

МОНИТОРИНГ ФИНСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ: ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ

Ю.М. Поляк^{1, 4)*}, Ю.И. Губелит²⁾, Т.Д. Шигаева¹⁾, Л.Г. Бакина¹⁾,
В.А. Кудрявцева¹⁾, Г. Дембска³⁾, Г. Пазиковска-Сапота³⁾

¹⁾ ФГБУН «Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН»,
Россия, 197110, г. Санкт-Петербург, ул. Корпусная, д.18; *yuliapolyak@mail.ru

²⁾ Зоологический институт РАН,
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 1

³⁾ Гданьский Морской институт,
Польша, 80830, Гданьск, ул. Длуги-Тарг, 41/42

⁴⁾ Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9

Резюме. Мониторинговые исследования, проведенные в Финском заливе Балтийского моря, позволили установить, что техногенное воздействие на прибрежную зону приводит к изменению интенсивности и направленности биогеохимических процессов, протекающих в донных отложениях. В результате регулярного массового развития макроводорослей происходит дополнительное накопление металлов в донных отложениях прибрежной зоны, обусловленное возникающей гипоксией и выходом металлов из разлагающейся биомассы водорослей. Сукцессия микробных популяций проявляется в увеличении доли микроорганизмов, толерантных к металлам, а также микроорганизмов, способных к деструкции нефтяных углеводородов, и сопровождается изменением активности окислительно-восстановительных ферментов донных отложений. Выявлены основные антропогенные факторы, оказывающие влияние на активность микробиоты донных отложений, к числу которых относятся загрязнение медью, свинцом и нефтепродуктами.

Ключевые слова. Балтийское море, мониторинг, донные отложения, металлы, нефтепродукты, *Cladophora glomerata*, микробиота, углеводородокисляющие бактерии, металл-толерантные бактерии, ферментативная активность.

MONITORING OF THE GULF OF FINLAND, BALTIC SEA: ANTROPOGENIC PRESSURE ON BIOGEOCHEMICAL, PROCESSES IN THE COASTAL ZONE

Y.M. Polyak^{1, 4)*}, Y.I. Gubelit²⁾, T.D. Shigaeva¹⁾, L.G. Bakina¹⁾,
V.A. Kudryavtseva¹⁾, G. Dembska³⁾, G. Pazikowska-Sapota³⁾

¹⁾ Scientific Research Center for Ecological Safety Russian Academy of Sciences,
18, Korpusnaya str., 197110, St. Petersburg, Russia; *yuliapolyak@mail.ru

²⁾ Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences,
1, Universitetskaya Embankment, 199034, St. Petersburg, Russia

³⁾ Maritime Institute in Gdansk,
41/42, Długi Targ str., 80-830, Gdansk, Poland

⁴⁾ Saint-Petersburg State University,
7-9, Universitetskaya Embankment, 199034, St. Petersburg, Russia

Summary. Our study has shown that anthropogenic impact on the Gulf of Finland, Baltic Sea, leads to changes in rate and direction of biogeochemical processes

in the coastal sediments. Mass development of algae in coastal area contributes to accumulation of metals due to hypoxic conditions and metal release from decaying macroalgal biomass. Succession of microbial populations is evident as increase in percentage of metal-tolerant and hydrocarbon-oxidizing bacteria followed by alterations in the activity of sediment redox enzymes. The main anthropogenic factors influencing microbial activity in the Gulf of Finland coastal sediments are copper, lead, and oil pollution.

Keywords. Baltic Sea, monitoring, sediments, metals, oil pollution, *Cladophora glomerata*, microbiota, metal-tolerant bacteria, hydrocarbon-oxidizing bacteria, enzymatic activity.

Введение

Один из крупнейших заливов Балтийского моря – Финский залив, омывает территорию трёх государств: России, Эстонии и Финляндии. Российская его часть включает в себя внешний и внутренний эстуарии реки Невы, а также пресноводную и мелководную (до 4 м) Невскую губу, отделенную от внутреннего эстуария дамбой для защиты Санкт-Петербурга от наводнений. Внешний эстуарий представляет собой глубоководный (до 45 м) район на востоке Финского залива с солёностью поверхностных вод 3-8 ‰. Солёность поверхностных вод мелководного (до 25 м) внутреннего эстуария не превышает 1.5-5 ‰ (Алимов, Голубков, 2008а).

Побережье восточной части Финского залива является густонаселенным и высокоразвитым районом с высокой концентрацией промышленности, мощной атомной электростанцией (ЛАЭС), интенсивным сельским хозяйством. К числу крупнейших в Европе относятся нефтеналивные терминалы на северном (Приморск) и южном (Усть-Луга) побережье залива. Высокий уровень антропогенной нагрузки приводит к загрязнению, эвтрофированию и возникновению так называемых «зеленых приливов» как в Финском заливе, так и в Балтийском море в целом (Алимов, Голубков, 2008б; Gubelit et al., 2016).

Основная часть поллютантов аккумулируется в донных отложениях, создавая вторичное загрязнение и вызывая экологические последствия и биологические эффекты. Мишенями токсического действия оказываются многие гидробионты, включая планктон и зообентос (Berezina et al., 2016). В условиях антропогенного воздействия, особое значение в формировании качества воды в заливе приобретает активность микроорганизмов (Polyak et al., 2016). Деятельность микроорганизмов определяет интенсивность и направленность биогеохимических процессов, протекающих в загрязненных экосистемах. Загрязняющие вещества, накапливаясь в донных отложениях, негативно влияют на микроорганизмы, вызывая изменение уровня их ферментативной активности (Caruso et al., 2013). Благодаря высокой чувствительности ферментов к загрязнителям, показатель ферментативной активности широко используется для оценки экологического состояния загрязненных экосистем (Поляк, Бакина, 2015).

В проблеме мониторинга Финского залива Балтийского моря, изучение сос-

тояния прибрежной зоны, уровня загрязненности воды и донных отложений, степени воздействия поллютантов на микроорганизмы и интенсивности протекания биогеохимических процессов представляется важным этапом, необходимым для прогнозирования состояния экосистемы. Целью настоящих исследований являлось изучение микробиологических процессов, протекающих в донных отложениях прибрежной зоны восточной части Финского залива, и оценка нарушений, вызванных загрязнением тяжелыми металлами, нефтью и нефтепродуктами.

Методы и материалы

Экспедиционные исследования проводили в 2012-2016 гг. в летний период на 13 станциях наблюдения от Приморска на северном побережье до Лужской губы на южном побережье залива (рис. 1). Материалом для исследований служили пробы верхнего слоя донных отложений (0-5 см), отобранные штанговым дночерпателем «Робур», и образцы макроводорослей *Cladophora glomerata*, *Ulva intestinalis* и *Ulva* sp. Образцы донных отложений и макроводорослей отбирали в мелководной прибрежной зоне (глубина 1 м), каждый в четырех повторностях.

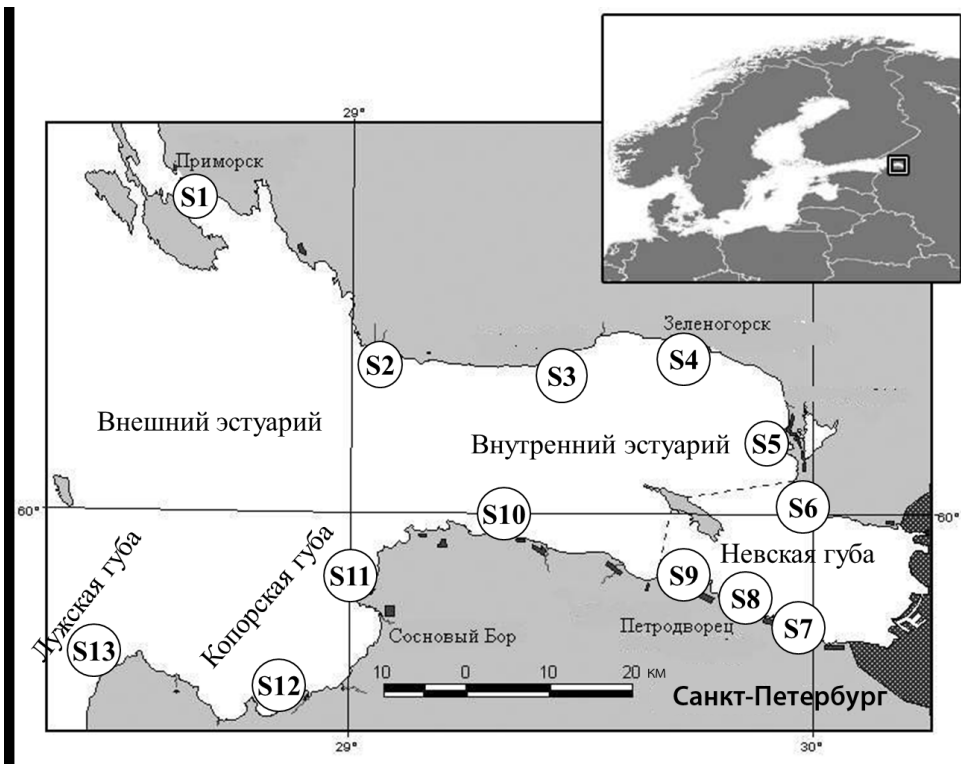


Рисунок 1. Карта восточной части Финского залива Балтийского моря и расположение станций наблюдения

S1 – Приморск, S2 – мыс Флотский, S3 – Репино, S4 – Ушково, S5 – Дубки, S6 – Ольгино, S7 – Петродворец, S8 – Мартышкино, S9 – Ломоносов, S10 – Большая Ижора, S11 – Графская бухта, S12 – Систо-Палкино (Копорская губа), S13 – Лужская губа

Для проведения химического и физико-химического анализа образцы донных отложений высушивали при температуре 30°C в сушильном шкафу до постоянного веса, после чего просеивали через сито для отбора фракций диаметром меньше 1 мм. Образцы водорослей высушивали при температуре 80°C до постоянного веса и взвешивали на весах с точностью до 0.01 г. Далее, арифметическим способом, проводился расчет биомассы в граммах сухой массы на м² (г сух. массы м⁻²) дна, с учетом площади поверхности, с которой была взята проба.

Общее содержание металлов (Cu, Zn, Pb, Cd, Fe) в донных отложениях определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе «Agilent 7700х» (Agilent technologies, Япония). Подвижные формы металлов (Cu, Zn, Pb, Cd) определяли методом инверсионной вольтамперометрии на приборе АВА 3 (НПП “Буревестник” Россия). Металлы экстрагировали в водный раствор ацетатным буфером с рН=4.8. Анализ нефтепродуктов (НП) проводили флуориметрическим методом (ПНД Ф 16.1:2.21-98). Содержание сухого вещества определяли после высушивания донных отложений при температуре 105°C до постоянного веса. Гранулометрический анализ донных отложений проводили лазерным методом (Федотов и др., 2007) на лазерном анализаторе LA-950 Horiba (Япония). Содержание органического углерода в донных отложениях определяли методом Тюрина (Методическое руководство..., 1980).

Для проведения микробиологического анализа образцы донных отложений отбирали в стерильные флаконы, транспортировали в лабораторию при температуре 4°C и анализировали сразу после доставки в лабораторию. Количество гетеротрофных микроорганизмов определяли методом посева на сухой питательный агар (СПА), разбавленный водой в соотношении 1:10 (Кузнецов, Дубинина, 1989). Численность углеводородокисляющих и металл-толерантных бактерий определяли, соответственно, на среде Ворошиловой-Диановой и на среде СПА, разбавленной в соотношении 1:10, с добавлением 1 мМ металлов (Cu, Zn, Pb). Полученные результаты выражали в процентах к общему числу гетеротрофов.

Дегидрогеназную активность донных отложений определяли методом Ленарда, основанном на восстановлении индикатора 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида с последующим фотометрическим анализом полученных растворов при длине волны 490 нм (Хазиев, 2005). В качестве субстрата дегидрирования в донные отложения вносили глюкозу, образовавшийся формазан экстрагировали метанолом. Инкубирование донных отложений проводили при температуре 30°C, в течение 24 час. Дегидрогеназную активность выражали в мкг восстановленной соли тетразолия (трифенилформазана) на 1 г сухого вещества (с.в.).

Активность каталазы в донных отложениях определяли методом перманганатометрического титрования Джонсона и Темпле (Хазиев, 2005), основанном на измерении количества перекиси водорода, не разложившейся через 20 мин. после внесения в донные отложения. Каталазную активность выражали в мл 0.1 н КМnO₄ на 1 г с.в. за 20 мин.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Statistica (версия 10, Statsoft).

Результаты

Характеристика физико-химических свойств донных отложений прибрежной зоны восточной части Финского залива представлена в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика донных отложений прибрежной зоны Финского залива

№ станции	Расположение	Координаты	C _{орг} (%)	pH	Eh (мВ)	Т, °С	Соленость (г·л ⁻¹)	Гранулометрический состав (%)		
								Песок	Глина	Ил
S1	Приморск	60°21'54N 28°36'42E	0.78± 0.08	6.88± 0.42	160±21	22	2.72± 0.18	95.8± 4.1	2.8±1.7	1.4±0.5
S2	Мыс Флотский	60°09'44N 29°09'07E	0.74± 0.10	6.74± 0.35	344±28	23	1.16± 0.09	98.9± 1.0	1.1±0.4	0
S3	Ушково	60°11'41N 29°37'17E	0.08± 0.01	7.42± 0.57	-76±5	24	0.64± 0.03	97.4± 2.4	1.2±0.2	1.4±0.4
S4	Репино	60°09'44N 29°51'16E	0.07± 0.03	6.90± 0.53	-53±8	23	0.45± 0.14	90.7± 10.5	4.5±2.7	4.8±1.9
S5	Дубки	60°05'24N 29°55'11E	0.40± 0.05	6.95± 0.42	-68±9	23	0.27± 0.05	97.0± 2.3	1.3±0.4	1.7±0.2
S6	Ольгино	59°59'32 N 30°05'46 E	0.10± 0.02	6.95± 0.38	170±14	27	0.10± 0.02	97.7± 2.2	1.8±0.6	0.5±0.2
S7	Петродворец	59°53'21N 29°54'12E	0.32± 0.04	6.90± 0.51	-87±10	24	0.16± 0.04	94.7± 4.8	2.6±0.5	2.7±0.4
S8	Мартышкино	59°54'09N 29°50'21E	0.79± 0.08	6.77± 0.48	266±22	24	0.31± 0.07	95.6± 4.2	2.9±0.7	1.5±0.3
S9	Ломоносов	59°89'29N 29°34'14E	0.24± 0.03	6.80± 0.39	40±7	23	0.39± 0.05	97.6± 2.4	1.0±0.3	1.4±0.2
S10	Большая Ижора	59°56'04N 29°54'18E	0.15± 0.03	5.86± 0.31	104±12	24	1.32± 0.16	90.1± 10.7	5.4±2.0	4.5±0.9
S11	Графская бухта	59°58'85N 29°12'51E	0.20± 0.02	7.08± 0.27	248±19	23	2.81± 0.27	97.2± 2.5	1.3±0.5	1.5±0.1
S12	Копорская бухта	59°48'25N 28°53'48E	0.17± 0.02	7.6± 0.69	-83±11	23	2.87± 0.16	91.7± 7.6	5.8±2.2	2.5±0.4
S13	Лужская губа	59°46'54N 28°26'41E	0.12± 0.03	6.86± 0.44	69±7	22	3.19± 0.34	93.9± 5.8	3.8±1.7	2.3±0.7

Верхний слой донных отложений в основном состоял из песчаных фракций и характеризовался низкой концентрацией органического углерода (0.1 - 0.8%) и незначительным содержанием глинистых частиц. Показатель pH был близок к нейтральным значениям (6.8-7.1) на большинстве станций наблюдения за исключением станции S10, где в донных отложениях наблюдалась сла-

боксидная реакция (рН 5.9), и станций S3, S12, где активная реакция среды была слабощелочной (7.4-7.6). Уровень Eh поверхностного слоя донных отложений различался значительно по побережью (на 300-400 мВ). На ряде станций наблюдения, в основном, расположенных на побережье внутреннего эстуария, были зарегистрированы отрицательные значения окислительно-восстановительного потенциала, достигающие -80 мВ (станции S3, S4, S5, S7, S12). Градиент солёности отражал распространение пресных вод р. Невы в сторону моря. В Невской губе солёность не превышала 0.1-0.3 г л⁻¹, во внутреннем эстуарии достигала 2.8 г л⁻¹, во внешнем эстуарии – 3.2 г л⁻¹.

Результаты анализа содержания нефтепродуктов в донных отложениях позволили установить, что концентрация НП варьирует в интервале от 1 до 110 мг кг⁻¹. Высокая концентрация НП (>30 мг кг⁻¹ донных отложений) была выявлена на станциях S1, S5, S7, S8, S9, S10. На ряде станций (S4, S6, S13), содержание НП было низким и не превышало 1.5 мг кг⁻¹.

Анализ уровня загрязнения донных отложений тяжелыми металлами показал, что валовое содержание меди, цинка, свинца и кадмия в донных отложениях достигает 55.7, 172.0, 32.7 и 0.3 мг кг⁻¹, соответственно (табл. 2). Максимальная концентрация меди, кадмия и свинца была выявлена в донных отложениях Приморска (станция S1), при этом концентрация свинца превышала значения регионального фона и на остальных станциях наблюдения, как на северном, так и на южном побережье залива.

Таблица 2. Валовое содержание металлов и нефтепродуктов в донных отложениях прибрежной зоны Финского залива

№ станции	Cu (мг кг ⁻¹)	Zn (мг кг ⁻¹)	Cd (мг кг ⁻¹)	Pb(мг кг ⁻¹)	НП(мг кг ⁻¹)
S1	55.70±7.12	66.12±7.20	0.33±0.04	32.67±6.59	32.90±5.08
S2	3.51±0.64	17.81±1.43	0.05±0.01	20.03±1.51	2.84±1.96
S3	2.87±1.37	29.59±14.41	0.11±0.03	7.96±1.83	2.85±0.42
S4	3.91±0.44	27.38±5.16	0.09±0.01	15.42±0.91	1.33±0.26
S5	3.59±1.25	26.32±4.14	0.06±0.01	15.60±1.84	32.90±4.27
S6	3.25±1.05	16.03±3.11	0.05±0.01	15.27±1.42	1.41±0.13
S7	10.82±1.17	43.38±7.90	0.15±0.11	23.46±2.89	36.37±3.78
S8	8.64±1.06	171.96±35.64	0.20±0.04	13.12±2.41	61.59±5.74
S9	6.87±1.82	45.67±3.89	0.15±0.11	16.78±2.10	81.30±11.64
S10	2.54±0.49	13.04±2.45	0.10±0.02	12.69±3.08	110.04±15.21
S11	3.32±0.92	38.69±5.31	0.29±0.05	12.97±2.39	5.87±0.41
S12	7.13±0.44	11.22±2.28	0.09±0.01	6.22±1.78	3.21±0.49
S13	1.90±0.87	31.19±5.17	0.08±0.03	14.78±1.12	1.52±0.22
C _ф *	12	34	0.2	10	10

Примечание. *C_ф – региональный фон (Алимов, Голубков, 2008б; Шахвердов, Шахвердова, 2015)

В донных отложениях Приморска было выявлено максимальное содержание наиболее опасных с экологической точки зрения подвижных форм металлов, в том числе меди, свинца и цинка (рис. 2). Высокий уровень содержания металлов в донных отложениях станции S1, по-видимому, связан с тем, что в настоящее время в этом районе действует крупнейший среди портов российского Северо-Запада нефтеналивной терминал. Более высокое, по сравнению с другими станциями, содержание подвижных форм Pb, Zn и Cd в донных отложениях, было обнаружено и на южном побережье залива, что, очевидно, связано с развитием многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка» (Поляк и др., 2017).

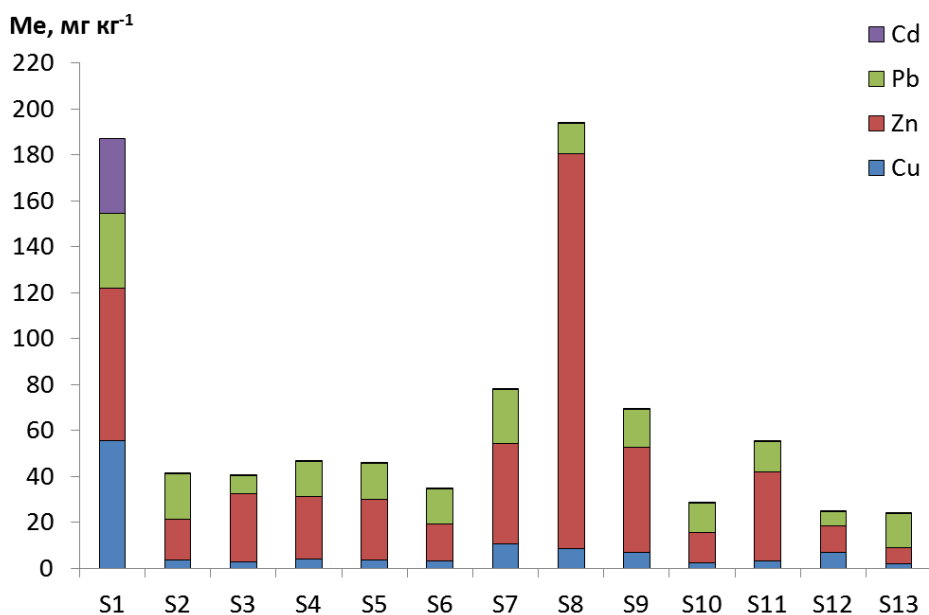


Рисунок 2. Подвижные формы меди, цинка, свинца и кадмия в донных отложениях прибрежной зоны Финского залива

Подвижные формы металлов способны высвобождаться из донных отложений и накапливаться живыми организмами. В местах массовых скоплений биомассы водорослей *Cladophora glomerata* и *Ulva* sp., широко распространенных в Балтийском море возбудителей «зеленых приливов», происходило дополнительное накопление металлов в донных отложениях, связанное с возникающей гипоксией и выходом металлов из разлагающейся биомассы. Биомасса зеленых макроводорослей колебалась в широком диапазоне на различных станциях (рис. 3). Максимальные значения наблюдались на станциях S1 (Приморск), S7 (Петродворец), S11 (Графская бухта), S12 (Систо-Палкино), S13 (Лужская губа).

Факторы биоконцентрации (BCF) металлов водорослями составляли от 63 до более 7 800 для Cu, от 70 до более 36 500 для Zn, от более 240 до более 3 700 для Cd, и достигали более 80 000 для Pb (табл. 3). Наиболее высокие значения BCF на северном побережье выявлены на станции S1 (*Ulva* sp.), на южном побережье – на станциях S12 (*C. glomerata*) и S13 (*Ulva intestinalis*).

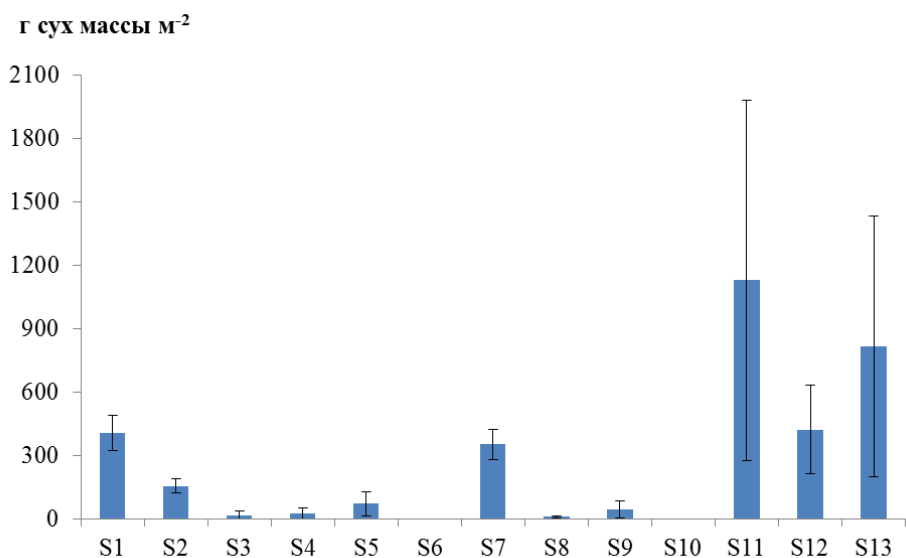


Рисунок 3. Биомасса зеленых макроводорослей в восточной части Финского залива в исследуемый период

Таблица 3. Факторы биоаккумуляции металлов (BCF) в макроводорослях

Станция	Водоросли	Cu	Pb	Zn	Cd
S1	<i>Ulva sp.</i>	>7 800	>80 000	>36 500	>800
S2	<i>Cladophora glomerata</i>	>4 200	>35 000	>21 800	-
S4	<i>C. glomerata</i>	2 445	>15 000	>18 000	-
S5	<i>C. glomerata</i>	>3 800	>20 000	>17 500	>240
S6	<i>C. glomerata</i>	2 380	>21 000	>22 000	>3700
S7	<i>C. glomerata</i>	2 900	>60 000	>22 400	-
S11	<i>C. glomerata</i>	>4 500	>40 000	>20 400	-
S12	<i>C. glomerata</i>	63	>25 000	70	-
S13	<i>C. glomerata</i>	>1 400	>1 800	>7 450	-
	<i>Ulva intestinalis</i>	>2 000	>61 000	>6 000	-

Связанные с техногенным загрязнением изменения были выявлены и при изучении сообщества донных микроорганизмов. В большинстве исследованных образцов были обнаружены микроорганизмы толерантные к тяжелым металлам. Их численность составила 1 - 12% от общего числа гетеротрофных бактерий (рис. 4). На ряде станций наблюдения была выявлена высокая численность углеводородоокисляющих бактерий (УВБ), способных использовать нефтяные углеводороды в качестве источника углерода и энергии. Относительная численность УВБ варьировала в интервале от 2 до 20% от общей численности гетеротрофов.

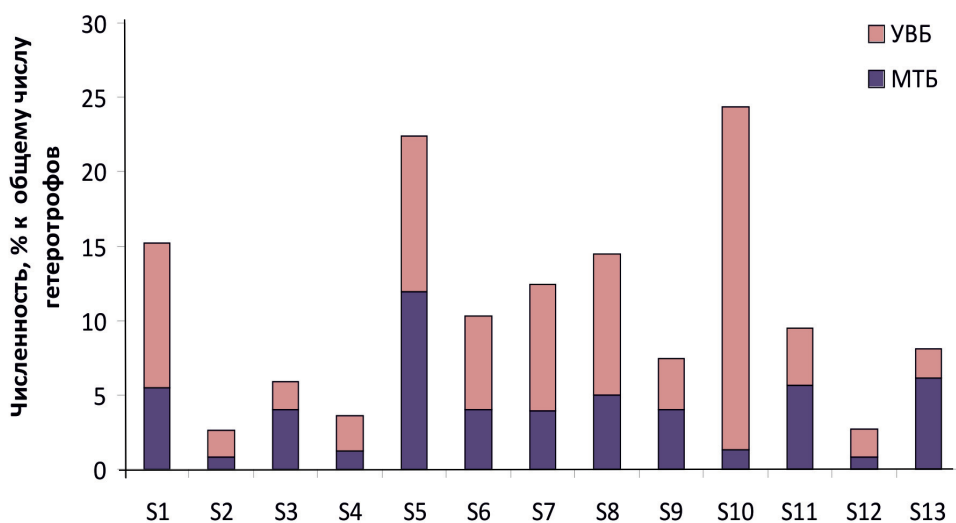


Рисунок 4. Численность металл-толерантных бактерий (МТБ) и углеводородокисляющих бактерий (УВБ), выраженная в процентах от общего числа гетеротрофных бактерий, в донных отложениях прибрежной зоны

Разложение органических соединений, содержащихся в донных отложениях, в том числе углеводов, происходит при непосредственном участии окислительно-восстановительных ферментов – дегидрогеназы и каталазы. Общая метаболическая активность микробиоты донных отложений характеризуется их дегидрогеназной активностью (Tate, 2002). В донных отложениях прибрежной зоны, активность дегидрогеназы составила 0.7 – 6.3 мг ТФФ $(10 \text{ г})^{-1} \text{ сут}^{-1}$ (рис. 5). Наиболее высокая дегидрогеназная активность была выявлена в Невской губе и внешнем эстуарии р. Невы.

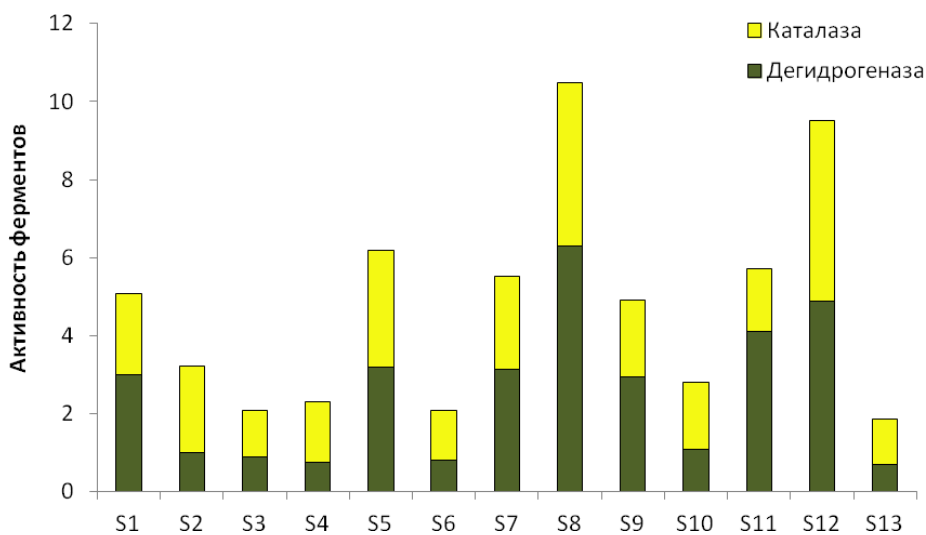


Рисунок 5. Активность ферментов дегидрогеназы (мг ТФФ $(10 \text{ г})^{-1} \text{ сут}^{-1}$) и каталазы (мг $\text{H}_2\text{O}_2 \text{ г}^{-1}$) в донных отложениях прибрежной зоны Финского залива

Каталаза участвует в разложении перекиси водорода и играет существенную роль в кислородном балансе донных отложений. В Невской губе и внешнем эстуарии р. Невы каталазная активность была наиболее высокой и достигала $4.6 \text{ мг H}_2\text{O}_2 \text{ г}^{-1}$. В донных отложениях внутреннего эстуария активность каталазы была значительно ниже и в среднем составляла $1.3 \pm 0.9 \text{ мг H}_2\text{O}_2 \text{ г}^{-1}$.

Для оценки влияния антропогенных факторов на биогеохимические процессы, происходящие в донных отложениях, вычисляли ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между концентрацией загрязняющих веществ и микробиологическими параметрами (табл. 4).

Таблица 4. Ранговые коэффициенты корреляции Спирмена между микробиологическими параметрами и физико-химическими показателями донных отложений

	ДА	КА	Гетеротрофы	УВБ	МТБ
КА	0.824**				
Гетеротрофы	0.593*	0.549*			
УВБ	-	-	0.726**		
МТБ	-	-	0.648*	0.509*	
Еh	-	0.709**	-	-	-
рН	-	-	-	-	-
песок	-0.701**	-0.567*	-0.621*	-	-
глина	0.593*	-	-	-	-
ил	0.805**	0.632*	0.654*	-	-
С	0.590*	0.560*	0.642*	-	-
Сu	-	-	-	-	0.706**
Zn	-	-	-	-	0.620*
Cd	-	-	-	-	-
Pb	-	-	-	-	0.560*
Fe	-	0.608*	-	0.644*	-
Подвижные формы Сu	-0.717 **	-0.561*	-	-	0.584*
Подвижные формы Zn	-	-	-	-	-
Подвижные формы Cd	-	-	-	-	-
Подвижные формы Pb	-0.563*	-	-	-	-
Нефтепродукты	0.712**	0.571*	-	0.703**	-

Примечания: 1) ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

2) УВБ – углеводородокисляющие бактерии, МТБ – металлтолерантные бактерии, ДА – дегидрогеназная активность, КА – каталазная активность

Корреляционный анализ выявил прямую зависимость ($p < 0.01$) между содержанием НП и относительной численностью углеводородокисляющих бактерий (УВБ), выраженной в процентах от общего числа гетеротрофов. В

незагрязненных донных отложениях микроорганизмы этой группы также были обнаружены, но их численность не превышала 2% от общего числа гетеротрофов, в то время как на станциях с повышенным содержанием НП численность УВБ составляла от 9 до 20%. Прямая зависимость была выявлена и между содержанием металлов и относительной численностью металл-толерантных бактерий (МТБ). Положительная корреляция отмечена между численностью МТБ и концентрацией меди, цинка и свинца ($p < 0.05$).

Статистический анализ выявил тесную связь поллютантов не только со специфическими группами донных микроорганизмов, но и с уровнем ферментативной активности донных отложений. Положительная корреляция отмечена между активностью окислительно-восстановительных ферментов и концентрацией нефтепродуктов ($p < 0.05$). Между содержанием подвижных форм меди и свинца в донных отложениях и активностью ферментов была выявлена отрицательная корреляция ($p < 0.05$).

Необходимо отметить, что связь между ферментативной активностью и валовым содержанием металлов в донных отложениях была слабой ($p > 0.1$). Исключением является положительная корреляция ($p < 0.05$) между активностью каталазы и концентрацией железа, что, по-видимому, связано с активным участием ионов железа в молекулах каталазы в каталитических циклах.

Помимо антропогенных факторов, на активность микробиологических процессов, происходящих в донных отложениях, оказывают влияние факторы окружающей среды. Выявлена прямая зависимость дегидрогеназной и каталазной активности от гранулометрического состава донных отложений, окислительно-восстановительного потенциала, содержания органического вещества ($p < 0.05$) (табл. 3). Оба фермента тесно связаны между собой ($p < 0.01$), кроме того, их активность коррелирует с численностью гетеротрофных бактерий в донных отложениях ($p < 0.05$). Активность окислительно-восстановительных ферментов слабо связана с численностью металл-толерантных и углеводородоксиляющих бактерий ($p > 0.1$).

Дискуссия

Антропогенное воздействие на прибрежную зону Финского залива приводит к аккумуляции в донных отложениях загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы и нефтепродукты. Достаточно высокое содержание поллютантов было выявлено более чем в 40% исследованных образцов донных отложений, что указывает на неблагоприятную экологическую ситуацию в прибрежной зоне. Полученные результаты коррелируют с данными многолетних наблюдений, свидетельствующими о загрязнении донных отложений и устойчивом превышении ПДК по меди, свинцу, цинку в водах восточной части Финского залива (Алимов, Голубков, 2008а). По данным РОСГИДРОМЕТа, несмотря на наметившуюся в последние годы тенденцию к снижению концентрации загрязняющих веществ в восточной части Финского залива, на многих станциях наблюдения концентрация металлов и НП в воде по-прежнему повышена и может достигать 6-10 ПДК (Качество морских вод, 2015).

Донные отложения являются средой обитания бентосных организмов, и их загрязнение вызывает не только вторичное загрязнение поверхностных вод, но и оказывает негативное воздействие на различные звенья трофической цепи, включая микро- и макроорганизмы (Zbikowski et al., 2007; Nogales et al., 2011; Naser, 2013). В исследованный период в Приморске и на южном побережье внешнего эстуария р. Невы массово развивались зеленые макроводоросли, что определило их значимую роль в функционировании прибрежного сообщества (Gubelit et al., 2016). Проведенные исследования позволили выявить последствия регулярного массового развития макроводорослей и накопления их биомассы в прибрежной зоне восточной части Финского залива.

Как правило, в статьях, посвященных «зеленым» приливам, кроме общего изменения сообществ и вытеснения многолетних видов макроводорослей, также упоминаются условия гипоксии, возникающие под толстым слоем аккумулированной водорослевой биомассы и вызывающие массовую миграцию и гибель бентосных животных (Berezina et al., 2007; Higgins et al., 2008). Кроме того, отмечено, что зеленые макроводоросли служат благоприятным субстратом для аккумуляции и развития энтеробактерий (Gubelit, Vainshtein, 2011).

Кроме вышеупомянутых негативных последствий, наши данные по содержанию металлов в донных отложениях и фактору биоаккумуляции металлов макроводорослями, позволяют предположить, что в местах массовых скоплений водорослевой биомассы, может происходить дополнительное накопление металлов в донных отложениях, которое обусловлено возникающей гипоксией и выходом металлов из разлагающейся биомассы водорослей. Статистический анализ показал однонаправленность векторов содержания металлов в донных осадках и биомассы макроводорослей. Как было отмечено нами ранее, максимальные концентрации металлов в донных отложениях были отмечены в местах с максимальной биомассой водорослей (Gubelit et al., 2016).

Отклик микробного сообщества на техногенное воздействие проявился в активном развитии гетеротрофных бактерий, толерантных к металлам и способных к деструкции нефтяных углеводородов. Их доля в донных отложениях с повышенным содержанием загрязняющих веществ достигала 20% от общего числа гетеротрофов. Полученные результаты согласуются с данными многих авторов о высокой чувствительности индикаторных групп микроорганизмов к антропогенному загрязнению водных экосистем (Безвербная и др., 2005; Polyak et al., 2014; Chronopoulou et al., 2015). Благодаря своим физиологическим и генетическим особенностям, микроорганизмы, быстро реагируют на изменение условий внешней среды (Израэль, Цыбань, 1992). Адаптация микробиоты к действию поллютантов происходит за счет включения механизмов резистентности, что позволяет микроорганизмам участвовать в биодеградации поллютантов.

Гетеротрофные бактерии синтезируют ферменты, необходимые для деградации и трансформации полимеров и органических соединений, тем самым

определяя свою важнейшую роль в регулировании биогеохимических циклов в водных экосистемах (Cho, Azam, 1988). Статистический анализ выявил тесную связь ферментативной активности донных отложений не только с природными факторами (гранулометрическим составом, содержанием органического вещества, Eh), но и с антропогенными – концентрацией тяжелых металлов (меди, свинца) и нефтепродуктов.

Наличие положительной связи между относительным содержанием металл-толерантных и углеводородокисляющих бактерий указывает на комплексный характер загрязнения донных отложений в прибрежной зоне залива. Комплексное загрязнение окружающей среды металлами и нефтепродуктами встречается достаточно часто и может различным образом влиять на интенсивность микробиологических процессов (Shi et al., 2002). Так, ферментативная активность почв, загрязненных смесью металлов, снижается и зависит от состава и концентрации загрязнителей (Niemeyer et al., 2012).

Наши исследования выявили отрицательную корреляцию между активностью ферментов и металлами, в то время как с нефтепродуктами была обнаружена положительная корреляция. Высокий уровень корреляции отражает взаимодействие между поллютантами и микроорганизмами, которое проявляется в форме токсического действия металлов на микробиоту донных отложений и активного развития углеводородокисляющих бактерий. Полученные результаты согласуются с данными Kimes с соавт. (2013) и Païssé с соавторами (2010), показавшими, что в присутствии углеводов происходит накопление в донных отложениях бактерий, способных включать их в свой метаболизм. Активное развитие в загрязненных донных отложениях микроорганизмов специфических групп указывает на адаптацию микробиоты к антропогенному воздействию.

Таким образом, отличительной особенностью донных отложений прибрежной зоны Финского залива является сукцессия микробных популяций и увеличение доли микроорганизмов, толерантных к металлам и/или способных к деструкции нефтяных углеводов. Проведенные исследования позволили установить, что, выявленные различия в активности микробиоты донных отложений определяются влиянием как природных, так и антропогенных факторов. Несмотря на адаптацию части микробного сообщества к антропогенному воздействию, ферментативная активность донных отложений, загрязненных тяжелыми металлами, снижается, что свидетельствует о замедлении скорости трансформации органического вещества и снижении интенсивности биогеохимических процессов.

Благодарности

Исследования были частично поддержаны грантом РФФИ № 01201351192, государственной исследовательской темой ЗИН РАН № 0120135119 и международным проектом трехстороннего сотрудничества между Финляндией, Россией и Эстонией “Год Финского залива 2014”.

Список литературы

Алимов А.Ф., Голубков С.М. 2008а. Экосистема эстуария реки Невы: биологическое разнообразие и экологические проблемы. – М., КМК, 477 с.

Алимов А.Ф., Голубков С.М. 2008б. Изменения в экосистемах восточной части Финского залива. – Вестник Росс. академии наук, т. 78, № 3, с. 223-230.

Безвербная И.П., Бузолева Л.С., Христофорова Н.К. 2005. Металлоустойчивые гетеротрофные бактерии в прибрежных акваториях Приморья. – Биология моря, т. 31, № 2, с. 89-93.

Израэль Ю.А., Цыбань А.В. 1992. Исследование экосистемы Берингова и Чукотского морей. Вып. 3. – СПб., Гидрометеиздат, 656 с.

Качество морских вод по гидрохимическим показателям. Ежегодник 2014. 2015. /Под ред. А.Н. Коршенко. – М., Наука, 156 с.

Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. 1989. Методы изучения водных микроорганизмов. – М., Наука, 286 с.

Методическое руководство по анализу органического вещества донных отложений. 1980. / Под ред. Е.М. Заславского. – М., ВНИРО, 64 с.

Поляк Ю.М., Бакина Л.Г. 2015. Ферментативная диагностика нефтезагрязненных почв северо-западного региона РФ. – В сб.: Роль почв в биосфере и жизни человека. – М., МАКС Пресс, с. 223-224.

Поляк Ю.М., Шигаева Т.Д., Кудрявцева В.А., Конаков В.Г. 2017. Влияние гранулометрического состава донных отложений на подвижность и токсичность тяжелых металлов в прибрежной зоне Финского залива Балтийского моря. – Вода: химия и экология, № 1, с. 11-18.

Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Путляев В.И., Архангельская Т.А., Елисеев А.В., Милановский Е.Ю. 2007. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерного дифракционного методов определения гранулометрического состава почв. – Почвоведение, № 3, с. 310-317.

Хазиев Ф.Х. 2005. Методы почвенной энзимологии. – М., Наука, 252 с.

Шахвердов В.А., Шахвердова М.В. 2015. Типы и факторы загрязнения восточной части Финского залива и его береговой зоны. – Известия Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, т. 176, с. 101-113.

Berezina N.A., Tsiplenkina I.G., Pankova E.S., Gubelit J.I. 2007. Dynamics of invertebrate communities in stony littoral of the Neva Estuary (Baltic Sea) under macroalgal blooms. – Transitional Water Bull., vol. 1, pp. 49-60.

Berezina N.A., Gubelit Y.I., Polyak Y.M., Sharov A.N., Kudryavtseva V.A., Lubimtsev V.A., Petukhov V.A., Shigaeva T.D. 2016. Anintegrated approach to the assessment of the eastern gulf of Finland health: A case study of coastal habitats. – J. Mar. Syst. ,<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.013>

Chronopoulou P.-M., Sanni G.O., Silas-Olu D.I., Van der Meer J.R., Timmis K.N., Brussaard C.P.D., McGenity T.J. 2015. Generalist hydrocarbon-degrading bacterial communities in the oil-polluted water column of the North Sea. – *Microb. Biotechnol.*, 8(3), pp. 434-447.

Caruso G., Azzaro F., La Ferla R., De Pasquale F., Raffa F., Decembrini F. 2013. Microbial enzymatic activities and prokaryotic abundance in the upwelling system of the Straits of Messina (Sicily): distribution, dynamics and biogeochemical considerations. – *Adv. Oceanogr. Limnol.*, vol. 4(1), pp. 43-69.

Cho B.C., Azam F. 1988. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior. – *Nature*, vol. 332, pp. 441-443.

Gubelit Yu.I., Vainshtein M.B. 2011. Growth of enterobacteria on algal mats in the eastern part of the Gulf of Finland. – *Inland Water Biol.*, vol. 4, pp. 132-136.

Gubelit Y., Polyak Y., Dembska G., Pazikowska-Sapota G., Zegarowski L. et al. 2016. Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: Sediments, macroalgae, microbiota. – *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 806-819.

Higgins S.N., Malkin S.Y., Howell E.T., Guildford S.J., Campbell L., Hiriart-Bayer V., Hecky R.E. 2008. An ecological review of *Cladophora glomerata* (Chlorophyta) in the Laurentian Great Lakes. – *J. Phycol.*, vol. 44, pp. 839-854.

Kimes N.E., Callaghan A.V., Aktas D.F., Smith W.L., Sunner J., Golding B., Drozdowska M., Hazen T.C., Suflita J.M., Morris P.J. 2013. Metagenomic analysis and metabolite profiling of deep-sea sediments from the Gulf of Mexico following the deepwaterhorizon oil spill. – *Front. Microbiol.*, vol. 4(50), pp. 1-17.

Naser H.A. 2013. Assessment and management of heavy metal pollution in the marine environment of the Arabian Gulf: A review. – *Marine Pollution Bulletin*, vol. 72, pp. 6-13.

Niemeyer J.C., Lolata G.B., de Carvalho G.M., da Silva E.M., Sousa J.P. et al., 2012. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. – *Appl. Soil Ecol.*, vol. 59, pp. 96-105.

Nogales B., Lanfranconi M.P., Pina-Villalonga J.M., Bosch R. 2011. Anthropogenic perturbations in marine microbial communities. – *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 35, pp. 275-298.

Païssé S., Goñi-Urriza M., Coulon F., Duran R. 2010. How a bacterial community originating from a contaminated coastal sediment responds to an oil input. – *Microb Ecol.*, vol. 60(2), pp. 394-405.

Polyak Y.M., Medvedeva N.G., Gubelit Y.I., Dembska G., Zegarowski L., Sapota G. 2014. Microbial population changes in the polluted coastal sediments of the Gulf of Finland, Baltic Sea / Proceedings of 6 IEEE/OES Baltic International Symposium: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment (Tallinn, 27-29 May 2014). BALTIC, 2014, pp. 32-37.

Polyak Y., Shigaeva T., Gubelit Y., Bakina L., Kudryavtseva V., Polyak M. 2016. Sediment microbial activity and its relation to environmental variables along the eastern Gulf of Finland coastline. – *Journal of Marine Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.017>

Shi W., Becker J., Bischoff M., Turco R.F., Konopka A. E. 2002. Association of microbial community composition and activity with lead, chromium, and hydrocarbon contamination. – *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 68(8), pp. 3859-3866.

Tate R.L. III. 2002. Microbiology and enzymology of carbon and nitrogen cycling. – In: *Enzymes in the Environment: Activity. Ecology and Applications* / Burns R.G. and Dick R.P. (Eds.) – Marcel Dekker Inc., New York, pp. 227-248.

Zbikowski R., Szefer P., Latala A. 2007. Comparison of green algae *Cladophora* sp. and *Enteromorpha* sp. as potential biomonitors of chemical elements in the southern Baltic. – *Sci. Total Environ.*, vol. 387, pp. 320-332.

References

Alimov A.F., Golubkov S.M. 2008a. *Jekosistema jestuarija reki Nevy: biologicheskoe raznoobrazie i ekologicheskie problem* [Ecosystem of the Neva Estuary: biodiversity and ecological problems]. Moscow, KMK Publ., 477 p. (In Russian).

Alimov A.F., Golubkov S.M. 2008b. Izmeneniya v jekosistemah vostochnoj chasti Finskogo zaliva [Changes in the eastern Gulf of Finland ecosystem]. *Vestnik Ross. akademii nauk – Herald of the Russian Academy of Sciences*, vol. 78(3), pp. 223–230. (In Russian).

Bezverbnaja I.P., Buzoleva L.S., Hristoforova N.K. 2005. Metalloustojchivye geterotrofnye bakterii v pribrezhnyh akvatorijah Primor'ja [Metal-resistant heterotrophic bacteria in coastal waters of Primorye]. *Biologija morja – Russian Journal of Marine Biology*, vol. 31(2), pp. 89-93. (In Russian).

Izrael' Ju.A., Cyban' A.V. 1992. *Issledovanie jekosistemy Beringova i Chukotskogo morej. Vol. 3* [The study of the Beringov Sea and Chukotskoe Sea ecosystems]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 656 p. (In Russian).

Kachestvo morskikh vod po gidrohimicheskim pokazatelyam. Ezhegodnik 2014. [The quality of sea water by hydrochemical parameters. Annual report 2014]. 2015. / A.N. Korshenko (Ed.). Moscow, Nauka Publ., 156 p. (In Russian).

Kuznecov S.I., Dubinina G.A. 1989. *Metody izuchenija vodnykh mikroorganizmov* [Methods of studying of aquatic microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 286 p. (In Russian).

Metodicheskoye rukovodstvo po analizu organicheskogo veshchestv adonnykh otlozheniy [Methodological guidelines for the analysis of organic matter of bottom sediments]. 1980 / E.M. Zaslavskii (Ed.). Moscow, VNIRO Publ., 64 p. (In Russian).

Polyak Ju.M., Bakina L.G. 2015. Fermentativnaja diagnostika neftezagryaznennykh pochv severo-zapadnogo regiona RF [Enzymatic diagnostics of oil contaminated soil in North-Eastern Russia]. V sb.: *Rol' pochv v biosfere i zhizni cheloveka – The role of soil in the biosphere and human life*. Moscow, MAKS Press, pp. 223-224. (In Russian).

Polyak Yu.M., Shigaeva T.D., Kudryavceva V.A., Konakov V.G. 2017. Vliyaniye granulometricheskogo sostava donnykh otlozheniy na podvizhnost' i toksichnost' tyazhelykh metallov v pribrezhnoy zone Finskogo zaliva Baltiyskogo moray [Influence of grain-size distribution of sediments on the mobility and toxicity of heavy metals in coastal zone of the Gulf of Finland]. *Voda: himiya i jekologiya – Water: chemistry and ecology*, no. 1, pp. 11-18. (in Russian).

Fedotov G.N., Shein E.V., Putljaev V.I., Arhangel'skaja T.A., Eliseev A.V., Milanovskij E.Ju. 2007. Fiziko-himicheskie osnovy razlichij sedimentometricheskogo i lazernogo difrakcionnogo metodov opredelenija granulometricheskogo sostava pochv [Physicochemical bases of differences between the sedimentometric and laser-diffraction techniques of soil particle-size analysis]. *Pochvovedenie – Eurasian Soil Sciences*, vol. 3, pp. 310-317. (In Russian).

Haziev F.H. 2005. *Metody pochvennoj enzimologii* [Methods of Soil Enzymology]. Moscow, Nauka Publ. , 252 p. (In Russian).

Shahverdov V.A., Shahverdova M.V. 2015. Tipy i factory zagryazneniya vostochnoj chasti Finskogo zaliva i ego beregovoj zony [Types and factors of pollution of the eastern Gulf of Finland and its coastal zone]. *Izvestiya Rossijskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. A.I. Gercena – Bulletin of the Russian State Pedagogical University A.I. Herzen*, vol. 176, pp. 101-113. (In Russian).

Berezina N.A., Tsiplenkina I.G., Pankova E.S., Gubelit J.I. 2007. Dynamics of invertebrate communities in stony littoral of the Neva Estuary (Baltic Sea) under macroalgal blooms. – *Transitional Water Bull.*, vol. 1, pp. 49-60.

Berezina N.A., Gubelit Y.I., Polyak Y.M., Sharov A.N., Kudryavtseva V.A., Lubimtsev V.A., Petukhov V.A., Shigaeva T.D. 2016. Anintegrated approach to the assessment of the eastern gulf of Finland health: A case study of coastal habitats. – *J. Mar. Syst.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.08.013>

Chronopoulou P.-M., Sanni G.O., Silas-Olu D.I., Van der Meer J.R., Timmis K.N., Brussaard C.P.D., McGenity T.J. 2015. Generalist hydrocarbon-degrading bacterial communities in the oil-polluted water column of the North Sea. – *Microb. Biotechnol.*, 8(3), pp. 434-447.

Caruso G., Azzaro F., La Ferla R., De Pasquale F., Raffa F., Decembrini F. 2013. Microbial enzymatic activities and prokaryotic abundance in the upwelling system of the Straits of Messina (Sicily): distribution, dynamics and biogeochemical considerations. – *Adv. Oceanogr. Limnol.*, vol. 4(1), pp. 43-69.

Cho B.C., Azam F. 1988. Major role of bacteria in biogeochemical fluxes in the ocean's interior. – *Nature*, vol. 332, pp. 441-443.

Gubelit Yu.I., Vainshtein M.B. 2011. Growth of enterobacteria on algal mats in the eastern part of the Gulf of Finland. – *Inland Water Biol.*, vol. 4, pp. 132-136.

Gubelit Y., Polyak Y., Dembska G., Pazikowska-Sapota G., Zegarowski L. et al. 2016. Nutrient and metal pollution of the eastern Gulf of Finland coastline: Sediments, macroalgae, microbiota. – *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 806-819.

Higgins S.N., Malkin S.Y., Howell E.T., Guildford S.J., Campbell L., Hiriart-Bayer V., Hecky R.E. 2008. An ecological review of *Cladophora glomerata* (Chlorophyta) in the Laurentian Great Lakes. – *Phycol.*, vol. 44, pp. 839-854.

Kimes N.E., Callaghan A.V., Aktas D.F., Smith W.L., Sunner J., Golding B., Drozdowska M., Hazen T.C., Suflita J.M., Morris P.J. 2013. Metagenomic analysis and metabolite profiling of deep-sea sediments from the Gulf of Mexico following the deepwater horizon oil spill. – *Front. Microbiol.*, vol. 4(50), pp. 1-17.

Naser H.A. 2013. Assessment and management of heavy metal pollution in the marine environment of the Arabian Gulf: A review. – *Marine Pollution Bulletin*, vol. 72, pp. 6-13.

Niemeyer J.C., Lolata G.B., de Carvalho G.M., da Silva E.M., Sousa J.P. et al., 2012. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil. – *Appl. Soil Ecol.*, vol. 59, pp. 96-105.

Nogales B., Lanfranconi M.P., Pina-Villalonga J.M., Bosch R. 2011. Anthropogenic perturbations in marine microbial communities. – *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 35, pp. 275-298.

Païssé S., Goñi-Urriza M., Coulon F., Duran R. 2010. How a bacterial community originating from a contaminated coastal sediment responds to an oil input. – *Microb Ecol.*, vol. 60(2), pp. 394-405.

Polyak Y.M., Medvedeva N.G., Gubelit Y.I., Dembska G., Zegarowski L., Sapota G. 2014. Microbial population changes in the polluted coastal sediments of the Gulf of Finland, Baltic Sea / Proceedings of 6 IEEE/OES Baltic International Symposium: Measuring and Modeling of Multi-Scale Interactions in the Marine Environment (Tallinn, 27-29 May 2014). *BALTIC*, 2014, pp. 32-37.

Polyak Y., Shigaeva T., Gubelit Y., Bakina L., Kudryavtseva V., Polyak M. 2016. Sediment microbial activity and its relation to environmental variables along the eastern Gulf of Finland coastline. – *Journal of Marine Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.017>

Shi W., Becker J., Bischoff M., Turco R.F., Konopka A.E. 2002. Association of microbial community composition and activity with lead, chromium, and hydrocarbon contamination. – *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 68(8), pp. 3859-3866.

Tate R.L. III. 2002. Microbiology and enzymology of carbon and nitrogen cycling. – In: *Enzymes in the Environment: Activity. Ecology and Applications* / Burns R.G. and Dick R.P. (Eds.) – Marcel Dekker Inc., New York, pp. 227-248.

Zbikowski R., Szefer P., Latala A. 2007. Comparison of green algae *Cladophora* sp. and *Enteromorpha* sp. as potential biomonitors of chemical elements in the southern Baltic. – Sci. Total Environ., vol. 387, pp. 320-332.

Статья поступила в редакцию: 02.04.2017 г.

После переработки: 06.06.2017 г.