

## Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Черное море)

О. В. Соловьёва<sup>1</sup>, Е. А. Тихонова<sup>1,✉</sup>, О. А. Миронов<sup>1</sup>,  
Т. О. Барабашин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»), Ростов-на-Дону, Россия  
✉ [tihonova@mail.ru](mailto:tihonova@mail.ru)

Поступила в редакцию 30.05.2020 г., после доработки – 12.02.2021 г.

**Цель.** Определение концентраций и выявление закономерностей распределения полиароматических углеводородов (ПАУ) в донных отложениях контактной зоны река – море (на примере р. Черной и Севастопольской бухты) – цель данной работы.

**Методы и результаты.** Гранулометрический состав донных отложений определялся методом декантации и рассеивания. Идентификация и количественное определение ПАУ проводилось методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. Общее содержание ПАУ в донных отложениях исследуемого района колебалось в диапазоне 12–670 нг/г сухого осадка. Минимальное содержание контаминантов было зафиксировано в речной части района, за геохимическим барьером. В районе впадения р. Черной в Севастопольскую бухту содержание ПАУ составляло 121 нг/г. Их максимальная концентрация отмечена в морских грунтах Севастопольской бухты, в 1,5 км юго-западнее места впадения р. Черной в бухту. В устьевой зоне р. Черной идентифицировано 14 ПАУ, 4 из них (нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, антрацен) – в следовых количествах. Максимальная концентрация илистого материала (99%) наблюдалась в акватории Севастопольской бухты. Распределение илистых фракций следующее: 20% – алеврито-пелитовая, 79% – пелито-алевритовая. В районе впадения реки в акваторию бухты отмечается накопление песчаной фракции (7%) и максимальная доля пелитовых илов.

**Выводы.** Зафиксированные концентрации ПАУ соответствуют фоновым нетоксичным уровням. Идентифицированные в донных отложениях устьевой зоны р. Черной ПАУ имеют смешанное, преимущественно петрогенное происхождение. Полученные данные указывают, что в условиях контактной зоны река – море накопление ПАУ в целом и их отдельных фракций определяется преимущественно наличием ила в донных отложениях.

**Ключевые слова:** маргинальный фильтр, донные отложения, гранулометрический состав, полициклические ароматические углеводороды, Севастопольская бухта, река Черная

**Благодарности:** авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам лаборатории аналитического контроля водных экосистем «АзНИИРХ»: Н. С. Анохиной – главному специалисту, Г. В. Скрыпник – ведущему научному сотруднику, кандидату химических наук – за определение полициклических ароматических углеводородов в исследуемых донных отложениях в рамках договора о сотрудничестве между ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» и «АзНИИРХ» (договор о сотрудничестве №116 от 15.12.2017 г.); К. И. Гурову – младшему научному сотруднику отдела биогеохимии моря ФГБУН ФИЦ МГИ – за определение гранулометрического состава донных отложений. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 121031500515-8 «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем».

**Для цитирования:** Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Черное море) / О. В. Соловьёва [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 3. С. 362–372. doi:10.22449/0233-7584-2021-3-362-372

© Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Миронов О. А., Барабашин Т. О., 2021

# Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bottom Sediments of the River – Sea Mixing Zone on the Example of the River Chernaya and the Sevastopol Bay (the Black Sea)

O. V. Soloveva<sup>1</sup>, E. A. Tikhonova<sup>1,✉</sup>, O. A. Mironov<sup>1</sup>,  
T. O. Barabashin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,  
Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> Azov-Black Sea branch of "VNIRO" ("AzNIIRKH"), Rostov-on-Don, Russia  
✉ tihonova@mail.ru

**Purpose.** The study is aimed at determining concentrations of the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and at revealing their pattern distribution in the bottom sediments of the "river – sea" contact zone on the example of the Sevastopol Bay and the river Chernaya.

**Methods and Results.** Granulometric composition of the bottom sediments was determined by the decantation and dispersion method. Identification and quantitative determination of PAHs were carried out by the high performance liquid chromatography method. The total PAHs content in the bottom sediments of the area under study varied from 12 to 670 ng/g of dry weight. The pollutant content was minimum in the river site beyond the geochemical barrier. In the area where the river Chernaya flows into the Sevastopol Bay, the PAHs content was 121 ng/g. The highest PAHs content was revealed in the Sevastopol Bay bottom sediments, more precisely, in 1.5 km southwest of the river Chernaya flowing into the bay. 14 PAHs were identified in the estuary zone of the river, 4 of them (naphthalene, 2-methylnaphthalene, fluorene, anthracene) were in the trace amounts. The maximum concentration (99%) of silty material was observed in the Sevastopol Bay water area. The silt fractions were distributed as follows: 20% – aleuritic-pelite fraction, 79% – pelitic-aleurite fraction. Directly in the area of the river inflow into the bay, accumulation of the sand fraction (7%) and the maximum portion of pelitic silts were noted.

**Conclusions.** The recorded values of PAHs corresponded to the natural non-toxic levels. PAHs identified in the bottom sediments of the river estuary zone are of the mixed, predominantly petrogenic origin. The obtained data show that in the conditions of the "river – sea" contact zone, the PAHs accumulation in general and their individual fractions were governed mainly by presence of silt in the bottom sediments.

**Keywords:** marginal filter, bottom sediments, particle size distribution, polycyclic aromatic hydrocarbons, Sevastopol Bay, river Chernaya

**Acknowledgments:** the authors appreciate deeply the staff of the Laboratory of analytical control of water ecosystems ("AzNIIRKH"): the chief specialist Anokhina N. S., the leading researcher, PhD (chemistry) Skrypnik G. V. for determining polycyclic aromatic hydrocarbons in the studied bottom sediments within the framework of the cooperation agreement between the IBSS, RAS and "AzNIIRKH" (cooperation agreement № 116 of 15.12.2017); the junior researcher of the Department of Marine Biogeochemistry, MHI RAS, Gurov K. I. for determining the bottom sediments granulometric composition. The work was carried out within the framework of state task № 121031500515-8 "Molecular and biogeochemical foundations of marine ecosystems homeostasis".

**For citation:** Soloveva, O.V., Tikhonova, E.A., Mironov, O.A. and Barabashin, T.O., 2021. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bottom Sediments of the River – Sea Mixing Zone on the Example of the River Chernaya and the Sevastopol Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(3), pp. 338-347. doi:10.22449/1573-160X-2021-3-338-347

## Введение

Маргинальные фильтры возникают в зонах смешения речных и морских вод в устьях рек [1]. Здесь происходят значительные по масштабам процессы флокуляции и коагуляции растворенных и взвешенных веществ. Работа седиментационной и сорбционной частей фильтра дополняется биоассимиля-

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 37 № 3 2021 363

цией и биофильтрацией. Все эти процессы приводят к тому, что в среднем в маргинальной зоне рек мира откладывается 93–95% от взвешенных и 20–40% от растворенных веществ речного стока (включая загрязнение). В частности, среднегодовой вклад речного стока в бюджет неорганического углерода бухты составляет 2250–2300 т в год [2]. В результате в местах впадения речных вод в море часто происходит накопление вещества, в том числе и поллютантов различного генезиса. Многие из них поступают в речные воды со всей площади водосборного бассейна рек. Эти процессы негативно сказываются на экологическом состоянии акваторий в местах смешения речных и морских вод. Именно эти зоны традиционно заселялись человеком и подвергались антропогенному прессу. С другой стороны, их экологическое благополучие является важным элементом сохранения качества окружающей человека среды. Поэтому исследование процессов переноса, накопления и трансформации отдельных классов загрязняющих веществ в контактной зоне река – море остается важным для решения фундаментальных и практических задач.

Информативным показателем степени и характера антропогенного воздействия в природных средах являются содержание и состав полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [3]. Актуальность изучения ПАУ усиливается тем, что многие индивидуальные ПАУ являются приоритетными загрязнителями, обладающими канцерогенным эффектом. Их источниками в окружающей среде служат высокотемпературное воздействие на органическое вещество при антропогенной деятельности, а также природные литогенные и биогеохимические углеводородные потоки [3].

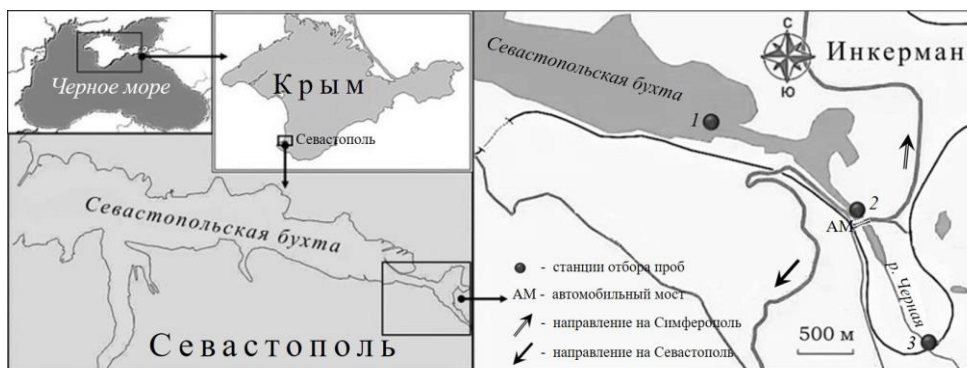
В городскую среду ПАУ поступают в основном при сжигании топлива котельными, ТЭЦ и автотранспортом [4, 5]. Выбросы карбюраторных и дизельных двигателей могут содержать, по разным оценкам, 16–2300 мг/кг ПАУ в составе твердой фракции выбросов [6]. Почти все соединения, поступающие с выбросами транспорта, осаждаются в полосе 50 м от транспортной артерии. При смыве с территории значительная часть этих веществ аккумулируется в прибрежных донных отложениях [7], особенно в городских условиях, где дорожное покрытие способствует их смыву с территории [8].

За последние годы в Севастополе произошло увеличение количества транспортных средств. А в районе акватории биогеохимического барьера р. Черная – Севастопольская бухта расположен автомобильный мост между городской трассы Севастополь – Симферополь, движение транспорта по которому увеличивает интенсивность поступления ПАУ в данную зону.

Несмотря на наличие значительного количества потенциальных источников поступления ПАУ, исследование и контроль содержания данного класса веществ в районе р. Черной не проводились. В научной литературе содержатся отрывочные данные о содержании ПАУ на отдельных участках Севастопольской бухты [9]. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы является определение концентраций и выявление закономерностей распределения ПАУ в донных отложениях зоны река – море (на примере р. Черной и Севастопольской бухты).

## Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовались пробы донных отложений, отобранные весной 2019 г. (рис. 1). Протяженность маргинального фильтра р. Черная – Севастопольская бухта лежит в пределах 1,27–4,1 км [2]. Выбор станций отбора проб проводился в соответствии с расположением и протяженностью зоны маргинального фильтра (рис. 1): ст. 1 – непосредственно до начала границ биогеохимического барьера в самой бухте в пределах соленой зоны; ст. 2 – в акватории маргинального фильтра, в солоноватоводной части, где наиболее ярко проявляются седиментационные процессы; ст. 3 – в речной пресноводной зоне. В акватории бухты глубины не превышали 4 м, в реке они доходили до 1 м.



**Р и с. 1.** Карта-схема отбора донных отложений (ст. 1 – 3) исследуемой акватории, 2019 г.  
**F i g. 1.** Scheme of the sea bottom sediments sampling (st. 1 – 3) in the water area under study, 2019

Отбор и подготовка проб донных осадков выполнялись в соответствии с нормативными документами (ГОСТ 17.1.5.01-80; ISO 5667-12:1995; ISO 5667-19:2001). Гранулометрический состав определялся методом декантации и рассеивания с использованием стандартных сит согласно ГОСТ 12536-2014 (введен с 01.07.2015 г.).

Определение ПАУ в донных отложениях проводили согласно Федеральному руководству 1.31.2007.03548 «Методика выполнения измерений массовой доли полициклических ароматических углеводородов в пробах почв и донных отложений пресных и морских водных объектов». Данная методика основана на выделении ПАУ из донных осадков и почв экстракцией смесью гексана и ацетонитрила (10:1), концентрировании экстракта, хроматографическом отделении углеводородной фракции в тонком слое оксида алюминия. Идентификацию и определение индивидуальных ПАУ в донных отложениях проводили на жидкостном хроматографе *Beta-10US* фирмы *EKOM* с люминесцентным детектором (*RF-5301 PC*) и колонкой *Yanapak ODS-T*.

## Результаты и обсуждение

Общее содержание ПАУ в донных отложениях исследуемого района колебалось в диапазоне 12–670 нг/г сухого осадка. Их минимальное содержание отмечено в речной части района исследования (ст. 3), за так называемым геохимическим барьером. В районе впадения р. Черной в Севастопольскую бухту, возле автомобильного моста (ст. 2), суммарное содержание ПАУ ( $\Sigma$ ПАУ) было на порядок выше (121 нг/г), чем в речных донных осадках. Зафиксированные величины соответствуют фоновым нетоксичным уровням [9]. Наибольшее  $\Sigma$ ПАУ отмечено в морских грунтах Севастопольской бухты (ст. 1). Таким образом, маловероятно, что в исследованном районе речной сток является основным источником поступления ПАУ. Этот класс веществ, вероятно, изначально поступает в акваторию бухты (ст. 2). Полученные данные соизмеримы с  $\Sigma$ ПАУ в донных отложениях контактных зон река – море других участков российского побережья. Так, концентрации ПАУ в донных отложениях различных акваторий составляли: на разрезе Обская губа – Карское море 11–94 нг/г, в маргинальных фильтрах Енисея 11–36 нг/г, р. Дон – 33 нг/г [10, 11]. В морских грунтах северо-восточной части Черного моря, по данным [12], концентрации суммы идентифицированных ПАУ находились в диапазоне 2–123 мкг/кг сухой массы.

Известно, что Черноморское побережье в целом и Севастопольская бухта, в частности, подвержены нефтяному загрязнению [13]. Многие полиароматические соединения являются неотъемлемыми компонентами нефтепродуктов (петрогенные ПАУ) [11], поэтому их наличие может быть связано с фактом нефтяного загрязнения в регионе. Также присутствие полиаренов нередко связано со сжиганием различных органических соединений в результате хозяйственной деятельности человека (пирогенные ПАУ) [11]. Вследствие этих факторов в исследуемом объекте можно предполагать наличие ПАУ различного происхождения.

В устьевой зоне р. Черной идентифицировано 14 ПАУ, 4 из них (нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, антрацен) – в следовых количествах (рис. 2).

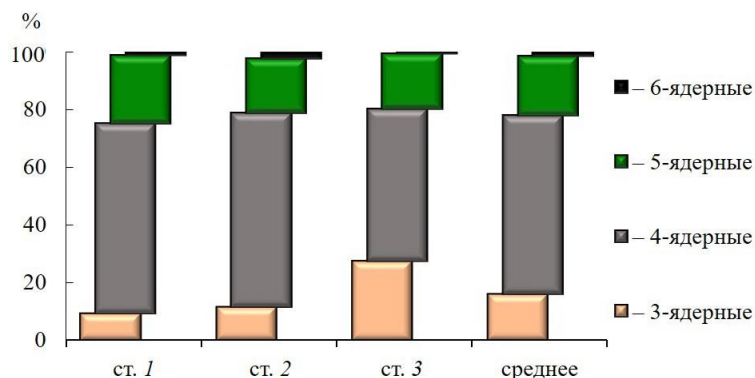


Рис. 2. Доля ПАУ с различным числом бензольных групп, %

Fig. 2. The percentage of PAHs with different numbers of benzene groups, %

В исследуемой зоне наибольшая доля ПАУ приходилась на соединения с четырьмя бензольными кольцами (53–67%). На суммарное содержание фенантрена и хризена приходилась 50%  $\Sigma$ ПАУ. Эти соединения генетически связаны с высшей наземной растительностью [11]. Их наличие может быть обусловлено как нефтяным загрязнением, так и смывом и разложением органических веществ из прибрежных районов. Следует отметить, что с продвижением от реки к морю снижалась доля фенантрена и увеличивалась – хризена. Суммарный процент этих веществ сохранялся. Оба соединения широко распространены в живой природе, а также являются компонентами топлива и других нефтепродуктов. Наличие фенантрена часто связывают с дизельными и бензиновыми выхлопными частицами [14].

Доля наиболее токсичных ПАУ, которые принято считать канцерогенными (5- и 6-ядерные), в сумме достигала 25% в донных отложениях бухты, в речных осадках она была несколько ниже и составляла 20%. Для сравнения: в донных отложениях Казачьей бухты, расположенной юго-западнее Севастопольской бухты, доля таких соединений в донных осадках колебалась в пределах 11–32% [15]; в Балаклавской бухте, являющейся базой многочисленного маломерного флота, согласно нашим данным, она составляла 8–33%. Шестиядерные ПАУ отмечены на всех станциях пробоотбора. Их наибольшая доля зафиксирована в районе ст. 1.

С целью идентификации происхождения ПАУ были использованы молекулярные индексы, включающие в себя соотношения различных компонентов загрязнения [14, 16, 17]. По величине полученных соотношений можно судить о петрогенной либо пиролитической природе идентифицированных соединений (таблица).

**Значения молекулярных индексов для ПАУ пиролитического и петрогенного происхождения**  
**Molecular index values for PAHs of pyrolytic and petrogenic origin**

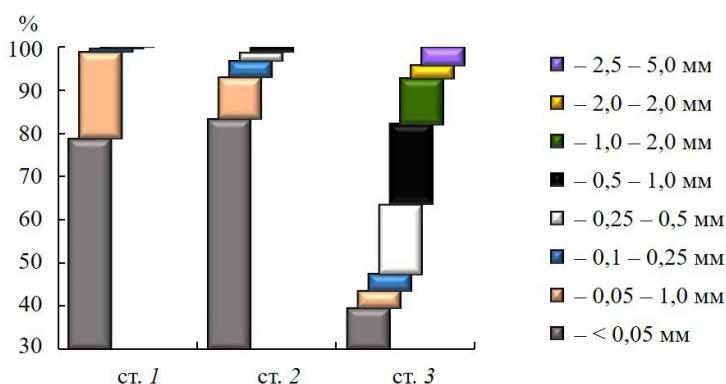
Молекулярные индексы / Molecular indices	Min – max (среднее значение) / Min – max (average value)	Происхождение / Origin		Источник данных / Source of data
		Пиролитическое / Pyrolytic	Петрогенное / Petrogenic	
Фенантрен/антрацен / Phenanthrene/anthracene	$\infty$	< 10,0	> 15,0	[18]
Флуорантен/пирен / Fluoranthene/pyrene	1,2–6,1(1,5)	> 1,0	< 1,0	[18]
Флуорантен/(флуорантен + пирен) / Fluoranthene/(fluoranthene + pyrene)	0,5–0,9 (0,6)	> 0,5	< 0,5	[18]
Пирен/бенз(а)пирен / Pyrene/benz(a)pyrene	4,6–12,2 (7,8)	< 1,0	> 1,0	[17]
(Флуорантен + пирен) / (фенантрен + хризен) / (Fluoranthene + pyrene) / (phenanthrene + chrysene)	0,5	> 1,0	< 1,0	[5]
$\Sigma(2-4) / \Sigma(5-6)$	3,1–4,1 (3,2)	< 1,0	> 1,0	[17]

Расчет показал (таблица), что значения четырех индексов из шести указывают на преимущественно петрогенное происхождение обнаруженных ПАУ. Можно сделать вывод, что идентифицированные в донных отложениях приустьевой зоны р. Черной ПАУ имеют смешанную природу.

Бенз(а)пирен (Б(а)П) нередко используется как характерный компонент для оценки уровня антропогенного углеводородного загрязнения. Его токсические свойства хорошо изучены [19], для него установлены ориентировочно безопасные уровни воздействия и предельно допустимые концентрации (ПДК) в различных компонентах окружающей среды (ГН 2.1.5.1315-03; ГН 2.1.7.2041-06.2.1.7). Токсичность данных веществ является относительной единицей измерения для оценки вредоносности других полиароматических соединений [8].

Содержание Б(а)П в донных отложениях исследуемого района колебалось в пределах 0,08–6,19 нг/г при нормативной концентрации 25 нг/г согласно зарубежным нормативам *Neue Niederlandische Liste. Atlasten Spektrum 3/95* («голландские листы»). Таким образом, устье р. Черной и прилегающие к нему районы можно считать благополучными по данному показателю. Настоящая оценка не является однозначной ввиду отсутствия в Российской Федерации документов, нормирующих содержание Б(а)П в донных отложениях.

Существует ряд методик, определяющих нормирование данного показателя. В частности, в одной из них предлагается учитывать гранулометрический состав донных отложений \* как фактор, существенно влияющий на накопление поллютантов. В соответствии с указанной методикой концентрация Б(а)П в песках не должна превышать 2 нг/г, в илах – 5 нг/г. Участки дна с содержанием выше 30 нг/г относят к сильнозагрязненным. В районе исследования грунты преимущественно представлены илистыми фракциями (рис. 3), т. е. содержание Б(а)П в них не должно превышать 5 нг/г. В результате ст. 2 и 3 можно считать благополучными по данному показателю. На ст. 1, расположенной в акватории бухты, этот показатель несколько превышен (в 1,2 раза).



**Р и с. 3.** Фракционный состав донных отложений исследуемой акватории  
**Fig. 3.** Bottom sediments fractional composition in the water area under study

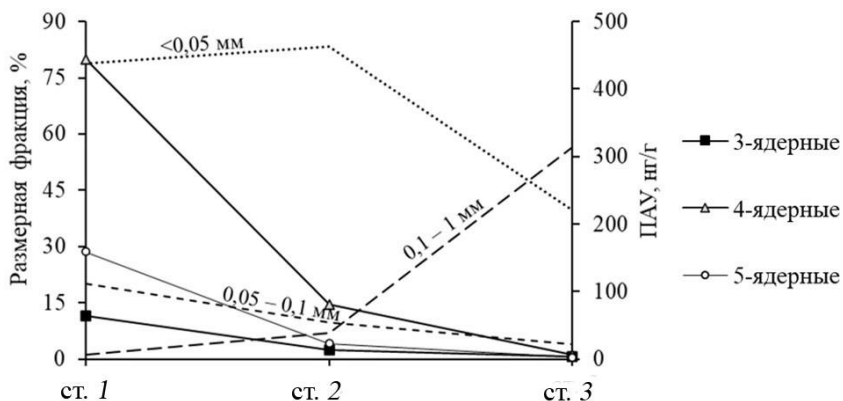
\* *Транидо М. А.* Распределение канцерогенных ПАУ и мониторинг водной среды (на примере водоемов Прибалтийского региона) : автореферат дис. ... канд. биол. наук. Ленинград, 1985. 20 с.

Как известно [11, 13, 15], способность донных отложений накапливать различные вещества во многом связана с их гранулометрическим составом. В нашем случае (рис. 3) максимальная концентрация илистого материала (99%) наблюдалась в акватории Севастопольской бухты на удалении от места впадения р. Черной. Распределение илистых фракций следующее: 20% приходится на алеврито-пелитовую, 79% – на пелито-алевритовую. По мере приближения к устью р. Черной соотношение фракций донных отложений меняется. На участке непосредственного впадения реки в акваторию бухты отмечается накопление песчаной фракции (7%), а также максимальная доля пелитовых илов, что, по-видимому, объясняется особенностями осаждения органического вещества на маргинальном фильтре. В речных донных отложениях вклад мелкодисперсной фракции ниже и не превышает 40%. При этом доля песка возрастает до 39%, появляется гравийная фракция (18%). Отмечено, что по мере продвижения от бухты к реке изменяются основные параметры осадкообразования: уменьшается глубина, увеличивается гидродинамическая активность, появляются источники терригенного материала. Именно этим изменением можно объяснить увеличение доли средне- и крупнозернистых фракций в донных отложениях.

На основании данных о гранулометрическом составе была проведена оценка зависимости  $\Sigma$ ПАУ и массовых фракций данного класса загрязняющих веществ от процентного содержания различных компонентов обломочного материала донных отложений. Анализ зависимости содержания ПАУ с различным числом циклов от доли размерных фракций донных отложений (рис. 4) показал, что накопление отдельных фракций ПАУ происходит подобно накоплению  $\Sigma$ ПАУ. Для всех исследованных групп наибольшая взаимосвязь наблюдалась с долей размерной фракции 0,1–0,05 мм. Положительной зависимости содержания ПАУ от доли других фракций донных отложений не отмечено. Установлено, что снижение доли алеврито-пелитовой фракции (0,05–0,1 мм) приводит к сокращению концентраций ПАУ в донных отложениях. Наибольшие вариации концентраций отмечены для 4- и 5-ядерных ПАУ, содержание которых изменяется от 443 и 159 нг/г в отложениях бухты до 6 и 2,3 нг/г в речных наносах соответственно (рис. 4). Результаты, полученные для пелито-алевритовой фракции (< 0,05 мм), не столь однозначны.

Таким образом, продемонстрирована известная способность мелкодисперсных фракций донных отложений аккумулировать поллютанты различного типа [11], в том числе и органические [20]. Отметим, что в данной работе не была выявлена бимодальная зависимость накопления ПАУ от гранулометрического состава донных осадков, описанная в отдельных работах. Например, согласно [21], легкие молекулы ассоциируются с песчаной фракцией, а тяжелые, 6-ядерные – с иловой. В нашем случае подтверждается мнение автора работы [20] о том, что накопление органических веществ в целом (и ПАУ – в том числе) связано преимущественно с наличием ила в донных отложениях.





**Р и с. 4.** Гранулометрический состав и содержание отдельных фракций ПАУ в поверхностном слое донных отложений исследуемой акватории

**F i g. 4.** Granulometric composition and content of the individual PAHs fractions in the bottom sediments surface layer in the water area under study

Как видно, при продвижении по течению реки к морю повышалось суммарное содержание полиаренов, изменялся их качественный состав в сторону увеличения доли более токсичных соединений. Как правило, геохимический барьер река – море является фильтром, который препятствует проникновению в открытые морские районы нефтяных и пирогенных углеводородов. Это явление характерно для устьевых областей Волги, Даугавы, Дуная и других рек, т. е. оно проявляется вне зависимости от климатических зон [11]. Согласно нашим данным, подобные процессы не характерны для исследуемого барьера. Вероятно, это связано с тем, что уровень загрязнения по рассматриваемым параметрам гораздо выше в бухте, чем в зоне смешения и реке. В нашем случае большая часть источников поступления ПАУ находится на берегах Севастопольской бухты и ее водном зеркале. Река Черная, протекая по относительно малонаселенным и экологически благополучным пригородным зонам, содержит в своих водах (судя по составу донных отложений) небольшое количество загрязняющих веществ. Весьма вероятно, она не является весомым источником поступления ПАУ в акваторию Севастопольской бухты.

### Выводы

**1.** Общее содержание ПАУ в донных отложениях зоны впадения р. Черной в море колебалось в пределах 12–670 нг/г сухого осадка. Минимальные значения содержания ПАУ зафиксированы в речной части района исследования, за так называемым геохимическим барьером. В районе впадения р. Черной в Севастопольскую бухту содержание ПАУ было на порядок выше (121 нг/г), чем в речных донных осадках. Наибольшее  $\Sigma$ ПАУ отмечено в морских грунтах Севастопольской бухты, в 1,5 км юго-западнее места впадения р. Черной в бухту. Зафиксированные величины соответствуют фоновым нетоксичным уровням.

2. В устьевой зоне р. Черной идентифицировано 14 ПАУ, 4 из них (нафталин, 2-метилнафталин, флуорен, антрацен) – в следовых количествах. Наибольшая часть (50%) приходилась на суммарное содержание фенантрена и хризена. Доля наиболее токсичных соединений (5- и 6-ядерных), которые принято считать канцерогенными, в сумме достигала 25% в донных отложениях бухты. В речных осадках она была несколько ниже и составляла 20%.

3. Идентифицированные в донных отложениях приустьевой зоны р. Черной ПАУ имеют смешанную, преимущественно петрогенную природу.

4. Содержание Б(а)П в донных отложениях исследуемого района колебалось в пределах 0,08–6,19 нг/г. Полученные данные сравнивались с нормативами, так называемыми «голландскими листами», а также с условными нормативами, в которых предлагается учитывать гранулометрический состав донных отложений как фактор, существенно влияющий на накопление поллютантов. В соответствии с зарубежными нормативами устье р. Черной и прилегающие к нему районы можно считать благополучными по данному показателю. Согласно условным нормативам, в районе бухты, прилегающем к устью, данный показатель превышен в 1,2 раза.

5. Анализ взаимосвязи гранулометрического состава донных отложений и накопления в них ПАУ показал, что максимальная аккумуляция данного класса веществ происходит в иловой фракции, в большей степени – во фракционной группе 0,05–0,1 мм. Таким образом, в условиях контактной зоны река – море накопление ПАУ в целом и их отдельных фракций преимущественно определяется наличием ила в донных отложениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735 – 747.
2. *Моисеенко О. Г., Хоружий Д. С., Медведев Е. В.* Карбонатная система вод реки Черной и зоны биогеохимического барьера река Черная – Севастопольская бухта (Черное море) // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 6. С. 47 – 60.
3. Полициклические ароматические углеводороды в аквальных ландшафтах дельты реки Дон в зимний период / Т. С. Кошовский [и др.] // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион*. 2017. № 2. С. 118–127.
4. *Халиков И. С.* Идентификация источников загрязнения объектов природной среды полициклическими ароматическими углеводородами с использованием молекулярных соотношений // *Экологическая химия*. 2018. Т. 27, № 2. С. 76–85.
5. *Ровинский Ф. Я., Теплицкая Т. А., Алексеева Т. А.* Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов. Л. : Гидрометеоздат, 1988. 224 с.
6. *Neff J. M.* Bioaccumulation in Marine Organisms: Effects of contaminants from oil well produced water. Amsterdam : Elsevier, 2002. 452 p.
7. *Ильницкий А. П., Королев А. А., Худолей В. В.* Канцерогенные вещества в водной среде. М. : Наука, 1993. 222 с.
8. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях рек и каналов Санкт-Петербурга / А. Ю. Опекунов [и др.] // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География*. 2015. Вып. 4. С. 98 – 109.
9. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine / R. M. Burgess [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2009. Vol. 58, iss. 8. P. 1103–1115. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.013>

10. Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonisation with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP) / V. Savinov [et al.]. Tromsø : Akvaplan-niva, 2011. 71 p.
11. *Немировская И. А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М. : Научный мир, 2013. 432 с.
12. Загрязнение прибрежной акватории российского Причерноморья нефтяными компонентами / А. А. Ларин [и др.] // Морской экологический журнал. 2011. Отд. вып. № 2. С. 49–55.
13. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
14. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust and surface soil: Comparisons of concentration, profile, and source / D.-G. Wang [et al.] // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2009. Vol. 56, iss. 2. P. 173–180. doi:10.1007/s00244-008-9182-x
15. Organic Compounds in Bottom Sediments under Conditions of Coastal Urbanization (a Case Study of Kazach'ya Bay of the Black Sea) / O. V. Soloveva [et al.] // Oceanology. 2019. Vol. 59, iss. 2. P. 214–222. <https://doi.org/10.1134/S0001437019020176>
16. Загрязнение Азовского моря полиароматическими углеводородами / Л. Ф. Павленко [и др.] // Вопросы рыболовства. 2008. Т. 9, № 4 (36). С. 861–869.
17. *Soclo H. H., Garrigues Ph., Ewald M.* Origin of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coastal Marine Sediments: Case Studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine (France) Areas // Marine Pollution Bulletin. 2000. Vol. 40, iss. 5. P. 387–396. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00200-3)
18. Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments and mussels (*Mytilus edulis*) from the Western Baltic Sea: occurrence, bioavailability and seasonal variations / P. Baumard [et al.] // Marine Environmental Research. 1999. Vol. 47, iss. 1. P. 17–47. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(98\)00105-6](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(98)00105-6)
19. *Израэль Ю. А., Цыбань А. В.* Антропогенная экология океана. Л. : Гидрометеоздат, 1989. 528 с.
20. *Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И.* Геохимия Черного моря. Киев : Наукова думка, 1982. 144 с.
21. *Krein A., Schorer M.* Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments // Water Research. 2000. Vol. 34, iss. 16. P. 4110–4115. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00156-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00156-1)

*Об авторах:*

**Соловьёва Ольга Викторовна**, старший научный сотрудник, отдел морской санитарной гидробиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Российская Федерация, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1283-4593**, **Scopus Author ID: 57208499211**, **ResearcherID: X-4793-2019**, [kozl\\_ya\\_oly@mail.ru](mailto:kozl_ya_oly@mail.ru)

**Тихонова Елена Андреевна**, старший научный сотрудник, отдел морской санитарной гидробиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Российская Федерация, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-9137-087X**, **Scopus Author ID: 57208495804**, **ResearcherID: X-8524-2019**, [tihonova@mail.ru](mailto:tihonova@mail.ru)

**Миронов Олег Андреевич**, старший научный сотрудник, отдел морской санитарной гидробиологии, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (299011, Российская Федерация, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **Scopus Author ID: 56227568700**, **ResearcherID: ABH-9273-2020**, [mironov87@gmail.com](mailto:mironov87@gmail.com)

**Барабашин Тимофей Олегович**, заместитель руководителя Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ») (344002, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Береговая, д. 21в), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-4103-6224**, [timbar@bk.ru](mailto:timbar@bk.ru)