

УДК 504.454:574.52:579.68

DOI: 10.15372/KhUR2024561

EDN: ASNORY

Сезонная динамика химико-микробиологических характеристик донных отложений морского устья малой реки Севастопольского региона (на примере реки Черной, Крым)

Е. А. ТИХОНОВА, Н. В. БУРДИЯН, Ю. В. ДОРОШЕНКО, О. В. СОЛОВЬЕВА

Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

E-mail: tihonova@mail.ru

(Поступила 14.09.2023; после доработки 26.10.2023; принята к печати 22.12.2023)

Аннотация

Проанализирована годовая динамика: 1) содержания хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) и нефтяных углеводородов (НУ) в прибрежных речных наносах, в донных отложениях зоны смешения речных и морских вод и в донных отложениях морской акватории; 2) численности углеводородоокисляющей (УОБ) и гетеротрофной (ГБ) групп бактерий в донных отложениях морского участка и речных прибрежных наносах. Максимальное содержание ХЭВ выявлено в морской акватории (450 ± 17.5 мг/100 г), минимальное – в речной части (127.6 ± 10.9 мг/100 г), в зоне смешения речных и морских вод – 370 ± 37.9 мг/100 г. Средние концентрации НУ распределены аналогично концентрациям ХЭВ: максимальные величины (127.5 ± 10.9 мг/100 г) в морских грунтах, в осадках зоны смешения – несколько ниже (103.1 ± 9.4 мг/100 г) и минимальные значения (54.8 ± 23.9 мг/100 г) в речных наносах. Дана физико-химическая характеристика донных отложений и прибрежных наносов. Численность ГБ варьировала от $7.5 \cdot 10^3$ до $2.5 \cdot 10^6$ кл/г в донных отложениях морского участка, от $9.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^8$ кл/г – речного. Сезонная изменчивость количественных показателей ГБ на обоих участках не отмечена. Бактерии, окисляющие нефтяные углеводороды, высеяны в 100 % проб донных отложений и прибрежных наносов обозначенных акваторий. Численность УОБ в морской зоне варьировала от 25 до $2.5 \cdot 10^4$ кл/г, речной – от 25 до $4.5 \cdot 10^3$ кл/г. В прибрежных наносах реки максимальные показатели численности УОБ отмечены в паводковый период (февраль–апрель).

Ключевые слова: донные отложения, нефтяные углеводороды, хлороформ-экстрагируемые вещества, бактерии

ВВЕДЕНИЕ

Районы смешения речных и морских вод служат зонами транспорта химических загрязняющих веществ и природного материала из наземных экосистем в открытый океан [1, 2]. Важная роль таких зон в функционировании морских экосистем связана с тем, что они являются областью действия маргинальных фильтров [3], где в местах смешения речных и морских вод накапливаются высокие концентрации органи-

ческого вещества автохтонного и аллохтонного происхождения и осуществляются процессы его трансформации. Запасы автохтонных веществ увеличиваются за счет фотосинтеза фитопланктона, макрофитов и хемосинтеза некоторых бактерий, аллохтонных – за счет выноса их с водосборной площади, поступления с атмосферными, а также с бытовыми и промышленными стоками [4]. Отличительной чертой эстуариев является взаимное влияние реки и моря на все происходящие процессы, определяющее двусторонний

встречный характер основных потоков вещества и энергии. Экологическое состояние эстуариев зависит от геоморфологических, физических, химических и биологических процессов, а также антропогенного воздействия [5]. В последнее время экосистемы эстуариев малых рек все больше привлекают внимание исследователей [6–8].

Донные отложения являются конечным этапом миграции загрязняющих веществ, поступающих с прилегающей суши и из атмосферы, и могут служить интегральным показателем загрязнения водных объектов веществами различной природы. Донные отложения довольно консервативная система, где биохимические процессы самоочищения происходят очень медленно. Поэтому концентрации загрязняющих веществ в них изменяются во времени в незначительной степени [9]. Процессы образования и разложения органического вещества в донных отложениях занимают важное место в функционировании эстуариев. Накопление органических веществ в донных осадках в итоге способствует эвтрофикации малых эстуариев. Антропогенная составляющая органического вещества в таких зонах зачастую представлена углеводородами, в том числе и нефтяными [10, 11]. Основную роль в продукционно-деструкционных процессах в донных отложениях, особенно в их верхних слоях, играет сообщество бентосных микроорганизмов [9]. Микробиологические сообщества являются важными компонентами эстуарных экосистем. Они ответственны за многие биохимические процессы, начиная от регулирующих функций круговорота питательных веществ, таких как азот, фосфор и сера [12], до биодegradации и разложения загрязняющих веществ, в том числе органической природы [13]. Поверхностный слой донных отложений обладает самой высокой микробной активностью, чувствительные микроорганизмы из поверхностных отложений также могут быть индикаторами экологического качества акватории [14, 15]. Состояние активных и разнообразных микробных сообществ в эстуарных экосистемах имеет большое экономическое и экологическое значение [16].

Река Черная по протяженности и водности является наиболее значимой из рек Севастопольского региона. Устье р. Черной имеет сложную структуру, которая включает простой устьевой участок реки и сложное устьевое взморье, состоящее из закрытой части – Инкерманского лимана и Севастопольской бухты, а также открытой части взморья [17]. Морское устье р. Черной

первоначально относилось к лиманно-бухтовому типу устьев. Результатом многочисленных антропогенных преобразований стало нарушение естественных процессов формирования устья р. Черной. В настоящее время, устье отнесено к нетиповым, антропогенно-измененным [17].

Цель настоящего исследования – сравнительный анализ состояния донных отложений зоны смешения “река – море” на основе годовой динамики содержания хлороформ-экстрагируемых веществ, нефтяных углеводородов, а также численности углеводородокисляющей и гетеротрофной групп бактерий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материал

Материал для исследования отбирали ежемесячно в течение 2019–2020 гг. Исследуемая зона смешения “река – море” условно была разделена на три участка (рис. 1) по градиенту солености [18]: морской участок (станция (ст.) 1), находящийся непосредственно в акватории бухты Севастопольской; “переходный” (ст. 2), расположенный вблизи автомобильного моста (учитывался в качестве фактора антропогенного поступления загрязняющих веществ со смывом с автодороги) и непосредственно речной участок (ст. 3), где отбирались подвижные береговые наносы.

Методики исследования

На ст. 1 и 2 пробы донных отложений отбирали дночерпателем Петерсона с площадью захвата 0.038 м² по течению впадающей реки, подвижные береговые наносы на ст. 3 – ручным пробоотборником. Глубина пробоотбора в акватории бухты доходила до 8 м, в зоне смешения – до 2 м, в речной зоне – до 1 м. На данной глубине пробоотбора интенсивно происходит перемешивание донных отложений и прибрежных наносов, активное поступление органических веществ со стоком реки и с прилегающих территорий. При отборе проб проводили измерения температуры воды и отмечали (визуально) уровень воды (высокий, низкий) в реке.

Методы исследования

Пробы донных отложений и прибрежных наносов для определения количества хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) и нефтяных углеводородов (НУ) сушили в естественных ус-

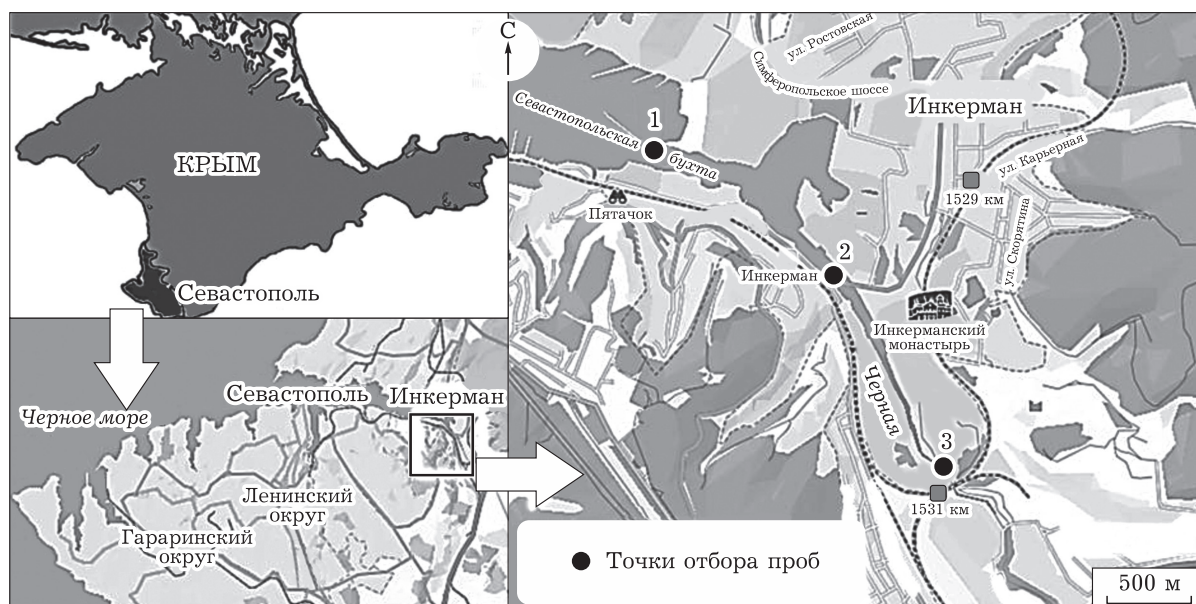


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб донных отложений и прибрежных наносов в зоне смешения «река – море» (р. Черная – бух. Севастопольская).

ловиях, растирали в инертной ступке, просеивали через сито с диаметром ячеек 0.25 мм. Полученные воздушно-сухие осадки в количестве 5 г экстрагировали хлороформом до обесцвечивания промывных порций, экстракты собирали в коническую колбу объемом 100 мл, отгоняли растворитель на водяной бане до остаточного объема 2–3 мл и переносили в предварительно взвешенные на аналитических весах ВЛР-200 (Россия) бюксы. После испарения хлороформа бюксы взвешивали и таким способом определяли массу ХЭВ в исследуемом материале. Для определения концентрации НУ в донных отложениях и прибрежных наносах исследуемой акватории из бюкса количественно переносили тетрахлорметаном (CCl_4) полученное количество ХЭВ на колонку с Al_2O_3 (3 г) и доводили пропущенный элюат до объема 10 мл. Далее измеряли пропускание полученного раствора на спектрофотометре ФСМ-1201 (Инфраспек, Россия) в кювете в области $2700\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ против такой же кюветы с CCl_4 , пропущенным через Al_2O_3 [19, 20]. Все полученные результаты для концентраций ХЭВ и НУ пересчитывали на 100 г воздушно-сухой массы донных отложений. Корреляционный анализ ($p = 0.05$) проводился с помощью пакета программ Microsoft Excel 2010.

В донных отложениях морской и речной зоны (ст. 1 и 3) определяли численность гетеротрофных (ГБ) и углеводородокисляющих (УОБ) групп бактерий. В грунте ст. 2 по техническим причинам микробиологические анализы были

сделаны только дважды в марте и августе. Определение численности бактерий проводили методом предельных десятикратных разведений с использованием жидких питательных сред. Для ГБ использовали среду с пептоном [21]. Для УОБ применяли среду Ворошиловой–Диановой [22]. В качестве единственного источника углерода и энергии в каждую пробирку после посева вносили 1 % стерильной нефти. При приготовлении сред учитывали соленость морской воды. Наиболее вероятное число микроорганизмов в единице объема рассчитывали по таблице Мак-Креди (в трех повторностях), основанной на методе вариационной статистики [23]. Пробы обрабатывали не позднее 2 ч с момента отбора.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воды в течение годового периода изменялась в следующем диапазоне: морская вода – от 8.5 до 26 °С, речная – от 3 до 21 °С. Результаты проведенных анализов показали, что донные осадки и прибрежные речные наносы исследуемых станций отличались по основным физико-химическим характеристикам и гранулометрическому составу.

Донные отложения бухты представлены серыми илами, характеризующимися отрицательным значением окислительно-восстановительного потенциала (Eh), что соответствует границе перехода от окисленной к восстановленной зоне. Такие условия могут способствовать выходу со-

единений металлов из донных осадков и загрязнению воды [24]. Окислительно-восстановительные условия донных отложений оказывают значительное влияние на разложение и накопление попадающих в них органических веществ, в том числе антропогенной природы [25]. Одной из причин снижения величины E_h являются микроводоросли, биомасса которых на станциях с отрицательным значением E_h значительно выше, чем на других станциях [26]. В местах скопления водорослей происходит их активное разложение, возникает дефицит кислорода, что способствует снижению окислительно-восстановительного потенциала, особенно активно этот процесс происходит в период “цветения” водорослей при повышенных температурах воды [27].

В смешанной зоне присутствовали илы с примесью песка, в речной – мелкодисперсные пески с примесью глины и остатков растительности. В обеих зонах отмечены положительные значения E_h . Зафиксированные изменения E_h в донных отложениях обусловлены, прежде всего, сосредоточением зоны наибольшей микробиологической активности на границе “осадок – придонная вода”. Это позволяет по величине окислительно-восстановительного потенциала определять “застойные” зоны или зоны концентрирования органических веществ, которые активно подвергаются микробиологической деструкции [24].

Во время поступления большого количества воды в период паводка при усилении скорости потока водных масс происходит перенос поверх-

ностных донных отложений и смыв прибрежных наносов. Характер передвижения наносов зависит от различных физических характеристик (плотности частиц, гранулометрического состава и др.), а также от глубины и скорости водного потока. Известно, что в активный период паводков перемещаются частицы диаметром до 2 мм [28], однако в большинстве случаев диаметр частиц не превышает 0.5 мм. Считается [29, 30], что данная фракция донных осадков наиболее активно аккумулирует органические молекулы. В донных отложениях, отобранных в зоне смешения (ст. 2), отмечено наибольшее содержание (83 %) фракции 0.5 мм [31], что указывает на активное накопление органических веществ в донных осадках ст. 2. Естественная влажность донных отложений в бухте и зоне смешения “река – море” была одинакова и составляла 64 %, в речной зоне была несколько выше – 78 % [18]. Высокая влажность обеспечивает условия для интенсификации аэробных и анаэробных микробиологических процессов, регулирующих деградацию накопленных в донных отложениях поллютантов [32]. Водородный показатель (pH) варьировал: от минимальных значений (7.44) в морской зоне, смешанной – 7.74 и до максимальных (7.94) в речной зоне. Снижение pH обычно характеризует восстановительные условия, которые создаются при доминировании анаэробных процессов трансформации органического вещества в донных отложениях.

Максимальное среднее количество ХЭВ (рис. 2) отмечено в морской акватории (450 ± 17.5 мг/100 г),

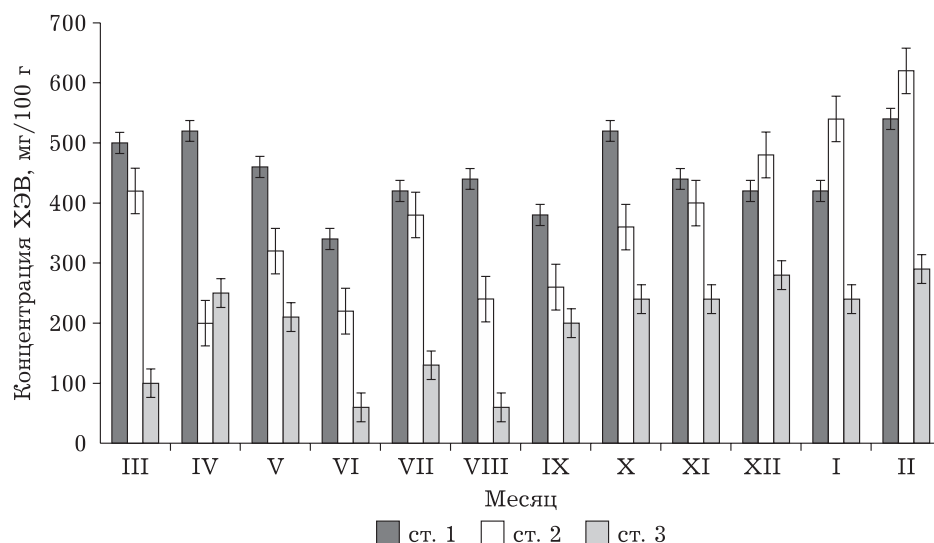


Рис. 2. Концентрации хлороформ-экстрагируемых веществ (ХЭВ) со стандартной ошибкой в донных отложениях и прибрежных наносах зоны смешения “река – море” (р. Черная – бух. Севастопольская): ст. 1 – морской участок; ст. 2 – смешанный участок; ст. 3 – речной участок.

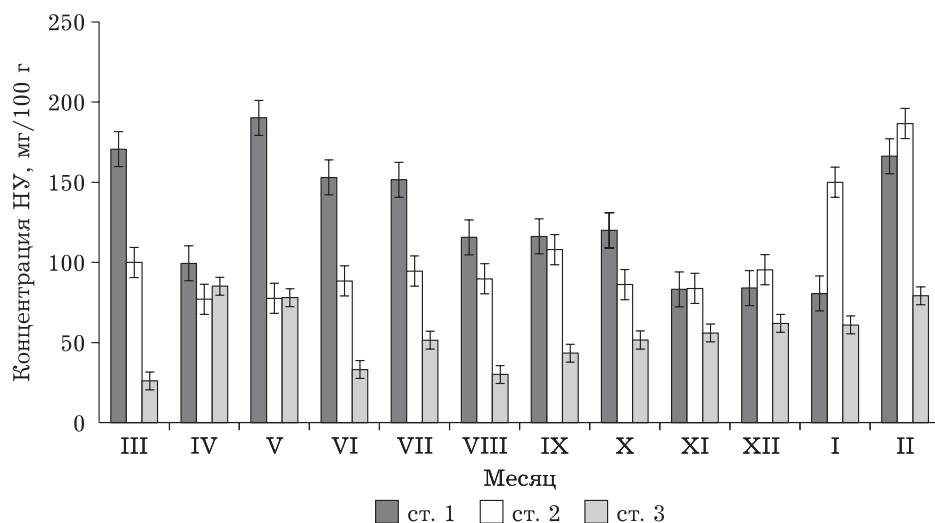


Рис. 3. Концентрации нефтяных углеводородов (НУ) со стандартной ошибкой в донных отложениях и прибрежных наносах зоны смешения “река – море” (р. Черная – бух. Севастопольская): ст. 1 – морской участок; ст. 2 – смешанный участок; ст. 3 – речной участок.

минимальное среднее – в речной части (127.6 ± 10.9 мг/100 г). В зоне смешения речных и морских вод данный показатель составлял в среднем 370 ± 37.9 мг/100 г. Зафиксированные уровни содержания органических веществ указывают на интенсивное их накопление в морской зоне, которая является зоной хронического органического загрязнения, и зоне смешения, где поступление загрязняющих веществ происходит как с морскими, так и речными водами.

Средние концентрации НУ в донных отложениях и прибрежных наносах исследуемой акватории (рис. 3) распределены аналогично концентрациям ХЭВ: максимальные величины (127.5 ± 10.9 мг/100 г) на ст. 1, на ст. 2 – несколько ниже (103.1 ± 9.4 мг/100 г) и минимальные значения (54.8 ± 23.9 мг/100 г) на ст. 3. Несмотря на то, что максимальные величины ХЭВ и НУ отмечены в морских донных отложениях, корреляционной зависимости между данными величинами не выявлено. В то же время тесная корреляционная зависимость отмечена между данными параметрами в смешанной (коэффициент корреляции $r = 0.77$) и речной ($r = 0.8$) зонах. Данный факт может быть связан с одними и теми же источниками поступления органических веществ в донные отложения участков смешения и реки и разными источниками поступления – в донные осадки морского участка. Если полученные результаты по содержанию НУ в донных отложениях сравнивать с нормативами из так называемых Голландских листов (50 мг/100 г) [33], то средние показатели в бухте и зоне смешения “река – море” превышали нор-

матив в 2.5 и 2 раза соответственно. Концентрации НУ в речной зоне весь исследуемый период оставались в пределах указанного норматива.

Важным показателем наличия нефтяного загрязнения являются УОБ, которые используют НУ в качестве единственного источника углерода и энергии. Известно [34], что бактериальные сообщества четко выявляют “концентрационную границу” (400–600 мг/100 г) нефтяного загрязнения донных отложений, ниже которой микробиальные ценозы, обитающие на границе “вода – донные осадки”, еще справляются с поступающими в морские грунты углеводородами и стабилизируют ситуацию в акватории. Согласно этим данным, исследуемая эстуарная зона обладает достаточным микробиальным самоочищающим потенциалом.

Процентное содержание НУ в ХЭВ, указывающее на “степень углеводородности” исследуемой акватории, варьировало от 19 до 45 % в морской зоне, от 15 до 70 % – в смешанной и от 7 до 75 % – в речной. Широкий диапазон колебаний данного показателя в реке и зоне смешения указывает на постоянное поступление углеводородов. Кроме того, оно имеет сезонность, с которой связано количество поступающей воды в реку.

На исследуемых станциях выраженный пик показателя “процентного содержания НУ в ХЭВ” отмечен в июне (в морской зоне – 45 %, в смешанной – 70 % и в речной – 75 %). В этом месяце зафиксированы максимальные количества выпавших атмосферных осадков [11]. Учитывая паводковый режим стока р. Черной с преобла-

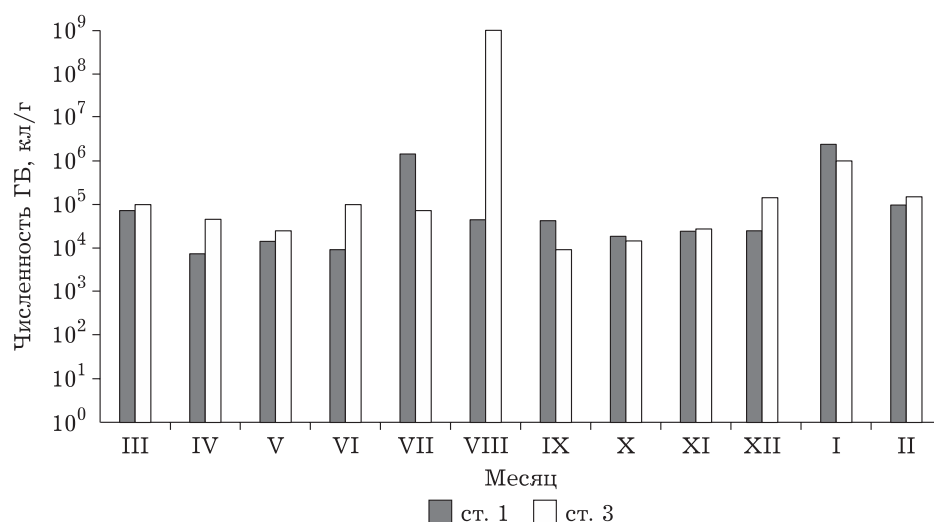


Рис. 4. Численность гетеротрофных бактерий (ГБ) в донных отложениях и прибрежных наносах зоны смешения “река – море” (р. Черная – бух. Севастопольская): ст. 1 – морской участок; ст. 3 – речной участок.

данием дождевого и смешанного питания [17], можно предполагать, что в июне с интенсивным поверхностным стоком поступило большое количество органических веществ, которые впоследствии несколько изменили процентное соотношение ХЭВ и НУ.

Результаты микробиологических исследований показали, что численность ГБ (рис. 4) варьировала от $7.5 \cdot 10^3$ до $2.5 \cdot 10^6$ кл/г в донных отложениях морского участка (ст. 1), от $9.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^8$ кл/г – речного (ст. 3). Численность ГБ в весенний период на морском участке колебалась от $7.5 \cdot 10^3$ до $7.5 \cdot 10^4$ кл/г, в прибрежных наносах на речном участке – в пределах четвертого порядка (от $2.5 \cdot 10^4$ до $9.5 \cdot 10^4$ кл/г). Максимальные значения на обеих станциях выявлены в мартовских пробах. В апреле число ГБ на ст. 1 снизилось на порядок, а на ст. 3 – уменьшилось до $4.5 \cdot 10^4$ кл/г. В майских пробах численность ГБ в речной и морской зоне была в пределах четвертого порядка.

В летние месяцы диапазон численности ГБ в морских осадках варьировал от $9.5 \cdot 10^3$ до $1.5 \cdot 10^6$ кл/г. Максимальная численность определена в июльской пробе, в июне число ГБ составило $9.5 \cdot 10^3$ кл/г, а в августе не превышало $4.5 \cdot 10^4$ кл/г. Летние наблюдения в речной зоне показали, что число ГБ в июне и июле колебалось в пределах одного порядка ($7.5 \cdot 10^4$)–($9.5 \cdot 10^4$), максимальное же значение ($9.5 \cdot 10^8$) выявлено в августе. Высокая численность ГБ также отмечена в августе в зоне смешения.

Количество ГБ в морских пробах (ст. 1), отобранных в осенний период, колебалось в преде-

лах четвертого порядка: ($2.0 \cdot 10^4$)–($4.5 \cdot 10^4$) кл/г. В пробах речного участка численность ГБ по сравнению с летними результатами снизилась на несколько порядков и варьировала от $9.5 \cdot 10^3$ до $2.5 \cdot 10^4$ кл/г.

В зимнем цикле наблюдений наибольшая численность ГБ на ст. 1 определена в январе ($2.5 \cdot 10^6$ кл/г), в оставшихся зимних пробах морской зоны число ГБ колебалось от $2.5 \cdot 10^4$ до $9.5 \cdot 10^4$ кл/г. На ст. 3 численность ГБ находилась в пределах одного порядка ($1.5 \cdot 10^5$)–($9.5 \cdot 10^5$) кл/г, равные значения получены в декабрьской и февральской пробах.

Годовое наблюдение показало, что в морской зоне максимальная численность ГБ выявлена в июле и январе, наименьшие показатели ГБ определены в апреле и июне, в остальных морских пробах численность ГБ колебалась от $1.5 \cdot 10^4$ до $9.5 \cdot 10^5$ кл/г. На речном участке вспышка численности ГБ зарегистрирована в августе, минимум ГБ отмечен в сентябре. Сезонная изменчивость количественных показателей ГБ на обоих участках не отмечена. По всей видимости, численность ГБ зависела, в первую очередь, от содержания органического вещества. Установлено, что в 83 % проб речных прибрежных наносов численность ГБ варьировала от $1.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^4$ кл/г, в морской зоне в 67 % проб число ГБ колебалось в пределах одного порядка – ($1.5 \cdot 10^3$)–($9.5 \cdot 10^3$) кл/г. Именно приустьевые зоны характеризуются высокой численностью бактериопланктона и бактериобентоса [35].

Выявлена отрицательная корреляционная зависимость между численностью ГБ и содержа-

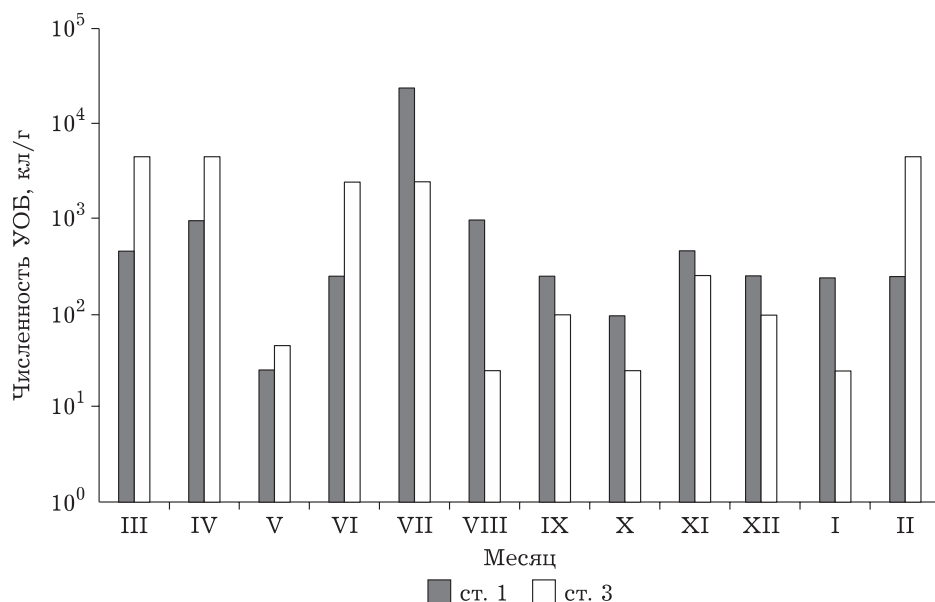


Рис. 5. Численность углеводородоокисляющих бактерий (УОБ) в донных отложениях и прибрежных наносах зоны смешения “река – море” (р. Черная – бух. Севастопольская): ст. 1 – морской участок; ст. 3 – речной участок.

нием ХЭВ на станциях отбора проб (в речной зоне $r = -0.5$; в морской зоне $r = -0.21$ $\alpha < 0.05$).

Бактерии, окисляющие НУ, высеяны в 100 % проб донных отложений и прибрежных наносов обозначенных акваторий (рис. 5). Количественные показатели УОБ в морской зоне за исследуемый период варьировали от 25 до $2.5 \cdot 10^4$ кл/г, в речной зоне – от 25 до $4.5 \cdot 10^3$ кл/г.

Весенняя серия наблюдений показала, что численность УОБ на морском участке колебалась от 25 до $9.5 \cdot 10^2$ кл/г, речном – от 45 до $4.5 \cdot 10^3$ кл/г, причем минимальные показатели на обеих станциях получены в мае. Численность УОБ в донных отложениях реки (ст. 3) в мартовских и апрельских пробах была довольно высокой и составляла $4.5 \cdot 10^3$ кл/г. Число УОБ на морской станции в эти же месяцы было на порядок ниже. На обеих станциях в майских пробах число УОБ снизилось и не превышало второго порядка (45 и 25 кл/г). Равная численность УОБ отмечена в мартовских пробах из речного и переходного участка.

Летом число УОБ в морской зоне колебалось от $2.5 \cdot 10^2$ до $2.5 \cdot 10^4$ кл/г, речной – от 25 до $2.5 \cdot 10^3$ кл/г. Количественные показатели УОБ морской зоны в июне и августе не превышали $9.5 \cdot 10^2$ кл/г, в то время как в июльской пробе отмечена максимальная численность УОБ в годовой динамике морской станции – $2.5 \cdot 10^4$ кл/г. Равные показатели численности УОБ ($2.5 \cdot 10^3$ кл/г) зафиксированы на речном участке в июне и июле,

резкое падение численности УОБ на данной станции (до 25 кл/г) отмечено в августе.

Осенью число УОБ в морской зоне варьировало от 95 до $4.5 \cdot 10^2$ кл/г, в речной зоне – от 25 до $2.5 \cdot 10^2$ кл/г. В морской зоне минимум УОБ отмечен в октябре, как и на речном участке. В сентябре и ноябре число УОБ составляло $2.5 \cdot 10^2$ и $9.5 \cdot 10^2$ кл/г соответственно. В речной зоне минимальный показатель УОБ выявлен в октябре, а максимальный – в ноябрьском образце донных отложений.

В зимний период в морской зоне зафиксированы равные показатели численности УОБ ($2.5 \cdot 10^2$ кл/г) во всех трех пробах, в речной зоне максимальный показатель УОБ ($4.5 \cdot 10^3$ кл/г) определен в феврале, в декабре и январе число УОБ составило 95 и 25 кл/г соответственно.

В годовом цикле проведенных микробиологических наблюдений установлено, что в морской зоне максимум численности УОБ ($4.5 \cdot 10^3$ кл/г) выявлен в июле, минимум – в мае. В осадках речной зоны максимальные показатели численности УОБ отмечены в паводковый период (февраль–апрель). В апрельских пробах на обеих станциях зафиксирована наибольшая доля УОБ от общей численности гетеротрофного бактериобентоса, составляющая в морской зоне 13 %, в речной – 10 %. В остальные месяцы процент УОБ от общего числе ГБ был незначительным (1–4 %), что схоже с исследованиями [36, 37].

Довольно высокая численность ($2.5 \cdot 10^3$ кл/г) УОБ в речной зоне выявлена в июньской и июльской пробах. Как отмечалось ранее, в июне определен и наибольший процент содержания НУ в общем количестве ХЭВ. Численность УОБ в осадках морской зоны в 58 % проб превышала таковую в речной, причем в 50 % речных проб численность УОБ колебалась от 25 до 95 кл/г, а в морской зоне в 75 % проб показатели численности УОБ в донных отложениях колебались от 250 до 950 кл/г. Незначительный положительный коэффициент корреляции определен между численностью УОБ и концентрацией НУ (в речной зоне $r = 0.13$; в морской зоне $r = 0.18$ $\alpha < 0.05$). Это может быть связано с тем, что способность УОБ к трансформации нефтяных углеводородов зависит от многочисленных факторов окружающей среды [38, 39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты годового наблюдения за динамикой содержания ХЭВ и НУ в донных отложениях исследуемых акваторий показали, что максимальное количество ХЭВ отмечено в морской акватории (450 ± 17.5 мг/100 г), минимальное – в речной части (127.6 ± 10.9 мг/100 г). В зоне смешения речных и морских вод данный показатель составлял 370 ± 37.9 мг/100 г. Полученные средние показатели соответствуют III уровню загрязнения (100–500 мг/100 г) из пяти описанных. Данные уровни содержания органических веществ указывают на интенсивное их накопление в морской зоне, которая является зоной хронического органического загрязнения, и зоне смешения, где поступление загрязняющих веществ происходит как с морскими, так и речными водами.

Средние концентрации НУ исследуемой акватории распределены аналогично концентрациям ХЭВ: максимальные величины (127.5 ± 10.9 мг/100 г) выявлены в морских грунтах, в осадках зоны смешения – несколько ниже (103.1 ± 9.4 мг/100 г) и минимальные значения (54.8 ± 23.9 мг/100 г) – в речных наносах. По сравнению с нормативами “Голландских листов” (50 мг/100 г) средние показатели НУ в донных отложениях бухты и зоны смешения “река – море” превышали норматив в 2.5 и 2 раза соответственно, тогда как в речных наносах оставались в его пределах.

Проведенный анализ пространственной изменчивости исследованных микробиологических

показателей показал, что численность ГБ в донных отложениях морского участка в течение года варьировала от $7.5 \cdot 10^3$ до $2.5 \cdot 10^6$ кл/г, речного – от $9.5 \cdot 10^3$ до $9.5 \cdot 10^8$ кл/г. Сезонная изменчивость количественных показателей ГБ на обоих участках не отмечена. По всей видимости, численность ГБ зависела, в первую очередь, от содержания органического вещества. Выявлена отрицательная корреляционная зависимость между численностью ГБ и содержанием ХЭВ на станциях отбора проб. Бактерии, окисляющие НУ, выселяны в 100 % проб донных отложений и прибрежных наносов обозначенных акваторий. Количественные показатели УОБ в морской зоне за исследуемый период варьировали от 25 до $2.5 \cdot 10^4$ кл/г, в речной зоне – от 25 до $4.5 \cdot 10^3$ кл/г. В осадках речной зоны максимальные показатели численности УОБ отмечены в паводковый период (февраль–апрель). В апрельских пробах на обеих станциях зафиксирована наибольшая доля УОБ от общей численности гетеротрофного бактериобентоса, составляющая в морской зоне 13 %, в речной – 10 %. В остальные месяцы процент УОБ от общего числа ГБ был незначительным (1–4 %).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме “Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемотропических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России” (№ гос. регистрации 124030100127-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Telesh I., Schubert H., Skarlato S. Life in the salinity gradient: discovering mechanisms behind a new biodiversity pattern // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 2013. Vol. 135. P. 317–327.
- 2 McLusky D. S., Elliott M. The Estuarine Ecosystem: Ecology, Threats and Management. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2004. 224 p.
- 3 Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология.* 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
- 4 Привезенцев Ю. А. Интенсивное прудовое рыбководство: учебник. М.: Агропромиздат, 1991. 368 с.
- 5 Гаретова Л. А., Левшина С. И., Фишер Н. К., Сиротский С. Е., Шестеркин В. П. Распределение органического вещества, фитопигментов и гетеротрофных бактерий вдоль градиента солености в эстуариях малых рек бассейна Татарского залива // *Изв. ТИНРО.* 2016. Т. 184. С. 219–235.
- 6 Гаретова Л. А., Фишер Н. К. Условия и источники формирования углеводородного фона в донных отложениях малых эстуариев Татарского пролива // *Геохимия.* 2020. Т. 65, № 8. С. 768–777.

- 7 Jickells T. D., Andrews J. E., Parkes D. J., Suratman S., Aziz A. A., Hee Y. Y. Nutrient transport through estuaries: the importance of the estuarine geography // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 2014. Vol. 150, Pt. B. P. 215–229.
- 8 Pye K., Blott S. J. The geomorphology of UK estuaries: the role of geological controls, antecedent conditions and human activities // *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 2014. Vol. 150, Pt. B. P. 196–214.
- 9 Фишер Н. К., Гаретова Л. А. Биогеохимическая характеристика донных отложений реки Тумнин (бассейн Японского моря) // *География и природ. ресурсы.* 2021. Т. 42, № 4. С. 115–122.
- 10 Немировская И. А. Нефть в океане: загрязнение и природные потоки. М.: Научный мир, 2013. 432 с.
- 11 Soloveva O. V., Tikhonova E. A., Mironov O. A., Alyomova T. E. Origin of hydrocarbons in the water of the river-sea mixing zone: a case study from the Chernaya River – the Sevastopol bay, Black Sea // *Reg. Stud. Mar. Sci.* 2021. Vol. 45. Art. 101870.
- 12 Falkowski P. G., Fenchel T., Delong E. F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles // *Science.* 2008. Vol. 320, No. 5879. P. 1034–1039.
- 13 Xie Y., Wang J., Wu Y., Ren C., Song C., Yang J., Yu H., Giesy J. P., Zhang X. Using in situ bacterial communities to monitor contaminants in river sediments // *Environ. Pollut.* 2016. Vol. 212. P. 348–357.
- 14 Duarte B., Freitas J., Caçador I. Sediment microbial activities and physico-chemistry as progress indicators of salt marsh restoration processes // *Ecol. Indic.* 2012. Vol. 19. P. 231–239.
- 15 Kallmeyer J., Pockalny R., Adhikari R. R., Smith D. C., D'Hondt S. Global distribution of microbial abundance and biomass in subseafloor sediment // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. Vol. 109, No. 40. P. 16213–16216.
- 16 Grizzetti B., Lique C., Pistocchi A., Vigiak O., Zulian G., Bouraoui F., De Roo A., Cardoso A. C. Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 671. P. 452–465.
- 17 Миньковская Р. Я., Демидов А. Н. Эволюция морского устья реки Черной (Севастопольский регион) // *Эколог. безопасность прибреж. и шельфовой зон моря.* 2016. № 1. С. 81–88.
- 18 Tikhonova E., Burdiyan N., Soloveva O., Kotelyanets E., Mironov O., Guseva E., Gurov K. Ecological state of the water area in the fresh water – saline water mixing zone in spring (the River Chernaya estuary – Sevastopol Bay, Black Sea) // *Pollution.* 2022. Vol. 8, No. 2. P. 693–703.
- 19 РД 52.10.803–2013. Массовая доля нефтяных углеводородов в пробах морских донных отложений: методика измерений методом инфракрасной спектроскопии. М.: 2014. 24 с.
- 20 Руководство по методам химического анализа морских вод / под ред. С. Г. Орадовского. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 118–131.
- 21 Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алёмов С. В. Санитарно-биологические аспекты экологии севавтопольских бухт в XX веке / НАН Украины, Ин-т биологии южных морей. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
- 22 Родина А. Г. Методы водной микробиологии: практ. руководство / АН СССР, Зоол. ин-т. М.: Наука, 1965. 363 с.
- 23 Нетрусова А. И. Практикум по микробиологии: учеб. пособие. М.: Академия, 2005. 603 с.
- 24 Шигаева Т. Д., Поляк Ю. М., Кудрявцева В. А. Окислительно-восстановительный потенциал как показатель состояния объектов окружающей среды // *Биосфера.* 2020. Т. 12, № 3. С. 111–124.
- 25 Husson O. Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: a transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy // *Plant Soil.* 2013. Vol. 362, No. 1–2. P. 389–417.
- 26 Губелит Ю. И., Поляк Ю. М., Шигаева Т. Д., Кудрявцева В. А. Влияние “зеленых приливов” на загрязнение прибрежной зоны тяжелыми металлами // *Докл. АН.* 2019. Т. 489, № 3. С. 321–324.
- 27 Gubelit Yu. I. Climatic impact on community of filamentous macroalgae in the Neva estuary (eastern Baltic Sea) // *Mar. Pollut. Bull.* 2015. Vol. 91, No. 1. P. 166–172.
- 28 Горбунов А. О., Ковалев Д. П., Ковалев П. Д. Донные наносы, переносимые течением в районе размыва берега залива Мордвинова (о. Сахалин) // *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3, № 2. С. 209–218.
- 29 Krein A., Schorer M. Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments // *Water Res.* 2000. Vol. 34, No. 16. P. 4110–4115.
- 30 Burgess R. M., Terletskaia A. V., Milyukin M. V., Povolutskii M., Demchenko V. Y., Bogoslavskaya T. A., Topkin Y. V., Vorobyova T. V., Petrov A. N., Lyashenko A., Ho K. T. Concentration and distribution of hydrophobic organic contaminants and metals in the estuaries of Ukraine // *Mar. Pollut. Bull.* 2009. Vol. 58, No. 8. P. 1103–1115.
- 31 Соловьёва О. В., Тихонова Е. А., Миронов О. А., Барабашин Т. О. Полициклические ароматические углеводороды в донных отложениях зоны смешения река – море на примере реки Черной и Севастопольской бухты (Черное море) // *Мор. гидрофиз. журн.* 2021. Т. 37, № 3. С. 362–372.
- 32 Савич В. И., Смарицын С. Н., Гукалов В. В., Раскатов В. А., Поляков А. М. Интегральная оценка окислительно-восстановительного состояния системы почва-растение // *Изв. Тимирязевской с.-х. акад.* 2019. Т. 4. С. 19–31.
- 33 Dutch Target and Intervention Values, 2000 (the New Dutch List) [Electronic resource] / Esdat Environmental Database Management Software. URL: esdat.net/Environmental%20Standards/Dutch/annexS_I2000Dutch%20Environmental%20Standards.pdf (accessed 03.06.2023).
- 34 Кузнецова И. А., Дзюбан А. Н. Бактериобентосные сообщества под воздействием нефтяного загрязнения водоемов // *Гидробиол. журнал.* 2006. Т. 42, № 5. С. 88–92.
- 35 Каретникова Е. А., Гаретова Л. А. Пространственно-временное распределение бактериопланктона и бактериобентоса в Амурском лимане и прилегающих морских акваториях // *Океанология.* 2015. Т. 55, № 5. С. 776–786.
- 36 Hewson I., Fuhrman J. A. Richness and diversity of bacterioplankton species along an estuarine gradient in Moreton Bay, Australia // *Appl. Environ. Microbiol.* 2004. Vol. 70, No. 6. P. 3425–3433.
- 37 Алёмов С. В., Бурдиан Н. В., Витер Т. В., Гусева Е. В., Короткова А. В. Бентос северо-западной части озера Донузлав в 2017 году // *Экосистемы.* 2020. № 22. С. 15–28.
- 38 Рубцова С. И., Егоров В. Н. Влияние абиотических факторов на численность нефтеокисляющих бактерий в прибрежных районах Черного моря // *Экология моря.* 2004. Т. 66. С. 91–99.
- 39 Xu X., Liu W., Tian S., Wang W., Qi Q., Jiang P., Gao X., Li F., Li H., Yu H. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: a perspective analysis // *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. Art. 2885.