

Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеийского полуострова (Крым)

Н. А. Орехова *, Е. И. Овсяный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

Поступила 23.04.2021 г.; принята к публикации 12.08.2021 г.; опубликована 25.09.2021 г.

По данным экспедиционных исследований, выполненных в 2015 г., изучены характеристики донных отложений в зоне расположения глубоководного канализационного коллектора комплексных очистных сооружений «Южные» и трансформация донных отложений в результате длительного антропогенного воздействия. Данные получены стандартными методами геохимического анализа. Установлено, что донные отложения в районе разгрузки сточных вод комплексных очистных сооружений «Южные» представлены грубообломочными и крупнозернистыми фракциями. Это минеральные частицы, сформированные как в результате абразии берегов, так и в процессе накопления и диагенеза (ракушечник, детритный песок) донных отложений. По дисперсному и химическому составу они значительно отличались от донных отложений, сформированных в природных условиях. Это были преимущественно неконсолидированные водонасыщенные отложения с низкой карбонатностью, высоким содержанием органического углерода и влаги, а также с признаками (примеси, консистенция, запах), характерными для техногенных илов коммунальных стоков. Отмечено, что уровень накопления органического углерода антропогенного происхождения сопоставим с уровнем накопления органического вещества в донных отложениях бухт Севастопольского региона, характеризующихся ограниченным водообменом и подверженных длительному антропогенному загрязнению. Превышение установленных ранее критических уровней содержания органического углерода в рыхлых грунтах Черного моря ($C_{орг} \geq 2.5\%$) приводит к деструктивным изменениям в экосистемах: оказывает негативное влияние на бентос, резко изменяя его структурные показатели (численность, биомасса, общее видовое богатство) с перестройкой его преобладающей видовой структуры.

Ключевые слова: донные отложения, органический углерод, сточные воды, Голубая бухта.

Благодарности: работа выполнена в рамках темы государственного задания 0555-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»), а также проекта РФФИ 18-05-80028 «Исследование и оценка роли гидрофизических

© Орехова Н. А., Овсяный Е. И., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

и биогеохимических процессов в формировании зон дефицита кислорода и сероводородного заражения прибрежных районов Крымского полуострова и Керченского пролива».

Для цитирования: Орехова Н. А., Овсяный Е. И. Метаморфизация донных отложений при неконтролируемом сбросе сточных вод в литоральную зону Гераклеийского полуострова (Крым) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 3. С. 68–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-68-83

Metamorphization of Bottom Sediments under Uncontrolled Discharge of Waste Waters into the Litoral Zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea)

N. A. Orekhova *, E. I. Ovsyany

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: natalia.orekhova@mhi-ras.ru*

Submitted 23.04.2021; revised 12.08.2021; published 25.09.2021

Based on the data of field research performed in 2015, the authors studied characteristics of bottom sediments in the area of a deepwater sewage collector of “Yuzhnye” Integrated Sewage Treatment Plant and transformation of bottom sediments resulted from a long-term anthropogenic impact. The data were obtained by standard methods of geochemical analysis. It is established that the bottom sediments in the wastewater discharge area of “Yuzhnye” Integrated Sewage Treatment Plant are represented by rudaceous and coarse-grained fractions. These are mineral particles formed both as a result of coastal abrasion and in the process of accumulation and diagenesis (shell rock, detrital sand) of bottom sediments. In terms of their size distribution and chemical composition they differed significantly from the sediments formed under natural conditions. These were mostly unconsolidated water-saturated sediments with low carbonate content, high organic carbon and moisture content and signs (impurities, consistency, odour) characteristic of municipal sewage sludge. It is noted that the accumulation level of anthropogenic organic carbon is comparable to that of organic matter in the bottom sediments of Sevastopol region bays characterized by limited water exchange and subject to long-term anthropogenic pollution. Exceeding the previously established critical organic carbon levels in the soft soils of the Black Sea ($C_{org} \geq 2.5\%$) results in destructive changes in ecosystems: it has a negative impact on benthos sharply changing its structural characteristics (abundance, biomass, total species richness) with restructuring of its dominant species structure.

Keywords: bottom sediments, organic carbon, waste water, Golubaya Bay.

Acknowledgements: the work is performed under state task 0555-2021-0005 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”, and RFBR project 18-05-80028 “Study and assessment of the role of hydrophysical and biogeochemical processes in formation of oxygen deficiency zones and hydrogen sulfide pollution of coastal areas of the Crimean Peninsula and the Kerch Strait”.

For citation: Orekhova, N.A. and Ovsyany, E.I., 2021. Metamorphization of Bottom Sediments under Uncontrolled Discharge of Waste Waters into the Litoral Zone of the Herakleisky Peninsula (Crimea). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 68–83. doi:10.22449/2413-5577-2021-3-68-83 (in Russian).

Прибрежно-шельфовая зона Гераклейского полуострова находится под продолжительным антропогенным прессом, испытывая нагрузку различной интенсивности – от умеренной до значительной. Наиболее длительному и существенному воздействию подвержены морские акватории, водообмен которых с открытыми водами ограничен [1–4]. Показательным примером является Севастопольская бухта, более ста лет находящаяся под влиянием разнообразных источников загрязнения [1, 3].

Однако некоторые районы открытой части севастопольского побережья также подвержены продолжительному и систематическому загрязнению. Одним из значимых источников загрязнения являются сточные воды [5]. По результатам анализа состояния канализационных сооружений [5] среднегодовой сброс сточных вод составляет около 60 млн м³, из этого объема 70–73 % подвергаются только механической очистке, около 13 % – биологической. Оставшиеся 14–16 % сбрасываются без очистки. Примерно 92 % всех городских стоков¹⁾ сбрасываются в бухты и открытое море, остальные 8 % – в реки Севастопольского региона (Черная, Бельбек, Балаклавка) [5]. В настоящее время функционирует более 30 выпусков сточных вод¹⁾, 16 из которых используется для сброса стоков непосредственно в Черное море [5]. Рост населения Севастополя и, как результат, водопотребления должны приводить к увеличению сброса сточных вод, до 80 % которых сливаются в море без биологической очистки¹⁾.

К числу мест, подверженных значительному загрязнению сточными водами, относится литоральная зона Гераклейского п-ова в районе б. Голубой. Здесь осуществляется разгрузка стоков комплексных очистных сооружений (КОС) «Южные», на которые приходится максимальный объем коммунальных сточных вод [5, 6]. В настоящее время на КОС «Южные» эксплуатируются только сооружения механической очистки, которая является малоэффективной, так как удаляется лишь крупнодисперсная фракция взвешенных веществ, доля которой не превышает 30 %. О недостаточной очистке сточных вод этого коллектора также свидетельствует высокая концентрация ионов аммония (до 3 мМ), синтетических поверхностно-активных веществ (до 2 мг/дм³) и нефтепродуктов (до 0.6 мг/дм³) [6]. Сброс вод осуществляется по глубоководному канализационному коллектору длиной около 3 км [7, 8] с заглублением оголовка примерно на 85 м [8].

Загрязнение неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами приводит к эвтрофикации морской среды. Установлено, что такие воды являются источником загрязнения донных отложений органическим веществом $C_{орг}$ (3.6–6.2 %), тяжелыми металлами (Ni, Cd, Cr, Sg и др.), концентрация которых выше фоновых значений [9]. КОС «Южные» оказывают и наибольшее антропогенное воздействие на прибрежную зону г. Севастополя. С их стоком в воды поступает до 75 % биогенных и 88 % загрязняющих веществ [6].

В 2015–2016 гг. Морским гидрофизическим институтом РАН были проведены комплексные экспедиционные исследования, которые позволили

¹⁾ Корчмит Ю. В., Леонов А. А. Загрязнение природной среды города Севастополя : Справочно-методическое пособие. Севастополь, 2009. 172 с.

установить, что вблизи берега над канализационным коллектором КОС «Южные» находится источник загрязнения, который по гидрофизическим, гидрохимическим и микробиологическим данным может быть идентифицирован как сточные воды [7, 8]. Еще ранее анализ спутниковых данных позволил обнаружить в этом месте плум (предположительно сточных вод) длиной 3–4 км и шириной 0.6 км, расположенный существенно ближе к берегу (в 600–700 м), чем оголовок глубоководного коллектора [10]. Причиной поступления сточных вод является аварийное состояние канализационного коллектора после его повреждения в 2003 г. Это приводит к систематическому загрязнению среды и ежегодным неоднократным закрытиям пляжей города санитарной службой из-за превышения санитарно-химических и санитарно-микробиологических нормативов (СанПиН 2.1.5.2582-2010). Гидрохимическими исследованиями, выполненными в Голубой бухте в зоне аварийного сброса сточных вод КОС «Южные» [8], выявлены высокие концентрации биогенных элементов, значительно превышающих ПДК.

Сточные воды содержат высокие концентрации растворенных и взвешенных органических веществ (ОВ), минеральных и органических соединений фосфора и азота и других химических веществ [5]. При их взаимодействии с морской водой протекают процессы, характерные для функционирования комплексной геохимической барьерной зоны, подобные процессам в устьевой области реки [11]. Это проявляется в осаждении и фракционировании основной части растворенного и взвешенного материала, в том числе и органического. Контактируя с пресными сточными водами, вода Черного моря (соленость 17–18 ‰) выступает в качестве электролита, что при флокуляции и коагуляции растворенных и взвешенных веществ активизирует процессы седиментации и образования донных осадков (ДО).

В то же время формирование и динамика осадочного материала при контакте сточных и морских вод характеризуют результирующую роль физико-химических и гидродинамических процессов, протекающих в прибрежно-шельфовой зоне при продолжительном неконтролируемом сбросе неочищенных вод, что в конечном итоге приводит к трансформации ДО. Исследование химического состава верхнего (0–5 см) слоя ДО позволяет судить о степени и характере изменений характеристик морской среды вследствие длительного антропогенного воздействия на прибрежные акватории. Изменения физико-химических условий ДО приводят к трансформации их гранулометрической структуры и вещественного состава, что отражается на общем экологическом состоянии морской среды.

Опыт бесконтактного и контактного мониторинга зоны разгрузки сточных вод в районе КОС «Южные» указывает на разный характер проявлений изменения состояния водной морской среды [5, 7, 10]. Анализ результатов этих исследований показал, что изменения характеристик водной среды, обнаруженные как при бесконтактных (визуальных и спутниковых) наблюдениях, так и при гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследованиях, не являются систематическими. Они выражаются в эпизодических превышениях нормативных показателей воды. Так, по результатам анализа примерно 200 снимков спутников *Landsat-8* и *Sentinel-2*, полученных в 2013–2019 гг., было выявлено только 24 случая загрязнения сева-стопольской прибрежной зоны сточными водами КОС «Южные» [12].

В результате подводного обследования коллектора в 2019 г. в 750 м от берега на глубине 35 м было обнаружено его повреждение с разломом трубы со смещением. Из-за этого, по экспертным оценкам, в месте аварии не менее 70 % объема сброса недостаточно очищенных сточных вод в течение 16 лет поступало в морскую среду.

В настоящее время, по сообщениям администрации г. Севастополя, авария на канализационном коллекторе устранена. Однако масштаб повреждения и продолжительность загрязнения позволяет предполагать обширный характер воздействия на морскую среду, так как загрязнение ДО оказывает прямое и опосредованное влияние и на бентосные организмы [13], для которых ДО являются средой обитания. Помимо этого, ДО становятся источником вторичного загрязнения водной среды при динамических воздействиях или изменении окислительно-восстановительных условий [2].

Исходя из этого, целью настоящей работы является оценка состояния и особенности трансформации ДО, вызванной длительным антропогенным воздействием в районе расположения КОС «Южные».

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили пробы ДО, отобранные в зоне расположения глубоководного канализационного коллектора КОС «Южные» (рис. 1) в ходе экспедиционных работ на малотоннажном судне «Бирюза» 28–31 июня 2015 г. Работы выполнялись в два этапа – в литоральной зоне и в зоне, находящейся непосредственно рядом с выпуском. Район исследования ограничивался ~70-метровой изобатой. На рис. 1 точками отмечены станции, выполненные во время 1-го этапа (28–30 июня 2015 г.), треугольниками – во время 2-го этапа (31 июня 2015 г.), звездочкой – предполагаемое место повреждения трубы. Заштрихованная область указывает на зону влияния сточных вод.

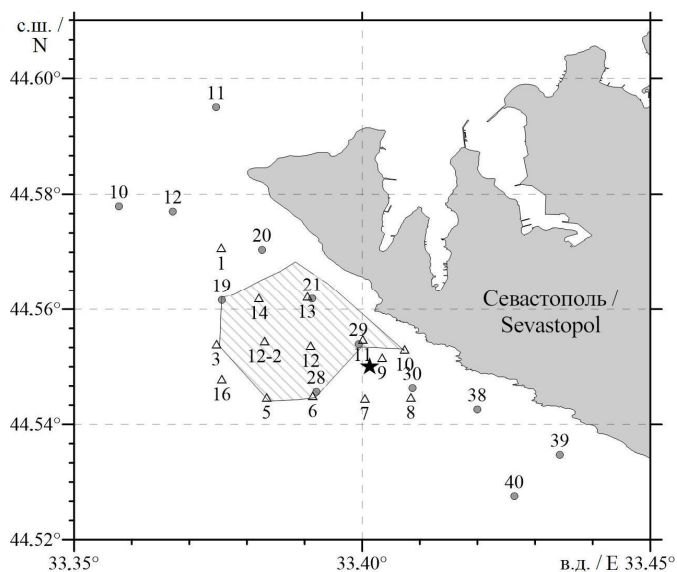


Рис. 1. Схема станций отбора проб

Fig. 1. Sampling station map

Пробы ДО (слой 0–5 см) были отобраны пробоотборником типа Петерсена (площадь захвата 0.025 м²).

Определение геохимического состава отложений (содержание органического и неорганического углерода, влажности и гранулометрической структуры) выполнялось по стандартной аналитической процедуре, подробно описанной в [14].

Результаты и обсуждение

Полученные результаты геохимического анализа представлены в таблице и на рис. 2. По гранулометрическому составу ДО исследуемого района должны быть подобны осадкам акваторий открытого типа с умеренным антропогенным воздействием и сходными гидродинамическими условиями, например как акватории юго-восточного Крыма (Лименский залив, б. Ласпи [14, 15]), где, несмотря на различие минералогического состава, крупнодисперсные фракции в литорали преобладают [15, 16], а основная доля гравийной фракции состоит из биогенного материала [16].

Однако, как показывают полученные нами результаты, современные ДО в районе исследования в значительной мере были представлены алевритопелитовыми илами с высокой долей мелкодисперсных фракций (до 95%), примесью песка и гравия, песчаными и песчано-гравийными фракциями с ракушечно-каменным гравием (рис. 2).

Иловые осадки выглядели неконсолидированными, их цвет изменялся от светло- до темно-серого; отмечен характерный затхлый запах. В ДО станций, расположенных вблизи разлома коллектора, встречались примеси частиц из пластмассы. Эти осадки были обводнены (влажность $\geq 100\%$), содержание

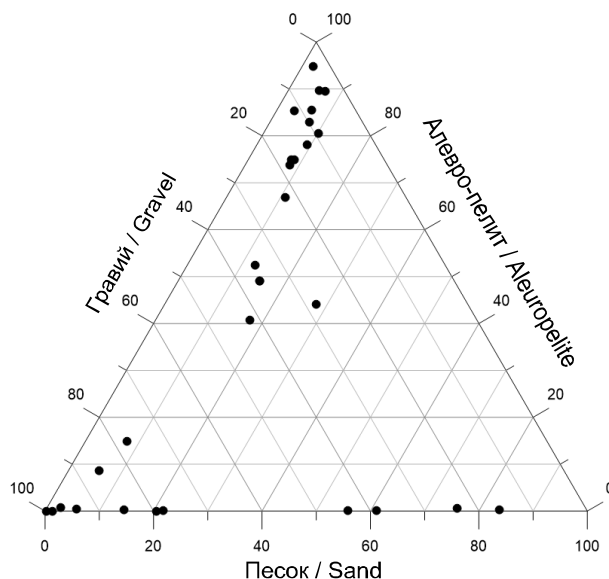


Рис. 2. Распределение фракций (%) в донных осадках (слой 0–5 см), отобранных в Голубой бухте

Fig. 2. Distribution of bottom sediment fractions (%) (0–5 cm layer) sampled in the Golubaya Bay

Общая характеристика ДО (слой 0–5 см), отобранных в Голубой бухте
 General characteristic of bottom sediments (0–5 cm layer) sampled in the Golubaya Bay

Стан-ция / Station	Глубина, м / Depth, m	Влажность, % / Water content, %	Средний размер частиц, мм / Average particle size, mm	C _{орг} , % / C _{org} , %	CaCO ₃ , %
1-й этап (28–30 июня 2015 г.) / 1 st stage (28–30 June 2015)					
10	69.5	150	0.9	1.63	51.2
11	69	124	1.8	0.56	86.3
12	62	32	0.3	1.40	31.8
19	75	134	0.2	1.91	32.5
20	31	34	4.0	0.17	98.9
21	42	41	1.6	0.85	87.5
28	66	106	0.5	1.62	34.6
29	41	69	1.2	0.10	98.1
30	41	35	4.4	0.17	97.2
38	34	42	2.5	0.09	98.0
39	26	31	4.1	0.14	97.6
40	75	137	0.6	1.87	28.1
2-й этап (31 июня 2015 г.) / 2 nd stage (31 June 2015)					
1	61	65	4.0	0.55	83.3
1*	61	65	–	1.11	64.5
3	69	136	0.5	1.51	40.9
5	75	149	0.5	1.79	34.9
6	67	126	0.2	1.61	32.0
7	64	111	1.2	1.57	51.1
8	53	35	4.3	0.44	89.8
9	29	62	4.7	5.60	86.5
10	19	30	5.0	0.62	96.7
11	32	45	4.9	0.78	91.7
12	65	161	0.7	1.74	44.6
12-2	67	140	0.9	1.64	31.2
13	36	16	4.9	0.42	94.8
14	67	131	1.0	1.49	50.9
16	20	3	2.3	0.10	98.5

* Анализ илистой части осадка.

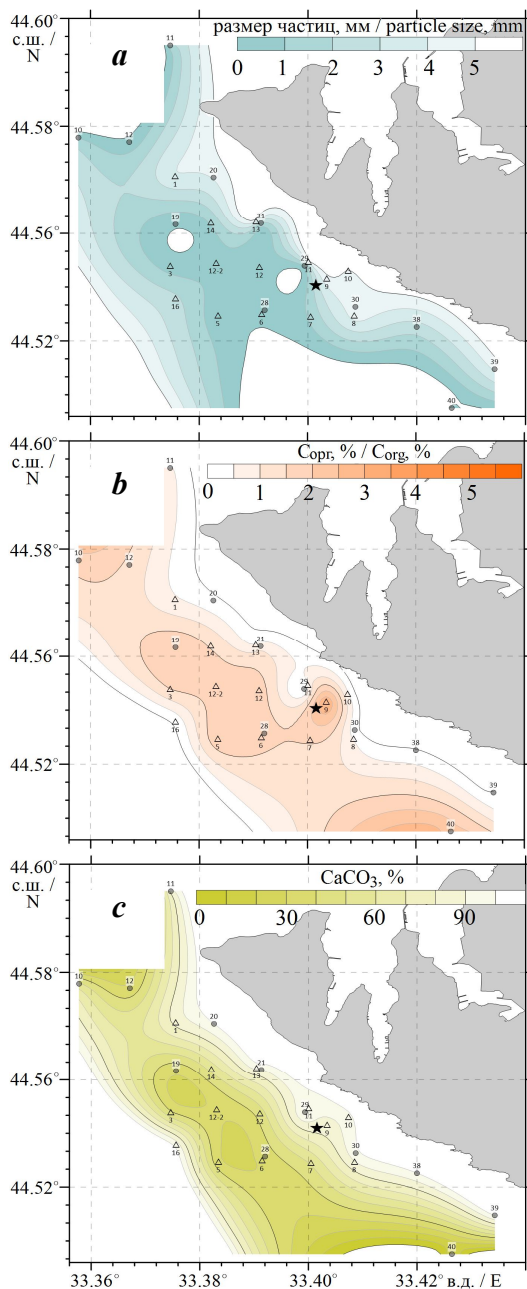
* Analysis of the sludge part of the sediment.

Рис. 3. Пространственная изменчивость среднего размера частиц (*a*), содержания органического (*b*) и неорганического (*c*) углерода в донных отложениях

Fig. 3. Spatial variability of particle average size (*a*), organic (*b*) and inorganic (*c*) carbon in bottom sediments

органического углерода ($C_{\text{орг}}$) достигало 5.6 % сух. мас. Отмечено увеличение доли мелкодисперсной части, преимущественно алеврито-пелитовой (до 95 %), в районе разлома коллектора (рис. 3, *a*). Преобладание мелкодисперсных фракций – крупно- и мелкоалевритовой и пелитовой – является признаком техногенных осадков [17, 18]. Такая дисперсная структура осадков существенно отличается от естественно сложившейся гранулометрической структуры ДО литоральной зоны шельфа Юго-Западного Крыма [14–16], когда при естественном состоянии (вне зоны воздействия стоков) доля крупнодисперсных фракций (песчаная + гравийная) составляет более 75 % [16]. Для формирования подобной мелкодисперсной структуры необходим мощный антропогенный источник длительного действия, которым являются сточные воды КОС «Южные» при аварийном сбросе.

Среднее содержание органического углерода (1.23 % сух. мас.) в ДО исследуемого района (рис. 3, *b*) также было значительно выше, чем в подобных акваториях Юго-Западного Крыма [14, 15]. При этом отмечена пространственная вариабельность этого параметра от 0.09 до 5.60 % сух. мас. (таблица). Максимальная концентрация $C_{\text{орг}}$ обнаружена в илистой фракции вблизи разлома канализационного коллектора (ст. 9) на глубине 29 м. Такой уровень накопления ОВ характерен для бухт Севастопольского региона с ограниченным водообменом (Артиллерийская, Южная), которые длительное время подвергаются антропогенному воздействию [1, 3]. Этот высокий



уровень накопления органического вещества в открытой прибрежной зоне обусловлен значительным объемом сброса недостаточно очищенных сточных вод и продолжительным воздействием на морскую среду. Однако существенная доля гравийно-песчаной фракции осадка (рис. 2; 3, *a*), состоящей преимущественно из биогенного материала [16], обуславливает высокую карбонатность (CaCO_3) – 30 % и более (таблица, рис. 3, *c*). Вблизи разлома коллектора на ст. 9 содержание достигает 87 %. Высокое содержание одновременно органического и неорганического углерода является нетипичным для ДО, сформированных в естественных условиях вне антропогенного воздействия, так как биогеохимические процессы их образования противоположно направлены [3]. Кроме того, обогащение органическим веществом ДО литоральной зоны и формирование биогенных карбонатов в процессе взаимодействия сточных вод с морской водой предполагает высокую скорость осадконакопления.

Для оценки влияния сточных вод на морскую среду на основании анализа результатов исследования гранулометрического состава (таблица, рис. 2), а также исходя из диапазонов полученных значений влажности, содержания органического и неорганического углерода, результатов спутниковых наблюдений [7] и сравнительного анализа структурных особенностей осадков литоральных зон сходных климатических условий юго-западного побережья Крыма, выполнена группировка данных для характеристики двух типов отложений (рис. 4, 5):

- 1) в зоне воздействия сточных вод;
- 2) вне зоны воздействия.

Несмотря на условность такого подхода, результаты гранулометрического и химического анализов ДО позволяют установить, что в районе исследования сформированы два типа ДО:

тип 1 – неконсолидированные илистые осадки, образованные в результате смешения неочищенных сточных вод с морской водой и характеризующиеся высокими значениями влажности и содержания $C_{\text{орг}}$, а также преимущественно низкой карбонатностью (ст. 10, 12, 19, 28, 40 (1-й этап); ст. 3, 5–7, 9, 12, 12-2, 14 (2-й этап));

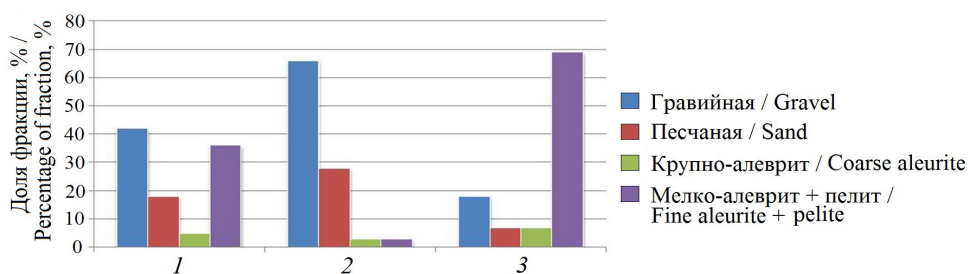


Рис. 4. Модификация фракционной структуры донных осадков в районе сточных вод (КОС «Южные»): 1 – азональная структура ДО; 2 – вне зоны воздействия сточных вод; 3 – в зоне воздействия сточных вод

Fig. 4. Modification of the fraction structure of bottom sediments under influence of wastewater (sewage treatment plant “Yuzhnye”): 1 – azonal structure of bottom sediments; 2 – outside the area influenced by wastewater; 3 – in the area influenced by wastewater

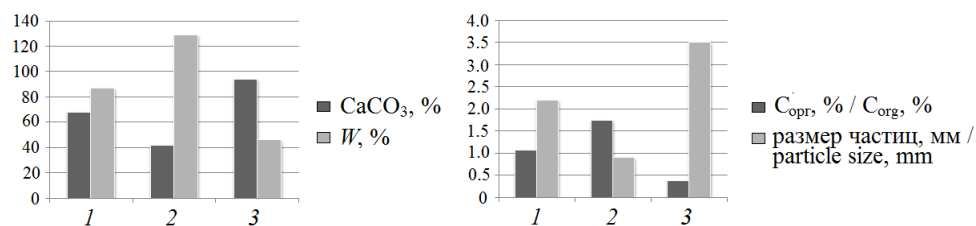


Рис. 5. Изменение влажности (W), содержания неорганического и органического углерода, среднего размера частиц в донных отложениях: 1 – при азональном распределении; 2 – распределении в зоне действия сточных вод; 3 – распределении вне зоны действия сточных вод

Fig. 5. Changes in water content (W), inorganic and organic carbon content, average particle size in bottom sediments 1 – azonal distribution; 2 – distribution in the area influenced by wastewater; 3 – distribution outside the area influenced by wastewater

тип 2 – песчано-галечные и песчаные осадки с низкой влажностью, высокой карбонатностью и низким содержанием $C_{орг}$ (ст. 20, 21, 29, 30, 38, 39 (1-й этап); ст. 1, 8, 10, 11, 13, 16 (2-й этап); таблица, рис. 4, 5).

В зонах экстремального воздействия неочищенных коммунальных стоков КОС «Южные» на морскую среду уровень загрязнения ДО органическим веществом антропогенного происхождения резко повышается, коррелируя с содержанием органического углерода в техногенных илах севавтопольских бухт вторичного порядка – Южной, Артиллерийской [3].

Особенностью хозяйственно-бытовых (коммунальных) сточных вод является относительное постоянство их состава. Основная часть загрязнений представлена органическими веществами, доля которых составляет более 50 % от общей массы загрязняющих веществ. В работе Корчмита Ю. В., Леонова А. А.¹⁾ общая масса сброса ОВ в море со сточными водами Севастополя оценивается в 6060 т/год, из этого количества на КОС «Южные» приходится наибольшая доля – 79 %, т. е. 4800 т/год. По нашей оценке, исходя из объема сброса сточных вод КОС «Южные» (80 тыс. м³/сут) и их состава, общая масса ОВ, поступающая в море со сточными водами в прибрежно-шельфовую зону Гераклейского п-ова, составляет не менее 4900 т/год. При этом из этой массы ОВ не менее 70 % поступало в литоральную зону из аварийного разлома канализационного коллектора. Таким образом, за время аварийного состояния коллектора (16 лет) в литоральную зону поступило около 50 тыс. т ОВ.

Еще В. И. Вернадский указывал, что геохимические изменения, вносимые в гидросферу деятельностью человека, проявляются в изменении состава органической компоненты, увеличении ее содержания и преобразовании ее качественной структуры. В работе А. А. Огородниковой и др. [19] показано, что при загрязнении морской среды сточными водами накопление ОВ, а также органических и неорганических соединений азота и фосфора наносит биоресурсам наибольший ущерб. В процессе органического загрязнения изменение геохимической структуры донных отложений как среды обитания имеет решающее значение для бентосных гидробионтов [20]. В работах [21–23] показано, что для области воздействия сточных вод

характерно общее увеличение численности гидробионтов и руководящего вида биоценоза *Chamelea gallina*, в сравнении с характерными биоценозами Черного моря. Увеличение биомассы в 4–6 раз рассматривается как отклик на результат воздействия органического загрязнения акватории. Отмечается также, что по мере приближения к оголовку выпуска сточных вод и, следовательно, увеличения концентрации органических веществ наблюдается снижение индекса видового разнообразия и количества обнаруживаемых видов.

Органический материал в отложениях – важный источник пищи для бентической фауны, однако его избыток может вызвать сокращение видового богатства, численности и биомассы за счет потребления кислорода на окисление ОВ [3] и наращивания концентраций токсичных побочных продуктов (аммиак и сероводород), связанных с распадом этих органических веществ. Локальное накопление ОВ способно оказывать негативное влияние на бентосный биоценоз [20, 24]. Для Черного моря установлены критические уровни накопления органического углерода в рыхлых ДО ($C_{\text{орг}} \geq 2.5\%$ сух. мас.), при достижении которых наблюдаются негативные изменения структурных показателей бентоса (численность, биомасса, видовое богатство) и отмечается перестройка его видовой структуры [20, 24].

Прибрежно-аквальная зона Севастопольского региона активно используется в качестве объекта рекреации. Здесь функционирует ряд стационарных лечебно-оздоровительных учреждений, а также летних баз отдыха, пляжей. Городские хозяйственно-бытовые и промышленные стоки являются постоянным источником загрязнения прибрежных морских вод региона. Нарушение санитарно-гигиенических норм приводит к временному закрытию пляжей. Помимо рекреационного использования, в прибрежной зоне Гераклеийского п-ова в последние годы прослеживается активное развитие марикультуры [24]. При выборе мест размещения морских ферм важно учитывать влияние сточных вод на состояние морской среды. Хотя аварийный разлом канализационного коллектора устранен, без строительства современных очистных сооружений с полной биологической очисткой сточных вод решение экологических проблем невозможно.

Заключение

Результаты исследования показали, что ДО литоральной части шельфа Гераклеийского п-ова в зоне сброса сточных вод КОС «Южные» по дисперсному и химическому составу значительно отличаются от осадков, сформированных в природных условиях. В зоне воздействия сточных вод это преимущественно неконсолидированные водонасыщенные отложения с высоким содержанием органического углерода, влаги и низкой карбонатностью, с признаками (примеси, консистенция, запах), характерными для техногенных илов коммунальных стоков. Уровень накопления $C_{\text{орг}}$ антропогенного происхождения сопоставим с накоплением ОВ в бухтах Южной и Артиллерийской, а также других бухтах Севастопольского региона с ограниченным водообменом с открытым морем, которые в течение длительного времени подвергаются антропогенному загрязнению. Превышение установленных ранее критических уровней содержания органического углерода в рыхлых грунтах Черного моря ($C_{\text{орг}} \geq 2.5\%$) приводит к негативным изменениям в экосистемах.

Полученные данные о современном состоянии ДО в зоне интенсивного антропогенного воздействия, а также характеристики ДО вне зоны активного воздействия являются начальным информационным материалом для последующей оценки степени воздействия на морскую среду и ее трансформации. Эти данные могут быть использованы при разработке программ мониторинга и проектов хозяйственного освоения акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 25.05.2020).
2. Органическое вещество и гранулометрический состав современных донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) / Н. А. Орехова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 523–533. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-523-533
3. *Orekhova N. A., Kononov S. K.* Oxygen and sulfides in bottom sediments of the coastal Sevastopol region of Crimea // *Oceanology*. 2018. Vol. 58, iss. 5. P. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
4. *Овсяный Е. И., Орехова Н. А.* Накопление органического вещества в донных отложениях бухты Казачья (Черное море) как следствие антропогенной нагрузки // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 5. С. 85–93.
5. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574594579-590>
6. *Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я.* Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
7. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040068>
8. *Иванов В. А., Фомин В. В.* Численное моделирование заглубленного стока в прибрежной зоне Гераклеяского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 6. С. 89–103.
9. Исследование донных отложений в антропогенной зоне шельфа Южного берега Крыма / А. И. Рябинин [и др.] // *Труды ГОИН*. 2015. Вып. 216. С. 307–325.
10. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 43–60.
11. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
12. Канализационные сбросы в севастопольской прибрежной зоне и их наблюдения из космоса / А. А. Кучейко [и др.] // *Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*, Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2019 г. Москва : ИКИ РАН, 2019. С. 286. doi:10.21046/17DZZconf-2019a

13. *Петров А. Н.* Реакция прибрежных макробентосных сообществ Черного моря на органическое обогащение донных отложений // *Экология моря*. Севастополь, 2000. Вып. 51. С. 45–51.
14. *Овсяный Е. И., Гуров К. И.* Исследование органического углерода и карбонатности в донных осадках шельфа южного побережья Крыма // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 1. С. 62–72. doi:10.22449/0233-7584-2016-1-62-72
15. *Орехова Н. А., Овсяный Е. И.* Органический углерод и гранулометрический состав литоральных донных отложений бухты Ласпи (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 3. С. 287–299. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-287-299
16. *Скребец Г. Н., Агаркова-Лях И. В.* Парагенетические ландшафтные комплексы абразионно-бухтовых ингрессионных берегов черноморского побережья Крыма // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского*. Сер. «География». 2004. Т. 17, № 4. С. 85–96.
17. Anthropogenic enrichment of the chemical composition of bottom sediments of water bodies in the neighborhood of a non-ferrous metal smelter (Silesian Upland, Southern Poland) / R. Machowski [et al.] // *Scientific Reports*. 2019. Iss. 9. 14445. doi:10.1038/s41598-019-51027-w
18. *Опекунов А. Ю.* Влияние техногенного воздействия на геохимическую структуру современных донных осадков // *Вестник СПбГУ*. Серия 7. 2004. Вып. 2. С. 70–80.
19. Воздействие береговых источников загрязнения на биоресурсы залива Петра Великого (Японское море) / А. А. Огородникова [и др.] // *Экология нектона и планктона дальневосточных морей и динамика климато-океанологических условий*. Владивосток : ТИПРО-центр, 1997. С. 430–450. (Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра ; Т. 122).
20. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos / J. Hyland [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. 2005. Vol. 295. P. 91–103. doi:10.3354/meps295091
21. *Киселева М. И.* Характеристика многолетних изменений бентоса в прибрежной зоне района Севастополя // *Экология моря*. Севастополь, 1988. Вып. 28. С. 26–32.
22. К вопросу о реакции черноморского макрозообентоса на эвтрофирование / Н. К. Ревков [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1999. С. 199–212.
23. Многолетние изменения бентоса в районе Севастополя (Чёрное море) / Н. А. Болтачёва [и др.] // *Экология моря*. Севастополь, 2006. Вып. 72. С. 5–15.
24. *Петров А. Н.* Структура прибрежных сообществ зообентоса о-ва Крит (Эгейское море) при разном уровне органического обогащения донных отложений // *Морской экологический журнал*. 2013. Т. 12, № 1. С. 59–73.

Об авторах:

Орехова Наталья Александровна, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X**; **ResearcherID: I-1755-2017**; **Scopus Author ID: 35784884700**, natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Овсяный Евгений Иванович, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2). **ORCID ID: 0000-0002-6093-5102**; **Scopus Author ID: 6506585957**

Заявленный вклад авторов:

Орехова Наталья Александровна – обработка данных, формулирование основного направления работ, целей и выводов; работа с материалами статьи

Овсяный Евгений Иванович – обработка материала, выполнение химического анализа, подготовка первичных материалов

REFERENCES

1. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sebastopol Bay and its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
2. Orekhova, N.A., Ovsyany, E.I., Gurov, K.I. and Popov, M.A., 2018. Organic Matter and Grain-size Distribution of the Modern Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 25(6), pp. 479–488. doi:10.22449/1573-160X-2018-6-479-488
3. Orekhova, N.A. and Konovalov, S.K., 2018. Oxygen and Sulfides in Bottom Sediments of the Coastal Sevastopol Region of Crimea. *Oceanology*, 58(5), pp. 679–688. doi:10.1134/S0001437018050107
4. Ovsyanyi, E.I. and Orekhova, N.A., 2019. Accumulation of Organic Carbon in Bottom Sediments of the Kazach'ya Bay (the Black Sea) Resulting from Anthropogenic Load. *Meteorologiya i Gidrologiya*, (5), pp. 85–93 (in Russian).
5. Gruzinov, V.M., Dyakov, N.N., Mezenceva, I.V., Malchenko, Y.A., Zhohova, N.V. and Korshenko, A.N., 2019. Sources of Coastal Water Pollution near Sevastopol. *Oceanology*, 59(4), pp. 523–532. <https://doi.org/10.1134/S0001437019040076>
6. Verzhevskaya, L.V. and Minkovskaya, R.Ya., 2020. Structure and Dynamics of Anthropogenic Load on the Coastal Zone of the Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106 (in Russian).
7. Bondur, V.G., Ivanov, V.A., Dulov, V.A., Goryachkin, Yu.N., Zamshin, V.V., Kondratiev, S.I., Lee, M.E., Mukhanov, V.S., Sovga, E.E. and Chukharev, A.M., 2018. Structure and Origin of the Underwater Plume near Sevastopol. *Fundamentalnaya i Prilkladnaya Gidrofizika*, 11(4), pp. 42–54. <https://doi.org/10.7868/S2073667318040068> (in Russian).
8. Ivanov, V.A. and Fomin, V.V., 2016. Numerical Simulation of Underwater Runoff Propagation in the Heraklean Peninsula Coastal Zone. *Physical Oceanography*, (6), pp. 82–95. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2016-6-82-95>
9. Ryabinin, A.I., Smyrnova, L.L., Danilova, E.A., Malchenko, Y.A., Erkushov, V.Y. and Bogoslavets, V.V., 2015. Investigation of Bottom Sediments in Anthropogenic Offshore of the Southern Coast of Crimea. In: V. M. Gruzinov, ed., 2015. *Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute*. Moscow: SOI. Iss. 216, pp. 307–325 (in Russian).
10. Dulov, V.A., Yurovskaya, M.V. and Kozlov, I.E., 2015. Coastal Zone of Sevastopol on High Resolution Satellite Images. *Physical Oceanography*, (6), pp. 39–54. doi:10.22449/1573-160X-2015-6-39-54
11. Lisitsyn, A.P., 1994. A Marginal Filter of the Oceans. *Okeanologiya*, 34(5), pp. 735–747 (in Russian).

12. Kucheiko, A.A., Ivanov, A.Y., Grigoriev, N.S., Ushkov, D.A., Terleeva, N.V. and Makarenko, A.V., 2019. [Sewage Discharge in the Sevastopol Coastal Area and Observation thereof from the Space]. In: IKI, 2019. [*Proceedings of the 17th All-Russia Open Conference «Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space», Moscow, IKI RAS, 8 October 2019*]. Moscow: IKI, p. 286. doi:10.21046/17DZZconf-2019a (in Russian).
13. Petrov, A.N., 2000. Responses of the Black Sea Macrobenthic Communities upon Organic Enrichment Impact of Bottom Sediments. In: IBSS, 2000. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 51, pp. 45–51 (in Russian).
14. Ovsyany, E.I. and Gurov, K.I., 2016. Research of Organic Carbon and Carbonate Content in the Bottom Sediments of the Crimean Southern Coast Shelf. *Physical Oceanography*, (1), pp. 60–70. doi:10.22449/1573-160X-2016-1-60-70
15. Orekhova, N.A. and Ovsyany, E.I., 2020. Organic Carbon and Particle-size Distribution in the Littoral Bottom Sediments of the Laspi Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, 27(3), pp. 266–277. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-266-277
16. Skrebets, G.N. and Agarkova-Lyakh, I.V., 2004. Paragenetic Landscape Complexes of Abrasion and Bay Ingression Coasts of the Black Sea Coast of Crimea. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Geography Sciences*, 17(4), pp. 85–96 (in Russian).
17. Machowski, R., Rzetala, M.A., Rzetala, M. and Solariski, M., 2019. Anthropogenic Enrichment of the Chemical Composition of Bottom Sediments of Water Bodies in the Neighborhood of a Non-Ferrous Metal Smelter (Silesian Upland, Southern Poland) *Scientific Reports*, (9), 14445. doi:10.1038/s41598-019-51027-w
18. Opekunov, A.Yu., 2004. The Influence of Technogenic Effect on the Geochemical Structure of Recent Bottom Sediments. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, Iss. 2, pp. 70–80 (in Russian).
19. Ogorodnikova, A.A., Veideman, E.L., Silina, E.I. and Nigmatulina, L.V., 1997. [Influence of Coastal Pollution Sources on Bioresources of the Peter the Great Bay (Sea of Japan)]. *Ecology of Nekton and Plankton of Far Eastern Seas and Climatic-Oceanological Dynamics. Izvestiya TINRO*, 122, pp. 430–450 (in Russian).
20. Hyland, J., Balthis, L., Karakassis, I., Magni, P., Petrov, A., Shine, J., Vestergaard, O. and Warwick, R., 2005. Organic Carbon Content of Sediments as an Indicator of Stress in the Marine Benthos. *Marine Ecology Progress Series*, 295, pp. 91–103. doi:10.3354/meps295091
21. Kisseleva, M.I., 1988. A Characteristic of Benthos Changes of Many Years in the Littoral Zone of the Area of Sevastopol. In: IBSS, 1988. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 28, pp. 26–32 (in Russian).
22. Revkov, N.K., Valovaya, N.A., Kolesnikova, E.A., Nikolaenko, T.V. and Shalyapin, V.K., 1999. [On Reaction of the Black Sea Macrozoobenthos on Eutrophication]. In: MHI, 1999. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, pp. 199–212 (in Russian).
23. Boltachova, N.A., Mazlumyan, S.A., Kolesnikova, E.A. and Makarov, M.V., 2006. Long-Term Changes of the Shallow Sea Benthos near Sevastopol (the Black Sea). In: IBSS, 2006. *Ekologiya Morya = Ecology of the Sea*. Sevastopol: IBSS. Iss. 72, pp. 5–15 (in Russian).
24. Petrov, A.N., 2013. The Structure of Coastal Zoobenthos Communities at Different Organic Enrichment Levels in Sediments (Crete, the Aegean Sea). *Marine Ecological Journal*, 12(1), pp. 59–73 (in Russian).

About the authors:

Natalia A. Orekhova, Leading Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Geogr.), **ORCID ID: 0000-0002-1387-970X; ResearcherID: I-1755-2017; Scopus Author ID: 35784884700**, natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Evgeny I. Ovsyany, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-6093-5102; Scopus Author ID: 6506585957**

Contribution of the authors:

Natalia A. Orekhova – data processing, statement of the main direction of the research, objective and conclusions; work with the paper materials

Evgeny I. Ovsyany – material processing, chemical analysis performance, primary material preparation

All the authors have read and approved the final manuscript.