

## Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока

А. В. Багаев<sup>1</sup>, В. В. Никишин<sup>1</sup>, Т. В. Рауэн<sup>2</sup>, Л. В. Вержевская<sup>1</sup>,  
С. В. Щербаченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<sup>2</sup> Институт биологии южных морей РАН, Севастополь, Россия

✉ a.bagaev1984@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 27.10.2021; одобрена после рецензирования 17.12.2021;  
принята к публикации 27.01.2022.

### Аннотация

**Цель.** Оценка временного и пространственного масштабов изменений физико-биологических параметров поверхностного слоя морской воды в ближайшей окрестности выпуска дождевого стока городской канализационной сети в Севастопольской бухте – цель данной работы.

**Методы и результаты.** Район исследований был ограничен Севастопольской бухтой. Измерения проводились в местах выпусков ливневой канализации (Артиллерийская бухта, Аполлонова бухта, бухта Голландия). С помощью беспилотного надводного аппарата определяли температуру и соленость по датчику ТМА-21. Станции располагались на прямой по нормали к берегу от места выпуска ливневой канализации. Количественный и размерный состав частиц общей взвеси и бактериопланктона определяли с помощью проточного цитометра *Cytomics TM FC 500*. Показано, что температура воды меняется в пределах 1,5°C и ее горизонтальный градиент слабо выражен. В поле солености градиент достигал 0,5. Максимальные концентрации взвешенного вещества определены в вершинной части Артиллерийской бухты ( $\sim 0,5 \times 10^6$  част. · мл<sup>-1</sup>). Размеры частиц взвеси составляли 0,5–2,5 мкм. Концентрации бактерий в ливневой воде соответствовали летним максимумам, наблюдаемым в Севастопольской бухте ( $0,9 \times 10^6$ – $2,8 \times 10^6$  кл. · мл<sup>-1</sup>). Поступление ливневых вод в бухту приводило к изменениям численности пикофитопланктона (в 2–6 раз).

**Выводы.** Протестирована методика применения беспилотных надводных аппаратов для оперативного локального мониторинга состояния морской воды в районах выпусков ливневой канализации. Данные об изменении солености могут служить индикатором интенсивности выпуска стока и могут быть использованы для прогнозирования воздействия ливневых стоков при реконструкции/переносе канализационной сети. Концентрация взвеси и микроорганизмов в поверхностных водах бухты восстанавливается спустя сутки после сильного дождя, поэтому для оперативной оценки влияния потенциально опасных или аварийных сбросов необходимо проведение оперативных измерений с использованием беспилотных надводных аппаратов.

**Ключевые слова:** Севастопольская бухта, ливневый сток, беспилотный надводный аппарат, seston, бактериопланктон, температура, соленость

**Благодарности:** экспедиционные исследования, накопление и оценка качества данных выполнены при поддержке гранта РФФИ и г. Севастополя № 20-45-920019. Дополнительная обработка, визуализация и анализ данных выполнены в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ по теме № 0555-2021-0005. Обработка данных на проточном цитометре и анализ результатов выполнены при поддержке темы госзадания ФИЦ ИнБЮМ № 121030300149-0. Авторы благодарят В. С. Муханова и Е. О. Сахонь за помощь при проведении цитометрии.

© Багаев А. В., Никишин В. В., Рауэн Т. В., Вержевская Л. В., Щербаченко С. В., 2022

Для цитирования: Локальные изменения физико-биологических параметров поверхностных вод Севастопольской бухты под влиянием ливневого стока / А. В. Багаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2022. Т. 38, № 2. С. 165–184. doi:10.22449/0233-7584-2022-2-165-184

## Local Changes of Physical and Biological Parameters of the Sevastopol Bay Surface Waters under the Influence of Rain Drainage

A. V. Bagaev<sup>1</sup>, ✉, V. V. Nikishin<sup>1</sup>, T. V. Rauen<sup>2</sup>, L. V. Verzhevskaya<sup>1</sup>, S. V. Scherbachenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup> A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ a.bagaev1984@mhi-ras.ru

### Abstract

**Purpose.** The work is aimed at assessing the temporal and spatial scales of variations in the physical and biological parameters of the seawater surface layer in the immediate vicinity of the urban sewer outfall in the Sevastopol Bay.

**Methods and Results.** The study area was limited to the Sevastopol Bay. Measurements were taken at the locations of the rainwater drainage outlets, namely in the Artilleriyskaya, Apollonova and Gollandiya bays. Temperature and salinity were measured by an unmanned surface vehicle using the TMA-21 sensor. The stations were located in a straight line normal to the coast from the rainwater drainage outlet. Quantitative and size composition of total suspended solids and bacterioplankton particles were determined using the *Cytomics TM FC 500* flow cytometer. Water temperature was shown to vary within 1.5 °C and its horizontal gradient was weakly pronounced. In the salinity field, the gradient reached 0.5 m<sup>-1</sup>. The maximum concentrations of suspended matter were revealed in the apical part of the Artilleriyskaya Bay (about 0.5×10<sup>6</sup> particles mL<sup>-1</sup>). The particle sizes of suspended matter ranged from 0.5 to 2.5 μm. Bacterial concentrations in the storm water corresponded to the summer maximums observed in the Sevastopol Bay (0.9×10<sup>6</sup>–2.8×10<sup>6</sup> ppm). The storm water inflow into the bay resulted in changes of the picophytoplankton number (by 2–6 times).

**Conclusions.** The method of applying an unmanned surface vehicle for operative local monitoring of seawater state in the areas of the rainwater drainage outlets has been tested. The data on the salinity changes can serve an indicator of the discharge intensity and can be used for forecasting the impact of storm water runoffs during reconstruction/relocation of the sewer network. The concentrations of suspended solids and microorganisms in the bay surface waters are restored one day after a heavy rain. Therefore rapid assessment of the impact of potentially dangerous or accidental discharges requires application of the unmanned surface vehicles for conducting the operational measurements.

**Keywords:** Sevastopol Bay, storm water runoff, unmanned surface vehicle, seston, bacterioplankton, temperature, salinity

**Acknowledgements:** Expeditionary research, data accumulation, and data quality assessment were supported by the RFBR and Sevastopol Government grant No. 20-45-920019. Additional data processing, its visualization, and analysis were performed within the framework of the state assignment of FRC MHI on theme No. 555-2021-0005. Processing of the flow cytometer data and analysis of the results were done with a support of the state assignment of FRC ISS No. 121030300149-0. The authors are grateful to V. S. Mukhanov and E. O. Sakhon for their assistance in cytometry process.

**For citation:** Bagaev, A.V., Nikishin, V.V., Rauen, T.V., Verzhevskaya, L.V. and Scherbachenko, S.V., 2022. Local Changes of Physical and Biological Parameters of the Sevastopol Bay Surface Waters under the Influence of Rain Drainage. *Physical Oceanography*, 29(2), pp. 152-171. doi:10.22449/1573-160X-2022-2-152-171

## Введение

В связи с активной урбанизацией побережья, ростом населения, наличием природоохранных объектов, зон марикультуры и рекреации в Севастопольской бухте, а также в связи с отсутствием современной системы сбора и очистки сточных вод возникает необходимость новых подходов к управлению и оперативному наблюдению за качеством морской воды. В то же время вследствие относительно небольшого времени жизни плюмов ливневой канализации отбор проб в исследовательских и мониторинговых экспедициях не всегда выполняется в период существования этих плюмов.

Исследование экологического состояния бухт, портов и заливов выполнялось во многих работах [1–5]. В них, как правило, анализируется химическое и биологическое состояние морских вод, осредненное на достаточно больших отрезках времени, комплексно оценивается характер и структура стоков, дается прогноз на последующие периоды [6–9]. Проблеме оценки экологического состояния вод прибрежных акваторий Черного моря посвящены работы [10–14]. Изучение загрязнения вод в Севастопольской бухте и прилегающей к ней прибрежной зоне выполнено ранее в работах [15–21] на основе данных долгосрочного мониторинга на станциях в глубоководной части бухты. Показано, что сброс неочищенных вод ведет к негативным изменениям условий жизни гидробионтов, снижению их количества, разнообразия видов [22, 23], а также к массовому цветению фитопланктона, образованию зон гипоксии в придонном слое и общей деградации экосистемы Севастопольской бухты [24–26]. Стоит отметить, что последние исследования, выполненные с помощью современных методик оценки состояния природных систем, характеризуют экологический статус Севастопольской бухты как критический [27]. Канализационные сети города не справляются с объемами экстремальных ливневых стоков, вызванных климатической и инфраструктурной изменчивостью в регионе [21]. В работе [28] на основе численной модели было показано, что растворенные и взвешенные вещества, выносимые вместе с ливневыми стоками, могут оказывать воздействие на прилегающие участки побережья в течение нескольких суток. В ней примесь полагалась консервативной, так как отсутствовали объективные оценки времени существования микроплюмов, образованных в результате выпусков ливневой канализации.

Характерным показателем качества морских вод и состояния их экосистем является концентрация основных компонентов морской взвеси (органические и минеральные вещества). Согласно данным [14], ежегодно в Севастопольскую бухту поступает 1680 т взвеси с 1 км<sup>2</sup> площади городской застройки. С учетом последних тенденций роста численности населения и увеличения площади строительства эта цифра может быть существенно выше<sup>1</sup>. В поверхностном слое вод вследствие низкой солености и плотности плюм быстро распространяется и благодаря бурой окраске легко идентифицируется визуальными методами.

Важными маркерами взвеси, позволяющими оценить степень загрязнения вод, служит размерный, количественный и качественный состав взвешенных частиц. Оперативная оценка этих маркеров взвешенных частиц, содержащихся

---

<sup>1</sup> URL: [https://sevzakon.ru/assets/files/zakproekty/19-447\\_1.pdf](https://sevzakon.ru/assets/files/zakproekty/19-447_1.pdf) (дата обращения: 15.02.2022).

в ливневых стоках и принимающих морских водах, может быть получена с использованием метода проточной цитометрии (ПЦ). Это один из высокотехнологичных методов исследования дисперсных сред в режиме индивидуального анализа отдельных частиц (т. е. дисперсной фазы) по сигналам светорассеяния и флуоресценции. Первые работы, посвященные анализу взвешенного вещества с помощью ПЦ в водах эстуариев, проводили в 1990-х гг. [29, 30]. В дальнейшем модернизация технических характеристик приборов позволила расширить область применения данного метода [31]. В частности, сегодня с помощью ПЦ можно исследовать дисперсные свойства ливневых стоков и идентифицировать их в акватории бухт. Этот метод позволяет не только провести общий количественный анализ взвеси (сестона, *SM*), включая микроорганизмы и неживые частицы (детритные и минеральные), но и вычленив информацию об отдельных компонентах сестона – гетеротрофном бактериопланктоне и пикофитопланктоне, ключевых микробных компонентах морской прибрежной экосистемы. Это позволяет оценить влияние ливневых вод на структуру пикопланктона бухты. Мониторинг пространственно-временной изменчивости взвеси служит инструментом для исследования динамики плюма ливневых вод, его распространения по акватории и воздействия на микробное население пелагиали.

Существующие надводные и наземные роботы выполняют как научные, так и технические работы в акваториях и прибрежных районах ([www.asvglobal.com](http://www.asvglobal.com), [www.ceehydrosystems.com](http://www.ceehydrosystems.com), [www.yunzhou-tech.com](http://www.yunzhou-tech.com), [clearpathrobotics.com/heron-unmanned-surface-vessel](http://clearpathrobotics.com/heron-unmanned-surface-vessel)). В публикациях компании *Saildrone* ([www.saildrone.com](http://www.saildrone.com)) представлены результаты применения беспилотных надводных роботов для записи акустических сигналов обитателей океана. Общей чертой большинства прибрежных исследований является применение роботизированных беспилотных устройств в задачах батиметрической съемки в акваториях. За редким исключением работы, описывающие перечисленные выше беспилотные надводные аппараты (БНА), не приводят информацию об использовании датчиков температуры и солености для проведения экспедиционных исследований.

Среди отечественных разработок можно отметить успешный проект беспилотного аппарата Центра морских исследований МГУ им. М. В. Ломоносова<sup>2</sup>. Публикаций, посвященных применению надводных беспилотных роботов в задачах экологического мониторинга, меньше [32, 33]. В Севастополе можно назвать лишь один успешный проект подобного типа, основанный на заякоренных буях (частная компания *WatSen*, [www.watsen.info](http://www.watsen.info)). Компания *Avionics* совместно с КарНЦ заявляла о работе своего БНА в озерах Карелии<sup>3</sup>.

Также стоит отметить, что большое количество публикаций о БНА посвящено разработке системы управления, алгоритмов управления и аппаратной части: разработка корпуса и системы управления выполнена в работе [34], модульная система с автоматическим распознаванием морского мусора предлагается в [35]. Прототипы автоматизированной лаборатории для малых водоемов показаны в [36, 37].

---

<sup>2</sup> URL: [http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/noc/am5\\_avionics\\_usv\\_ru.pdf](http://resources.krc.karelia.ru/water/doc/noc/am5_avionics_usv_ru.pdf) (дата обращения: 04.03.2022).

<sup>3</sup> URL: <https://marine-rc.ru/novosti/ispytaniya-finalnoy-versii-prototip> (дата обращения: 04.03.2022).

Близкое по методологии автоматизированное исследование плюмов малых рек с помощью летающих беспилотных аппаратов приводится в [38, 39].

Экспериментальная часть работы посвящена контролю гидрофизических свойств воды *in situ* с помощью БНА и инструментальных средств измерений. Рассмотрено применение прецизионного кондуктометра ТМА-21<sup>4</sup> для измерения электропроводности в районах ливневых стоков. Отличительной особенностью проведенных экспедиционных работ является применение оригинального БНА в качестве носителя кондуктометра, позволившего за короткий срок получить существенный объем измерений. Проведенные натурные исследования наглядно демонстрируют достоинства применения беспилотных аппаратов для контактных измерений параметров воды. Разработанный комплекс в составе БНА и синтезированные в его состав измерительные системы позволяют привязать измерение электропроводности к географическим координатам, что в итоге дает возможность построить двумерное поле распределения и изменения электропроводности в районе стока.

Используемый нами БНА авторской разработки [40–43] по габаритам меньше перечисленных аналогов, что, с одной стороны, улучшает мобильность береговых экспедиций, с другой – вводит некоторые ограничения на условия эксплуатации (ветро-волновая обстановка на воде).

Цель данной работы – оценка временного и пространственного масштабов изменений физико-биологических параметров поверхностного слоя морской воды в ближайшей окрестности выпуска ливневого стока городской канализационной сети.

В исследовании решались две задачи: требовалось, во-первых, оценить время жизни и дальность распространения микроплюмов дождевого стока; во-вторых, показать, что беспилотные аппараты – это надежный инструмент для проведения оперативных измерений непосредственно во время дождя.

### Материалы и методы

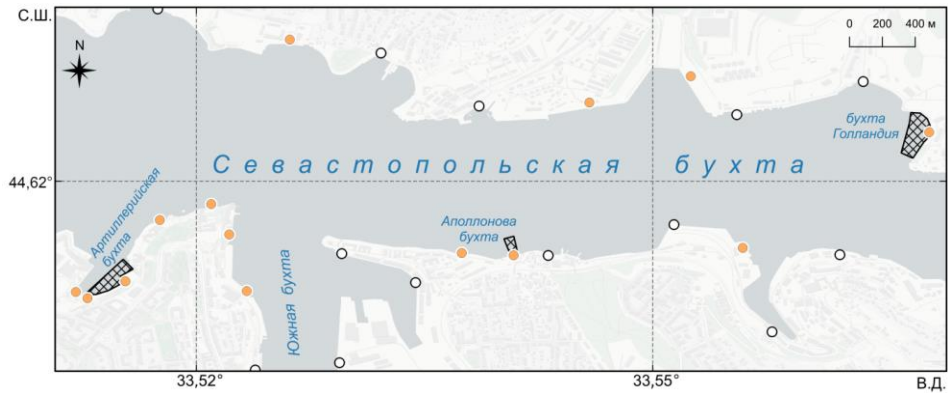
Район исследований был ограничен Севастопольской бухтой (г. Севастополь, юго-западная часть п-ова Крым, Россия). Для исследования выбраны три известных выпуска ливневой канализации: в Артиллерийской бухте, в бухтах Аполлоновой и Голландия (рис. 1). С февраля по июль 2021 г. возле каждого выпуска проводился отбор проб воды на четырех станциях, расположенных по нормали к берегу (рис. 2). Временной промежуток отбора проб включал следующие периоды (таблица): без выпадения осадков (фоновые значения); во время или сразу после дождя; на следующие сутки после дождя. Параллельно с отбором проб с помощью БНА оригинальной конструкции проводилось измерение температуры и солености морской воды на поверхности, при движении галсами вдоль и поперек полигона, с помощью датчика ТМА-21. В связи с погодными условиями и плохим сигналом *GPS* измерение температуры и солености с помощью БНА проводилось не во всех экспедициях (см. последнюю колонку в таблице).

---

<sup>4</sup> URL: <https://datchiki.com/wp-content/uploads/2019/08/Datchik-provodimosti-TMA-21-s.pdf> (дата обращения: 04.03.2022).

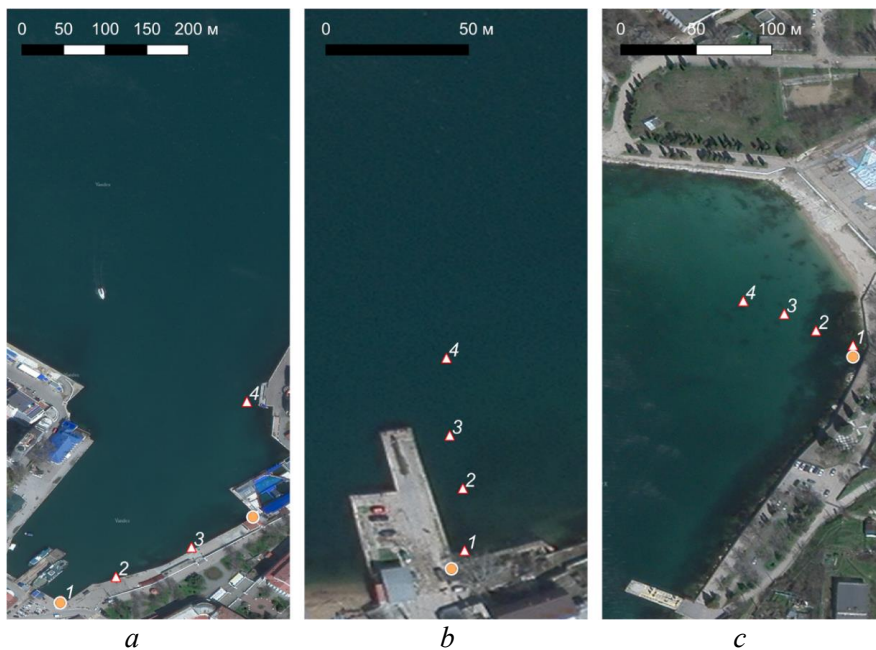
**Сводный список экспедиций в районы выпусков ливневых стоков  
Севастопольской бухты в 2021 г.  
Consolidated list of expeditions to the areas of storm water runoffs  
in the Sevastopol Bay in 2021**

| Дата / Date | Место проведения экспедиции / Location of the expedition | Погодные условия / Weather conditions | Результаты измерений / Measurement results  |
|-------------|--|---------------------------------------|---|
| 26.03.2021  | Аполлонова бухта / Apollonova Bay                        | после дождя / after the rain          | Отсутствуют. Причина: механическое повреждение платы автопилота / No results. Reason: mechanical damage to the autopilot board  |
| 02.04.2021  | Аполлонова бухта / Apollonova Bay                        | штиль / calm                          | Температура и соленость воды / Water temperature and salinity   |
| 08.04.2021  | Артиллерийская бухта / Artilleriyskaya Bay               | во время дождя / during the rain      | Температура и соленость воды / Water temperature and salinity   |
| 09.04.2021  | Артиллерийская бухта / Artilleriyskaya Bay               | после дождя / after the rain          | Отсутствуют. Причина: заливание корпуса автопилота из-за дождя при транспортировке / No results. Reason: flooding of the autopilot body due to rain during transportation |
| 29.04.2021  | Артиллерийская бухта / Artilleriyskaya Bay               | штиль / calm                          | Отсутствуют. Причина: плохой сигнал ГНСС / No results. Reason: weak signal of GNSS  |
| 17.05.2021  | Аполлонова бухта / Apollonova Bay                        | после дождя / after the rain          | Отсутствуют. Причина: сильное поверхностное волнение / No results. Reason: strong surface waves   |
| 03.06.2021  | Бухта Голландия / Gollandiya Bay                         | во время дождя / during the rain      | Отсутствуют. Причина: недостаточная герметичность корпуса автопилота / No results. Reason: insufficient tightness of the autopilot body                                   |
| 04.06.2021  | Бухта Голландия / Gollandiya Bay                         | после дождя / after the rain          | Отсутствуют. Причина: механическая неисправность двигателя / No results. Reason: mechanical failure of the impeller   |
| 07.06.2021  | Бухта Голландия / Gollandiya Bay                         | штиль / calm                          | Температура и соленость воды / Water temperature and salinity   |
| 18.06.2021  | Бухта Голландия / Gollandiya Bay                         | после дождя / after the rain          | Температура и соленость воды / Water temperature and salinity   |



**Р и с. 1.** Схематическая карта центральной части Севастопольской бухты с отметками известных выходов ливневой (оранжевые маркеры) и муниципальной (белые маркеры) канализации. Заштрихованными многоугольниками показаны три района проведения экспедиций: Артиллерийская бухта, Аполлонова бухта, бухта Голландия. Карта построена средствами *QGIS 3.10*, базовый слой *cartoDB Positron*

**F i g. 1.** Schematic map of the Sevastopol Bay central part with the marks corresponding to the known locations of the rainwater (orange dots) and municipal (white dots) wastewater discharge outlets. Cross-hatched polygons show the areas of expeditions: the Artilleriyskaya, Apollonova and Gollandiya bays. The map is built using *QGIS 3.10* software and *cartoDB Positron*-basemap



**Р и с. 2.** Схема расположения станций 1–4 отбора проб воды (красно-белые треугольники) с отметками известных выходов ливневой канализации (оранжевые маркеры) в районах экспедиций: *a* – Артиллерийская бухта; *b* – Аполлонова бухта; *c* – бухта Голландия. Карта построена средствами *QGIS 3.10*, базовый слой *Yandex-satellite*

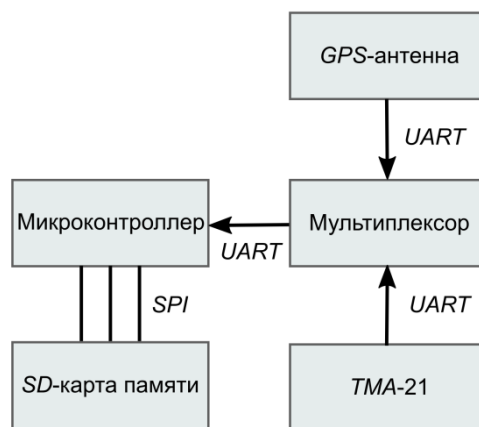
**F i g. 2.** Scheme to show location of the water sampling stations 1–4 (red-white triangles) with the marks corresponding to the known locations of the rainwater (orange dots) discharge outlets in the study areas: *a* – the Artilleriyskaya Bay; *b* – the Apollonova Bay; *c* – the Gollandiya Bay. The map is built using *QGIS 3.10* software and *Yandex-satellite* basemap

В ходе экспедиций использовались следующие устройства:

- беспилотный надводный аппарат с габаритами  $1 \times 0,3 \times 0,5$  м, оснащенный автопилотом, датчиком температуры и электропроводности ТМА-21 и ГНСС-модулем (рис. 3, *a*);
- лодка двухместная резиновая надувная «Инзер-250», влагозащищенный аккумулятор 12 В;
- наземная станция (ноутбук *ASUS* с внешним модулем телеметрии) для отслеживания работы БНА и приборов.



*a*



*b*

**Р и с. 3.** Внешний вид БНА (*a*) и функциональная схема преобразователя кондуктометра ТМА-21 (*b*). *UART* – универсальный асинхронный приемопередатчик, *SPI* – последовательный внешний интерфейс

**F i g. 3.** Overview of USV (*a*) and functional scheme of the TMA-21 conductimeter converter (*b*). *UART* – Universal Asynchronous Receiver and Transmitter, *SPI* – serial peripheral interface

Отбор проб для цитометрического анализа в лаборатории проводился параллельно с работой БНА, что в совокупности позволило сократить время на один экспедиционный выход. При отборе проб соблюдались правила, касающиеся стерильности емкостей и фиксации мест отбора с помощью навигатора.

Станции располагались на прямой по нормали к берегу от места выпуска ливневой канализации на расстоянии 5, 20, 50, 100 м (там, где это позволяла морфология берега).

С помощью БНА выполнялось гидрологическое исследование места работ (измерение температуры и солёности). Данные с БНА поступали на наземную станцию для контроля. После прохождения всех станций БНА возвращался к месту запуска. Направление и размещение галсов выбиралось так, чтобы были покрыты измерениями станции отбора проб воды с захватом до 50 м в обе стороны.

Обработка данных измерений температуры и солёности (фильтрация по качеству и интерполяция по методу обратной взвешенной дистанции (*Inverse Distance Weighted*<sup>5</sup>, *IDW*)) выполнялась в геоинформационной системе *QGIS*.

<sup>5</sup> URL: [https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user\\_manual/processing\\_algs/qgis/interpolation.html](https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/interpolation.html) (дата обращения: 04.03.2022).



Горизонтальное разрешение определяется скоростью движения БНА и дискретностью приема координат. В связи с тем, что прием координат осуществляется с частотой 1 Гц, минимальное расстояние между ближайшими измерениями равно скорости БНА. В процессе экспедиционных работ скорость аппарата не превышала  $1,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Таким образом, вдоль линии галса разрешение составляет  $\sim 1,5 \text{ м}$ .

Для анализа проб воды применяли проточный цитометр *Cytomics TM FC 500* (*Beckman Coulter*, США) и программное обеспечение *CXP*. Для определения количественного и размерного состава частиц общей взвеси был разработан специальный протокол измерения [44]. Общую численность *SM* определяли в неокрашенных пробах воды с помощью гейтинга популяции частиц на двухпараметрических цитограммах прямого светорассеивания (канал *FS*) и гранулярности (*SS*). Численность бактерий определяли в пробах, окрашенных *SYBR Green I* (*Molecular Probes*, США) в соответствии с [45], с помощью гейтинга популяции клеток на двухпараметрических цитограммах прямого светорассеивания (канал *FS*) и флуоресценции *SYBR Green I* в зеленой области спектра (канал *FL1*, 525 нм) на безразмерных логарифмических шкалах [46]. Численность/число/количество клеток бактериопланктона рассчитывали по скорости протока пробы ( $15 \text{ мкл} \cdot \text{мин}^{-1}$ ), времени счета (60 с) и количеству клеток, зарегистрированных в этот промежуток времени (3–50 тыс. кл.). Контроль качества измерений проводили с помощью калибровочных флуоросфер *Flow-Check TM* (*Beckman Coulter*) с известной концентрацией в пробе.

Общую численность пикофитопланктона определяли в неокрашенных пробах с помощью гейтинга популяции клеток на двухпараметрических цитограммах прямого светорассеивания (канал *FS*) и автофлуоресценции в красной (*FL4*, 675 нм) и оранжевой (*FL2*, 575 нм) областях спектра на безразмерных логарифмических шкалах.

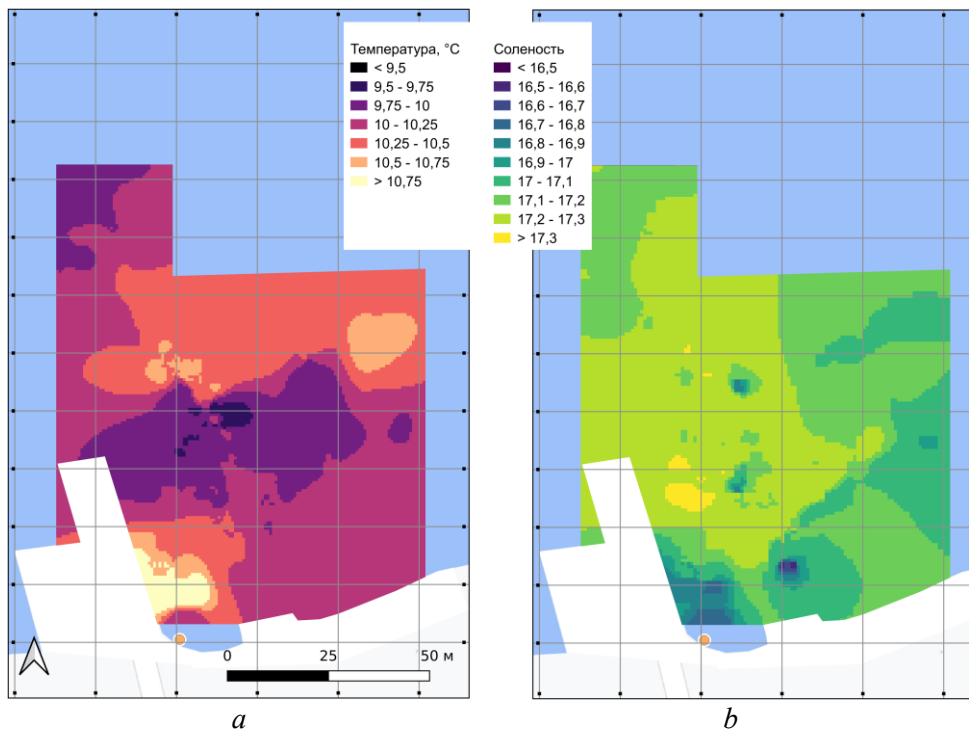
Идентификацию кластеров пикоцианобактерий рода *Synechococcus* и эукариотных пиководорослей в пространстве цитометрических переменных проводили по размерам клеток (канал *FS*) и оранжевой флуоресценции (канал *FL2*) фикоэритрина (*PE*) в соответствии с [47].

## Результаты

В ходе анализа практического применения БНА в полевых исследованиях были выявлены основные ограничения: низкая брызгозащита платы контроллера автопилота (заливание при зарядах дождя и срыве брызг с обрушивающихся ветровых волн), низкая остойчивость при волнении и слабая чувствительность антенны *GPS*, особенно при наличии рядом источников помех. В то же время хорошо показали себя батареи (стабильная работа на протяжении двух часов, достаточный запас хода), канал передачи телеметрии и система хранения данных на борту (нулевые потери).

Поле температуры оказалось наименее информативным параметром при оценке локальных изменений физических параметров поверхности морской воды. Как правило, изменения температуры не превышали  $0,5^\circ\text{C}$  и лишь для Аполлоновой бухты достигали  $1,25^\circ\text{C}$  при измерениях в апреле (рис. 4, а). Самые сильные градиенты всегда были сосредоточены вблизи берега. При этом

в мелководной бухте Голландия, на самом мелком участке, где дно густо заросло макрофитами и имеет темную окраску (рис. 2, *c*), в результате дифференциального прогрева стабильно наблюдалась более высокая температура по сравнению с глубоководной частью бухты (рис. 5, *a*). В Аполлоновой и Артиллерийской бухтах дно имеет более резкий уклон, берег забетонирован. В большинстве случаев отмечены более низкие температуры вблизи бетонных пирсов и локальные пятна теплых вод в местах выпусков ливневой канализации (рис. 4, *a*; 6, *a*).

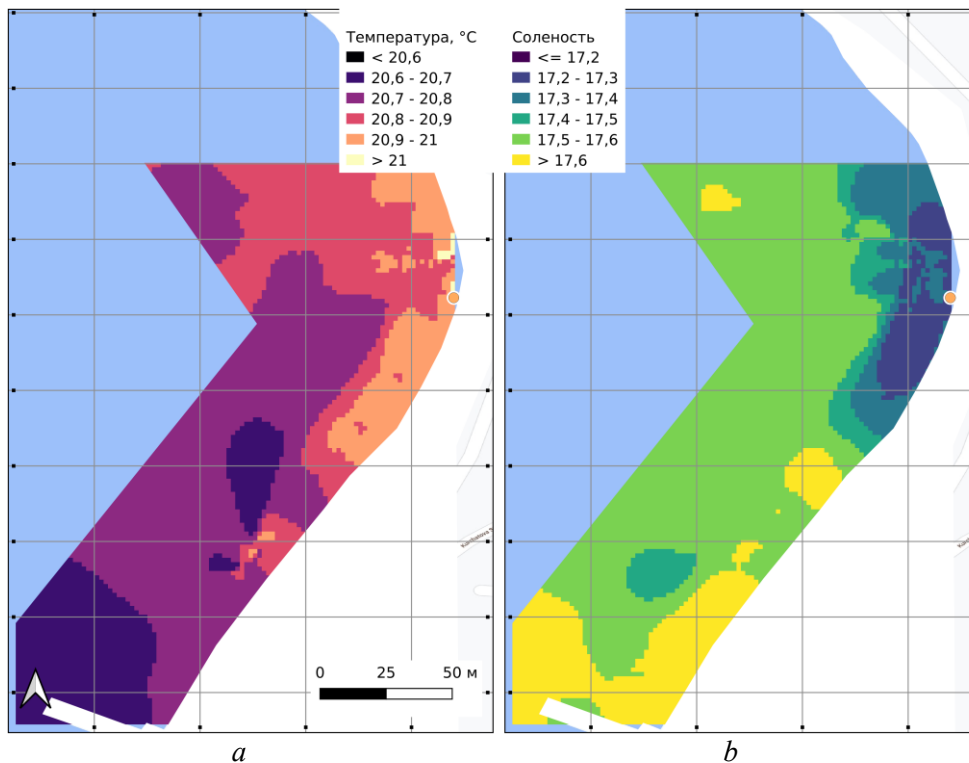


**Р и с. 4.** Двумерное поле температуры (*a*) и солёности (*b*) воды по данным *in situ*-измерений датчиком ТМА-21 с борта БНА в окрестности ливневого выпуска в Аполлоновой бухте 02.04.2021 г. Результат интерполяции по алгоритму *IDW* средствами *QGIS*, базовая карта *Google Terrain*. Положение выпуска ливневой канализации отмечено оранжевым маркером. Линии сетки проведены с шагом 20 м

**F i g. 4.** Two-dimensional temperature (*a*) and salinity (*b*) field based on the *in situ* measurements performed by TMA-21 sensor from board the USV near the rainwater discharge outlet in the Apollonova Bay on 02.04.2021. The result of *IDW* interpolation made using *QGIS* and *Google Terrain* basemap. Location of the rainwater discharge outlet is shown by an orange dot. Grid lines are drawn with the 20 m interval

Поле солёности во всех экспедициях соответствовало ожидаемому распределению с положительным градиентом в сторону открытой части бухты. На всех картах поля солёности (рис. 4, *b*; 5, *b*; 6, *b*) можно наблюдать пятна слегка распресненной воды в непосредственной близости от выхода ливневой канализации. При измерениях во время дождя (Артиллерийская бухта, рис. 6, *b*)

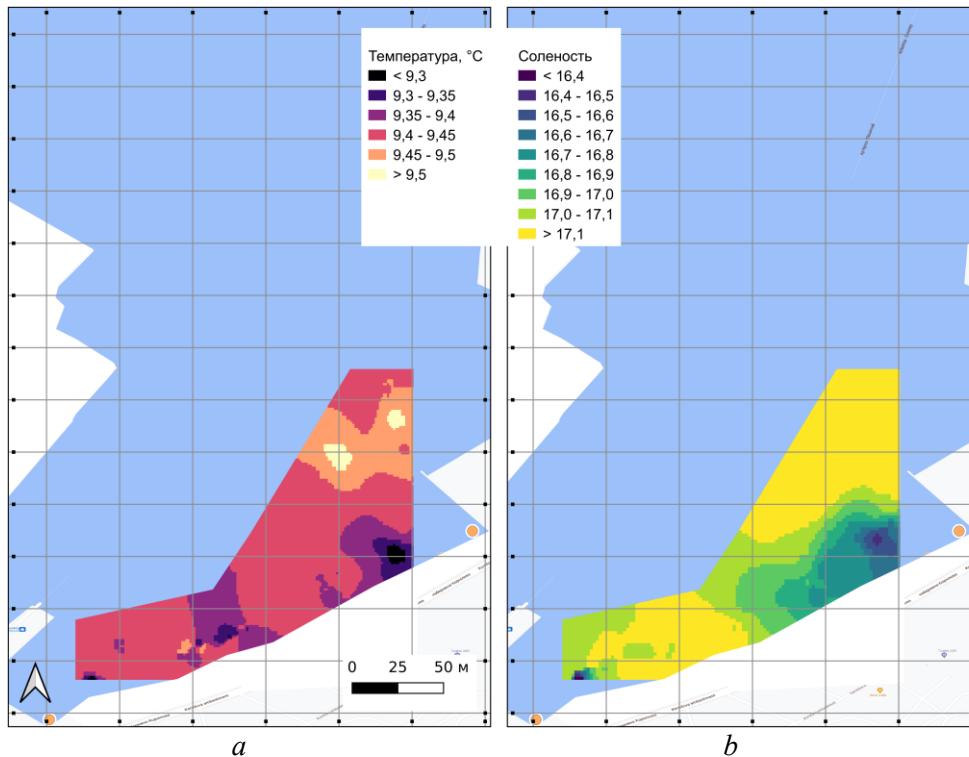
градиент составлял  $\sim 0,5 \text{ м}^{-1}$ . Таким образом, с помощью оперативных измерений физических параметров морской воды при использовании БНА с достаточно высокой точностью можно идентифицировать и локализовать источники распресненной воды в бухте. Отметим, что распределение градиента солености указывает на быстрое перемешивание верхних слоев воды при распространении плюма.



**Р и с. 5.** Двумерное поле температуры (a) и солености (b) воды по данным *in situ*-измерений датчиком TMA-21 с борта БНА в окрестности ливневого выпуска в бухте Голландия 18.06.2021 г. Результат интерполяции по алгоритму *IDW* средствами *QGIS*, базовая карта *Google Terrain*. Положение выпуска ливневой канализации отмечено оранжевым маркером. Линии сетки проведены с шагом 40 м

**F i g. 5.** Two-dimensional temperature (a) and salinity (b) field based on the *in situ* measurements performed by TMA-21 sensor from board the USV near the rainwater discharge outlet in the Gollandiya Bay on 18.06.2021. The result of *IDW* interpolation made using *QGIS* and *Google Terrain* basemap. Location of the rainwater discharge outlet is shown by an orange dot. Grid lines are drawn with the 40 m interval

Измерения температуры и солености показали наличие слабого положительного градиента в температуре и солености в направлении от берега, что хорошо соответствует предположению об относительно быстром перемешивании.



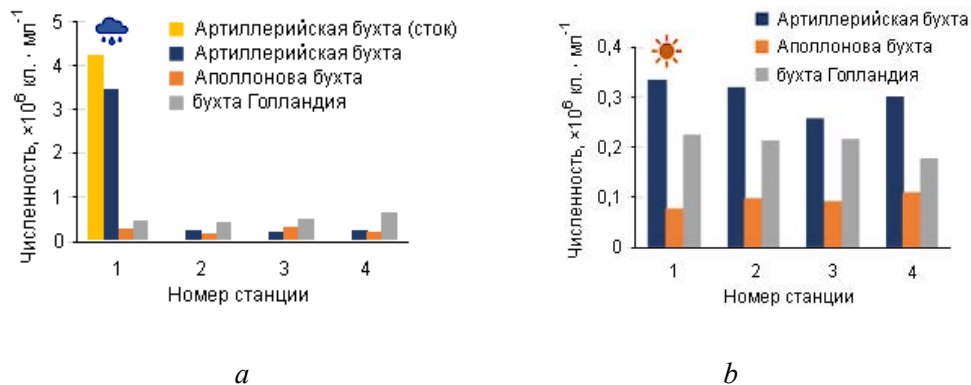
**Р и с. 6.** Двумерное поле температуры (*a*) и солёности (*b*) воды по данным *in situ*-измерений датчиком TMA-21 с борта БНА в окрестности ливневого выпуска в Артиллерийской бухте 08.04.2021 г. Результат интерполяции по алгоритму *IDW* средствами *QGIS*, базовая карта *Google Terrain*. Положение выпуска ливневой канализации отмечено оранжевым маркером. Линии сетки проведены с шагом 40 м

**F i g. 6.** Two-dimensional temperature (*a*) and salinity (*b*) field based on the *in situ* measurements performed by TMA-21 sensor from board the USV near the rainwater discharge outlet in the Artilleryskaya Bay on 08.04.2021. The result of *IDW* interpolation made using *QGIS* and *Google Terrain* basemap. Location of the rainwater discharge outlet is shown by an orange dot. Grid lines are drawn with the 40 m interval

Прямые измерения на малых масштабах и с высокой дискретностью впервые выполнены в Севастопольской бухте с использованием БНА. Результаты наших измерений хорошо согласуются с предыдущими работами по численному моделированию распространения примеси в Севастопольской бухте (см, напр., [28, 48, 49]). Характерной особенностью всех этих работ был расчет распространения пассивного трассера из точечного источника с начальной концентрацией, принимаемой за единицу. Хотя дальнейшее распространение трассера определяется сложной системой течений в бухте, можно отметить одну общую особенность: уже через 24 ч после выброса трассера его концентрация на минимальном удалении от начальной точки уменьшается до ~ 5% от первоначальной (см. рис. 1 из работы [49], первая карта во втором ряду, или рис. 6, *b* из работы [28]). С другой стороны, в [48] с помощью численного моделирования показано, какое определяющее влияние на термохалинную струк-

туру вод в Севастопольской бухте оказывает сток р. Черной (средний месячный максимум до  $3,5 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  согласно [50]; максимальный расход  $15,2 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$  согласно [17]). Как отмечено в [17], воды реки не заходят даже в акваторию Инкерманского ковша, т. е. не проникают далее 3 км от места впадения. Из совокупности модельных данных и наблюдений можно сделать предварительный вывод о локальном характере влияния любых источников с расходом, меньшим расхода малой реки в период половодья ( $\sim 5 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ ), на содержание примеси в воде бухты. При этом, безусловно, необходимо учитывать, что в зависимости от химического состава примеси степень негативного воздействия на экологическое состояние акватории может существенно усиливаться.

*Взвесь.* При анализе полученных данных было установлено, что во время дождя максимальное количество взвешенных частиц определяется на ст. 1 в водах Артиллерийской бухты ( $\sim 3,5 \times 10^6 \text{ част.} \cdot \text{мл}^{-1}$ ), непосредственно возле ливневого стока (рис. 7, *a*), при этом концентрация *SM* в ливневых водах, непосредственно поступающих в бухту, составляла  $\sim 4,3 \times 10^6 \text{ част.} \cdot \text{мл}^{-1}$ , т. е. в поверхностном слое бухты концентрация взвешенных частиц снижается в результате разбавления ливневых вод в плюме. Необходимо отметить, что концентрация численности *SM* в Артиллерийской бухте по сравнению с другими станциями (бухты Аполлонова и Голландия) была выше не только во время дождя, но и через день, а также в длительный период без дождя (рис. 7, *b*). Таким образом, по данному показателю можно утверждать, что Артиллерийская бухта принимает и удерживает наибольшее количество терригенной взвеси.

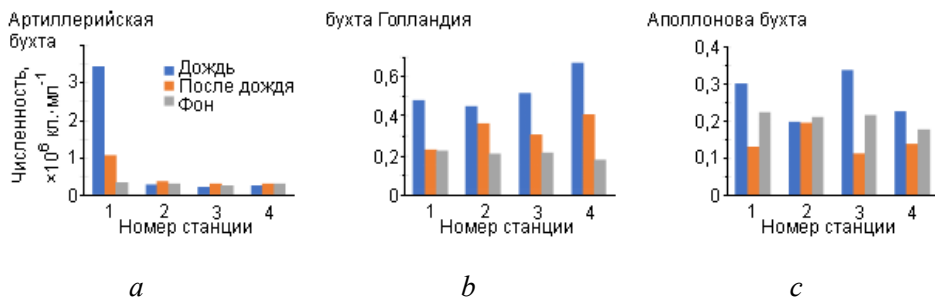


**Рис. 7.** Динамика численности частиц сестона на станциях разреза в трех бухтах (Артиллерийская, Аполлонова и Голландия) во время дождя (*a*) и при его длительном отсутствии (фоновые значения) (*b*)

**Fig. 7.** Dynamics of the seston abundance at the stations in three bays (the Artilleriyskaya, Apollonova and Gollandiya ones) during the rain (*a*) and in its absence for a long time (background values) (*b*)

Динамика распределения *SM* на станциях в трех бухтах была различной. Возможно, это связано с интенсивностью стока, течениями и глубиной. Во время дождя в Артиллерийской бухте уже на ст. 2 концентрация *SM* была на порядок ниже ( $0,5 \times 10^6 \text{ част.} \cdot \text{мл}^{-1}$ ), чем на ст. 1 ( $3,5 \times 10^6 \text{ част.} \cdot \text{мл}^{-1}$ ), и практически соответствовала фоновым значениям (рис. 7). В бухтах Голландия

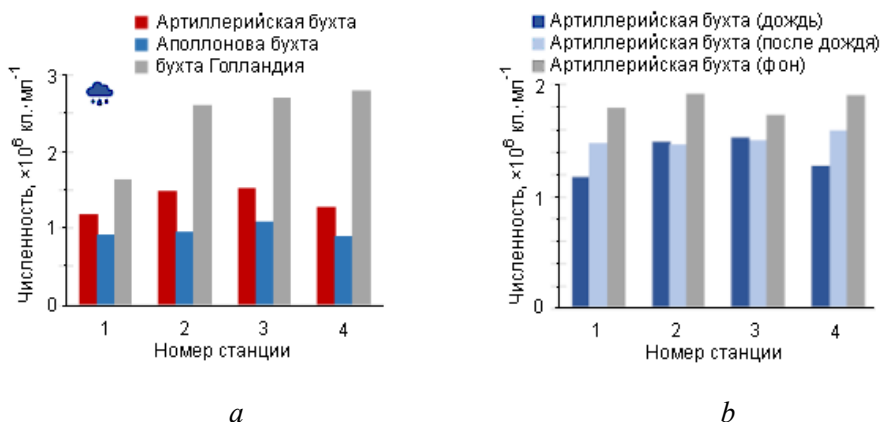
и Аполлонова во время дождя, напротив, отмечали повышение концентрации взвешенного вещества на станциях, удаленных от ливневого стока. В целом распределение *SM* на станциях было более равномерным (рис. 7, *a*). Разница в динамике распределения *SM* на станциях в разных бухтах сохранялась до, во время и после дождя (рис. 8).



**Рис. 8.** Динамика численности частиц сестона на станциях разреза в трех бухтах до, во время и после дождя

**Fig. 8.** Dynamics of the seston abundance at the stations in three bays before, during and after the rain

**Бактериопланктон.** Концентрации бактерий в ливневой воде, как оказалось, соответствовали летним максимумам содержания бактериопланктона, наблюдаемым в Севастопольской бухте, и составляли  $0,9 \times 10^6$ – $2,8 \times 10^6$  кл.·мл<sup>-1</sup> (рис. 9, *a*). Вместе с тем на всех станциях они были несколько ниже фоновых значений, которые наблюдали в тех же акваториях перед дождем (рис. 9, *b*). То есть во время дождя концентрация бактерий в поверхностном слое бухты снижалась, а затем уже на следующий день после дождя начинала восстанавливаться, что хорошо видно на примере Артиллерийской бухты (рис. 9, *b*). Это свидетельствовало о воздействии ливневых вод на микробное население принимающей морской акватории.



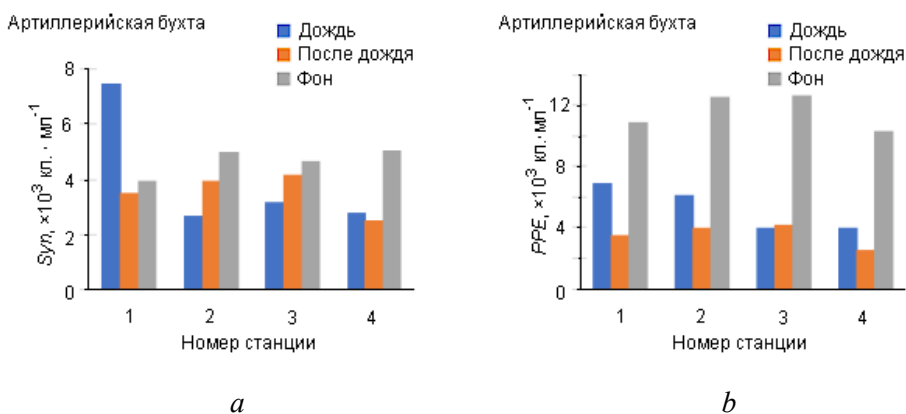
**Рис. 9.** Динамика численности бактериопланктона: *a* – во время дождя на станциях разреза в трех бухтах; *b* – в Артиллерийской бухте до, во время и после дождя

**Fig. 9.** Dynamics of the bacterial plankton abundance: *a* – during the rain at the stations in three bays; *b* – in the Artillery Bay before, during and after the rain

Подобные эффекты ранее отмечались другими авторами в исследованиях эстуарных зон, подверженных антропогенному загрязнению [51–53]. Обильный сброс ливневых вод в морскую акваторию приводит к ее значительному распреснению и привносит в нее избыток взвешенного вещества, биогенных веществ и собственной микрофлоры. Столь сильное воздействие на резидентное микробное сообщество может запускать в нем сукцессионные процессы, а возврат к «нормальному» состоянию требует значительного времени [52]. В период дождя состав бактериопланктона в принимающих водах обычно резко меняется: увеличивается таксономическое разнообразие сообщества, снижается пространственная неоднородность в распределении микроорганизмов, филогенетический анализ выявляет большее количество пресноводных и наземных таксонов, а также увеличение доли патогенных для человека бактерий [51].

Значительные изменения в численности бактериопланктона, выявленные в данном исследовании во время обильного сброса ливневых вод в полузакрытую морскую акваторию, как раз и могли свидетельствовать о подобных изменениях в резидентном бактериальном сообществе. Возврат его количественных показателей к норме (равновесному состоянию) спустя сутки после возмущающего воздействия, однако, не мог служить индикатором окончания сукцессионных процессов.

**Пикофитопланктон.** Цитометрический анализ не выявил представителей пикофитопланктона непосредственно в ливневых водах, что было вполне ожидаемо. В Артиллерийской бухте обильный дождь не вызывал заметных изменений в численности пикофитопланктона, за исключением роста обилия пикоцианобактерий (*Syn*) на ст. 1, непосредственно возле места расположения ливневки (рис. 10, а), что может быть связано с поступлением в воды бухты биогенных веществ (в первую очередь нитритов, которые активно утилизируются пикоцианобактериями) или с тем, что цианобактерии лучше размножаются в слабосоленой воде.



**Р и с. 10.** Динамика численности пикоцианобактерий *Synechococcus* (*Syn*) (а) и эукариотных пиководорослей (*PPE*) (б) на станциях разреза в Артиллерийской бухте до, во время и после дождя  
**F i g. 10.** Dynamics of the pico-cyanobacteriae *Synechococcus* (*Syn*) (a) and eukaryotic pico-algae (*PPE*) (b) abundance at the stations in the Artilleryskaya Bay before, during and after the rain

Как отмечалось в других публикациях, эта группа микроорганизмов способна наращивать численность в районах сброса сточных вод [53]. Численность *PPE* в ответ на поступление ливневых вод, наоборот, снижалась (рис. 10, *b*), однако интерпретация полученных нами данных затруднена вследствие, во-первых, их недостаточного объема и, во-вторых, слабой изученности экологии и экофизиологии мельчайшего эукариотного фитопланктона.

*Размеры взвешенных частиц* на станциях разреза в Артиллерийской бухте, бухтах Аполлонова и Голландия до, во время и после дождя различались в значительной степени. Во время дождя самые высокие показатели размеров частиц *SM* были зафиксированы почти на всех станциях Аполлоновой бухты. Фоновые же значения в этой бухте были практически в два раза ниже показателей, отмеченных во время осадков. То есть поступление ливневых стоков вело к увеличению размеров частиц *SM*. Обратная ситуация наблюдалась в Артиллерийской бухте: во время дождя на ст. 1, непосредственно около слива, размер частиц был в два раза меньше (0,8 мкм), чем при длительном отсутствии осадков (1,7 мкм). Максимальные и минимальные показатели размеров частиц *SM* были отмечены во время дождя в Аполлоновой бухте (2,4 мкм) на ст. 2 и в Артиллерийской бухте (0,8 мкм).

### Выводы

1. Построена и протестирована методика применения беспилотных надводных аппаратов в задачах оперативного локального мониторинга состояния морской воды в районах канализационных выпусков. Пропуски в измерениях, вызванные нестабильной работой *GPS*-приемника и заливанием аппаратуры дождем и волнами, указывают на необходимость дальнейшей доработки корпуса и антенн ГНСС.

2. Зафиксированы незначительные изменения температуры морской воды (в пределах 1,5°C) даже во время действия осадков. Градиент температуры практически всегда соответствовал батиметрии. Таким образом, температура воды – не достаточно информативный индикатор изменения состояния воды во время ливневого стока на мелководье в условиях быстрого перемешивания.

3. Более значительные изменения наблюдались в поле солености (в пределах 1 м<sup>-1</sup>), градиент достигал 0,5 на расстоянии ~ 1 м. Данные об изменении солености могут служить индикатором интенсивности выпуска ливневого стока и могут быть использованы для прогнозирования потенциального воздействия ливневых стоков при реконструкции/переносе канализационной сети города.

4. Максимальные концентрации взвешенного вещества были измерены в вершинной части Артиллерийской бухты (~ 0,5 × 10<sup>6</sup> част. · мл<sup>-1</sup>). Динамика распределения сестона на станциях в разных бухтах отличалась, и эта разница сохранялась до, во время и после дождя.

5. Концентрации бактерий в ливневой воде соответствовали летним максимумам бактериопланктона, наблюдаемым в Севастопольской бухте (0,9 × 10<sup>6</sup>–2,8 × 10<sup>6</sup> кл. · мл<sup>-1</sup>). Поступление ливневых вод в акваторию бухты вело к незначительному снижению численности бактериопланктона на всех станциях



и способствовало изменениям численности пикофитопланктона, которые в каждой бухте были разными. Фоновые значения содержания взвеси и микроорганизмов в водах Севастопольской бухты восстанавливались спустя сутки после сильного дождя.

**6.** Построенные карты распределения солености и графики изменения концентрации сестона качественно соответствуют результатам проведенного ранее численного моделирования для Севастопольской бухты и могут быть использованы для выбора коэффициентов горизонтального турбулентного перемешивания в численных моделях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kumar P.* Water Quality Assessments for Urban Water Environment // *Water*. 2021. Vol. 13, iss. 12. 1686. <https://doi.org/10.3390/w13121686>
2. A New Approach for Detecting and Mapping Sewage Impacts / S. D. Costanzo [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2001. Vol. 42, iss. 2. P. 149–156. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00125-9)
3. *Chunye W., Delu P.* Zoning of Hangzhou Bay ecological red line using GIS-based multi-criteria decision analysis // *Ocean & Coastal Management*. 2017. Vol. 139. P. 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.013>
4. *Özdemir N., Döndü M., Doğan H. M.* Investigation some physico-chemical properties of the freshwater sources feeding the Bay of Gökova in Turkey by Geographic Information Systems // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века. Минск, 17–18 мая. 2018 г. С. 12–14. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/204106> (date of access: 01.03.2022).
5. Coastal Management Tools and Databases for the Sevastopol Bay (Crimea) / S. Kononov [et al.] // *Proceedings of the Tenth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment* / Ed. E. Ozhan. Medcoast 11. 25–29 October 2011. Rhodes, Greece. Vol. 1. P. 145–156.
6. Water quality integrated system: A strategic approach to improve bathing water management / P. P. Penna [et al.] // *Australian Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 295, iss. 2. 113099. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113099>
7. Identifying Sources of Faecal Contamination in a Small Urban Stream Catchment: A Multiparametric Approach / L. J. Reynolds [et al.] // *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. 661954. doi:10.3389/fmicb.2021.661954
8. Marine water quality of a densely populated Pacific atoll (Tarawa, Kiribati): Cumulative pressures and resulting impacts on ecosystem and human health / C. A. Graves [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 163. 111951. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111951>
9. *Meng F., Saagi R.* Integrated modelling and control of urban wastewater systems // *Water-Wise Cities and Sustainable Water Systems: Concepts, Technologies, and Applications* / Eds.: X. C. Wang, G. Fu. London : IWA Publishing, 2021. P. 259–279. [https://doi.org/10.2166/9781789060768\\_0259](https://doi.org/10.2166/9781789060768_0259)
10. Nutrient dynamics and eutrophication in the Sea of Marmara: Data from recent oceanographic research / B. Yalçın [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2017. Vol. 601–602. P. 405–424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.179>
11. *Tan İ., Aslan E.* Metal pollution status and ecological risk assessment in marine sediments of the inner Izmit Bay // *Regional Studies in Marine Science*. 2020. Vol. 33. 100850. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100850>
12. *Моисеенко О. Г., Коновалов С. К., Орехова Н. А.* Индексы оценки экологического статуса бухт в общей стратегии управления прибрежной средой в целях ее устойчивого развития на примере б. Севастопольской (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 399–402.

13. Радиоэкологический мониторинг плутония в донных отложениях сева­стопольских бухт / Н. Н. Терешенко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. Вып. 27. С. 289–293.
14. *Миронов О. А., Муравьева И. П., Миронова Т. О.* Нефтяное загрязнение берегов Севастополя // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26–1. С. 212–216.
15. 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. 2000. Вып. 1. С. 79–103.
16. 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. 2014. Вып. 28. С. 153–164.
17. *Совга Е. Е., Хмара Т. В.* Влияние стока реки Черной в периоды паводка и межени на экологическое состояние кутовой части акватории Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 31–40. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-31-40>
18. Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона / Е. И. Овсяный [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2001. Вып. 2. С. 138–152.
19. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IV : Черное море. Вып. 3 : Современное состояние загрязнения вод Черного моря / Под ред. А. И. Симонова, А. И. Рябинина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 1996. 230 с.
20. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2006. 90 с. URL: [http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij\\_rezhim\\_sevastopolskoj\\_buhty\\_2006.pdf](http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologo-gidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf) (дата обращения: 28.02.2022).
21. 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
22. Современное состояние и тенденции изменения экосистемы Севастопольской бухты / Е. В. Павлова [и др.] // Акватория и берега Севастополя: экосистемные процессы и услуги обществу. Севастополь : Акватита, 1999. С. 70–94. URL: <https://repository.marine-research.org/handle/299011/5248> (дата обращения: 22.02.2022).
23. *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: 18.02.2022).
24. 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. 2007. Вып. 15. С. 74–109.
25. 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>
26. *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
27. Индексы и показатели экологического статуса Севастопольской бухты / О. Г. Моисеенко [и др.] // Вестник Московского университета. Серия 5 : География. 2015. Вып. 4. С. 42–49. URL: <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/155> (дата обращения: 03.03.2022).

28. 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
29. *Moreira-Turcq P., Martin J. M., Fleury A.* Chemical and biological characterization of particles by flow cytometry in the Krka estuary, Croatia // *Marine Chemistry*. 1993. Vol. 43, iss. 1–4. P. 115–126. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(93\)90219-E](https://doi.org/10.1016/0304-4203(93)90219-E)
30. *Moreira-Turcq P. F., Martin J. M.* Characterisation of fine particles by flow cytometry in estuarine and coastal Arctic waters // *Journal of Sea Research*. 1998. Vol. 39, iss. 3–4. P. 217–226. [https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(97\)00053-1](https://doi.org/10.1016/S1385-1101(97)00053-1)
31. Evaluation of a flow cytometry method to determine size and real refractive index distributions in natural marine particle populations / J. Agagiate [et al.] // *Applied Optics*. 2018. Vol. 57, iss. 7. P. 1705–1716. <http://doi.org/10.1364/AO.57.001705>
32. A innovative semi-immergible USV (SI-USV) drone for marine and lakes operations with instrumental telemetry and acoustic data acquisition capability / F. M. Raimondi [et al.] // *OCEANS 2015 - Genova*. 2015. P. 1–10. doi:10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271595
33. *Geng C., Li G., Xu H.* A Platform for Coastline Monitoring System by Unmanned Surface Vessel // 3rd International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). 2019. P. 177–180. doi:10.1109/ISASS.2019.8757775
34. Design of a Twin Hull Based USV with Enhanced Maneuverability / M. Blaich [et al.] // *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. Vol. 46, iss. 33. P. 1–6. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00056>
35. Design, Development and Testing of the Modular Unmanned Surface Vehicle Platform for Marine Waste Detection / J. Vasilj [et al.] // *Journal of Multimedia Information System*. 2017. Vol. 4, iss. 4. P. 195–204. <https://doi.org/10.9717/JMIS.2017.4.4.195>
36. *Yoder N., Preston V., Michel A. P. M.* The PEST: Platform for Environmental Sensing Technology // *OCEANS 2019- Marseille*. 2019. P. 1–5. doi:10.1109/OCEANSE.2019.8867366
37. *Прудзе П. С., Шишкин Е. М.* Роботизированная водная беспилотная лаборатория для мониторинга малых водоемов естественного и искусственного происхождения // *Метеорология и гидрология*. 2020. Вып. 11. С. 122–124.
38. Spatial Structure, Short-temporal Variability, and Dynamical Features of Small River Plumes as Observed by Aerial Drones: Case Study of the Kodor and Bzyp River Plumes / A. Osadchiev [et al.] // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, iss. 18. 3079. doi:10.3390/rs12183079
39. *Osadchiev A., Zavialov P.* Structure and Dynamics of Plumes Generated by Small Rivers // *Estuaries and Coastal Zones - Dynamics and Response to Environmental Changes* / Eds. J. Pan, A. Devlin. London : IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87843>
40. *Nikishin V., Durmanov M., Skorik I.* Autonomous Unmanned Surface Vehicle for Water Surface Monitoring // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2020. Vol. 14, iss. 4. P. 853–858. doi:10.12716/1001.14.04.09
41. *Nikishin V., Durmanov M., Skorik I.* Low-Cost Unmanned Surface Vehicle for Autonomous Bathymetric Surveillance // *The 1st International Conference on Maritime Education and Development*. / Eds. S. Bauk, S. D. Ilčev. Cham : Springer, 2021. P. 83–91. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64088-0\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64088-0_8)
42. *Никишин В. В., Дурманов М. А.* Структура низко- и высокоуровневого программного обеспечения беспилотного морского аппарата // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: сб. науч. тр. / Под ред. Ю. Б. Гимпилевича*. Москва ; Севастополь : РНТОРЭС им. А. С. Попова, СевГУ, 2019. № 2. С. 74. URL: <https://rt-sevastopol.ru/conf2019isbn/articles/001-016.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
43. *Shishkin I. E., Grekov A. N., Nikishin V. V.* Intelligent Decision Support System for Detection of Anomalies and Unmanned Surface Vehicle Inertial Navigation Correction // *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2019. P. 1–6. doi:10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867601

44. Рауэн Т. В., Багаев А. В. Оценка концентрации и качественного состава взвеси в Севастопольской бухте с помощью проточного цитометра // Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых, Москва, 18–24 апреля 2021 г. Москва : Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук, 2021. С. 302–303. URL: <https://doi.org/10.1128/aem.63.1.186-193.1997> (дата обращения: 18.02.2022).
45. Enumeration and Cell Cycle Analysis of Natural Populations of Marine Picoplankton by Flow Cytometry Using the Nucleic Acid Stain SYBR Green I / D. Marie [et al.] // Applied and Environmental Microbiology. 1997. Vol. 63, iss. 1. P. 186–193. <https://doi.org/10.1128/aem.63.1.186-193.1997>
46. Gasol J. M., Del Giorgio P. A. Using flow cytometry for counting natural planktonic bacteria and understanding the structure of planktonic bacterial communities // Scientia Marina. 2000. Vol. 64, iss. 2. P. 197–224. <https://doi.org/10.3989/scimar.2000.64n2197>
47. Marie D., Simon N., Vaulot D. Phytoplankton cell counting by flow cytometry // Algal culture techniques / Ed. R. A. Andersen. Cambridge : Academic Press, 2005. P. 253–267.
48. Михайлова Э. Н., Шатири Н. Б. Воспроизведение пространственно-временной изменчивости термохалинных полей в Севастопольской бухте // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 5. С. 23–39.
49. 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
50. Овсяный Е. И., Орехова Н. А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 1. С. 82–94. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-82-94
51. Terrestrial sources homogenize bacterial water quality during rainfall in two urbanized watersheds in Santa Barbara, CA / B. Sercu [et al.] // Microbial Ecology. 2011. Vol. 62, iss. 3. P. 574–583. doi:10.1007/s00248-011-9874-z
52. Coastal bacterioplankton community dynamics in response to a natural disturbance / S. K. Yeo [et al.] // PloS one. 2013. Vol. 8, iss. 2. e56207. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056207>
53. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11, вып. 4. С. 42–54. doi:10.7868/S2073667318040068

*Об авторах:*

**Багаев Андрей Владимирович**, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. 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@mhi-ras.ru](mailto:a.bagaev1984@mhi-ras.ru)

**Никишин Владимир Владимирович**, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, [nikishin\\_v@mail.ru](mailto:nikishin_v@mail.ru)

**Рауэн Татьяна Владимировна**, научный сотрудник, ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-6757-7491**, **SPIN-код: 1868-3826**, [taschi@mail.ru](mailto:taschi@mail.ru)

**Вержевская Людмила Владимировна**, ведущий специалист, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-1547-7966**, **ResearcherID: R-4253-2018**, **SPIN-код: 7309-7879**, [ludmyla.ver@mhi-ras.ru](mailto:ludmyla.ver@mhi-ras.ru)

**Щербаченко Сергей Владимирович**, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: ABE-1711-2021**, **SPIN-код: 6248-1224**, [shcherbachenko\\_sv@mhi-ras.ru](mailto:shcherbachenko_sv@mhi-ras.ru)