

#1 (15) март 2020 г.



# Окружающая среда

Санкт-Петербурга

ЧИСТЫЙ СЛЕД

ВОДОРОД – ТОПЛИВО БУДУЩЕГО



ПЕРСОНА:

МИХАИЛ ФЕДОРОВ

VOLGABUS 2166

К 75-ЛЕТИЮ ПОБЕДЫ

В737HE 198-RUS

ТЕМА НОМЕРА:

# ЭКОЛОГИЯ И ТРАНСПОРТ



# Биологические эффекты опасных химических веществ в восточной части Финского залива в фокусе проекта HAZLESS

*Н.А. Березина, канд. биол. наук;*

*Ю.И. Губелит, канд. биол. наук;*

*А.А. Максимов, д-р биол. наук, Зоологический институт РАН;*

*А.Н. Шаров, канд. биол. наук;*

*З.А. Жаковская, канд. биол. наук;*

*Ю.М. Поляк, канд. биол. наук;*

*С.В. Сладкова, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН;*

*Н.В. Бобылева, ГГУП «Минерал»;*

*Т.А. Загребина, канд. геогр. наук, ФГБУ Северо-Западное УГМС;*

*И. Липс, д-р естеств. наук,*

*Н. Колесова, Таллинский технический университет*

Наш город расположен на берегах Финского залива, важнейшего судоходного пространства и излюбленного места отдыха горожан. Залив играет ключевую роль в формировании биоресурсов и качества природной среды всего бассейна Балтийского моря, поэтому к нему приковано пристальное внимание многих международных экологических организаций. Вместе с тем он страдает от множества воздействий, вызванных человеческой деятельностью, в том числе градостроительством, развитием судоходства, открытием нефтеналивных терминалов и строительством портов. Из действующих портов в залив могут попадать опасные вещества (ОВ), такие как биоциды, нефтепродукты, диоксины и тяжелые металлы (свинец, кадмий, цинк). В стоках очистных сооружений возможно присутствие фармацевтических препаратов.

**В** Плана действий по Балтийскому морю Хельсинкской комиссии (ХЕЛКОМ) была подчеркнута необходимость разработки мониторинга биологических эффектов для обеспечения надежной оценки ОВ и разработки мер по смягчению неблагоприятных последствий человеческой деятельности для окружающей среды Балтийского моря. Тесное сотрудничество стран побережья Финского залива ведется в рамках проекта ER-90 «Опасные химические вещества в восточной части Финского залива – концентрация и оценка воз-

действия» (HAZardous chemicalS in the eastern Gulf of Finland – concentrations and impact assessment, HAZLESS) Программы приграничного сотрудничества «Россия – Эстония» на период 2014–2020 годов. Это взаимодействие обеспечит глубокие и единообразные оценки состояния и последствий воздействий ОВ в регионе восточной части Финского залива и, в свою очередь, внесет значимый вклад в деятельность по реализации Рамочной директивы по морской стратегии (Marine Strategy Framework Directive) во всей Балтике. Проект HAZLESS

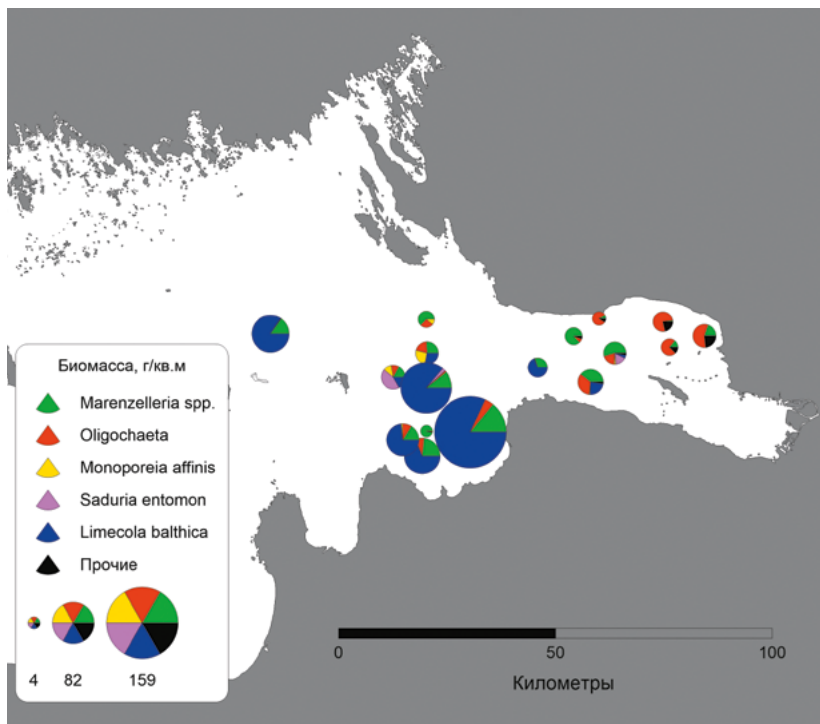
стартовал в апреле 2019 года и продлится до конца февраля 2022 года (<https://hazless.msi.ttu.ee/>).

Научные коллективы Санкт-Петербурга из Зоологического института Российской академии наук (ЗИН РАН) и Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности (НИЦЭБ РАН) участвуют в проекте в качестве российских партнеров. Ведущим партнером проекта выступает Таллинский технический университет (TalTech). Финский институт окружающей среды (SYKE)

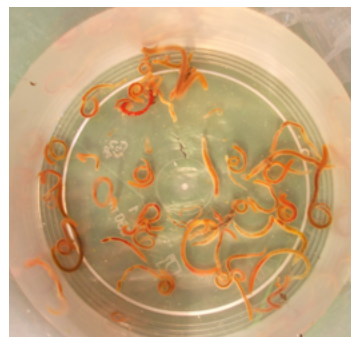
выступает ассоциированным партнером. В проекте в качестве экспертных участников задействованы представители Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и администрация Санкт-Петербурга в лице ГГУП «Минерал».

Общая цель проекта – это адаптация и внедрение единых биологических показателей для оценки и контроля состояния окружающей среды восточной части Финского залива. В основные задачи проекта входят как измерение приоритетных загрязняющих веществ из списка опасных веществ ХЕЛКОМ, в том числе тяжелых металлов, ПАУ, ПХБ, оловоорганических соединений, ПФОС и фармацевтических препаратов, так и изучение биологических эффектов и реакции морских обитателей (ракообразных, моллюсков и рыб) и всей экосистемы Балтийского моря на те или иные воздействия ОВ; расширение знаний о биоаккумуляции и биомагнификации ОВ в морских пищевых сетях и, в конечном счете, выбор самых совершенных методов оценки эффектов ОВ для мониторинга состояния окружающей среды в этом регионе Балтийского моря.

В ходе проекта используются комплекс методов классической биоиндикации и биотестирования, а также новые методы биомаркирования. Проводятся анализ токсичности донных осадков, исследование аномалий развития эмбрионов у амфипод, и отклонения аэробного метаболизма и сердечного ритма у моллюсков, появление специфической микробиоты у рыб и ракообразных, оценка уровня бионакопления ОВ в тканях



Карта распределения биомассы зообентоса в августе 2019 года

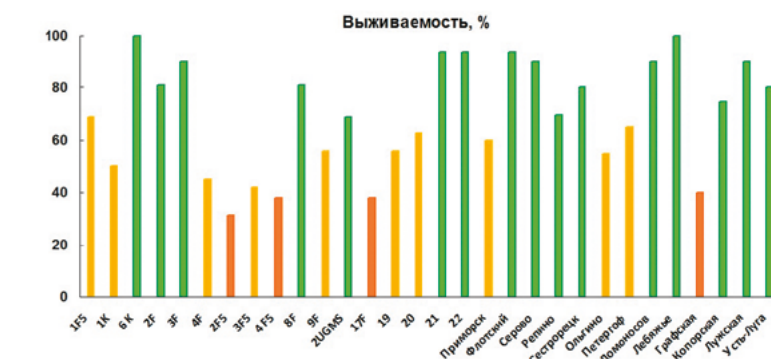


Массовые виды беспозвоночных – макомы балтийской Limecola balthica, садурии Saduria entomon, амфиподы Monoporeia affinis и полихеты Marenzelleria arctica

гидробионтов и состояние (повышенного риска обнаружения ОВ) и референтных мест. По данным скрининга 2019

года большая часть акватории российской части Финского залива находится в удовлетворительном состоянии. В целом содержание кадмия и свинца, нефтепродуктов и ПХБ на всех изученных участках было ниже пределов обнаружения, как в донных отложениях, так и в тканях водных животных и растений, но выявлено несколько участков особого риска, для которых актуально воздействие таких ОВ, как цинк, полиароматические углеводороды и оловоорганические соединения (табл. 1). Опасный фармацевтический препарат диклофенак обнаружен в воде на некоторых прибрежных участках залива (в 14% проб) с концентрацией в пределах 0,6 – 2,4 нг/л. В других районах Балтийского моря (Швеции и Германии) уровень DCF также невысок (2,0 – 9,2 нг/л), а в северной Атлантике у побережий Португалии и Ирландии отмечали его концентрации >200 нг/л (Benilde et al., 2018).

В составе донных сообществ восточной части залива самыми многочисленными являются многощетинковые черви (полихеты) *Marenzelleria arctica*, вселенцы из Арктики, которые



Результаты оценки качества местообитаний по выживаемости амфипод *Gmelinoides fasciatus* (10-суточный тест). Критерии: выживаемость рачков 100–70% – хорошее качество, отсутствие токсичности (GES), <45% – плохое качество, повышенная токсичность (оранжевый цвет)

обосновались в Финском заливе в первой декаде 2000-х годов. В то же время коренные балтийские виды – такие как моллюски *Limecola balthica* и реликтовые ракообразные (*Saduria entomon* и *Monoporeia affinis*) – остаются наиболее массовыми обитателями морского дна. Наибольшие биомассы зообентоса отмечены у южного побережья залива, что связано с высокой долей моллюсков (до 100 г/м<sup>2</sup>).

Амфипода *M. affinis* – типичный обитатель батииали залива – встречается на 90% изученных станций, достигает максимум 1300 экз./м<sup>2</sup> и 3 г/м<sup>2</sup>. Также корофиум *Corophium volutator* достигал высоких биомасс (10

г/м<sup>2</sup>) в Лужской губе. Высоких численностей в прибрежной части залива (глубины <5 м) достигают другие виды рачков-амфипод: *Gmelinoides fasciatus* и *Pontogammarus robustoides* (с биомассами до 10 г/м<sup>2</sup>) и *Gammarus tigrinus* (до 5 г/м<sup>2</sup>, Березина, Максимов, 2016). Амфиподы используются в качестве биоиндикаторов состояния окружающей среды в мониторинговых программах (Gorokhova et al., 2018).

Оценка токсичности донных местообитаний (седиментов) по выживаемости амфиподы *Gmelinoides fasciatus* выявила несколько неблагоприятных районов, на которых выжива-

Таблица 1. Содержание ОВ в тканях морских животных и растений, донных отложениях (ДО) и воде, выявленных в 2019 году\*

Станция	Цинк, мг/кг		Σ16 ПАУ, мкг/кг		ТВТ, мкг/кг	ΣООС, мкг/кг	DCF, нг/л
	в биоте	в ДО	в биоте	в ДО			
Прибрежье							
Приморск	<0.6	36.2	2	971	-	-	0.6
Флотский	<0.6	15.6	4	59	-	-	-
Серово	<0.6	15	2	34	-	-	-
Репино	<0.6	19	2	35	-	-	-
Сестрорецк	<0.6	35.1	4	45	-	-	0.9
Ольгино	<0.6	30	<1	41	-	-	-
Петергоф	<0.6	18.6	<1	239	-	-	-
Ломоносов	<0.6	18	<1	51	-	-	-
Лебяжье	<0.6	14.1	<1	275	-	-	1.4

Графская бухта	<0.6	21.8	2	67	-	-	2.4
Копорская губа	<0.6	21.5	2	60	-	-	-
Лужская губа	<0.6	6.6	<1	67	30	122	1.2
<b>Курортный район</b>							
19	0.65	105	<1	31	14	14	<0.06
20	0.83	130	<1	99	32	86	-
21	0.65	110	<1	59	50	140	-
<b>Мелководный район</b>							
1 F5	<0.6	150	<1	108	83	420	<0.06
2 F		130	<1	65	32	92	-
4 F		160	<1	45	71	147	-
9 F	<0.6	100	<1	40	32	92	-
22		100	<1	101	29	140	-
<b>Копорская губа</b>							
1 K	0.78	170	<1	69	17	17	<0.06
6 K	<0.6	95	<1	35	52	115	-
8 F	<0.6	95	<1	44	52	126	-
4 F5	<0.6	100	<1	59	50	140	-
<b>Глубоководный район</b>							
2 F5	<0.6	100	<1	51	74	123	<0.06
3 F5	0.73	140	<1	277	155	198	-
2 UGMS	1.1	140	<1	61	240	367	-
17 F	1.1	170	<1	158	174	290	-

\* ПАУ – полиароматические углеводороды, ООС – оловоорганические соединения, ТВТ – трибутилолово, DGF – диклофенак.  
«-» – нет данных

емость ниже 45%. В этих районах обнаружено повышенное количество нефтепродуктов и оловосодержащих соединений (табл. 1).

В ходе проекта оценивается влияние потенциальной токсичности донных отложений по состоянию здоровья эмбрионов амфипод, повышению их смертности или появлению пороков развития (уродств) эмбрионов. Средняя частота встречаемости (%) деформированных, увеличенных, недифференцированных и мертвых эмбрионов в расчете на одну самку или частота встречаемости самок более чем с одним случаем уродств эмбриона были рекомендованы Международным

советом по исследованию моря (ICES) в качестве общих биоиндикаторов воздействия загрязняющих веществ (Sundelin et al. 2008). Этот индекс был выбран в качестве предварительного индикатора для биологического воздействия опасных веществ в Балтийском море проектом ХЕЛКОМ CORESET (Gorokhova et al. 2018). Этот метод освоен и успешно применяется в Швеции, Дании, Финляндии, Латвии, Эстонии и России.

Для оценки метаболической активности животных в окружающей среде используется регистрация скорости аэробного метаболизма и параметров сердечного ритма отдельных

организмов (моллюсков и ракообразных) после их трансплантации из контрольной в загрязненную среду. Влияние кадмия ( $Cd^{2+}$ ) 5 мг/л на интенсивность аэробного метаболизма моллюсков ( $14,2 \pm 1,3$  мм) при температуре воздуха  $13,2 \pm 0,2$  °C измеряли через 48 часов и 6 суток. Скорость потребления кислорода моллюсками была снижена под влиянием кадмия и составляла  $0,015 \pm 0,01$  мг  $O_2$ /час г ( $p < 0,05$ ), что примерно втрое ниже, чем контроль  $0,045 \pm 0,01$  мг  $O_2$ /час г. Сифоны моллюсков были выдвинуты на максимальную величину, тогда как у контрольных моллюсков такого не наблюдалось. При более длительной экспози-



ции наблюдалась аналогичная картина поведения и дыхания моллюсков. На шестые сутки экспозиции скорость потребления кислорода составляла  $0,021 \pm 0,01$  мг  $O_2$ /час г, а к десятым суткам наблюдалась 100-процентная смертность животных. Содержание кадмия в донных осадках в восточной части Финского залива по данным литературы достигает 1,2–2,4 мг/кг, что при увеличении биодоступности кадмия (например, при повышении температуры) может привести к угнетению популяции.

Один из физиологических методов основан на изучении сердечного ритма морских животных (моллюсков и ракообразных). Используется волоконно-оптическая система для регистрации частоты сердечных сокращений (ЧСС) у взрослого моллюска (Холодkevич и др., 2019). Например, по времени восстановления ЧСС моллюсков после стресса до фонового уровня можно диагностировать состояние здоровья животных. В качестве кратковременного стресса применяется изменение солености воды (гиперосмотический стресс) на 1 час. Этот показатель определили у моллюсков *Anodonta sp.* после 30 суток содержания на донных отложениях, собранных на пяти участках в восточной части Финского залива с разным содержанием нефтепродуктов и металлов. Выявлено возрастание показателя с увеличением токсичности донных отложений.



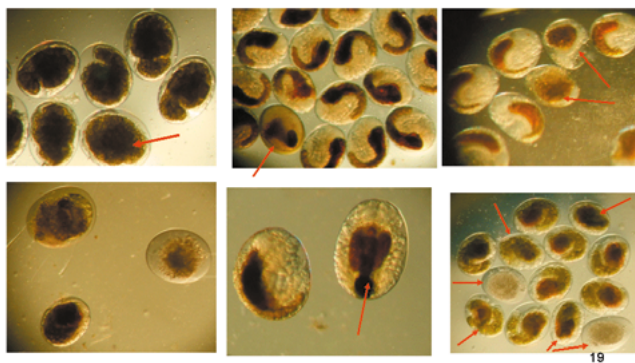
Групповое обучение представителей разных стран на базе института окружающей среды Финляндии, г. Хельсинки

Токсичность была подтверждена как прямым измерением содержания ОВ, так и методом биотестирования с ракообразными, при >80-процентной смертности. Моллюски, обитавшие в донных осадках, в которых содержалось более 200 мг/кг нефтепродуктов и 170 мг/кг цинка, характеризовались длительным временем восстановления ЧСС (125 мин.), которое было значительно выше, чем у таких же моллюсков (<60 мин.), обитавших на грунтах из чистых мест с отсутствием этих ОВ.

Оперативным методом контроля состояния водных экосистем является микробная индикация. Микробиота

пищеварительной системы водных организмов находится под постоянным воздействием токсичных соединений, загрязняющих воды Финского залива. Определение содержания микроорганизмов, способных к биодеградации загрязняющих веществ (например, углеводородокисляющих бактерий) в пищеварительном тракте морских животных (рыб, моллюсков, ракообразных), отражает изменения, происходящие в окружающей среде. Численность углеводородокисляющих бактерий, превышающая 10% от общего числа гетеротрофных бактерий, указывает на наличие загрязнения воды и донных отложений нефтью и нефтепродуктами и может быть рекомендована в мониторинге для оценки экологической ситуации в водных экосистемах. Высокая численность углеводородокисляющих бактерий (11,4–16,2%) в пище-

**Оперативным методом контроля состояния водных экосистем является микробная индикация.**



Самка амфиподы *M. affinis* с эмбрионами (слева). Эмбрионы здоровые и с уродствами в выводковой камере амфиподы *G. fasciatus* (справа)

варительном тракте отдельных видов рыб (трехиглой колюшки, пескаря, плотвы, уклейки, ельца) была выявлена на некоторых станциях наблюдения в Финском заливе, наибольшая – у рыб, выловленных в районе Приморска.

Зеленые макроводоросли вида *Cladophora glomerata* играют огромную роль в прибрежной экосистеме восточной части Финского залива. Летом они образуют массовые скопления вдоль берега, которые могут доставлять отдыхающим неудобства, прежде всего из-за неприятного запаха. Макроводоросли способны накапливать тяжелые металлы, что позволяет использовать их в качестве индикаторов загрязнения. Кроме этого, потребление макроводорослей беспозвоночными и рыбами приводит к поступлению ионов металлов из водорослевой массы в пищевые цепи.

В Финском заливе концентрации тяжелых металлов в макроводорослях отражают степень загрязненности окружающей среды, а именно: максимальное накопление металлов в биомассе наблюдалось на станциях с самым высоким содержанием металлов в придонной воде. Также высока корреляция между содержанием метал-



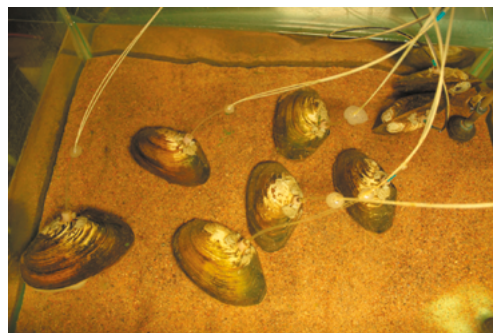
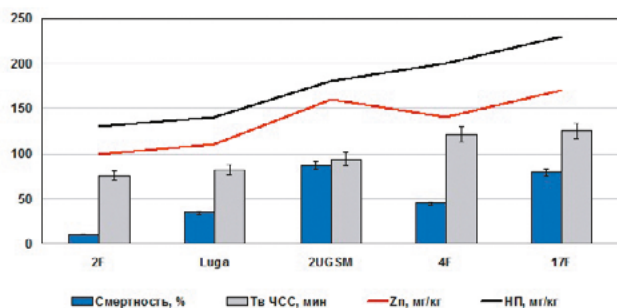
Двустворчатый моллюск *Limicola balthica* губы в воде, загрязненной кадмием (слева). Лабораторная установка (респирометр) с портативным оксиметром «HANNA» с автоматической температурной компенсацией для измерения уровня аэробного метаболизма моллюсков (справа)

лов в биомассе и подвижными формами металлов в донных отложениях. В водорослевых матах, где биомасса водорослей может достигать несколько кг на 1 м<sup>2</sup> дна, а толщина водорослевого слоя – 40 см, содержание металлов в донных осадках обычно значительно выше, чем на участках без водорослей. Это дает возможность выделять на побережье «точки риска», где мы можем предсказать наличие загрязнения прибрежной зоны. Таким образом, характеристики макроводорослей и содержание

металлов в них – это важный индикатор наличия металлов в окружающей среде.

В ходе проекта будут также оценены эффекты ОВ на уровне биохимических процессов с помощью рекомендованных ХЕЛКОМ биомаркеров воздействия и новых биомаркеров, выбранных в рамках HAZLESS. Комплексный подход позволит найти связь между качеством окружающей среды и здоровьем живых организмов на уровне биохимических и физиологических процессов, когда





Тестирование донных отложений с различных станций в Финском заливе с использованием показателя частоты сердечных сокращений (Тв ЧСС), смертности рачков-амфиподов и химического анализа металлов и нефтепродуктов (слева). Внешний вид моллюсков *Anodonta sp.* с прикрепленным оптическим волокном, передающим сигнал сердцебиения (справа)

последствия воздействия еще обратимы и губительное действие на организм может быть предупреждено. Применение таких «систем раннего предупреждения» вредных эффектов ОВ позволит дать возможность надежного прогнозирования эффектов токсичности и не допустить их влияния на такие жизненно важные функции организма, как метаболизм, рост и размножение. Именно эти функции играют ведущую роль для благополучия и здорового развития популяций живых организмов и гармоничного сосуществования человека и окружающей среды в Балтийском регионе. Основные результаты проекта HAZLESS будут использованы для разработки стратегии транснационального мониторинга и оценки эффектов опасных веществ не только на акватории исследований проекта, но также и в других регионах Балтийского моря.

### Список использованной литературы

Холодкович С.В., Шаров А.Н., Чуйко Г.М., Кузнецова Т.В., Гапеева М.В., Ложкина Р.А. 2019. Оценка качества пресноводных экосистем по функциональному состоянию двустворчатых моллюсков. *Водные ресурсы*. 2. С. 214–224. DOI: 10.1134/S0097807819020064



Прибрежная зона залива покрыта водорослевыми матами

Benilde B., Gomez E., Courant F., Escande A., Fenet H. 2018. Diclofenac in the marine environment: A review of its occurrence and effects. *Marine Pollution Bulletin*. 13. 496–506

Berezina N., Maximov A. 2016. Abundance and food preferences of amphipods (Crustacea: Amphipoda) in the eastern Gulf of Finland, Baltic Sea. *Journal Siberian Federal University. Biology*. 10: 409–426

Gorokhova E., Sundelin B., Berezina N. 2018: Reproductive disorders and malformed embryos of amphipods: HELCOM Supplementary indicator. doi.org/10.13140/RG.2.2.34346.52162

Sundelin, B., Eriksson Wiklund, A-K., Ford, A.T. 2008: Biological effects

of contaminants: the use of embryo aberrations in amphipod crustaceans for measuring effects of environmental stressors. *ICES Techniques in Marine Environmental Sciences*. 41. doi.org/10.1098/rspb.2010.129510.25607/OBP-223

