

УДК 628.394.6:59 (268.45)

Экоотоксикологические исследования донных отложений центральных и восточных районов Баренцева моря

Е. А. Горбачева

Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства
и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), г. Мурманск, Россия;
e-mail: gorbach@pinro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6926-3587>

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию
26.02.2020;

получена
после доработки
09.06.2020

Ключевые слова:

биотестирование,
токсичность,
донные отложения,
Баренцево море,
*Phaeodactylum
tricornutum*,
Artemia salina

Методом биотестирования исследована экотоксичность донных отложений центральных и восточных районов Баренцева моря. В экспериментах изучалось воздействие водных вытяжек донных отложений на рост культуры морской одноклеточной водоросли *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin и выживаемость личинок эвригалинного жаброногого рачка *Artemia salina* L. По данным исследований в Центральном, Западно-Новоземельском и Южно-Новоземельском желобах наряду с нетоксичными присутствуют слабо- и среднетоксичные донные отложения, что может указывать на накопление загрязняющих веществ в этих районах Баренцева моря. В прилегающих к желобам районах моря токсичные донные отложения не обнаружены. В вытяжках, отнесенных к категориям слабо- и среднетоксичных, наблюдалось преимущественно снижение выживаемости личинок *A. salina*. Только одна вытяжка, полученная из донных отложений Южно-Новоземельского желоба, оказывала слабое токсическое воздействие на одноклеточную водоросль *Ph. tricornutum*. Содержание мелкодисперсной (> 0,063 мм) фракции в донных отложениях, характеризующихся как слабо- и среднетоксичные, составляло 24,8–66,8 % и не отличалось от содержания этой фракции в донных отложениях, классифицированных как нетоксичные – 27,8–76,9 %. Полученные данные согласуются с опубликованными результатами химического анализа, в соответствии с которыми Центральный, Западно-Новоземельский и Южно-Новоземельский желобы отмечены среди районов Баренцева моря с наиболее высоким содержанием целого ряда загрязняющих веществ в донных отложениях.

Для цитирования

Горбачева Е. А. Экоотоксикологические исследования донных отложений центральных и восточных районов Баренцева моря. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 2. С. 122–130. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-122-130.

Bottom sediments of the central and eastern parts of the Barents Sea: Ecotoxicological studies

Elena A. Gorbacheva

Polar Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography
("PINRO" named after N. M. Knipovich), Murmansk, Russia;
e-mail: gorbach@pinro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6926-3587>

Article info

Abstract

Received
26.02.2020;

received in revised
09.06.2020

Key words:

bioassay,
toxicity,
marine sediments,
Barents Sea,
*Phaeodactylum
tricornutum*,
Artemia salina

Bioassay is used to study bottom sediment ecotoxicity in the central and eastern parts of the Barents Sea. The effect of sediment elutriates on the growth of microalgae *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin and survival of brine shrimp *Artemia salina* L. larvae has been studied. As shown by scientific evidence, low and moderately toxic bottom sediments are present in the Eastern Basin, West Novaya Zemlya and South Novaya Zemlya troughs along with non-toxic bottom sediments, which may be indicative of accumulation of pollutants in these areas of the Barents Sea. Toxic bottom sediments have not been found in the sea areas adjacent to them. Reduced survival rate in sediment elutriates of low and moderate toxicity has been shown predominantly by *A. salina* larvae. Only one sediment elutriate from the South Novaya Zemlya trough has had a slight toxic effect on *Ph. tricornutum*. The amount of fine-grained fraction (> 0.063 mm) in bottom sediments classified as low and moderately toxic is 24.8–66.8 % and do not differ from its amount found in bottom sediments classified as non-toxic – 27.8–76.9 %. The findings obtained are consistent with published chemical analysis data according to which the Eastern Basin, West Novaya Zemlya and South Novaya Zemlya troughs are included in the Barents Sea areas having highest amounts of a number of pollutants in bottom sediments.

For citation

Gorbacheva, E. A. 2020. Bottom sediments of the central and eastern parts of the Barents Sea: Ecotoxicological studies. *Vestnik of MSTU*, 23(2), pp. 122–130. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-122-130.

Введение

Экотоксичность – это характеристика качества окружающей среды, полученная с помощью живых биотестов. Методы биотестирования достаточно широко применяются при проведении экологических исследований и характеризуются простотой, доступностью и быстротой получения результата (Калинкина и др., 2013; Лукьянова и др., 2014; Strode et al., 2017; Vethaak et al., 2017). Живые организмы, используемые в качестве биотестов, как правило, обладают высокой чувствительностью и способны реагировать на низкие концентрации токсических веществ. Экотоксичность является интегральным показателем и учитывает воздействие на живой организм всего комплекса накопленных в среде загрязняющих веществ и их метаболитов, а также синергические и антагонистические взаимодействия. По мнению В. А. Тереховой (2011), использование приемов биотестирования позволяет получить информацию о неблагополучии в опережающем режиме, до проявления видимых изменений в природных экосистемах.

Загрязняющие вещества, поступившие в водоем, аккумулируются в донных отложениях. Уровень загрязнения донных отложений, большей частью значительно выше, чем воды. Поллютанты накапливаются на дне крайне неравномерно. Рельеф дна оказывает существенное влияние на динамику придонных сред, на распределение и концентрацию осадочного материала и химических веществ, в том числе загрязнителей (Зинченко, 2009). Аккумуляция загрязняющих веществ возможна в районах депонирования осадочного вещества, которое на Арктическом шельфе в значительной степени представлено нефелоидами – тонкодисперсными, терригенными осадками, переносимыми во взвеси и отличающимися повышенной сорбционной емкостью (Зинченко, 2008). Загрязнение донных отложений особенно опасно для бентосных организмов и может привести к снижению их продуктивности, что негативно отразится на многих звеньях пищевой цепи, включая ценные промысловые виды.

Для выявления экотоксичности донных отложений биотестированию подвергаются водные вытяжки донных отложений и (или) "неизменные" донные отложения (Терехова, 2011; Степанова, 2017). При биотестировании водных вытяжек донных отложений применяются бактерии, одноклеточные водоросли, простейшие, ракообразные, гаметы и личинки морских ежей, личинки и молодь рыб, "неизменных" донных отложений – личинки хирономид, ракообразные, моллюски, личинки и молодь рыб (Davies et al., 2012; Жмур, 2012; Степанова, 2017). Например, одноклеточная водоросль *Phaedactylum tricornerutum* была использована для оценки токсичности водных вытяжек донных отложений западной части Берингова и Охотского морей (Соколова и др., 1997). Для биотестирования "неизменных" донных отложений Рижского залива (Балтийское море) применялись амфиподы *Monoporeia affinis*, *Pontogammarus robustoides*, *Corophium volutator* и *Bathyporeia pilosa* (Strode et al., 2017). В практике токсикологического контроля донных отложений в Северной Америке используются тест с амфиподами *Hyalella azteca* и бактериальный тест Microtox® (Степанова, 2017). Следует отметить, что универсального биотеста высокочувствительного ко всем видам загрязняющих веществ не существует из-за избирательной чувствительности организмов к действию токсикантов. При проведении экотоксикологических исследований рекомендуют одновременно использовать 2–3 тест-организма различных трофических уровней (Терехова, 2011; Жмур, 2012).

В настоящее время экотоксичность донных отложений Баренцева моря изучена недостаточно. В 1991 и 1992 гг. было проведено биотестирование придонных вод и донных отложений Баренцева моря с использованием инфузории *Tetrahymina piriformis*, которое показало умеренное и выраженное ингибирование культуры простейших, главным образом, на участках, находящихся под воздействием вод Северо-Атлантического течения, а также в районах, близко расположенных к источникам техногенного загрязнения (Гуревич, 2002). В последние годы опубликованы результаты биотестирования донных отложений южной части Баренцева моря (Горбачева, 2018), района Штокмановского газоконденсатного месторождения (Горбачева, 2017) и океанологического разреза "Кольский меридиан" (Горбачева, 2019).

Целью исследований являлось определение уровня экотоксичности донных отложений, отобранных в центральных и восточных районах Баренцева моря, преимущественно в Центральном, Западно-Новоземельском и Южно-Новоземельском желобах, и сравнение полученных данных с опубликованными результатами химико-аналитических исследований.

Материалы и методы

Донные отложения были отобраны в экспедициях научно-исследовательских судов "Фридьоф Нансен", "Вильнюс" и "Профессор Бойко" Полярного филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича) в Баренцевом море в рамках выполнения государственного задания в 2016 и 2019 гг. Отбор проб производился дночерпателем Ван-Вина с площадью захвата 0,1 м². До начала исследований донные отложения хранили при температуре минус 18 °С не более 2-х месяцев. Карта-схема расположения станций отбора проб представлена на рис. 1.

Анализ гранулометрического состава донных отложений проводился водно-ситовым методом. Применялись сита с размером отверстий 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1 и 2 мм. Рассчитывалось процентное содержание в донных отложениях мелкозернистой фракции (> 0,063 мм), песка (от 0,063 до 2 мм) и гравия (от 2 до 63 мм)¹.

В качестве тест-организмов использовались культура одноклеточной водоросли *Phaedactylum tricorutum* Bohlin и личинки эвригалинного жаброногого рачка *Artemia salina* L. Эти тест-организмы хорошо культивируются в лабораторных условиях и доступны в течение всего года. Культура *Ph. tricorutum* и личинки *A. salina* рекомендованы для определения токсичности морских вод и донных отложений, отработанных буровых растворов и сточных вод разной степени солености, сбрасываемых в морские воды².

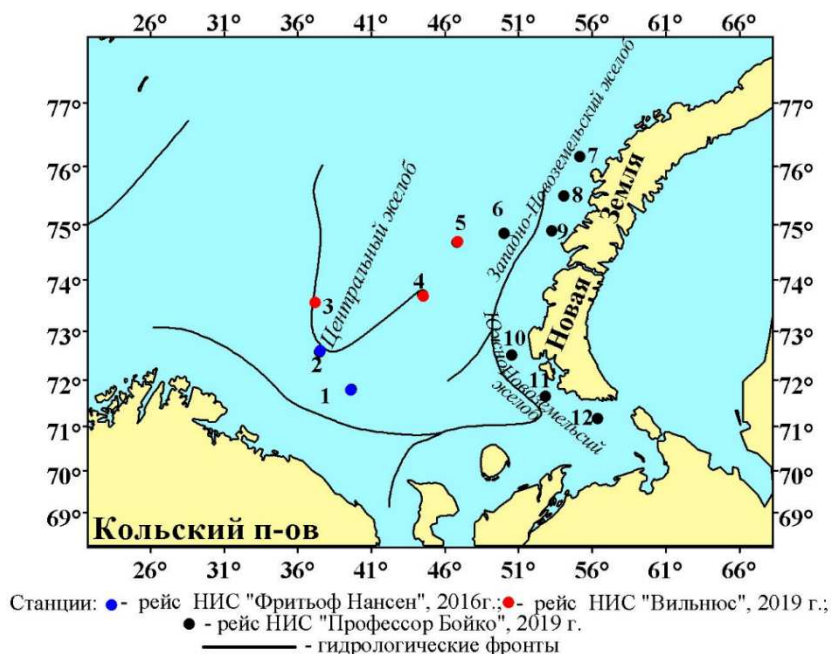


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб донных отложений (положение гидрофронтов по: *Воды..., 2016*)

Fig. 1. Schematic map of the location of the bottom sediment sampling stations (position of hydrological fronts according to *The Barents Sea..., 2016*)

Изучалось воздействие на тест-организмы водных вытяжек из донных отложений. Перед приготовлением вытяжки донные отложения высушивались до воздушно-сухого состояния, заливались морской водой из условно чистого района моря в соотношении 1 : 4 по объему и перемешивались в течение 2 ч. Затем отстаивались в течение 1 ч при температуре 20 ± 5 °С и 20 ч при температуре 2–4 °С. После отстаивания надосадочная жидкость сливалась и центрифугировалась в течение 10 мин при скорости 4 000 об/мин.

Постановка экспериментов на водоросли *Ph. tricorutum* осуществлялась в соответствии с ГОСТ 31960³, личинках *A. salina* – ГОСТ 31959⁴. Принятие указанных ГОСТов способствовало унификации методов оценки токсичности с использованием водоросли *Ph. tricorutum* и личинок *A. salina* и их гармонизации с требованиями международных стандартов.

При проведении исследований изучалось воздействие водных вытяжек из донных отложений на рост водоросли *Ph. tricorutum* и выживаемость личинок *A. salina*. Водоросли подсчитывались в камере Горяева и вычислялось процентное отношение числа клеток в вытяжке и числа клеток в контроле. Выживаемость рачков оценивалась как процентное отношение конечного количества выживших особей к их начальному количеству в каждом варианте опыта. Продолжительность опытов составляла 96 ч. Результаты экспериментов обрабатывались методами вариационной статистики: рассчитывалось среднее арифметическое и доверительный интервал.

¹ ГОСТ Р ИСО 14688-2-2017. Геотехнические исследования и испытания. Идентификация и классификация грунтов. Часть 2. Классификация. М., 2017.

² Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов. М., 2002.

³ ГОСТ 31960-2012. Вода. Методы определения токсичности по замедлению роста морских одноклеточных водорослей *Phaeodactylum tricorutum* Bohlin и *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. М., 2014.

⁴ ГОСТ 31959-2012. Вода. Методы определения токсичности по выживаемости морских ракообразных. М., 2014.

Донные отложения считались нетоксичными для *Ph. tricornutum*, если в конце эксперимента численность клеток водоросли в полученной из них водной вытяжке составляла $\geq 90\%$, слаботоксичными – 89–65 %, среднетоксичными – 50–64 %, высокотоксичными – 0–49 % от контроля. Для личинок *A. salina* донные отложения характеризовались как нетоксичные при выживаемости рачков в водной вытяжке в конце опыта 90–100 %, слаботоксичные – 89–65 %, среднетоксичные – 50–64 %, высокотоксичные – 0–49 %. По тест-организму, проявившему наибольшую чувствительность, определялась итоговая токсичность водной вытяжки и донных отложений, из которых она получена.

Результаты и обсуждение

По данным гранулометрического анализа содержание мелкозернистой фракции (табл.) в изученных пробах донных отложений изменялось от 24,8 до 76,9 %. Донные отложения Южно-Новоземельского желоба характеризовались преобладанием мелкозернистой (< 0,063 мм) фракции в центральных (станция 11) и южных (станция 12) районах и доминированием песчаной (0,063–2 мм) на севере (станция 10). В донных отложениях Западно-Новоземельского желоба мелкозернистая и песчаная фракции встречались приблизительно в равных количествах на юге (станция 9), а мелкозернистая преобладала в северных (станция 7) и центральных (станция 8) областях. Песчаная фракция доминировала в донных отложениях, отобранных в районе Центрального желоба (станции 2–4) и за пределами желобов (станции 1, 5 и 6). Песчаная фракция повсеместно представлена песком мелкой и средней крупности.

Таблица. Гранулометрический состав донных отложений
Table. Grain size of the bottom sediments

Номер станции	Глубина, м	Фракции, %			Номер станции	Глубина, м	Фракции, %		
		<0,063 мм	0,063–2 мм	2–63 мм			<0,063 мм	0,063–2 мм	2–63 мм
1	177	45,2	54,6	0,15	7	221	76,9	23,0	0,08
2	280	27,8	63,3	8,9	8	207	54,1	44,2	1,7
3	219	44,3	54,9	0,84	9	160	50,5	48,3	1,2
4	302	24,8	74,7	0,53	10	137	37,0	62,2	0,08
5	174	32,4	67,0	0,57	11	170	60,4	38,9	0,71
6	130	36,2	61,9	1,87	12	140	66,8	33,1	0,15

Результаты проведенных исследований показали, что слабое токсическое воздействие на культуру водоросли *Ph. tricornutum* (количество клеток снижалось в конце эксперимента до 84 % по сравнению с контролем) оказывала только водная вытяжка донных отложений, отобранных в центральной части Южно-Новоземельского желоба на станции 11 (рис. 2). В водной вытяжке донных отложений станции 12, располагавшейся в южной части Южно-Новоземельского желоба, угнетение роста водоросли зарегистрировали только в 1 и 2-е сутки опыта до 78 и 82 % по сравнению с контролем соответственно, которое в дальнейшем сменилось восстановлением и стимуляцией деления клеток *Ph. tricornutum*. В конце эксперимента количество клеток водоросли в вытяжке донных отложений станции 12 достигало 122 % по сравнению с контролем (произошла адаптация к изменившимся условиям среды), и ее можно считать нетоксичной для *Ph. tricornutum*. Водные вытяжки из остальных проб донных отложений (станции 1–10) оказывали только стимулирующее воздействие на рост культуры водоросли (численность клеток возрастала до 120–240 % по сравнению с контролем).

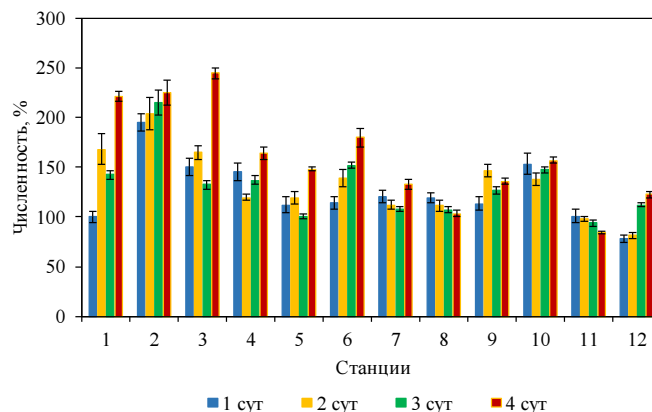


Рис. 2. Динамика численности водоросли *Ph. tricornutum* в водных вытяжках донных отложений
Fig. 2. Abundance dynamics of the algae *Ph. tricornutum* in the sediment elutriates

Биотестирование с использованием личинок *A. salina* показало снижение выживаемости рачков в водной вытяжке донных отложений юго-западного склона Центрального желоба (станция 3) до 53 % (рис. 3), что позволило классифицировать ее как среднетоксичную. Слаботоксичными для личинок *A. salina* оказались водные вытяжки донных отложений, отобранных в восточной части Центрального (станция 4), центральной части Западно-Новоземельского (станция 8) и на севере Южно-Новоземельского (станция 10) желобов, в которых выживаемость рачков снижалась до 77, 75 и 83 % соответственно. В водных вытяжках из донных отложений остальных станций (1, 2, 5–7, 9, 11 и 12) выживаемость рачков составляла 92–100 %, и их можно считать нетоксичными для личинок *A. salina*.

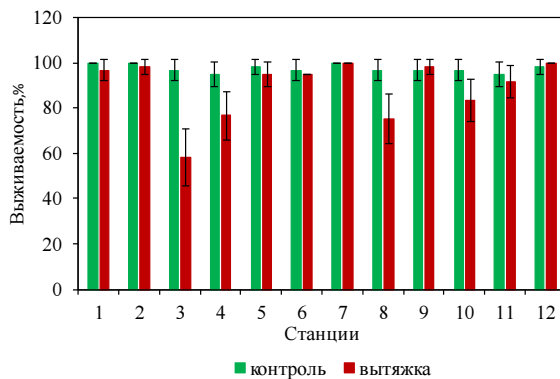


Рис. 3. Выживаемость личинок *A. salina* в водных вытяжках донных отложений
Fig. 3. Survival of the brine shrimp *A. salina* larvae in the sediment elutriates

Таким образом, по данным биотестирования токсичные для тест-объектов водные вытяжки были получены из проб донных отложений, отобранных в северных и центральных районах Южно-Новоземельского (станции 10 и 11) и центральной части Западно-Новоземельского (станция 8) желобов, а также на западном склоне и в восточной части Центрального желоба (станции 3 и 4), в районе огибающей его фронтальной зоны (рис. 1). Личинки *A. salina* оказались более чувствительны к загрязняющим веществам, содержащимся в водных вытяжках донных отложений изученных районов моря, чем культура одноклеточной водоросли *Ph. tricornutum*. Водные вытяжки из донных отложений оказывали преимущественно стимулирующее воздействие на рост водоросли *Ph. tricornutum*. По содержанию мелкодисперсной (< 0,063 мм) фракции все изученные донные отложения отличались не более чем в 3 раза. Донные отложения, классифицированные по результатам биотестирования водных вытяжек как токсичные, не выделялись высоким содержанием этой фракции. Содержание мелкозернистой фракции в токсичных донных отложениях изменялось в диапазоне от 24,8 до 66,8 %, в нетоксичных – от 27,8 до 76,9 %.

Внутренние желоба Баренцева моря, к которым относятся Западно-Новоземельский, Южно-Новоземельский и Центральный, рассматриваются как современные седиментологические ловушки (Митяев и др., 2007), а Центральный желоб считается наиболее крупной из них (Зинченко, 2009). Днища внутришельфовых желобов представлены замкнутыми по периметру наиболее погруженными субгоризонтальными или слабонаклонными участками морского дна. Они сравнительно узкие, вытянутые в длину, плоские, выполнены морскими и ледниково-морскими, преимущественно тонкозернистыми (нефелоидными) осадками⁵. Известно, что загрязняющие вещества в океане переносятся преимущественно со взвесью (Айбулатов и др., 1999), и районы ее аккумуляции могут являться ловушками загрязняющих веществ. Взвешенное вещество, а вместе с ним и поллютанты могут поступать на днище желобов и гравитационным путем со склонов прилежащих возвышенностей.

В тонкодисперсных, обладающих высокой сорбционной способностью донных отложениях, наблюдается более значительное содержание химических элементов и соединений, в том числе и антропогенного происхождения, чем грубодисперсных (Гуревич, 2002). Токсичность водных вытяжек обусловлена комплексным воздействием всех химических элементов и соединений, перешедших в них из донных отложений. При получении водной вытяжки в нее переходит только часть накопленных в донных отложениях загрязняющих веществ. Э. П. Щербань с соавторами (1994) показали, что степень вымывания поллютантов в водные вытяжки зависит от типа донных отложений, количественного содержания в них загрязняющих веществ, формы нахождения (существования) того либо другого элемента в донных отложениях и т. д. По данным этих исследований, например, нефтепродукты лучше переходят в водные вытяжки из песчаных и илесто-

⁵ Бургуто А. Г., Журавлев В. А., Заварзина Г. А., Зинченко А. Г. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист S(36), 37 – Баренцево море (зап., центр. части). Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016. 144 с.

песчаных, чем из илистых донных отложений. При приготовлении водных вытяжек в них вместе с загрязняющими веществами вымываются и биогенные элементы. Обогащение биогенами может быть причиной стимулирующего воздействия водных вытяжек донных отложений на рост водорослей (Олькова, 2014).

Присутствие токсичных донных отложений в Западно-Новоземельском, Южно-Новоземельском и Центральном желобах, вероятно, является следствием накопления загрязняющих веществ в этих районах моря. Результаты химико-аналитических исследований указывают, как правило, на относительно низкий уровень загрязнения донных отложений Баренцева моря в целом (*The Barents Sea...*, 2011). Вместе с тем Южно-Новоземельский, Западно-Новоземельский и Центральные желоба упоминаются среди районов Баренцева моря, характеризующихся наиболее высоким уровнем содержания целого ряда загрязняющих веществ. Так, в Южно-Новоземельском желобе отмечали более высокое по сравнению с фоновым уровнем содержание мышьяка и меди (Корнеев и др., 2008). Результаты исследований, представленные в работе М. А. Новикова и А. Ю. Жилина (2015), показывают, что максимальные для Баренцева моря уровни загрязнения донных отложений цинком и дихлордифенилтрихлорэтаном (ДДТ) регистрировались в том числе и в Южно-Новоземельском желобе. По данным этих авторов, Западно-Новоземельский желоб упоминается среди районов Баренцева моря с наиболее высоким содержанием меди, никеля, мышьяка и ДДТ. В Центральном желобе наблюдалось более значительное, чем в других районах Баренцева моря (за исключением прибрежной зоны), накопление в донных отложениях меди, цинка, свинца, кадмия, никеля, мышьяка, хрома, гексахлорциклогексана, хлорданов, полихлорбифенилов и ДДТ (Ильин и др., 2015; Новиков и др., 2015).

Согласно представленным результатам в Центральном желобе токсичные донные отложения регистрировались в области прохождения фронтальной зоны (рис. 1), разделяющей баренцевоморские и атлантические водные массы. Вместе с тем химико-аналитические данные о повышенном накоплении загрязняющих веществ именно на этом участке отсутствуют (отмечают, как правило, загрязнение донных отложений Центрального желоба в целом). Обобщение результатов исследований в районе другой фронтальной зоны – Полярного фронта (находится на северо-западе и севере Баренцева моря и отделяет атлантические водные массы от арктических), показало, что наблюдаемое здесь повышенное загрязнение вод преимущественно не сопровождалось более высоким загрязнением донных отложений (Новиков и др., 2018).

Районы исследований расположены на значительном удалении от наиболее хозяйственно освоенных участков побережья, и поступление загрязнения в эти акватории возможно с водами течений, льдами и в результате атмосферного переноса. Вместе с теплыми атлантическими водами Нордкапского течения в Баренцево море переносятся поллютанты от северо-европейских промышленных центров (Гуревич, 2002; Ильин и др., 2015). В Южно-Новоземельский и Западно-Новоземельский желоба токсиканты могут поступать также и с водами холодного течения Литке из Карского моря (Новиков и др., 2015), источниками загрязнения которого являются, главным образом, атмосферный перенос и сток сибирских рек Оби и Енисея (Ильин и др., 2015). Кроме того, льды способны транспортировать осадочное вещество (вместе с загрязнением), захваченное при их образовании из водной толщи, и эоловый материал, накопившийся на поверхности (Лисицын, 2001). В Баренцевом море лед может быть как местный, так и выносимый через Карские ворота и пролив между архипелагами Новая Земля и Земля Франца-Иосифа (фондовые данные ПИНРО). Осадочный материал (включая загрязняющие вещества), переносимый льдами, после их таяния фиксируется в толще донных осадков (Шевченко и др., 2001). Поставка эолового материала в Арктике в значительной степени происходит зимой при высокой сухости атмосферы, и главное значение имеет вымывание снегом, причем аэрозольного вещества не местного, а дальнего переноса (Лисицын, 2010). Многие элементы (Pb, Sb, Se, V и др.) поступают в Арктику преимущественно с аэрозолями (Шевченко и др., 2000).

При проведении экологического мониторинга методы биотестирования используются для выявления районов повышенного накопления токсичных соединений и оценки биологических эффектов загрязнения. Результаты биотестов показали ухудшение качества донных отложений на отдельных участках Центрального, Западно-Новоземельского и Южно-Новоземельского желобов, которое выразилось преимущественно в снижении выживаемости личинок *A. salina* и только в одном случае в ингибировании деления клеток водоросли *Ph. tricorutum* в экспериментах с водными вытяжками. Данные биотестов указывают на биологическую доступность токсикантов и чувствительность рачков-фильтраторов или одноклеточных водорослей к комплексу загрязняющих веществ, содержащихся в донных отложениях, отнесенных к категориям токсичных. Вместе с тем весьма сложно применять результаты исследований, проведенных в лаборатории, к организмам в естественной среде обитания. Донные биоценозы изученных районов моря представлены широким набором видов, относящихся к различным таксонам беспозвоночных и водорослей как более, так и менее чувствительных к данному загрязнению. Гидробионты могут адаптироваться к повышенному содержанию поллютантов в среде, отличаться по уровню токсикорезистентности на разных стадиях онтогенеза, перемещаться из загрязненных районов на участки с низким уровнем накопления токсических соединений и др. Для получения более полной информации об экотоксичности донных отложений необходимо использовать не только более широкий набор биотестов, но и биомаркеры, которые позволяют регистрировать неблагоприятные воздействия низкой интенсивности и в ряде случаев идентифицировать природу стресс-фактора. Наряду

с изучением водной вытяжки, желательнее применять биотестирование и для исследования "неизмененных" донных отложений.

Заключение

Изучение экотоксичности донных отложений центральных и восточных районов является продолжением исследований качества донных отложений открытых акваторий Баренцева моря. Ранее слаботоксичные для личинок *A. salina* донные отложения были зарегистрированы на станциях 3, 6 и в северной части океанологического разреза "Кольский меридиан" (Горбачева, 2019), а также на участке Штокмановского газоконденсатного месторождения (Горбачева, 2017). Биотестирование донных отложений южных районов Баренцева моря позволило охарактеризовать их преимущественно как нетоксичные или слаботоксичные (Горбачева, 2018). Следует отметить, что в 1993 г. при широкомасштабных экотоксикологических исследованиях дальневосточных морей зафиксировали слаботоксичные для водоросли *Ph. tricornutum* донные отложения в открытых районах Охотского и западной части Берингова морей, и эти данные были приняты в качестве фоновых характеристик качества водной среды в условиях усиливающегося антропогенного влияния на экосистемы (Соколова и др., 1997).

В результате проведенных исследований показано, что в Центральном, Западно-Новоземельском и Южно-Новоземельском желобах Баренцева моря наряду с нетоксичными присутствуют слабо- и среднетоксичные донные отложения. На трех станциях, располагавшихся за пределами желобов, токсичные донные отложения не зафиксированы. Личинки *A. salina* оказались более чувствительны к загрязняющим веществам, накопленным в донных отложениях изученных районов моря, чем микроводоросль *Ph. tricornutum*. Не выявлено зависимости степени токсичности исследованных донных отложений от их гранулометрического состава. Результаты биотестирования согласуются с опубликованными данными химического анализа донных отложений, указывающими на накопление целого ряда поллютантов в Центральном, Западно-Новоземельском и Южно-Новоземельском желобах Баренцева моря.

Библиографический список

- Айбулатов Н. А., Матюшенко В. А., Шевченко В. П., Политова Н. В. [и др.]. Новые данные о поперечной структуре латеральных потоков взвешенного вещества по периферии Баренцева моря // Геоэкология. 1999. № 6. С. 526–540.
- Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / отв. ред. Е. В. Сентябов. Мурманск : ПИПРО, 2016. 260 с.
- Горбачева Е. А. Использование биотестирования для оценки загрязнения донных отложений южных районов Баренцева моря // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2018. № 8(177). С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.15393/uchz.art.2018.253>.
- Горбачева Е. А. Использование биотестирования для оценки качества донных отложений района с низким уровнем загрязнения – разрез "Кольский меридиан" (Баренцево море) // Экологические системы и приборы. 2019. № 11. С. 41–47. DOI: 10.25791/esip.11.2019.985.
- Горбачева Е. А. Оценка качества донных отложений центральных районов Баренцева моря методом биотестирования // Вода: химия и экология. 2017. № 6(108). С. 71–77.
- Гуревич В. И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М. : Научный мир, 2002. 135 с.
- Жмур Н. С. Применение методов биотестирования в России и мире // Методы оценки соответствия. 2012. № 1. С. 10–14.
- Зинченко А. Г. Геоморфологические условия депонирования загрязняющих веществ на Арктическом шельфе Евразии // Геология полярных областей Земли: материалы XLII Тектонического совещания. В 2 т. М. : ГЕОС, 2009. Т. 1. С. 212–215.
- Зинченко А. Г. Экологическая геоморфология Арктического шельфа Евразии // Записки Горного института. 2008. Т. 176. С. 41–45.
- Ильин Г. В., Усягина И. С., Касаткина Н. Е. Геоэкологическое состояние среды морей российского сектора Арктики в условиях современных техногенных нагрузок // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. № 2(21). С. 82–93.
- Калинкина Н. М., Березина Н. А., Сидорова А. И., Белкина Н. А. [и др.]. Биотестирование токсичности донных отложений крупных водоемов Северо-Запада России с использованием ракообразных // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 6. С. 612–622. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S0321059613060060>.
- Корнеев О. Ю., Рыбалко А. Е., Федорова Н. К. Федеральный мониторинг геологической среды Западно-Арктического шельфа – состояние, объекты и перспективы развития // Нефть и газ арктического шельфа – 2008: материалы междунар. конф., Мурманск, 12–14 ноября 2008. Мурманск : ММБИ КНЦ РАН, 2008. С. 179–182.
- Лисицын А. П. Нерешенные проблемы океанологии Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М. : Научный мир, 2001. С. 31–74.

- Лисицын А. П. Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 18–60.
- Лукьянова О. Н., Журавель Е. В., Чульчечков Д. Н., Подгурская О. В. Оценка экологического состояния северо-восточного шельфа острова Сахалин: гидрохимический анализ и биотестирование // Известия ТИНРО. 2014. Т. 177. С. 182–192.
- Митяев М. В., Хасанкаев В. Б., Голубев В. А. Желоба Баренцева моря – современные каналы транспортировки или ловушки осадочного веществ? // Арктика и Антарктика. 2007. Вып. 5(39). С. 72–79.
- Новиков М. А., Драганов Д. М. Загрязнение воды и донных отложений металлами в области Полярного фронта Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-150-159>.
- Новиков М. А., Жилин А. Ю. Динамика уровней загрязнения донных отложений Баренцева моря в последнее десятилетие // Природные опасности: связь науки и практики: материалы II междунар. научно-практ. конф., Саранск, 23–24 апреля 2015 г. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. С. 319–325.
- Олькова А. С. Биотестирование в научно-исследовательской и природоохранной практике России // Успехи современной биологии. 2014. Т. 134, № 6. С. 614–622.
- Соколова С. А., Старцева А. И., Моисейченко Г. В., Черкашин С. А. Исследование воды и донных отложений в Охотском море методом биотестирования // Комплексные исследования экосистемы Охотского моря. М. : ВНИРО, 1997. С. 167–172.
- Степанова Н. Ю. Использование остракод для биотестирования донных отложений // Труды ИБВВ РАН. 2017. Вып. 77(80). С. 92–104.
- Терехова В. А. Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. № 2. С. 190–198.
- Шевченко В. П., Лисицын В. П., Виноградова А. А., Серова В. В. [и др.]. Потоки аэрозолей на поверхность Северного Ледовитого океана и их роль в осадконакоплении и в формировании природной среды Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М. : Научный мир, 2001. С. 385–393.
- Шевченко В. П., Лисицын В. П., Виноградова А. А., Смирнов В. В. [и др.]. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
- Щербань Э. П., Арсан О. М., Шаповал Т. Н., Цветкова А. М. [и др.]. Методика получения водных вытяжек из донных отложений для биотестирования // Гидробиологический журнал. 1994. Т. 30, № 4. С. 100–111.
- Davies I. M., Vethaak A. D. Integrated marine environmental monitoring of chemicals and their effects // ICES Cooperative Research Report / Series 2012. № 315. 277 p.
- Strode E., Jansons M., Purina I., Balode M. [et al.]. Sediment quality assessment using survival and embryo malformation tests amphipod crustaceans: The Gulf of Riga, Baltic Sea as case study // Journal of Marine Systems. 2017. Vol. 172. P. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.03.010>.
- The Barents Sea: Ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation / eds.: T. Jakobsen, V. K. Ozhigin. Trondheim : Tapir Acad. Press, 2011. 825 p.
- Vethaak A. D., Hamers T. Martinez-Gomez, Kamstra J. H. [et al.]. Toxicity profiling of marine surface sediments: A case using rapid screening bioassays of exhaustive total extract, elutriates and passive sampler extracts // Marine Environmental Research. 2017. Vol. 124. P. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.03.002>.

References

- Aibulatov, N. A., Matyushenko, V. A., Shevchenko, V. P., Politova, N. V. et al. 1999. New data on the transverse structure of lateral flows of suspended matter along the periphery of the Barents Sea. *Environmental Geoscience*, 6, pp. 526–540. (In Russ.)
- The Barents Sea Water: Structure, circulation, variability. 2016. Ed. E. V. Sentyabov. Murmansk. (In Russ.)
- Gorbacheva, E. A. 2018. Bioassay for sediment pollution level estimation in south areas of the Barents Sea *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 8(177), pp. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.15393/uchz.art.2018.253>. (In Russ.)
- Gorbacheva, E. A. 2019. Use of bioassay to assess the quality of sediments in the area of the Barents Sea Kola section with a low level of pollution. *Ecological Systems and Devices*, 11, pp. 41–47. DOI: 10.25791/esip.11.2019.985. (In Russ.)
- Gorbacheva, E. A. 2017. Assessment of the quality of bottom sediments in the Barents Sea central regions using biotesting. *Water: Chemistry and Ecology*, 6(108), pp. 71–77.
- Gurevich, V. I. 2002. Recent sedimentogenesis and environment on the Western-Arctic shelf of Eurasia. Moscow. (In Russ.)
- Zhmur, N. S. 2012. Applications of bioassay in Russian and the world. *Metody ocenki sootvetstvija*, 1, pp. 10–14. (In Russ.)
- Zinchenko, A. G. 2009. Geomorphological conditions for the deposition of pollutants on the Arctic shelf Eurasia. Proceedings of XLII Tectonic meeting *Geology of the polar regions of the Earth*. In 2 vol. Moscow. Vol. 1, pp. 212–215. (In Russ.)
- Zinchenko, A. G. 2008. Ecological geomorphology of the Arctic shelf Eurasia. *Journal of Mining Institute*, 176, pp. 41–45. (In Russ.)

- Ilyin, G. V., Usyagina, I. S., Kasatkina, N. Ye. 2015. Geocological state of seas environment in the Russian Arctic under the present technogenic stresses. *Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2(21), pp. 82–93. (In Russ.)
- Kalinkina, N. M., Berezina, N. A., Sidorova, A. L., Belkina, N. A. et al. 2013. Toxicity bioassay of bottom sediments in large water bodies Northwestern Russia with the use crustaceans. *Water Resources*, 40(6), pp. 612–622. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S0321059613060060>. (In Russ.)
- Korneev, O. Yu., Rybalko, A. E., Fedorova, N. K. 2008. Federal monitoring of geological environment of the West-Arctic shelf – the statement, objects and perspectives of development. Proceedings of Intern. conf. *Oil and Gas of Arctic Shelf – 2008*, 12–14 November 2008, Murmansk, MMBI KSC RAS, pp. 179–182. (In Russ.)
- Lisitzin, A. P. 2001. Nonresolved problems of the Arctic Oceanology. In Experience of system oceanologic studies in the Arctic. Moscow, Nauchny mir, pp. 31–74. (In Russ.)
- Lisitzin, A. P. 2010. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russian Geology and Geophysics*, 51(1), pp. 18–60. (In Russ.)
- Lukyanova, O. N., Zhuravel, E. V., Chulchekov, D. N., Podgurskaya, O. V. 2014. Assessment of ecological state for the north-eastern shelf of Sakhalin Island: Hydrochemical analysis and bioassay. *Izvestiya TINRO*, 177, pp. 182–192. (In Russ.)
- Mityaev, M. V., Khasankaev, V. B., Golubev, V. A. 2007. Barents Sea trenches – modern canals of transportations or traps of the sedimental material? *Arktika i Antarktika*, 5(39), pp. 72–79. (In Russ.)
- Novikov, M. A., Draganov, D. M. 2018. Pollution of water and bottom sediments of the Polar Front area in the Barents Sea with heavy metals. *Vestnik of MSTU*, 21(1), pp. 150–159. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-1-150-159>. (In Russ.)
- Novikov, M. A., Zhilin, A. Yu. 2015. Dynamics of contamination of the Barents Sea bottom sediments in recent decade. Proceedings of II Intern. conf. *Natural hazards: Links between science and practice*, 23–24 April 2015, Saransk, pp. 319–325. (In Russ.)
- Ol'kova, A. S. 2014. Bioassay in research and environmental practices of Russia. *Biology Bulletin Reviews*, 134(6), pp. 614–622. (In Russ.)
- Sokolova, S. A., Startseva, A. I., Moiseichenko, G. V., Cherkashin, S. A. 1997. Studies of water and bottom sediments in the Sea of Okhotsk Sea by the method of biotesting. In coll. articles *Complex Studies of Ecosystem of the Sea of Okhotsk*. Moscow, VNIRO, pp. 167–172. (In Russ.)
- Stepanova, N. Yu. 2017. Application of ostracods in toxicity of assessment of sediments. *Trudy IBVV RAN*, 77(80), pp. 92–104. (In Russ.)
- Terekhova, V. A. 2011. Soil bioassay: Problems and approaches. *Eurasian Soil Science*, 44(2), pp. 190–198. (In Russ.)
- Shevchenko, V. P., Lisitzin, A. P., Vinogradova, A. A., Serova, V. V. et al. 2001. Aerosol flows to the surface of the Arctic Ocean and their role in sedimentation and in the formation of the Arctic environment. In Experience of system oceanologic studies in the Arctic. Moscow, Nauchny mir, pp. 385–393. (In Russ.)
- Shevchenko, V. P., Lisitzin, A. P., Vinogradova, A. A., Smirnov, V. V. et al. 2000. Arctic aerosols. Results of ten-year investigations. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 13(6–7), pp. 551–576. (In Russ.)
- Shcherban', E. P., Arsan, O. M., Shapoval, T. N., Tsvetkova, A. M. et al. 1994. The procedure for obtaining aqueous extracts from bottom sediments for their biotesting. *Hydrobiological Journal*, 30(4), pp. 100–111. (In Russ.)
- Davies, I. M., Vethaak, A. D. Integrated marine environmental monitoring of chemicals and their effects. 2012. ICES Cooperative Research Report. Series N 315. 277 p.
- Strode, E., Jansons, M., Purina, I., Balode, M. et al. 2017. Sediment quality assessment using survival and embryo malformation tests amphipod crustaceans: The Gulf of Riga, Baltic Sea as case study. *Journal of Marine Systems*, 172, pp. 93–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.03.010>.
- The Barents Sea: Ecosystem, resources, management. Half a century of Russian-Norwegian cooperation. 2011. Eds.: T. Jakobsen, V. K. Ozhigin. Trondheim.
- Vethaak, A. D., Hamers T. Martinez-Gomez, Kamstra, J. H. et al. 2017. Toxicity profiling of marine surface sediments: A case using rapid screening bioassays of exhaustive total extract, elutriates and passive sampler extracts. *Marine Environmental Research*, 124, pp. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.03.002>.

Сведения об авторе

Горбачева Елена Анатольевна – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038; Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии ("ПИНРО" им. Н. М. Книповича), канд. биол. наук, науч. сотрудник; e-mail: gorbach@pinro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6926-3587>

Elena A. Gorbacheva – 6, Akademika Knipovicha Str., Murmansk, Russia, 183038; Polar Branch of All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography ("PINRO" named after N. M. Knipovich), Cand. Sci. (Biology), Researcher; e-mail: gorbach@pinro.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6926-3587>