

СТАТЬИ

УДК 574.52:556

**СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ  
В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ РЕКИ ЧЕРНОЙ И ОЦЕНКА  
ИХ ВЫНОСА В СЕВАСТОПОЛЬСКУЮ БУХТУ В ЗИМНИЙ СЕЗОН 2020 ГОДА**

**Малахова Л.В., Егоров В.Н., Малахова Т.В., Лобко В.В., Мурашова А.И., Бобко Н.И.**

*Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь,  
e-mail: malakhovalv@ibss-ras.ru*

Представлены результаты анализа хлорорганических соединений в воде и гидробионтах р. Черной в январе и феврале 2020 г. Концентрация таких хлорорганических ксенобиотиков, как пестицид п,п'-дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболитов п,п'-дихлордифенилдихлорэтилен и п,п'-дихлордифенилдихлорэтан, и шести индикаторных полихлорбифенилов была повышенной в устьевом участке по сравнению с районом среднего течения реки. По отношению к ПДК водных объектов культурно-бытового и рыбо-хозяйственного использования в воде не отмечено превышения нормативных значений, что свидетельствует о высоком качестве (в отношении данных токсикантов) воды одного из основных ресурсов питьевого водоснабжения г. Севастополя. В двух районах реки определены уровни накопления хлорорганических соединений водорослями (*Cladophora* spp.), высшими водными растениями (*Potamogeton* spp.) и моллюсками (*Crassostrea gigas* и *Mytilus galloprovincialis*). Установлены межвидовые различия в накоплении хлоруглеводородов в гидрофитах реки. Наибольшие коэффициенты накопления ХОС, достигающие  $6 \cdot 10^4$ , определены у *Potamogeton* spp. ПДК хлорорганических соединений в гидробионтах превышены не были. Проведена оценка выноса хлорорганических соединений в Севастопольскую бухту с потоком р. Черной в зимний сезон 2020 г. На масштабе двух месяцев изменчивость стока хлорированных углеводородов зависела в основном от степени загрязненности реки.

**Ключевые слова:** ДДТ, ПХБ, *Cladophora* spp., *Potamogeton* spp., двустворчатые моллюски, река Черная, бухта Севастопольская

**ORGANOCHLORINE COMPOUNDS CONTENT IN THE COMPONENTS  
OF THE BLACK RIVER ECOSYSTEM AND ASSESSMENT OF THEIR  
INFLOW TO THE SEVASTOPOL BAY IN THE WINTER SEASON 2020**

**Malakhova L.V., Egorov V.N., Malakhova T.V., Lobko V.V., Murashova A.I., Bobko N.I.**

*A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Sea of RAS, Sevastopol,  
e-mail: malakhovalv@ibss-ras.ru*

The results of analysis of organochlorine compounds in water and hydrobionts of the Chernaya River in January and February 2020 are presented. Concentrations of organochlorine xenobiotics such as p,p'-dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and its metabolites p,p'-dichlorodiphenyldichloroethylene and p,p'-dichlorodiphenyldichloroethane, and six indicator polychlorinated biphenyls were increased in the estuary section in comparison with the middle part of the river. In relation to maximum allowable concentration for water of domestic and fishery use, no excess of normative values was registered, which indicates a high water quality of one of the main drinking water resources of Sevastopol with respect to these toxicants. Organochlorine compounds accumulation levels by algae (*Cladophora* spp.), higher aquatic plants (*Potamogeton* spp.) and shellfish (*Crassostrea gigas* and *Mytilus galloprovincialis*) in two river parts have been determined. Interspecies differences in the accumulation of organochlorine compounds in the river hydrophytes have been identified. The highest organochlorine compounds accumulation coefficients, reaching  $6 \cdot 10^4$ , have been found in *Potamogeton* spp. Maximum allowable concentration of organochlorine compounds were not exceeded at the study hydrobionts. The discharge of organochlorine compounds into the Sevastopol Bay with the flow of the Chernaya River in the winter season 2020 was estimated. On a two-month scale the variability in the flow of organochlorine compounds depended mainly on the pollution level of the river.

**Keywords:** DDT, PCB, *Cladophora* spp., *Potamogeton* spp., bivalve, Chernaya River, Sevastopol Bay

Разработка критериев контроля экологического состояния окружающей среды по оценке равновесия между использованием и воспроизводством качества ее водных ресурсов является весьма актуальной для морских регионов, поскольку масштабы поступления загрязняющих веществ в морскую среду в отдельных районах превзошли интенсивность природных биогеохимических процессов самоочищения. В связи

с этим возникла проблема определения влияния опасных загрязнителей на морские экосистемы и поиск комплекса природных механизмов их самоочищения, которые, по заключению В.И. Вернадского, обеспечивают устойчивость биогеоценозов по отношению к воздействующим факторам.

Эта проблема касается и хлорорганических соединений (ХОС), к которым относятся хлорорганические пестициды (ХОП)

и полихлорбифенилы (ПХБ). ХОП экстенсивно использовались до 1970-х гг. в аграрном и коммунальном секторах для борьбы с насекомыми. ПХБ до 1990-х гг. широко применяли в качестве теплоносителей, гидравлических жидкостей, диэлектриков в конденсаторах и трансформаторах и т.п. Эти соединения из различных источников попадали в окружающую среду и в её условиях оказались очень устойчивыми, что привело к их глобальному распространению.

Изучение «судьбы» данных ксенобиотиков, поступающих в прибрежные черноморские районы Крыма, продолжается уже почти полвека в отделе радиационной и химической биологии ИнБЮМ. В последнее десятилетие использование современных прецизионных методов анализа ХОС и геохронологические исследования кернов донных отложений позволили установить период максимальной загрязнённости ХОС в прибрежных акваториях моря, относящийся к 1970–1980-м гг. [1]. В гидробионтах различной таксономической принадлежности нами были определены коэффициенты накопления ХОС ( $K_n$ ), максимальные значения которых достигали  $n \cdot 10^6$  подкожно-жировой клетчатке морских млекопитающих. Накопление ХОС водными организмами привело к тому, что они обнаруживались в гидробионтах даже в тех районах моря, где в воде не определялись, а высокие концентрации ХОС, например, у рыб способствовали ослаблению антиоксидантной защиты и развитию окислительного стресса [2]. В сева­стопольской морской акватории наиболее загрязненными районами являются бухты, имеющие затрудненный водообмен с открытым морем, из которых Севастопольская бухта является наиболее подверженной антропогенной нагрузке. При изучении биогеохимических механизмов ее самоочищения от загрязнителей было определено, что в современных условиях приоритетными загрязнителями являются ПХБ и соединения группы п,п'-дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ). Распределение ДДТ и его метаболитов ДДЭ и ДДД в поверхностном слое воды в бухте в весенний сезон 2008 г. показало, что повышенное содержание пестицидов этой группы было обнаружено в вершине бухты, в которую поступает сток р. Черной [3].

На реке Черной Крымским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды («Крымское УГМС») ведутся ежеквартальные гидрометрические и гидрохимические наблюдения, которые включают анализ качества воды по санитарно-гигиеническим нормам [4]. При изучении экологических аспектов р. Черной было показано, что в Севастопольскую

бухту выносится до 70% речного материала, что оказывает заметное влияние на её гидрохимический режим [5]. А в работе [6] было определено, что в паводковый период 2015 г. опреснение за счет речного стока выходило за пределы Нефтяной гавани, которая находится на расстоянии 1 км от вершины Севастопольской бухты, где в тот же период паводков значительно повышалась концентрация биогенных элементов. В целом гидрохимический режим реки и его влияние на бухту изучался неоднократно, однако вынос ХОС с потоком р. Черной до настоящего времени не оценивался. В то же время стало ясно, что для сохранения экологически безопасного состояния Севастопольской бухты в отношении ХОС необходимо нормировать антропогенную нагрузку из всех источников, в том числе с речным стоком Черной.

Целью работы являлось определение содержания ХОС в компонентах экосистемы р. Черной и оценка их поступления в Севастопольскую бухту в зимний сезон 2020 г.

#### Материалы и методы исследования

Исследования содержания ХОС в объектах экосистемы р. Черной были начаты в январе 2020 г. Схема станций приведена на рис. 1.

Пробы воды отбирали в январе и феврале 2020 г. в четырех точках нижнего и среднего течения р. Черной: в устьевой части в районе смешения речной и морской воды (ст. 1), в районе поселка Сахарная головка (ст. 2), у с. Хмельницкое (ст. 3) и в Байдарской долине (ст. 4). Для оценки уровня накопления ХОС в гидробионтах в устьевой части р. Черной на ст. 1 также были отобраны двустворчатые моллюски – мидии *Mytilus galloprovincialis* и устрицы *Crassostrea gigas*, а на ст. 3 отбирали пробы водоросли кладофоры *Cladophora* spp. и многолетних высших водных растений рдестов *Potamogeton* spp. Пробы гидрофитов высушивали, затем их гомогенизировали и отбирали аликвоты для анализа. У мидий и устриц для анализа отбирали мягкие части от нескольких особей. Пробо­подготовка включала экстракцию аналитов из проб воды н-гексаном, из проб гидробионтов – смесью ацетона и н-гексана (1:3) и дальнейшую очистку экстрактов от мешающих анализу полярных соединений колоночной хроматографией с флорисилом. В воде и гидробионтах газохроматографическим методом было определено содержание п,п'-ДДТ (далее ДДТ) и его метаболитов 4,4'-ДДЭ (ДДЭ) и 4,4'-ДДД (ДДД), а также шести индикаторных конгенов ПХБ (по номенклатуре IUPAC: 28, 52, 101, 138, 153 и 180). Анализ ХОС выполняли

в ЦКП «Спектрометрия и Хроматография» ФИЦ ИнБЮМ на газовом хроматографе Хроматэк Кристалл 5000 с микро-ЭЗД с параметрами газохроматографической системы, описанными в [7]. Концентрация ПХБ представлена как сумма шести конгенов ΣПХБ<sub>6</sub>, ДДТ – как сумма исходного пестицида ДДТ и его метаболитов ДДЭ и ДДД (ΣДДТ). Ошибка определения ХОС в воде не превышала 28%, в гидробионтах – 15%. Для гидробионтов были рассчитаны коэффициенты накопления ХОС (К<sub>н</sub>), равные отношению концентрации ХОС в массе гидробионта к его содержанию в воде.

В работе также использованы материалы наблюдений за содержанием ДДТ и ПХБ в воде Севастопольской бухты, полученные в период с 2016 по 2019 г. в ФИЦ ИнБЮМ. Общее содержание (или пул: П<sub>ХОС</sub>) ХОС в водной массе бухты рассчитывали по формуле

$$P_{\text{ХОС}} = C_{\text{ХОС}} \cdot V,$$

где C<sub>ХОС</sub> – концентрация ХОС в воде, V – объем воды выделенного бокса бухты. Районирование акваторий бухты на пять боксов было сделано с учетом её морфологических характеристик, а также гидрологических и гидрохимических исследований [3]. При расчетах принято допущение о равномерном распределении концентрации ХОС в границах бокса.

### Результаты исследования и их обсуждение

*ХОС в воде р. Черной.* В зимний сезон 2020 г. во всех пробах воды р. Черной были обнаружены ХОП из группы ДДТ и индикаторные конгены ПХБ. Концентрация ΣДДТ изменялась от уровней ниже предела обнаружения (<0,1 нг/л) на ст. 2 до 0,52 нг/л в Байдарской долине на ст. 4 (рис. 2). Исходный пестицид ДДТ на ст. 1 и 2 в январе обнаружен не был. На других станциях отношение суммы концентрации метаболитов ДДЭ и ДДД к концентрации ДДТ (Σ(ДДЭ + ДДД)/ДДТ), которое показывает степень преобразования исходного препарата, превышало единицу в 2,5–11 раз, что могло свидетельствовать как о поступлении ДДТ в воду р. Черной в существенно меньшем количестве, чем его метаболитов, так и о прошедшем распаде ДДТ непосредственно в воде реки.

Концентрация ΣПХБ<sub>6</sub> в январе была минимальной на ст. 3, а максимальной – 7,88 нг/л – на ст. 1. На всех станциях, кроме ст. 4 в феврале, она превышала содержание ΣДДТ в среднем на порядок величины. В январе концентрация ΣПХБ<sub>6</sub> в воде в среднем была выше в 3 раза, чем в феврале. Так же как в январе, в феврале повышенное содержание ΣПХБ<sub>6</sub> было обнаружено в устьевом районе на ст. 1.

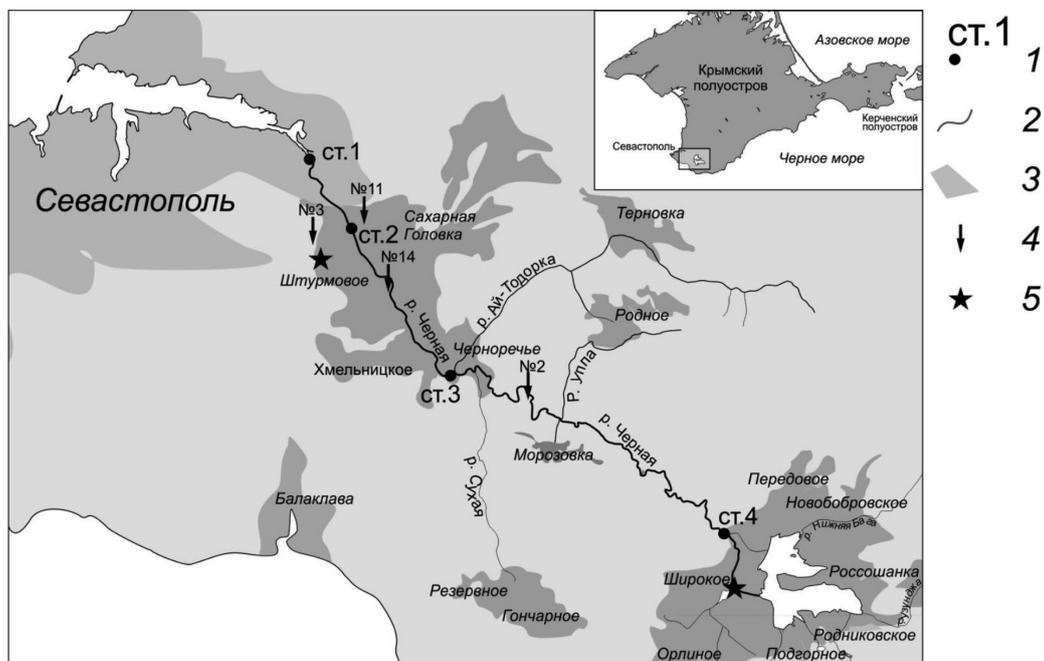


Рис. 1. Схема станций отбора проб на р. Черной. Обозначения: 1 – место отбора проб и номер станции, 2 – русло рек, 3 – контуры населенных пунктов, 4 – гидроузлы на реке Черной, 5 – очистные сооружения

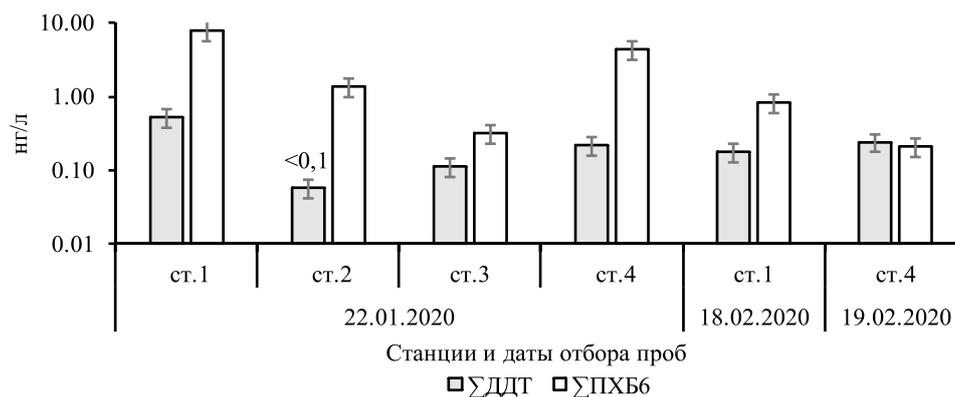


Рис. 2. Концентрация ХОС в воде р. Черной в январе и феврале 2020 г. Вертикальными отрезками показаны погрешности определения

Наблюдаемый широкий диапазон изменчивости концентрации ХОС в воде определялся наличием источников их поступления в реку в районе отбора проб. Точные источники поступления ДДТ и ПХБ на данный момент не были определены. Известно, что десятилетиями в реку поступали выпуски с канализационных очистных сооружений поселков Озерное и Сахарная голова [8]. По информации Севприроднадзора в ежегодном докладе о состоянии и об охране окружающей среды г. Севастополя в 2018 г. сброс сточных, транзитных и других вод осуществлялся в р. Черная в объеме 2,21 млн м<sup>3</sup>, что равно 3,9% от среднего годового стока реки в бухту, составляющего 56,8 млн м<sup>3</sup>/год. В докладе сообщалось, что в последние годы нагрузка от такого типа источников варьировала по объемам сброса и по содержанию в них поллютантов. Вклад в обнаруженную вариабельность концентрации ХОС по течению р. Черной, очевидно, вносит и рассредоточенное по водосборной территории загрязнение. Важным обстоятельством для его выявления могут являться устные свидетельства жителей сел. Из рассказов старожилых поселков, расположенных на водосборной площади реки, следовало, что в середине прошлого века много садов и полей в их районах опыляли дустом (ДДТ). Вероятно, из почвы этих районов может и в настоящее время вымываться ДДТ и его метаболиты. Поступление поллютантов от таких источников непостоянно и связано с метеорологическими условиями, как правило с осадками. Такая зависимость уровней загрязненности ХОС водной акватории от проливных дождей нами была определена в летний сезон 2019 г. После проливного дождя

07.06.2019 г., когда в Севастополе за два часа выпала месячная норма осадков – свыше 33 мм, концентрация ΣПХБ<sub>6</sub> в пробах воды в бухте Мартыновой оказалась повышенной на порядок величин по сравнению с фоновыми уровнями для этих районов и превысила ПДК в морской воде, равную 10 нг/л, в 4 раза. По-видимому, такое повышение являлось следствием поступления поллютантов в морскую акваторию с атмосферными осадками и смыва ПХБ ливневыми стоками из почвы, асфальтовых покрытий и других загрязненных наземных объектов на прилегающей территории.

Концентрация ΣПХБ<sub>6</sub> и ΣДДТ в воде реки не превышала ПДК для воды хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, равную 500 нг/л [4], и была сравнима с их концентрацией в воде Севастопольской бухты в 2018 г., где она изменялась в диапазоне от 0,54 до 2,49 и от 0,1 до 0,27 нг/л соответственно. Весной 2018 г. в районе впадения р. Черной в бухту содержание ХОС было повышено в среднем в 5 раз по сравнению с остальными районами бухты, что связано с поступлением ХОС с водой реки в паводковый период (рис. 3).

В последние годы загрязненность ХОС открытых районов Черного моря существенно снизилась по сравнению с началом 2010-х гг. Так, по данным 110-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в октябре 2019 г. в прибрежных районах Крыма концентрация ΣДДТ в среднем составила 0,33, ΣПХБ<sub>6</sub> – 0,83 нг/л. В воде р. Черной концентрация ΣДДТ в период наблюдений в среднем была равна 0,23 нг/л, что оказалось ниже в 1,5 раза, по сравнению с морем, тогда как ΣПХБ<sub>6</sub> – более чем в 2 раза выше (2,01 нг/л).

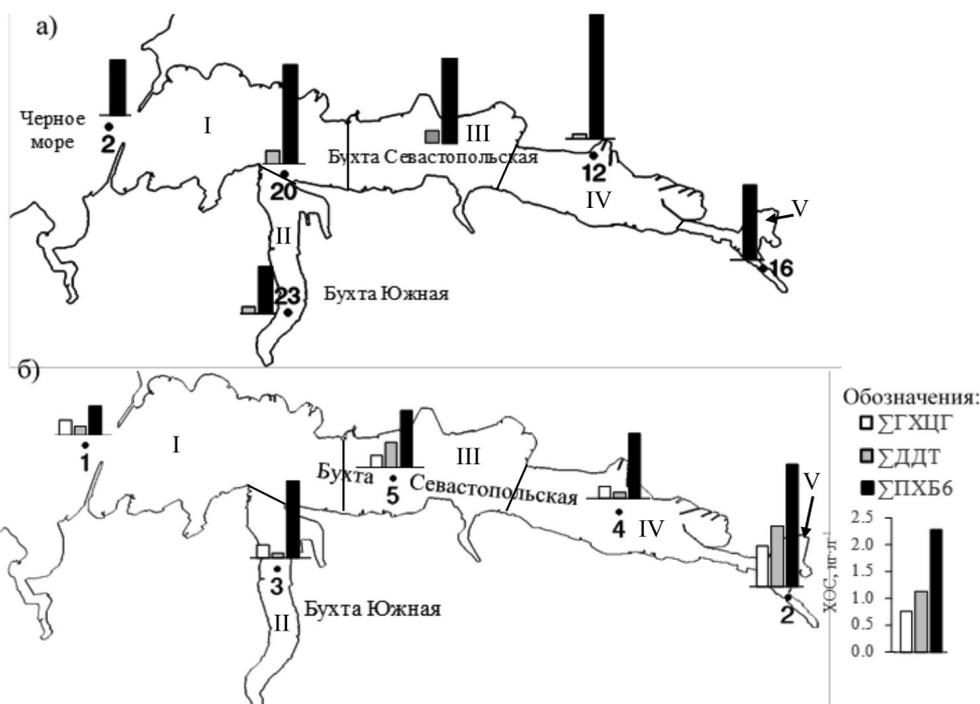


Рис. 3. Концентрация ХОС в поверхностном слое воды Севастопольской бухты в 2018 г.: а) зимний сезон, б) весенний сезон. Римскими цифрами обозначены боксы, на которые была условно поделена бухта

*ХОС в гидробионтах.* Вопрос о загрязнении ХОС гидробионтов р. Черной до настоящего времени оставался открытым. В январе 2020 г. была определена концентрация ХОС в кладофоре, которая произрастала на ст. 3 отдельными зарослями и составляла для ΣДДТ 0,19, а для ΣПХБ<sub>6</sub> – 3,25 нг/г сухой массы. В рдесте содержание ΣДДТ и ΣПХБ<sub>6</sub> было выше, чем в кладофоре, – 7,25 и 12,87 нг/г сухой массы соответственно. Более высокая концентрация ХОС в укореняющемся рдесте определяется, по-видимому, аккумулярованием загрязнителей не только из воды, но и из донных отложений. Накопление ХОС гидрофитами в реке происходило с высокими  $K_n$ , составляющими в кладофоре  $2 \cdot 10^3$  и  $1 \cdot 10^4$ , а в рдесте –  $6 \cdot 10^4$  и  $4 \cdot 10^4$  для ΣДДТ и ΣПХБ<sub>6</sub> соответственно. С одной стороны, такое накопление ХОС гидробионтами может способствовать очищению среды обитания, с другой – высокие концентрации ХОС в растениях могут привести к таким неблагоприятным изменениям в состоянии гидрофитов, как снижение фотосинтетической активности и, как следствие, уменьшение биомассы растений.

Наряду с водорослями и растениями в качестве удобных биоиндикаторов уровня загрязненности ХОС использовали

животных, в частности беспозвоночных. На ст. 1 в зоне смешения воды реки с морской водой бухты, где соленость воды в январе составила 12,3, а в феврале – 14,1‰, концентрация ΣДДТ в мидиях в среднем составила 7,1, ΣПХБ<sub>6</sub> – 58,9, в устрицах – 8,2 и 49,5 нг/г сырой массы соответственно. Как и в воде и в гидрофитах, содержание ΣПХБ<sub>6</sub> в моллюсках многократно превышало концентрацию ΣДДТ. Для сравнения, содержание ΣДДТ и ΣПХБ<sub>6</sub> в мидиях из морского района у выхода из Карантинной бухты в январе 2014 г. составляло в среднем 6,1 и 67,3 нг/г сырой массы соответственно. Несмотря на то, что образцы мидий были отобраны в районах, имеющих выраженные географические и гидрохимические отличия, явных различий в накоплении ХОС обнаружено не было, что свидетельствует об одинаковом уровне техногенной нагрузки в исследуемых акваториях.  $K_n$  в мидиях и устрицах на ст. 1 были равны для ΣДДТ  $3 \cdot 10^4$ , для ΣПХБ<sub>6</sub> –  $7 \cdot 10^3$ . Высокое накопление ХОС в тканях мидий приводит к значительному очищению от них среды обитания моллюсков, а также может вызвать нарушения в функционировании пищеварительных органов, гонад и других органов моллюсков [9]. В случае миграции ХОС по пищевой цепи и накопления их в организме че-

ловека они могут вызвать неблагоприятные процессы, связанные с их иммуносупрессивными и мутагенными свойствами.

Оценка выноса ХОС в Севастопольскую бухту со стоком р. Черной. Оценка месячного выноса ХОС  $R_{\text{ХОС}}$  (г) в бухту была проведена по рекомендациям [10] в соответствии с формулой

$$R_{\text{ХОС}} = C_{\text{ХОС}} \cdot W, \quad (1)$$

где  $C_{\text{ХОС}}$  – средняя концентрация ХОС (мкг/м<sup>3</sup>), определенная в январе и феврале 2020 г.;  $W$  – месячный объем стока, м<sup>3</sup>.

Расходы воды реки по гидропосту с. Хмельницкое – р. Черная в январе и феврале 2020 г. были предоставлены Крымским УГМС (табл. 1). Эти данные приняты за основу для оценки стока реки в вершину бухты Севастопольской, поскольку притоков между с. Хмельницким и устьем реки нет [11].

Сравнение водности реки в январе и феврале с многолетними данными за эти месяцы с 1961 по 2007 г. показало, что зимний сезон 2020 г. являлся маловодным, в январе средний расход был меньше среднего

многолетнего месячного расхода на 50%, а в феврале – почти на 60%.

Для расчета выноса ХОС с потоком р. Черной в бухту использовали значения концентрации ХОС, полученные на ст. 1 в нижнем течении реки (табл. 2).

Расчеты выноса ХОС в январе на основании концентрации  $\Sigma$ ДДТ на ст. 1 показали, что поступление ДДТ в бухту превысило февральское в 1,2 раза. Поступление ПХБ в бухту в январе оказалось в 9 раз выше, чем в феврале. Как видно, изменчивость выноса ХОС определялась в основном режимом загрязненности реки, сильно зависящим от источников поступления ХОС в реку между ст. 1 и ст. 2, которые значительно увеличили концентрацию ПХБ в устьевой части в январе.

Для ответа на вопрос, какую долю в воде Севастопольской бухты составляет количество ХОС, поступившее в бухту в зимний сезон 2020 г., авторы оценили пул ХОС в воде бухты по осредненным за период с 2016 по 2019 г. концентрациям ХОС в пяти боксах бухты (табл. 3).

Таблица 1

Сведения о расходе воды р. Черной по гидропосту с. Хмельницкое – р. Черная за январь и февраль 2020 г.

Месяц	Максимальный, м <sup>3</sup> /с	Минимальный, м <sup>3</sup> /с	Средний, м <sup>3</sup> /с
Январь	1,25	1,08	1,18
Февраль	1,77	1,03	1,25

Таблица 2

Оценка выноса ХОС со стоком р. Черной в бухту Севастопольскую в январе и феврале 2020 г.

Месяц	Вынос $\Sigma$ ДДТ, г/месяц	Вынос $\Sigma$ ПХБ <sub>6</sub> , г/месяц
Январь	0,70	24,90
Февраль	0,56	2,66
Суммарный	1,26	27,56

Таблица 3

Объемы боксов Севастопольской бухты [3], средняя концентрация ХОС в боксах в период с 2016 по 2019 г., пул ХОС в боксах и во всей Севастопольской бухте

Номер бокса	Объем бокса, м <sup>3</sup>	Концентрация $\Sigma$ ДДТ, нг/л	Концентрация $\Sigma$ ПХБ <sub>6</sub> , нг/л	$\Pi_{\Sigma\text{ДДТ}}$ *, г	$\Pi_{\Sigma\text{ПХБ}_6}$ **, г
I	33825650	0,37	2,13	12,52	72,05
II	10235990	0,31	2,06	3,17	21,09
III	22802850	0,32	2,54	7,30	57,92
IV	12935640	0,25	3,11	3,23	40,23
V	1512410	0,75	3,87	1,13	5,85
Вся бухта	81312540	0,40	2,74	32,53	222,80

Примечание. \* – пул  $\Sigma$ ДДТ в воде Севастопольской бухты; \*\* – пул  $\Sigma$ ПХБ<sub>6</sub>.

В результате расчетов  $P_{\Sigma ДДТ}$  в бухте оказался равным 32,53,  $P_{\Sigma ПХБ_6}$  – 222,80 г. Ранее оценка пула ХОС в воде бухты была проведена в 2008 г., когда  $P_{\Sigma ДДТ}$  в воде Севастопольской бухты составлял 278 г, а  $P_{\Sigma ПХБ_6}$  – 355 г [3]. По предварительным расчетам за последние 10 лет  $P_{\Sigma ДДТ}$  в воде бухты уменьшился в 8,6 раза, что согласуется с нашими данными общего снижения концентрации пестицидов этой группы в прибрежных районах Черного моря. Пул  $\Sigma ПХБ_6$  в воде бухты снизился не так значительно – всего в 1,5 раза.

Доля  $\Sigma ДДТ$  и  $\Sigma ПХБ_6$ , поступивших со стоком р. Черной в зимний сезон 2020 г., в общем пуле составила 3,9 и 12,4% соответственно. Если принять условие стационарности выноса  $\Sigma ДДТ$  и  $\Sigma ПХБ_6$ , то в год он составит 7,56 и 165,42 г/год или 23 и 74% от пула в бухте соответственно. Таким образом, предварительные расчеты относительного вклада ХОС, выносимых с потоком р. Черной, в общее содержание их в Севастопольской бухте показали, что три четверти годового поступления  $\Sigma ПХБ_6$  в бухту происходит со стоком реки, тогда как три четверти массы  $\Sigma ДДТ$  в последние годы попадает в бухту из других источников.

#### Заключение

В ходе работы впервые было проведено одновременное комплексное обследование воды и объектов водной флоры и фауны р. Черной на содержание ХОС в зимний сезон 2020 г. В природе аналогов изучаемых ХОС не существует, они, как вещества целенаправленного промышленного синтеза, являются индикаторами техногенного загрязнения реки. Появление в воде и гидробионтах р. Черной хлорорганических токсикантов является откликом экосистемы реки на антропогенную деятельность непосредственно на реке и на её водосборной площади. По величине суммарного показателя загрязнения ХОС по сравнению со средним течением реки более техногенно нагруженной вода оказалась в устьевом участке. По отношению к ПДК в воде акваторий культурно-бытового и рыбо-хозяйственного использования не отмечено превышения нормативных значений, что свидетельствует о высоком качестве воды одного из основных ресурсов питьевого водоснабжения г. Севастополя в отношении данных токсикантов. Однако даже такие невысокие концентрации ХОС в воде приводят к заметному загрязнению гидробионтов, обитающих в экосистеме реки. Определены уровни накопления ХОС водорослями, высшими водными растениями и моллюсками в среднем течении реки и в устьевом участ-

ке. Установлены межвидовые различия в накоплении ХОС в гидрофитах реки. Наибольшие  $K_n$ , достигающие  $6 \cdot 10^4$ , оказались у укореняющихся высших водных растений *Potamogeton* spp. Высокие коэффициенты накопления ХОС дают основание использовать водоросли и высшие растения в качестве тест-объектов для мониторинга ДДТ и ПХБ в речной воде.

Моллюски, как и гидрофиты из р. Черной, являются биологическим фильтром для поступающих в воду малорастворимых, липофильных ХОС. В мягких тканях мидий и устриц  $K_n$  ХОС достигали высоких значений, равных  $7 \cdot 10^3$ , что, соответственно, обуславливает существенное снижение их концентрации в воде.

Определен вынос ХОС в Севастопольскую бухту с потоком р. Черной в зимний сезон. На масштабе двух месяцев изменчивость стока ХОС зависела в основном от степени загрязненности реки.

*Работа выполнена по теме ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (АААА-А18-118020890090-2) при финансовой поддержке РФФИ по гранту «Балансовое изучение влияния стока р. Черной на эвтрофикацию и загрязнение Севастопольской бухты антропогенными радионуклидами, тяжелыми металлами и хлорорганическими ксенобиотиками» (АААА-А20-120013090118-8).*

*Авторы благодарят с.н.с., к.б.н. Мионову Н.В. за определение видов гидрофитов и с.н.с., к.б.н. Пиркову А.Н. за определение видов двустворчатых моллюсков.*

#### Список литературы

1. Малахова Л.В., Егоров В.Н., Малахова Т.В. Хлорорганические соединения в компонентах экосистем Севастопольских бухт, морской акватории природного заповедника «Мыс Мартыан» и Ялтинского порта // Вода: химия и экология. 2019. № 1–2. С. 57–62.
2. Малахова Л.В., Скуратовская Е.Н., Малахова Т.В., Болтачев А.Р., Лобко В.В. Хлорорганические соединения в ерше *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758 в акватории Севастополя (Чёрное море): пространственное распределение и биологический отклик на уровень накопления загрязнителей // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3. № 4. С. 51–63. DOI: 10.21072/mbj.2018.03.4.06
3. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Л.В., Мирзоева Н.Ю., Поповичев В.Н., Терешенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Плотичина О.В., Малахова Т.В., Проскурнин В.Ю., Сидоров И.Г., Стецюк А.П., Гулина Л.В., Марченко Ю.Г. Биогеохимические характеристики седиментационного самоочищения Севастопольской бухты от радионуклидов, ртути и хлорорганических загрязнителей // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3. № 2. С. 40–52. DOI: 10.7868/S032105961802008.
4. ГН 2.1.5.2280-07. Предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902068765> (дата обращения: 08.05.2020).

5. Овсяный Е.И., Орехова Н.А. Гидрохимический режим р. Черной (Крым): экологические аспекты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34. № 1. С. 82–94. DOI: 10.22449/0233-7584-2018-1-82-94.
6. Совга Е.Е., Хмара Т.В. Зимние паводки на реке Черная как источник поступления биогенных элементов в куттовую часть Севастопольской бухты // Моря России: фундаментальные и прикладные исследования: тезисы докладов Всероссийской научной конференции (Севастополь, 23–28 сентября 2019 г.). Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 275–277.
7. ПНД Ф 14.1:2: 3:4.204-04 Методика измерений массовых концентраций хлорорганических пестицидов и полихлорированных бифенилов в пробах питьевых, природных и сточных вод методом газовой хроматографии (издание 2018 г.) [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/551152549> (дата обращения: 08.05.2020).
8. Кондратьев С.И. Исследование гидрохимической структуры р. Черной (Крым) в 2006–2011 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 28. С. 176–185.
9. Livingstone D.R., Chipman J.K., Lowe D.M., Minier C., Pipe R.K. Development of biomarkers to detect the effects of organic pollution on aquatic invertebrates: recent molecular, genotoxic, cellular and immunological studies on the common mussel (*Mytilus edulis* L.) and other mytilid // International Journal of Environment and Pollution. 2000. 13. № 1–6. P. 56–91. DOI: 10.1504/IJEP.2000.002311
10. Временные методические рекомендации по расчету выноса органических, биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком. М.: Гидрометеоздат, 1983. 32 с.
11. Миньковская Р.Я. Геофизическая характеристика устьевой области реки Чёрной (Севастопольский регион) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 17. С. 194–214.