air and Soil Pollution. — 2006. — Vol. 177. — P. 457–466. DOI: 10.1007/s11270-006-9166-2.
- Kobayashi N.** Preliminary experiments with sea urchin pluteus and metamorphosis in marine pollution bioassay // Publ. Seto. Mar. Biol. Lab. — 1977. — Vol. 24, № 1–3. — P. 9–21.
- Rial D., Vazquez J.A., Murado M.A.** Toxicity of spill-treating agents and oil to sea urchin embryos // Sci. Total Environ. — 2014. — Vol. 472. — P. 302–308.

Поступила в редакцию 18.05.15 г.