

**Поиск оптимального расположения
проектируемых выпусков городской канализации
в Севастопольской бухте
с помощью численного моделирования
и геоинформационного анализа**

**Ю. Н. Рябцев¹, Л. В. Вержевская¹, Т. В. Рауэн²,
М. В. Цыганова^{1*}, В. В. Никишин^{1,3}, А. В. Багаев¹**

¹ *Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

² *Институт биологии южных морей РАН, Севастополь, Россия*

³ *Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия*

*e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

Поступила 15.12.2020 г.; принята к публикации 17.03.2021 г.; опубликована 25.03.2021 г.

Многочисленные исследования показали, что современное гидрохимическое и гидробиологическое состояние вод Севастопольской бухты оказывает негативное влияние на биоразнообразие ее акватории и рекреационный потенциал региона. Увеличение численности населения, рост туристического потока, планы по активному освоению ресурсов прибрежной зоны моря актуализируют задачу по оценке уровня влияния расположения выпусков городской канализации на наиболее посещаемые участки берега и зоны марикультуры. Предложен численный метод расчета функции влияния городских стоков на качество воды Севастопольской бухты. Расчеты выполнены для городских пляжей, набережной Приморского бульвара, причалов и мидийной фермы для различных вариантов предполагаемого расположения выпусков. Проведено сопоставление данных из доступных источников о расположении и характере выпусков муниципальной канализационной системы. Для каждой карты поля функции влияния выполнен анализ связности между известными выпусками и участками, где появление загрязненной взвеси нежелательно. Анализ полученных результатов показал, что наиболее подвержен влиянию ливневой и сточной канализации пляж «Ушакова балка». Районы причалов на Северной стороне испытывают сильное влияние непосредственно прилежащих выпусков. Концентрация взвеси, выпускаемой из ливневой канализации в центре города, в значительной степени влияет на состояние воды у основных мест отдыха жителей города.

Ключевые слова: Черное море, Севастопольская бухта, загрязнение, прибрежная зона, муниципальные стоки, математическое моделирование, сопряженные уравнения.

Благодарности: анализ доступных данных о расположении выпусков ливневых и сточных вод в Севастопольской бухте, расчет функции влияния и ГИС-анализ

© Рябцев Ю. Н., Вержевская Л. В., Рауэн Т. В., Цыганова М. В.,
Никишин В. В., Багаев А. В., 2021



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

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

выполнены при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополь в рамках научного проекта № 20-45-920019, разработка численной модели для расчета распространения примеси выполнены в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0005.

Для цитирования: Поиск оптимального расположения проектируемых выпусков городской канализации в Севастопольской бухте с помощью численного моделирования и геоинформационного анализа / Ю. Н. Рябцев [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2021. № 1. С. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128

Search for an Optimal Configuration of Projected Municipal Sewerage Outfalls in the Sevastopol Bay using Computational Modelling and Geoinformation Analysis

Yu. N. Ryabtsev¹, L. V. Verzhevskaya¹, T. V. Rauen²,
M. V. Tsyganova^{1*}, V. V. Nikishin^{1,3}, A. V. Bagaev¹

¹ Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

² A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russia

³ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*e-mail: m.tsyganova@mhi-ras.ru

Submitted 15.12.2020; revised 17.02.2021; published 25.03.2021

Numerous studies have shown that the current hydrochemical and hydrobiological state of the Sevastopol Bay has a negative impact on its biodiversity and recreational potential of the region. An increase in population and tourist flow, as well as plans for intense development of the coastal zone resources actualize the task of assessing the impact of the existing and planned configuration of the municipal sewage facilities on the most visited seashore areas and mariculture development. We propose a numerical method for calculating the function of influence of municipal sewage on the quality of the Sevastopol Bay water. Calculations were performed for the city beaches, esplanade of Primorsky Boulevard, piers and the mussel farm with various potential options of outfalls arrangement in mind. We have compared the data from available sources as to arrangement and character of the municipal sewerage outfalls. We have analyzed the connectivity between the known outfalls and areas where contaminated suspended matter is undesirable for each map of the influence function field. The analysis showed Ushakova Balka Beach to be the most susceptible to storm water and sewerage discharge. The areas near the berths on the Severnaya Side are strongly influenced by the immediately adjacent outfalls. Concentration of suspended matter released from the stormwater sewerage in the city center has a dramatic impact on the water condition at major places of recreation of city residents.

Keywords: Black Sea, Sevastopol Bay, pollution, coastal area, municipal wastewater, mathematical modelling, adjoint equations.

Acknowledgements: analysis of available data on location of stormwater and municipal wastewater outfalls in the Sevastopol Bay, calculation of the influence function and GIS-analysis are funded by the RFBR and the city of Sevastopol as part of scientific project 20-45-920019; development of the computational model to calculate propagation of impurities was performed under state order on topic no. 0555-2021-0005.

For citation: Ryabtsev, Yu.N., Verzhavskaia, L.V., Rauen, T.V., Tsyganova, M.V., Nikishin, V.V. and Bagaev, A.V., 2021. Search for an Optimal Configuration of Projected Municipal Sewerage Outfalls in the Sevastopol Bay using Computational Modelling and Geoinformation Analysis. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (1), pp. 111–128. doi:10.22449/2413-5577-2021-1-111-128 (in Russian).

Введение

Севастопольская бухта представляет собой акваторию эстуарного типа, имеющую ограниченный водообмен с открытым морем. В то же время она относится к зонам активного хозяйственного использования, а также является естественным резервуаром, в который поступают промышленные, сточные хозяйственно-бытовые и ливневые воды с основной части водосбора Гераклейского полуострова [1, 2]. Они, наряду с аварийными канализационными сбросами г. Севастополя, на протяжении длительного периода являются основными факторами загрязнения вод Севастопольской бухты [3, 4].

С 2014 г. в Севастополе отмечается рост численности населения¹⁾. Кроме того, город активно развивает туристический потенциал. Лишь за лето 2020 г. Севастополь посетили около 120 тысяч туристов, что на 20 % больше, чем за аналогичный период предыдущего года¹⁾. Все это влечет за собой дополнительное увеличение антропогенной нагрузки на Севастопольскую бухту. В то же время участки побережья, которые могут считаться рекреационно привлекательными (пляж, набережная, променады), малочисленны и потому требуют особого внимания.

Изучение загрязнения вод в бухте и прилегающей к ней прибрежной зоне ведется уже длительное время [1–7]. В конце 90-х – начале 2000-х гг. в бухту ежедневно сбрасывалось около 10–15 тыс. м³ неочищенных или условно чистых вод, содержащих широкий спектр веществ-загрязнителей с концентрациями, значительно превышающими допустимые нормы [1]. В 2001 г. среднегодовой объем сброса сточных вод по канализационным сетям ГУПС «Водоканал» составлял около 60 млн м³, из которых механическую очистку проходили только 73 % сточных вод, полную биологическую – 13 %, а 14 % сбрасывались в бухту без очистки [7]. В 2001 г. в Севастопольской бухте функционировало более 30 выпусков сточных вод, более 20 из них – постоянно действующие выпуски, по которым поступали неочищенные сточные воды [7]. Построенные в 1950–90-х гг. инженерные сети водохозяйственных организаций не справляются сегодня с объемами стоков, а устаревшие технологии очистки не рассчитаны на современный состав стоков [8]. На данный момент 80 % стоков не проходят биологическую очистку и в нарушение санитарных норм сливаются в прибрежную зону города. Если в Российской Федерации доля загрязненных вод в общем объеме сброса сточных вод в 2014 г. составляла 33.6 %, в Краснодарском крае – 28.1 %, то в Севастополе – 44.1 %²⁾.

¹⁾ Город Севастополь в цифрах 2018 г. Севастополь : Крымстат, 2018. 193 с.

²⁾ Проект стратегии социально-экономического развития города Севастополя до 2030 года [Электронный ресурс]. Севастополь, 2017. URL: https://sevzakon.ru/assets/files/zakproekty/19-447_1.pdf (дата обращения: 19.03.2021).

Перечисленные выше проблемы ведут также к негативным изменениям условий жизни гидробионтов, снижению их количества, разнообразия видов [9, 10], а также к массовому цветению фитопланктона, образованию зон гипоксии в придонном слое и общей деградации экосистемы Севастопольской бухты [11–13]. Стоит отметить, что последние исследования, выполненные с помощью современных методик оценки состояния природных систем, характеризуют экологический статус Севастопольской бухты как критический [14].

Вместе с тем наличие природоохранных объектов и зон марикультуры в Севастопольской бухте предъявляет повышенные требования к соблюдению в ней санитарных норм. В связи с миграционными и экономическими тенденциями развития города необходимо обозначить основные источники загрязнения вод бухты и очертить зоны побережья, которые наиболее подвержены влиянию таких источников. Так, недавно было заявлено о проекте реконструкции, а фактически о строительстве новой сети ливневых коллекторов г. Севастополя [15]. Кроме того, при разработке генплана города обсуждалось строительство единой линии набережной от б. Мартыновой до Ушаковой балки и возведение очистных сооружений для канализационных стоков строящегося культурного кластера.

Одним из показателей, характеризующих состояние качества воды в бухте, является взвесь (биогенные и терригенные взвешенные вещества, поступающие в воды бухты со сточными водами). По предварительной оценке, исходя из нормы атмосферных осадков для г. Севастополя (421 мм в год) и состава ливневых вод, с 1 км² площади городской застройки в Севастопольскую бухту ежегодно поступает 1680 т взвеси [15]. Приведенные выше факты позволяют предположить, что в настоящее время этот показатель существенно вырос, его мониторинг – важная задача для практической оценки состояния водоема и перспектив его дальнейшего использования.

Структура и изменчивость гидродинамических характеристик вод Севастопольской бухты изучается в основном с помощью численного моделирования. Решения уравнений гидротермодинамики океана в баротропном приближении, основанные на аналитических формулах, получены в работах [16, 17]. В работе [18] показано, что учет термохалинных факторов в бароклинной постановке задачи может заметно изменять динамику течений в сравнении с баротропным вариантом. Для моделирования динамики также применялась Принстонская модель океана с заданием среднемесячных профилей плотности [19]. Для дальнейшего увеличения точности воспроизводимой динамики моря необходимо знание полей температуры и солености с более высоким пространственным и временным разрешением. К сожалению, прогресс в развитии квазиоперативных наблюдений с высоким временным разрешением для Севастопольской бухты отсутствует. В целом, однако, можно сказать, что динамику вод в Севастопольской бухте характеризуют: высокая изменчивость скорости и направления течений под действием ветра, дополнительное влияние открытой границы и перестройка вертикального профиля плотности между сезонами. Поэтому для моделирования распространения свободной примеси более корректным будет расчет нескольких сценариев и обобщение результатов для наиболее вероятной ветровой ситуации.

В нашей работе рассмотрены закономерности распределения взвеси в водах бухты по данным, полученным в ходе численного решения сопряженной задачи. Как основные составляющие для геоинформационного (ГИС) анализа использованы географические координаты расположения муниципальных стоков и степень их влияния на различные участки побережья. На основе данных о степени связности между выбранными для защиты участками побережья и выпусками канализации в работе показано, какие именно выпуски канализации и в какой степени определяют загрязнение вод Севастопольской бухты в рекреационно привлекательных районах. Сочетание ГИС-анализа и численного моделирования позволяет применять выбранный подход для перспективного планирования расположения выпусков канализации. В качестве практических рекомендаций были выбраны оптимальные расположения выводов канализации и проведен расчет распространения свободной примеси с положительной плавучестью, чтобы подтвердить эффективность такого решения.

Материалы и методы

Оценка определения влияния стоков природного и антропогенного происхождения на прибрежные районы Севастопольской бухты проходила в несколько этапов.

На первом этапе был проведен анализ доступных данных о расположении выпусков ливневых и сточных вод в Севастопольской бухте. Данные из опубликованных источников [8, 15, 20, 21] были сопоставлены и систематизированы. По результатам сравнительного анализа с помощью инструментов геоинформационной системы *QGIS* 3.10 была построена карта обеспеченности информацией с геопривязкой и распределением по категориям различных типов выпусков (аварийные и регулярные выпуски канализационных вод без очистки, с механической или биологической очисткой, а также выпуски ливневой канализации). Фактически выпусков в акватории города больше, однако на карте представлены только те, которые подтверждаются

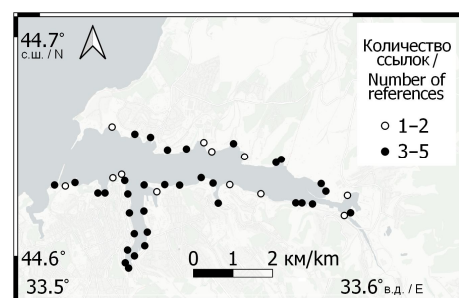


Рис. 1. Карта расположения выпусков муниципальной канализации в Севастопольской бухте с указанием количества источников, использованных для их верификации

Fig. 1. Map of location of municipal sewerage outfalls in the Sevastopol Bay, detailing the number of references used for verification thereof

опубликованными работами. Для целей нашего исследования были отобраны надежно подтвержденные расположения канализационных выпусков в Севастопольской бухте (рис. 1).

Кроме того, с использованием ГИС-данных ресурса *Open Street Map* был проведен анализ использования береговой линии и прибрежной зоны в Севастопольской бухте. В качестве природоохранных объектов выбраны: район официальных городских пляжей на м. Хрустальном и в Ушаковой балке, набережная Артиллерийской бухты и историческая набережная центра города (вдоль Приморского бульвара), короткие участки набережных возле причалов у Михайловской батареи и

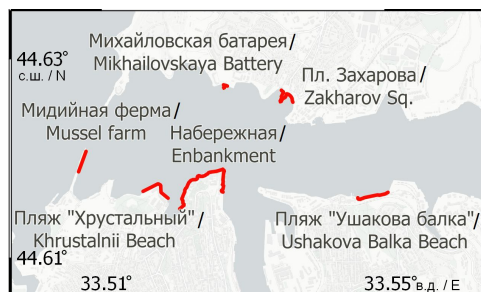


Рис. 2. Области Севастопольской бухты, которые предполагается защитить от загрязнения взвесью из канализационных стоков

Fig. 2. Areas of the Sevastopol Bay, which are suggested to be protected from pollution with suspended matter of sewage

ных уравнений переноса и диффузии взвеси – этот метод был разработан академиком Г. И. Марчуком [22]. Решение сопряженной задачи позволяет получить информацию о количестве взвеси в заданной априори области в заданный период времени при произвольном расположении источника взвеси.

Рассмотрим идеологию предлагаемого метода. Пусть есть уравнение переноса примеси в виде

$$\partial_t C + \operatorname{div}(UC) + \gamma C - \partial_z(\kappa \partial_z C) - \mu \Delta C = F, \quad (1)$$

где C – объемная концентрация примеси; $U = \{u, v, W\}$, u, v – горизонтальные компоненты скорости течения; $W = w + w^*$, w – вертикальная компонента скорости течения, w^* – собственная гравитационная скорость примеси (ось z направлена вниз); κ, μ – коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии; γ – коэффициент деструкции (разложения) примеси; $F(x, y, z, t)$ – источник примеси; t – время.

Следуя определенному алгоритму, можно получить уравнение, сопряженное данному:

$$-\partial_t C^* - \operatorname{div}(UC^*) + \gamma C^* - \partial_z(\kappa \partial_z C^*) - \mu \Delta C^* = p, \quad (2)$$

где функция $p(x, y, z, t)$ пока не определена.

При этом уравнения (1) и (2) связаны функционалом:

$$J = \int_0^T dt \int_G C p dG = \int_0^T dt \int_G C^* F dG. \quad (3)$$

Функционал J допускает различное физическое толкование в зависимости от выбора функции p . Здесь функция p задается в виде

$$p = P \text{ в области } \Omega, \quad p = 0 \text{ вне области } \Omega, \quad (4)$$

где $P = 1/(T \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_0^H dx dy dz)$, $\Omega = \{x \in [x_1, x_2], y \in [y_1, y_2], z \in [0, H]\}$.

пл. Захарова, а также мидийная ферма в районе южного мола со стороны Мартыновой бухты (рис. 2). Для каждого объекта вдоль уреза воды была выбрана полоса шириной 100–150 м. Эти полигоны были использованы в расчетных задачах.

На втором этапе с использованием методов численного моделирования проведена оценка опасности расположения выходов канализационных и ливневых стоков для рассматриваемых объектов. Задачи рационального размещения источников загрязнения для минимизации ущерба их деятельности традиционно решаются с помощью сопряженных уравнений переноса и диффузии взвеси – этот метод был разработан академиком Г. И. Марчуком [22]. Решение сопряженной задачи позволяет получить информацию о количестве взвеси в заданной априори области в заданный период времени при произвольном расположении источника взвеси.

В этом случае функционал J представляет собой среднюю концентрацию примеси, поступившей в природоохранную зону за время T :

$$J = P \int_0^T \int_0^{x_2} \int_0^{y_2} \int_0^H C dt dx dy dz .$$

Далее, используя формулу (4) и уравнение (2), вычисляем «сопряженную концентрацию» C^* . После этого рассчитываем функционал J , который является функцией координат пространства:

$$J = J(\xi, \eta, \zeta) = \int_0^T \int_G C^* F dG dt = Q \int_0^T C^*(\xi, \eta, \zeta, t) dt. \quad (5)$$

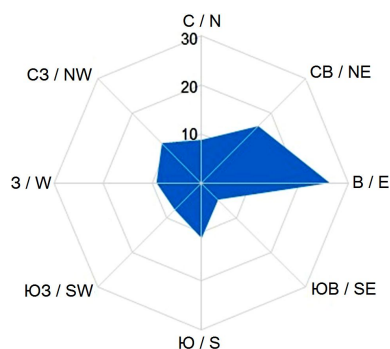
Таким образом, согласно принципу двойственности (3), получаем распределение средней (по объему и по времени) концентрации примеси C в природоохранной зоне Ω . Подчеркнем, что функционал J зависит от координат (ξ, η, ζ) и мощности источника Q .

Далее функционал J будем называть функцией влияния. На основе критерия, например J не более некоторого критического значения искомого функционала, связанного с санитарной нормой для выбранной природоохранной области, можно выбрать оптимальное местоположение источника (при фиксированной мощности). Затем, задав положение и мощность источника F , решить прямую задачу и посмотреть, как происходит распространение вносимой им примеси на самом деле.

В результате расчетов получены пространственные распределения функции влияния, которая нормирована так, чтобы показывать долю (в процентах) поступающей в рассматриваемую область взвеси при нахождении источника в точке, через которую проходит изолиния. При этом расположение источника в любой точке этой изолинии дает одинаковый вклад.

Ввиду мелководности акватории Севастопольской бухты течения здесь в основном определяются ветром. При условии устойчивости ветрового воздействия течения можно считать стационарными. Для расчета течений использована обобщенная на случай учета рэлеевского трения (пропорционального скорости течения) трехмерная баротропная линейная модель Фельзенбаума [23]. Более детальное описание метода и алгоритмов с использованными параметрами приведено в работе [24]. Расчеты выполнены для восьми основных направлений ветров и сведены в общую карту; обобщающее суммирование проводилось с весом каждого направления пропорционально среднегодовой многолетней розе ветров, построенной по архиву данных метеостанции на м. Павловском (рис. 3).

В ходе третьего этапа исследования была проведена обработка результатов численных расчетов с использованием ГИС-технологий и данных о расположении стоков городской канализационной сети. Были отмечены выпуски канализации, которые оказывают наибольшее влияние на прилегающие участки берега. Кроме того, в качестве объектов дополнительного анализа потенциального загрязнения через заглубленные выпуски канализации были рассмотрены пляжи «Хрустальный» и «Ушакова балка» как места массового отдыха людей и важные для города рекреационные объекты.



Р и с . 3 . Диаграмма повторяемости направления ветра для Севастопольской бухты по архивным данным метеостанции на м. Павловском (rp5.ru) за 2012–2019 гг.

Fig. 3. Chart of frequency of wind directions for the Sevastopol Bay according to the data of the meteorological station at Cape Pavlovskiy (rp5.ru) for 2012–2019

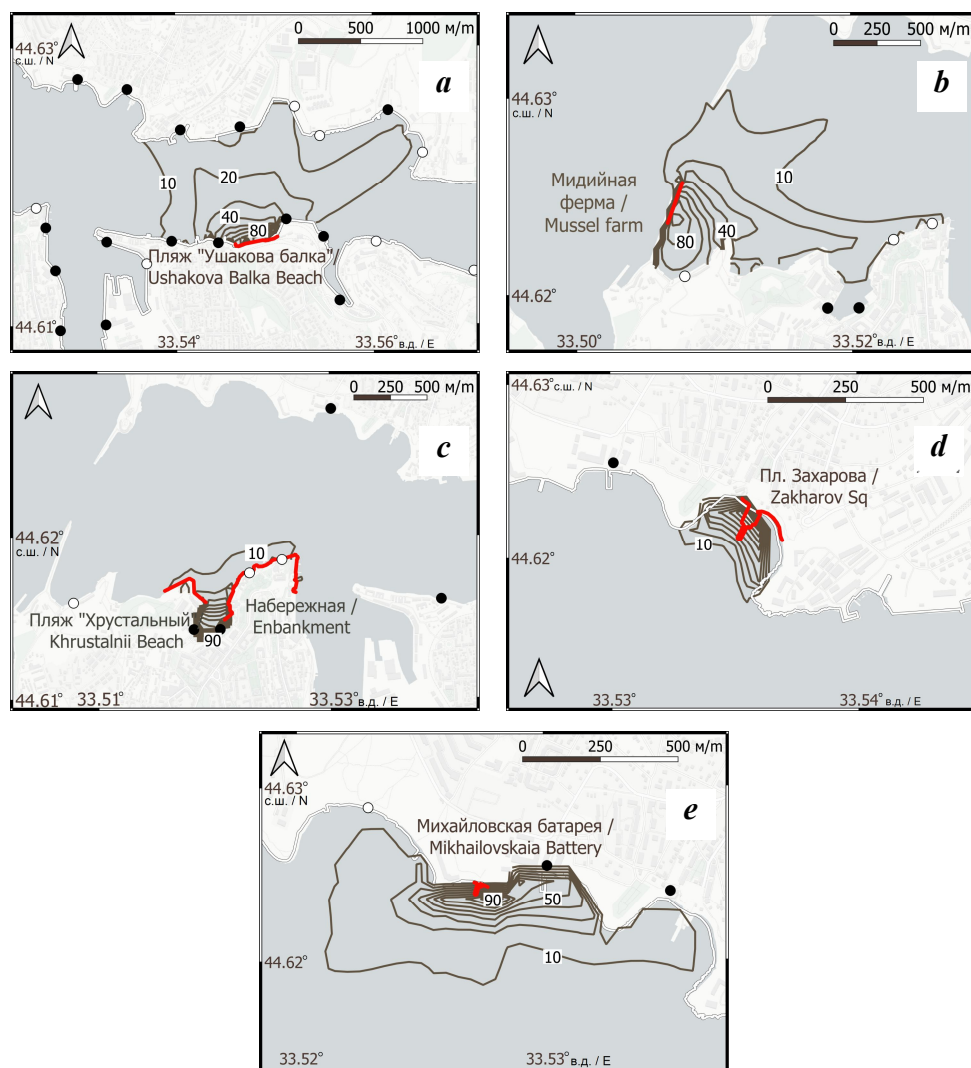
В случае если в плотностной структуре вод бухты отсутствует скачок плотности, загрязненная пресная вода и взвесь из-за течений могут выходить на поверхность не там, где расположен выпуск канализации. Поэтому для особо значимых областей дополнительно проанализированы поля функции влияния на придонных горизонтах. Наконец, исходя из общей карты поля функции влияния были выбраны точки, в которых можно расположить дополнительные выпуски канализационных стоков и при этом не ухудшить ситуацию с загрязнением поверхности бухты взвесью в районах, которые необходимо обезопасить.

Результаты и обсуждение

Наименее благоприятная обстановка отмечена в районе пляжа «Ушакова балка» (рис. 4, *a*). Этот район открыт для течений в основной части бухты, и именно здесь наиболее сильное влияние оказывают аварийные выпуски в прилегающих областях: непосредственно у причалов ($F \approx 30\%$) и за яхт-клубом ($F = 50\%$). Кроме того, небольшая часть приходящей взвеси может поступать из источников на противоположной стороне Севастопольской бухты: из выпусков в Инженерной, Доковой бухтах и бухте Голландия (изолиния $F \approx 10\%$). Распределение функции влияния показывает, что для выбранного пляжа связность с другими участками бухты самая обширная: изолинии функции влияния растянуты почти на 1.5 км.

Мидийной ферме в районе южного мола может быть нанесен вред в результате выпуска неочищенных канализационных стоков непосредственно в Мартыновой бухте ($F \approx 60\%$) и с противоположной стороны, возле яхт-клуба ($F \approx 20\%$). Этот вывод подтверждается неоднократными наблюдениями сотрудников ФИЦ ИнБЮМ, радиобиологический корпус которого расположен неподалеку. Вместе с тем близость к выходу из бухты ограничивает воздействие более удаленных источников за счет водообмена с открытым морем (рис. 4, *b*).

В центральной части наибольшему загрязнению от выпусков в Артиллерийской бухте подвержены акватория самой бухты, начинающаяся здесь набережная и пляж на м. Хрустальном. В выбранные области (набережная Приморского бульвара и пляж «Хрустальный»), согласно расчетам, попадает около 90 % от общей сброшенной взвеси из существующих ливневых стоков на берегах Артиллерийской бухты. Кроме того, вклад около 10 % дают источники вдоль набережной Приморского бульвара (рис. 4, *c*). Впрочем,



Р и с . 4 . Функция влияния для взвеси в поверхностном слое воды для пляжа «Ушакова балка» (a), мидийной фермы в Мартыновой бухте (b), центра города (c), площади Захарова (d) и Михайловской батареи (e). Изолинии проведены через каждые 10 %

F i g . 4 . Influence function for suspended matter in the surface water layer for Ushakova Balka Beach (a), the mussel farm in the Martynova Bay (b), the city centre (c), Zakharova Square (d) and Mikhailovskaya Battery (e). The isolines are given for each 10 %

из пяти упомянутых выпусков четыре являются выпусками ливневой канализации, а один – выпуском нормативно чистой городской канализации.

Из-за совокупного влияния конфигурации берега и ветровых течений район пл. Захарова характеризуется высоким градиентом функции влияния хозяйственно-бытовых стоков на качество воды вблизи берега. Можно считать, что почти все поверхностные стоки, которые поступают в бухту в окрестности паромных причалов, попадают на берег или остаются возле бетонных пирсов в течение нескольких суток. Для поддержания чистоты воды в этом районе

желательно уменьшение стоков или перенос выпуска канализации в северную часть бухты (рис. 4, *d*).

На качество воды у береговой линии в районе набережной возле Михайловской батареи влияет выпуск канализации в бухте Старосеверной ($F \approx 60\%$). Смещение этого выпуска ближе к западной части бухты ухудшит ситуацию, а размещение немного восточнее – улучшит до $F \approx 40\%$. Незначительное влияние ($F < 10\%$) может оказывать выпуск возле причалов на пл. Захарова (рис. 4, *e*). В целом направление ветровых течений в районе Михайловской батареи не благоприятствует приходу примеси из удаленных областей бухты.

Не всегда выпуск сточных вод происходит на поверхности. Несмотря на то что нам не известны точно глубины расположения канализационных выпусков, для пляжей м. Хрустального и в Ушаковой балке был проведен дополнительный анализ функции влияния в придонном слое. Это распределение отличается от поверхностного, особенно для пляжей и набережной в центре города.

На рис. 5 видно, что влияние выпуска в районе восточной части набережной, вблизи морского порта, оказывается очень значительным ($F \approx 90\%$). Определенный вклад ($F \approx 10\%$) также могут оказывать выпуски в районе причалов Южной бухты и в районе м. Павловского. Это еще раз подчеркивает важность правильного выбора глубины расположения канализационного выпуска в центральной части города. Кроме того, это демонстрирует особенность выбранной модели – способность учитывать перемещение взвеси в глубинных слоях.

Структура изолиний поля функции влияния для Ушаковой балки качественно соответствует поверхностной структуре, подчеркивая влияние аварийного канализационного выпуска, расположенного за яхтенной стоянкой, которое может быть даже более существенным, если выпуск будет расположен вблизи дна, а не у поверхности.

Анализ общей карты полей функции влияния, расположения канализационных и ливневых стоков и конфигурации уязвимых участков берега

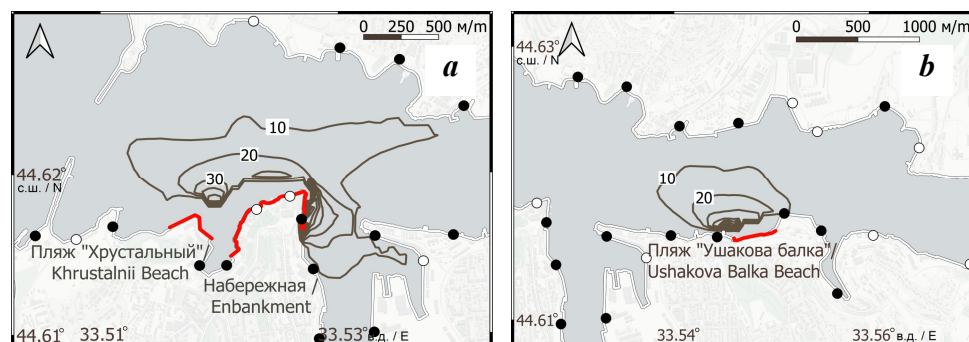
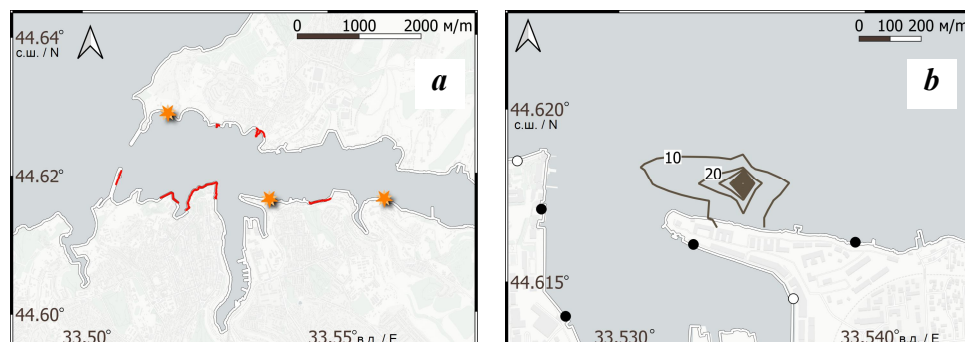


Рис. 5. Функция влияния для взвеси в придонном слое воды для центра города (а) и района пляжа «Ушакова балка» (б). Изолинии проведены через каждые 10 %

Fig. 5. Influence function for suspended matter in the surface water layer for the city centre (a) and the Ushakova Balka Beach area (b). The isolines are given for each 10 %



Р и с . 6 . Карта потенциально безопасного расположения дополнительных выпусков городской канализации (а) и изолинии суммарного поля концентрации консервативной примеси для точечного источника (b). Результаты модельного расчета. Изолинии проведены через каждые 10 % от максимума в точке сброса

F i g . 6 . Map of potentially safe location of additional municipal sewerage outfalls (a) and isolines of the combined field of conservative component concentration for a point source (b). Results of model calculation. The isolines are given for each 10 % of the maximum at the discharge point

позволил выделить несколько отрезков побережья, размещение на которых дополнительных канализационных стоков не приведет к существенному ухудшению ситуации (рис. 6, а). В качестве примера для гипотетического точечного источника проведен расчет распространения консервативной примеси на двое суток для восьми румбов (направлений ветра). Для расчета распространения пассивной примеси использована модель, предложенная в работе [25]. Учитывался трехмерный характер распространения примеси, обусловленный течениями и турбулентной диффузией. На рис. 6, b показано суммарное поле концентрации примеси к концу расчета, для восьми экспериментов с весами пропорционально диаграмме повторяемости направления ветра для региона (см. рис. 3). Пятно примеси в пределах 10%-ной изолинии не достигает набережной в центре города или пляжа в Ушаковой балке.

Выводы

В результате анализа натуральных данных о качестве воды в Севастопольской бухте и модельных расчетов были выявлены районы, размещение в которых источников загрязнения приведет к нарушению санитарных норм в рассматриваемой природоохранной зоне при средней климатической ветровой ситуации. Сопоставление имеющихся данных о расположении стоков показало, что район пляжа «Ушакова балка» наиболее подвержен воздействию стоков через переносимую течениями по поверхности взвесь. Остальные исследованные участки в основном подвержены воздействию одного-двух непосредственно прилегающих источников.

Для наиболее значимых городских пляжей в пределах бухты было показано, что заглубленные выпуски канализации могут оказывать существенное влияние на состояние воды у самих пляжей за счет перемещения взвеси придонными течениями.

В результате анализа поля функции влияния F для всей бухты были определены три участка, на которых можно разместить дополнительные выходы канализации. Они должны оказывать минимальное воздействие на пляжи, набережную, причалы и марикультурный комплекс.

Результаты расчетов легко применимы для анализа степени воздействия канализационных сбросов на любые участки побережья, хорошо масштабируются и вполне переносимы на другие акватории.

Как известно, в исследовании взаимодействия канализационных стоков с морской водой большое значение имеют процессы смешения стоковых и морских вод [26, 27]. В рамках дальнейшей работы по проекту планируется более детальное изучение горизонтального перемешивания вод различной плотности на примере Севастопольской бухты с помощью методов контактных измерений с автономного надводного аппарата, оснащенного набором датчиков. Полученные результаты позволят уточнить прогнозы влияния выпусков на прибрежную зону бухты и внести доработки в численную модель.

Для верификации результатов модельного прогноза наиболее перспективным представляется оперативный *in situ* мониторинг распространения взвеси в непосредственной близости от расположения выпусков канализации в моменты сброса или сразу после интенсивных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998–1999 гг.) / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. С. 79–103.
2. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.
3. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.
4. Совга Е. Е., Мезенцева И. В., Слепчук К. А. Сравнение ассимиляционной емкости и индекса трофности различных частей акватории Севастопольской бухты // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2020. № 3. С. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76
5. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV : Черное море. Вып. 3 : Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябикина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 230 с.
6. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАНУ, 2006. 90 с. URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 28.01.2021).
7. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. Вып. 2. С. 138–152.

8. Источники загрязнения прибрежных вод Севастопольского района / В. М. Грузинов [и др.] // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 4. С. 579–590. doi:10.31857/S0030-1574594579-590
9. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // *Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу*. Севастополь : Аквавита, 1999. С. 70–94. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5248> (дата обращения: 28.01.2021).
10. *Миронов О. Г., Кирюхина Л. Н., Алемов С. В.* Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/1466> (дата обращения: 28.01.2021).
11. Сезонные особенности гидролого-гидрохимической структуры вод Севастопольской бухты, микропланктон и распределение его биохимических компонент (Черное море, наблюдения 2004 – 2005 гг.) / А. С. Лопухин [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. Вып. 15. С. 74–109.
12. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples / V. S. Mukhanov [et al.] // *Ecologica Montenegrina*. 2019. Vol. 23. P. 77–86. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
13. *Вержевская Л. В., Миньковская Р. Я.* Структура и динамика антропогенной нагрузки на прибрежную зону Севастопольского региона // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2020. № 2. С. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106
14. Индексы и показатели экологического статуса Севастопольской бухты / О. Г. Моисеенко [и др.] // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2015. № 4. С. 42–49.
15. *Миронов О. Г.* Состав органической компоненты ливневых стоков в районе г. Севастополя // *Оценка расположенных на суше источников загрязнения морей, омывающих страны СНГ. Материалы международной конференции АСОПС*. Севастополь, 6–10 апреля 1992 г. Севастополь, 1992. Т. 1. С. 48–49.
16. *Хоролич Н. Г.* Расчет водообмена мелководного залива (бухты) с морем // *Труды ГОИН*. М. : Гидрометеиздат. 1986. № 168. С. 113–118.
17. *Шапиро Н. Б., Юценко С. А.* Моделирование ветровых течений в Севастопольских бухтах // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. № 1. С. 42–56.
18. *Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б.* Моделирование циркуляции и пространственной структуры термохалинных полей в Севастопольской бухте с учетом реальных внешних данных (зима 1997 г.) // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 2. С. 60–76.
19. *Белокопытов В. Н., Кубряков А. И., Пряхина С. Ф.* Моделирование распространения загрязняющей примеси в Севастопольской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 5–15. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-5-15
20. *Беляева О. И.* О загрязнении ливневых стоков, поступающих в прибрежную зону Черного моря (обзор) // *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Сер. «География»*. 2012. Т. 25(64), № 2. С. 20–27.
21. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт Севастопольского взморья / Е. А. Куфтаркова [и др.] // *Труды ЮгНИРО*. Керчь : ЮгНИРО, 2008. Т. 46. С. 110–117.

22. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М. : Наука, 1982. 320 с.
23. *Шати́ро Н. Б.* Моделирование течений на сева́стопольском взморье // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. Вып. 14. С. 119–134.
24. *Рябцев Ю. Н., Цыганова М. В.* Моделирование на основе сопряженных уравнений переноса загрязнений для задач комплексного экологического мониторинга // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 2. С. 214–225. doi:10.22449/0233-7584-2020-2-214-225
25. *Михайлова Э. Н., Шати́ро Н. Б., Ю́ценко С. А.* Моделирование распространения пассивной примеси в сева́стопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал. 1999. № 3. С. 29–42.
26. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) / В. Г. Бондур [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47, № 6. С. 827–846.
27. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн / В. Г. Бондур [и др.] // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 6. С. 833–845.

Об авторах:

Рябцев Юрий Николаевич, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-код: 7853-4597**, *ruab@mail.ru*

Вержевская Людмила Владимировна, ведущий специалист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-код: 7309-7879**, *ludmyla.ver@mhi-ras.ru*

Рауэн Татьяна Владимировна, научный сотрудник, Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2), **ORCID ID: 0000-0002-6757-7491**, **SPIN-код: 1868-3826**, *taschi@mail.ru*

Цыганова Марина Владимировна, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **Researcher ID: S-5426-2018**, **SPIN-код: 2256-0620**, *m.tsyganova@mhi-ras.ru*

Никишин Владимир Владимирович, доцент кафедры «Техническая экспертиза и управление качеством» Политехнического института, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), кандидат технических наук, *nikishin_v@mail.ru*

Багаев Андрей Владимирович, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **ResearcherID: K-5373-2016**, **SPIN-код: 5426-7176**, *a.bagaev1984@gmail.com*

Заявленный вклад авторов:

Рябцев Юрий Николаевич – формулировка и постановка задачи; разработка математической модели; выбор и обоснование численных методов решения уравнений; коррекция математической модели и проведение вычислений; анализ и обобщение результатов исследования

Вержевская Людмила Владимировна – формализованный анализ данных, обработка и описание результатов исследования; сбор доступных материалов по теме исследования; визуализация данных; доработка текста

Рауэн Татьяна Владимировна – теоретический анализ литературы по проблеме исследования; подготовка текста статьи

Цыганова Марина Владимировна – обзор литературы по проблеме исследования; проведение вычислений; доработка текста; визуализация / представление данных

Никишин Владимир Владимирович – участие в постановке задачи исследования, качественный анализ результатов и их интерпретация, подготовка текста статьи

Багаев Андрей Владимирович – постановка задачи исследования, общее научное руководство исследованием, качественный анализ результатов и их интерпретация

REFERENCES

1. Ovsyany, E.I., Kemp, R.B., Repetin, L.N. and Romanov, A.S., 2000. [Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay under Conditions of Anthropogenic Impact (according to Observations 1998–1999)]. In: MHI, 2000. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 1, pp. 79–103 (in Russian).
2. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V., Khmara, T.V. and Slepchuk, K.A., 2014. [On Prospects and Possibilities of Assessment of Self-Purification Ability of the Sevastopol Bay Water Area] In: MHI, 2014. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 28, pp. 153–164 (in Russian).
3. Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 2, pp. 138–152 (in Russian).
4. Sovga, E.E., Mezentseva, I.V. and Slepchuk, K.A., 2020. Comparison of Assimilative Capacity and Trophic Index for Various Parts of the Sevastopol Bay Water Area. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 63–76. doi:10.22449/2413-5577-2020-3-63-76 (in Russian).
5. Simonov, A.I. and Ryabinin, A.I., eds., 1996. [Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas. Vol. 4. The Black Sea. Iss. 3. Modern State of the Black Sea Waters Pollution]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 230 p. (in Russian).
6. Ivanov, V.A., Ovsyany, E.I., Repetin, L.N., Romanov, A.S. and Ignatyeva, O.G., 2006. *Hydrological and Hydrochemical Regime of the Sevastopol Bay and Its Changing under Influence of Climatic and Anthropogenic Factors*. Sevastopol: MHI NAS of Ukraine, 90 p. (in Russian).
7. Ovsyany, E.J., Romanov, A.S., Min'kovskaya, R.Ya., Krasnovid, I.I., Ozyumenko, B.A. and Zymbal, I.M., 2001. The Most Important Sources of Pollution for the Marine Environment of the Coastal Zone of Sevastopol. In: MHI, 2001. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 2, pp. 138–152 (in Russian).

8. Gruzinov, V.M., Dyakov, N.N., Mezenceva, I.V., Malchenko, Y.A., Zhohova, N.V. and Korshenko, A.N., 2019. Sources of Coastal Water Pollution near Sevastopol. *Oceanology*, 59(4), pp. 523–532. <https://doi.org/10.1134/S0001437019040076>
9. Pavlova, E.V., Ovsjanyi, E.I., Gordina, A.D., Romanov, A.S. and Kemp, R.B., 1999. Modern State and Tendencies of Change in Sevastopol Bay Ecosystem. In: E.V. Pavlova and N.V. Shadrin, eds., 1999. *Sevastopol Aquatory and Coast: Ecosystem Processes and Services for Human Society*. Sevastopol: Akvavita Publ., pp. 70–94 (in Russian).
10. Mironov, O.G., Kirjukhina, L.N. and Alyomov, S.V., 2003. *Sanitary-Biological Aspects of the Sevastopol Bays Ecology in XX Century*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. 185 p. (in Russian).
11. Lopukhin, A.S., Ovsyany, E.I., Romanov, A.S., Kovardakov, S.A., Bryanzeva, Yu., Rylkova, O.A., Gavrilova, N.A., Gubanov, V.V., Lopukhin, S.A. [et al.], 2007. Seasonal Peculiarities of Hydrologic-Hydrochemical Structure of Sevastopol Bay Water, Microplankton and Distribution of its Biochemical Components (the Black Sea, Observations of 2004–2005). In: MHI, 2007. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovyykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 15, pp. 74–109 (in Russian).
12. Mukhanov, V.S., Litvinyuk, D.A., Sakhon, E.G., Bagaev, A.V., Veerasingam, S. and Venkatachalapathy, R., 2019. A New Method for Analyzing Microplastic Particle Size Distribution in Marine Environmental Samples. *Ecologica Montenegrina*, 23, pp. 77–86. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
13. Verzhevskaya, L.V. and Minkovskaya, R.Ya., 2020. Structure and Dynamics of Anthropogenic Load on the Coastal Zone of the Sevastopol Region. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 92–106. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-92-106 (in Russian).
14. Moiseenko, O.G., Orekhova, N.A., Polyakova, A.V., Medvedev, E.V. and Konvalov, S.K., 2015. Indices and Indicators of the Environmental State of the Sevastopol Bay. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia*, (4), pp. 42–49 (in Russian).
15. Mironov, O.G., 1992. Composition of Downpour Flows Organic Component in the Region of Sevastopol. In: ACOPS, 1992. *Assessment of Land-Based Sources of Marine Pollution in the Seas Adjacent to the C.I.S. Book of Abstracts, Sevastopol, 6–10 April 1992*. Vol. 1. Sevastopol, pp. 48–49 (in Russian).
16. Khorolich, N.G., 1986. [Numerical Analysis of the Water Exchange between a Shallow-Water Gulf (Bay) and the Open Sea]. In: SOI, 1986. *Proceedings of SOI*. Moscow: Gidrometeoizdat. Iss. 168, pp. 113–118.
17. Shapiro, N.B. and Yushchenko, S.A., 2000. Simulation of Wind Currents in Sevastopol Bays. *Physical Oceanography*, 11(1), pp. 47–62. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02524495>
18. Mikhailova, E.N. and Shapiro, N.B., 2005. Simulation of the Circulation and Space Structure of Thermohaline Fields in the Sevastopol Bay with Regard for the Actual External Data (Winter, 1997). *Physical Oceanography*, 15(2), pp. 118–132. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0035-0>
19. Belokopytov, V.N., Kubryakov, A.I. and Pryakhina, S.F., 2019. Modelling of Water Pollution Propagation in the Sevastopol Bay. *Physical Oceanography*, 26(1), pp. 3–12. doi:10.22449/1573-160X-2019-1-3-12
20. Belayeva, O.I., 2012. Regarding of the Pollution of the Storm Drain in the Coastal Zone of Sea (Review). *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Geography Sciences*, 25(2), pp. 20–27 (in Russian).

21. Kuftarkova, E.A., Rodionova, N.Yu., Goubanov, V.I. and Bobko, N.I., 2008. Hydrochemical Characteristics of Several Bays of Sevastopol Coast. In: YUGNIRO, 2008. *Trudy YUGNIRO = YugNIRO Proceedings*. Kerch: YUGNIRO Publishers. Vol. 46, pp. 110–117 (in Russian).
22. Marchuk, G.I., 1986. *Mathematical Models in Environmental Problems*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 216 p.
23. Shapiro, N.B., 2006. Modeling of the Currents on the Seaside nearby Sevastopol City. In: MHI, 2006. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 14, pp. 119–134 (in Russian).
24. Ryabtsev, Yu.N. and Tsyganova, M.V., 2020. Modeling of Pollution Transport for the Integrated Environmental Monitoring Based on the Adjoint Equations. *Physical Oceanography*, 27(2), pp. 197–209.
25. Mikhailova, E.N., Shapiro, N.B. and Yushchenko, S.A., 2001. Modelling of the Propagation of Passive Impurities in Sevastopol Bays. *Physical Oceanography*, 11(3), pp. 233–247. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02508870>
26. Bondur, V.G., Filatov, N.N., Grebenyuk, Yu.V., Dolotov, Yu.S., Zdrovennov, R.E., Petrov, M.P. and Tsivilina M.N., 2007. Study of Hydrophysical Processes during the Monitoring of Anthropogenic Influences on Coastal Water Areas (the Case of Mamala Bay, Oahu Island, Hawaii). *Oceanology*, 47(6), pp. 769–787. doi:10.1134/S0001437007060033
27. Bondur, V.G., Grebenyuk, Y.V., Ezhova, E.V., Kazakov, V.I., Sergeev, D.A., Soustova, I.A. and Troitskaya Y.I., 2009. Surface Manifestations of Internal Waves Investigated by a Subsurface Buoyant Jet: 1. The Mechanism of Internal-Wave Generation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 45(6), pp. 779–790. <https://doi.org/10.1134/S0001433809060115>

About the authors:

Yuri N. Ryabtsev, Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-9682-9969**, **SPIN-code: 7853-4597**, ruab@mail.ru

Liudmila V. Verzhvetskaia, Leading Specialist, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-code: 7309-7879**, ludmyla.ver@mhi-ras.ru

Tatyana V. Rauen, Research Associate, A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS (2 Nakhimov Av., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0002-6757-7491**, **SPIN-code: 1868-3826**, taschi@mail.ru

Marina V. Tsyganova, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **ORCID ID: 0000-0003-2398-1756**, **ResearcherID: S-5426-2018**, **SPIN-code: 2256-0620**, m.tsyganova@mhi-ras.ru

Vladimir V. Nikishin, Associate Professor, Polytechnic Institute, Sevastopol State University (33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russian Federation), Ph.D. (Tech.), nikishin_v@mail.ru

Andrei V. Bagaev, Senior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Ph.D. (Phys.-Math.), **ORCID ID: 0000-0003-4018-7642**, **ResearcherID: K-5373-2016**, **SPIN-code: 5426-7176**, a.bagaev1984@gmail.com

Contribution of the authors:

Yuri N. Ryabtsev – research task statement; mathematical model development; selection and justification of computational methods for equation solving; mathematical model correction and performance of computations; study results analysis and generalization

Liudmila V. Verzhenskaia – formalized data analysis; research results processing and description; collection of available materials on the research topic; data visualization; text finalization

Tatyana V. Rauen – theoretical study of literature on the research topic; article text preparation

Marina V. Tsyganova – review of literature on the research topic; performance of computations; text finalization; data visualization/presentation

Vladimir V. Nikishin – participation in research task statement; qualitative analysis of results and their interpretation; article text preparation

Andrei V. Bagaev – research task statement; general scientific guidance of research; qualitative analysis of results and their interpretation

All the authors have read and approved the final manuscript.