

## Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова

В. Г. Бондур<sup>1</sup>, **В. А. Иванов**<sup>2</sup>, В. Е. Воробьев<sup>1</sup>, В. А. Дулов<sup>2,\*</sup>,  
В. В. Долотов<sup>2</sup>, В. В. Замшин<sup>1</sup>, С. И. Кондратьев<sup>2</sup>, М. Е. Ли<sup>2</sup>,  
В. В. Малиновский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
\*E-mail: dulov1952@gmail.com

Поступила в редакцию 26.09.2019 г., после доработки – 17.10.2019 г.

**Цель.** Целью работы является создание и тестирование экспериментального образца системы наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского п-ова с использованием спутниковых и контактных данных. Система предназначена для получения значимых параметров водной среды, необходимых для выявления источников антропогенных воздействий и выработки обоснованных рекомендаций по рациональному природопользованию и снижению уровня антропогенной нагрузки на морские экосистемы.

**Методы и результаты.** В статье представлено общее описание структуры и использованных технических средств мониторинга с акцентом на наземный сегмент системы, реализованный на базе Морского гидрофизического института, приведен пример использования наземного сегмента для мониторинга прибрежных акваторий Крыма. Обсуждена концепция наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории, лежащая в основе предлагаемой системы. Описан подспутниковый сегмент системы мониторинга, предназначенный для сбора, обработки и хранения информации, получаемой с контактных датчиков. Особое внимание уделено организации рабочего места оператора для оперативного анализа получаемых данных. Представлен опыт успешного применения системы мониторинга. Описана организация экспедиционных работ. Дан краткий обзор основных результатов, полученных за время тестирования системы мониторинга. Проиллюстрирован процесс комплексного анализа подспутниковых данных и многоспектральных космических изображений на примере обнаружения аварийного разрыва основной магистрали сброса сточных вод в г. Севастополе.

**Выводы.** Разработана, реализована и протестирована система наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского п-ова. Функционирование системы в 2015–2016 гг. показало ее высокую эффективность при выполнении оперативного комплексного анализа контактных и спутниковых данных, в особенности при выявлении аварийных ситуаций со сбросом сточных вод в море.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, наземно-космический мониторинг, прибрежные акватории, антропогенные воздействия, подповерхностные процессы, натурные исследования, геоинформационные системы.

**Благодарности:** работы выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственных заданий № 0827-2019-0004 (МГИ) и № 0588-2019-0030 (НИИ «АЭРОКОСМОС»), а также проекта № RFMEFI60419X0223.

**Для цитирования:** Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-103-115

© Бондур В. Г., **Иванов В. А.**, Воробьев В. Е., Дулов В. А., Долотов В. В., Замшин В. В., Кондратьев С. И., Ли М. Е., Малиновский В. В., 2020

# Ground-to-Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on the Coastal Zone of the Crimean Peninsula

V. G. Bondur<sup>1</sup>, V. A. Ivanov<sup>2</sup>, V. E. Vorobiev<sup>1</sup>, V. A. Dulov<sup>2,\*</sup>,  
V. V. Dolotov<sup>2</sup>, V. V. Zamshin<sup>1</sup>, S. I. Kondratiev<sup>2</sup>, M. E. Lee<sup>2</sup>,  
V. V. Malinovsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Scientific Research of Aerospace Monitoring "AEROCOSMOS", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

\*e-mail: dulov1952@gmail.com

*Purpose.* The aim of the work is to develop, construct and test the experimental model for the ground-to-space monitoring of anthropogenic impacts on the Crimean coast using satellite and surface data. The system is intended to obtain significant parameters of marine environment required for revealing the anthropogenic impact sources, developing feasible recommendations on sustainable nature management and decreasing the anthropogenic load on marine ecosystems.

*Methods and Results.* The paper represents description of the monitoring structure and the equipment focused on the ground segment of the system applied in the Marine Hydrophysical Institute of RAS, as well as the example of its implementation in monitoring the Crimean coastal water areas. Discussed is the concept of the ground-to-space monitoring of anthropogenic impacts on the coastal water areas which constitutes a foundation of the proposed system. The ground sub-satellite segment of the monitoring system intended for collecting, processing and storing the information obtained from the contact sensors is described. Special attention is paid to the workstation permitting to perform operational analysis of the obtained data. The experience of successful application of the monitoring system is represented. Arrangement of the field studies is described. Main results obtained from testing the monitoring system are briefly reviewed. Comprehensive analysis of sub-satellite data and multi-spectral satellite images is shown by the example of detecting the emergency break at the main wastewater line in Sevastopol.

*Conclusions.* The system of ground-to-space monitoring of the anthropogenic impacts on the Crimea coastal zone was developed, implemented and tested. The system functioning in 2015–2016 demonstrated its high efficiency in operational and complex analysis of direct and satellite data, especially in revealing emergency situations related to wastewater discharges to the sea.

**Keywords:** remote sensing of Earth, ground-to-space monitoring, coastal water areas, anthropogenic impact, subsurface processes, *in situ* measurements, geo-information systems.

**Acknowledgments:** the work is carried out within the framework both of the State tasks No. 0827-2019-004 (MHI) and No. 0588-2019-0030 (ISR "AEROCOSMOS") at financial support of Ministry of Education and Science and the project No. RFMEFI60419X0223.

**For citation:** Bondur, V.G., Ivanov, V.A., Vorobiev, V.E., Dulov, V.A., Dolotov, V.V., Zamshin, V.V., Kondratiev, S.I., Lee, M.E. and Malinovsky, V.V., 2020. Ground-to-Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on the Coastal Zone of the Crimean Peninsula. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(1), pp. 95-107. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-95-107

## Введение

Экологическое состояние Черного моря остается проблемным. Это связано с ростом антропогенной нагрузки, прежде всего, на прибрежные зоны Черного моря, а также с увеличением риска возникновения техногенных аварий и природных катастроф [1, 2]. При этом практически отсутствуют регулярные комплексные исследования состояния прибрежных областей и отдельных бухт, хотя именно там можно ожидать возникновения аварийных и экстремально неблагоприятных ситуаций [1, 3], связанных с антропогенными воздействиями. В этих условиях жизненно необходимо развитие систем контроля состояния морской среды и экосистем в прибрежных зонах [4–7].

Контроль состояния прибрежных акваторий традиционно выполняется наземными (см., например, [8–11]) либо космическими (см., например, [6, 7, 9, 12–17]) средствами.

Наземный мониторинг основан на непрерывном или фрагментарном получении контактных данных в определенных точках акватории, иногда на береговых станциях. К настоящему времени накоплены большие банки данных измерений *in situ* для прибрежных районов Черного, Баренцева и Карского морей (см., например, [18]). Существенным недостатком наземного мониторинга является невозможность охватить всю представляющую интерес акваторию, например шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации. Кроме того, контактные измерения в морских условиях являются затратной частью этого метода, поскольку требуют привлечения дорогостоящего измерительного оборудования и носителей (судов, платформ и т. д.), а также высококвалифицированных специалистов для проведения измерений и их анализа [8, 10–12, 19].

В свою очередь, космический мониторинг, основанный на анализе спутниковых изображений прибрежных акваторий, не может дать всей необходимой информации с требуемой детальностью [2, 12–16].

Для адекватной оценки важных характеристик водной среды дистанционные данные требуют калибровки и валидации с использованием подспутниковой информации [9–11, 19], что приводит к необходимости комплексирования результатов дистанционных и контактных измерений. Такое комплексирование необходимо также и для модельных расчетов с целью диагностики или прогноза процессов в морской среде при антропогенном воздействии [12, 15].

Комплексный мониторинг морской среды на основе спутниковых и наземных измерений был успешно применен в ряде отдельных исследований (см., например, [11, 15, 18]). Однако его систематическое применение с использованием специальной системы взаимодействующих спутникового и наземного сегментов остается на стадии обсуждения планов на будущее [19].

В 2015–2016 гг. был разработан, создан и протестирован экспериментальный образец системы наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского п-ова. Настоящая статья освещает успешный опыт организации и выполнения этой работы, представляет концептуальное и техническое описание системы, ее структуру и особенности с акцентом на ее наземный сегмент, реализованный на базе Морского гидрофизического института. Функционирование системы рассмотрено на примере проведения комплексного анализа подспутниковых данных и многоспектральных космических изображений, в результате которого был обнаружен аварийный разрыв основной магистрали сброса сточных вод в г. Севастополе.

### **Концепция мониторинга прибрежных акваторий**

Концепция наземно-космического мониторинга прибрежных акваторий заключается в следующем:

1. В результате сбора и накопления синхронных и квазисинхронных контактных и спутниковых данных формируются представления о фоновом (бл-

гополучном) состоянии исследуемых акваторий и его аномальных изменениях, связанных с антропогенными воздействиями и, возможно, с природными факторами.

2. Аномалии, обнаруженные при спутниковом мониторинге, оперативно исследуются контактными средствами. Исследования, в частности, включают определение характеристик морской среды, которые нельзя получить при спутниковых измерениях. Выполняется настройка методов обработки спутниковых данных и валидация результатов их обработки [14, 15, 20].

3. Формируются адекватные оценки экологического состояния акваторий и уровней негативных воздействий на них.

4. В случае экологического неблагополучия или угрозы катастрофы выработываются рекомендации по рациональному природопользованию и соответствующая информация предоставляется в заинтересованные государственные и региональные структуры [14, 15].

В рамках представленной концепции с учетом результатов предыдущих исследований [14, 15, 21–23] создан экспериментальный образец системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации (далее – Система мониторинга), использующий спутниковые и контактные данные. Космический сегмент Системы подробно рассмотрен в работе [24], ряд результатов, полученных при ее апробации, приведен в [2, 25, 26]. В настоящей работе представлен подспутниковый сегмент Системы мониторинга, обеспечивающий сбор, обработку и хранение подспутниковых данных.

### **Структура и состав подспутникового сегмента наземно-космической Системы мониторинга**

Состав основных элементов рассматриваемого сегмента Системы мониторинга приведен на рис. 1.

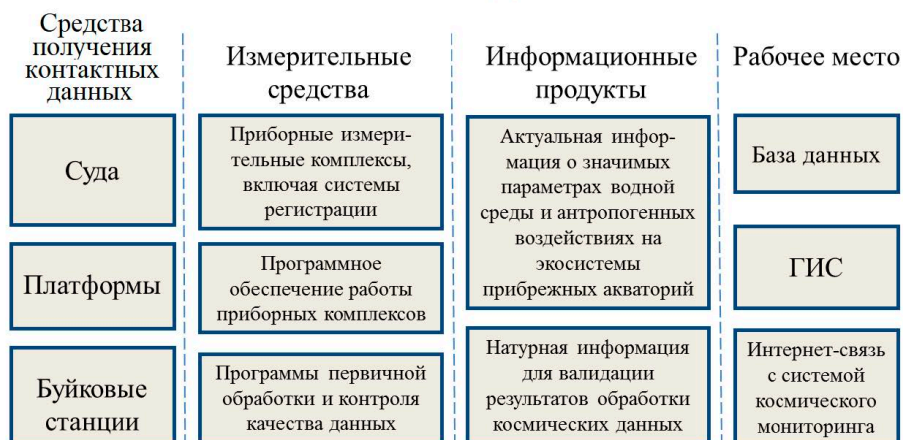
Контактные данные об антропогенных воздействиях на прибрежные акватории получают, как правило, с судов, береговых станций и морских платформ, дрейфующих буйковых станций [8–10, 14]. При отработке функционирования экспериментального образца Системы мониторинга для сбора подспутниковых данных были использованы: судно «Бирюза», стационарная океанографическая платформа (СОП), береговой приборный комплекс гидрофизического полигона РАН в пос. Кацивели, комплекс проточных гидрофизических попутных измерений (КГПИ), у которого процесс измерений и структура данных соответствуют буйковым станциям.

*Измерительные средства* выбирались с учетом требований для измерения фоновых характеристик вод, выявления источников антропогенных и естественных загрязнений, валидации результатов обработки космических данных. Подспутниковые измерения охватывают:

- характеристики морской поверхности и приповерхностного слоя атмосферы, необходимые для интерпретации спутниковых данных;
- гидрологические характеристики вод, включая вертикальные профили температуры и солёности, векторы скорости течения, записи внутренних волн;
- характеристики турбулентности;

- оптические характеристики толщи вод и морской поверхности;
- гидрохимические и микробиологические характеристики вод.

## Фрагмент Системы мониторинга на основе контактных данных



**Р и с. 1.** Структурная схема подспутникового сегмента наземно-космической Системы мониторинга

**Fig. 1.** Structural scheme of sub-satellite segment of the ground-to-space Monitoring System

Для обработки подспутниковых данных использовалось программное обеспечение, связанное с приборными комплексами, и специальные программы для первичной обработки и контроля качества каждого типа данных.

*Информационные продукты*, которые представляли собой файлы данных с фиксированной структурой, содержали актуальную натурную информацию о значимых параметрах водной среды и антропогенных воздействиях на экосистемы прибрежных акваторий, а также контактную информацию, зарегистрированную в моменты спутниковых съемок. Это позволило провести валидацию результатов обработки космических данных. Информационные продукты существенно упростили переход от натуральных измерений к анализу их результатов [10].

При отработке функционирования экспериментального образца Системы мониторинга подспутниковым сегментом формировались 22 типа информационных продуктов, включая:

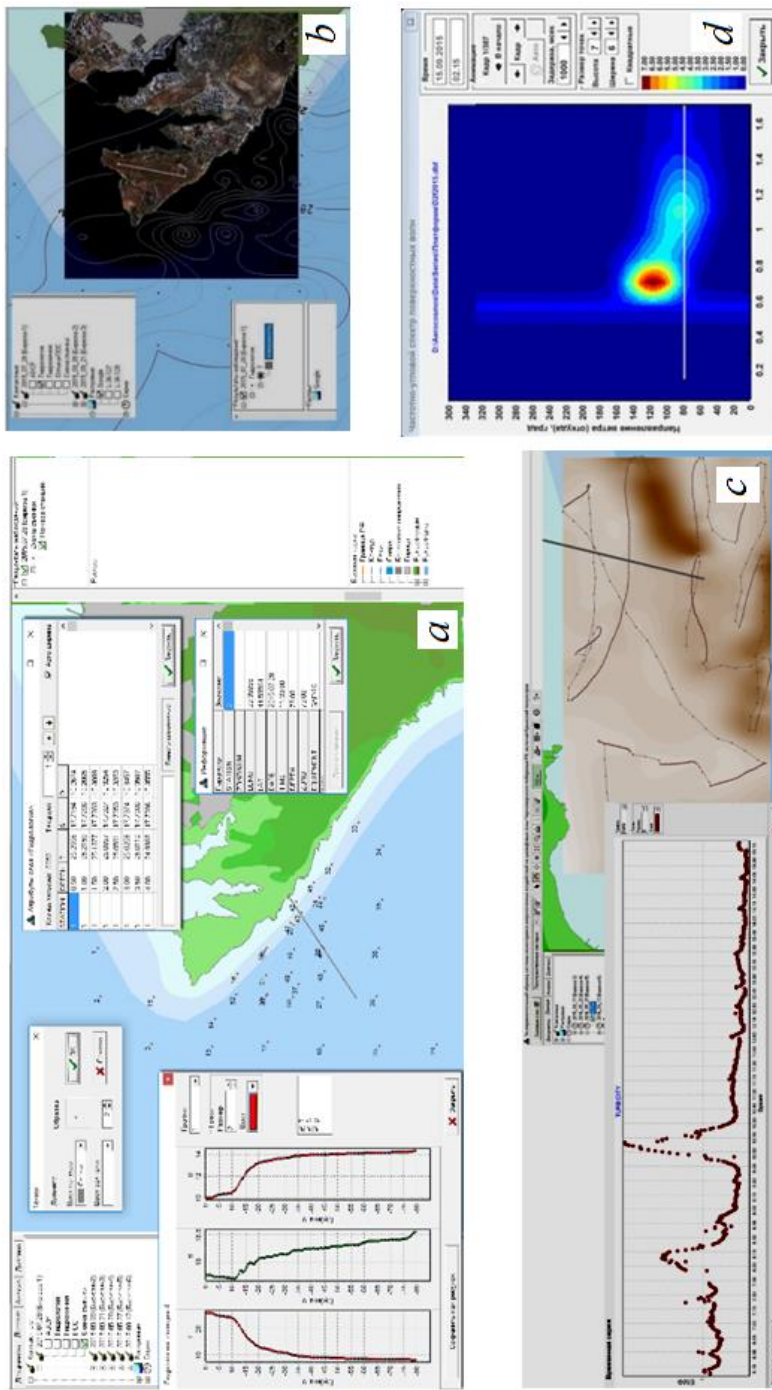
- общие метеоволновые характеристики,
- частотно-угловые спектры поверхностных волн,
- гидрологическую структуру вод,
- течения (данные *ADCP*),
- вертикальные профили показателя ослабления света,
- распределения гидрохимических характеристик,
- распределения гидробиологических характеристик,
- сопутствующие данные о гидрометеорологической ситуации (синоптические карты, карты приводного ветра по открытым данным скаттерометров, модельные расчеты) и др.

Внутри каждого информационного продукта данные распределялись по конкретным типам значимых параметров водной среды, например, гидрохимические характеристики включали: содержание кислорода, насыщенность воды кислородом (в %), содержание общего неорганического углерода, щелочность, содержание фосфатов, содержание кремнекислоты, содержание нитратов и нитритов, содержание ионов аммония, содержание общей взвеси, кислотность.

*Рабочее место оператора* предназначено для оперативного анализа натуральных океанографических данных, а также для автоматического усвоения архивной и актуальной информации по мониторингу прибрежных акваторий. Оно обеспечивает обмен информацией с Системой мониторинга по сети Интернет [24]. Рабочее место объединяет базу данных (БД) и геоинформационную систему (ГИС) океанографической направленности. БД формируется из актуальной, архивной и сопутствующей информации, которая могла дополняться фотографиями и видеозаписями из района проведения исследований, спутниковыми данными и результатами моделирования [27]. Использование БД позволяло:

- включать любое количество растровых изображений;
- визуализировать все материалы в любом сочетании на фоне базовой карты, имеющей до 10 тематических слоев (включая рельеф суши и моря);
- организовывать поименованные пространственные закладки с целью быстрого пространственного перемещения по карте;
- получать вертикальные распределения любых измеряемых параметров на выбранной океанографической станции;
- обрабатывать трассовые и временные записи;
- выполнять горизонтальную пространственную интерполяцию для любого горизонта или выбранного слоя вод с генерацией цифрового массива в формате *GS Surfer7 Binary GRID*, представляя результаты в виде сеточных регулярных распределений, с последующей реализацией функций геопроецирования;
- выводить изображение рабочего окна со всеми вкладками в формате *JPG* или *Web*-страницы;
- экспортировать пространственно привязанные растровые изображения в формате *GeoTIFF*.

Примеры использования этих возможностей проиллюстрированы на рис. 2, где показано рабочее окно оператора. Для выполнения гидрологического анализа можно вывести на экран выбранный район с положением станций в заданный промежуток времени, выбрать станцию и рассмотреть гидрологические профили (рис. 2, *a*). Данные о мутности поверхностного слоя в районе очистных сооружений пос. Симеиз 28.05.2016 г. включают как карту маршрута судна, так и запись вдоль трассы (рис. 2, *b*). Спутниковое изображение может быть совмещено с контурной картой температуры поверхности моря, полученной по контактными измерениями (рис. 2, *c*). Анализ состояния морской поверхности можно выполнять, опираясь на измеренные частотно-угловые спектры поверхностных волн (рис. 2, *d*, белая линия дает направление ветра).



**Р и с. 2.** Примеры интерфейса рабочего места оператора подспутникового сегмента Системы мониторинга: фрагменты рабочего окна для анализа данных гидрологических станций (a); трассовых измерений (b); спутниковых изображений (c); волновой обстановки (d)  
**Fig. 2.** Examples of the workstation interface of the Monitoring System: sub-satellite segment: fragments of the desktop window for analyzing the hydrological stations data (a), route measurements (b), satellite images (c) and wave situation (d)

## Некоторые результаты экспериментальных исследований и их анализ

Для отработки функций подспутникового сегмента Системы мониторинга в процессе испытаний экспериментального образца этой системы был проведен ряд экспедиций в районы, характеризующиеся интенсивными антропогенными воздействиями, связанными с глубинными стоками, в том числе восемь экспедиций на шельф Крымского п-ова (таблица). Одновременно проводилась космическая съемка с борта различных спутников.

### Экспедиции на шельф Крымского п-ова Expeditions at the Crimean Peninsular shelf

Название экспедиции / Name of expedition	Тестовый полигон / Name of test polygon	Координаты полигона / Polygon coordinates	Время проведения / Period of expedition
1-й рейс НИС «Бирюза» / The 1 <sup>st</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон у Гераклеийского п-ова / Test polygon near the Hera-clean Peninsular	44,490°–44,590° с. ш. / N, 33,310°–33,430° в. д. / E	28–31 июля 2015 г. / July 28–31, 2015
2-й рейс НИС «Бирюза» / The 2 <sup>nd</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон у Гераклеийского п-ова / Test polygon near the Hera-clean Peninsular	44,490°–44,590° с. ш. / N, 33,310°–33,430° в. д. / E	9–10 сентября 2015 г. / September 9–10, 2015
3-й рейс НИС «Бирюза» / The 3 <sup>rd</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон в районе СОП в пгт. Качивели / Test polygon in the region of stationary oceanographic platform in Katsiveli	44,388°–44,398° с. ш. / N, 33,980°–33,992° в. д. / E	20–22 сентября 2015 г. / September 20–22, 2015
Работы на СОП / Work at stationary oceanographic platform	Тестовый полигон в районе пгт. Качивели / Test polygon in the region of Katsiveli	44,388°–44,398° с. ш. / N, 33,980°–33,992° в. д. / E	15–25 сентября 2015 г. / September 15–25, 2015
4-й рейс НИС «Бирюза» / The 4 <sup>th</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон у Гераклеийского п-ова / Test polygon near the Hera-clean Peninsular	44,490°–44,590° с. ш. / N, 33,310°–33,430° в. д. / E	20–21 мая 2016 г. / May 20–21, 2016
5-й рейс НИС «Бирюза» / The 5 <sup>th</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон у поселка Симеиз / Test polygon near Simeiz	44,380°–44,400° с. ш. / N, 33,995°–34,033° в. д. / E	27–28 мая 2016 г. / May 27–28, 2016
6-й рейс НИС «Бирюза» / The 6 <sup>th</sup> cruise of R/V "Biryuza"	Тестовый полигон у Гераклеийского п-ова / Test polygon near the Hera-clean Peninsular	44,490°–44,590° с. ш. / N, 33,310°–33,430° в. д. / E	12–13 сентября 2016 г. / September 12–13, 2016
Работы на СОП / Work at stationary oceanographic platform	Тестовый полигон в районе пгт. Качивели / Test polygon in the region of stationary oceanographic platform in Katsiveli	44,388°–44,398° с. ш. / N, 33,980°–33,992° в. д. / E	14–30 сентября 2016 г. / September 14–30, 2016



В ходе проведения экспедиций регистрировался широкий набор оптических характеристик воды и мелкомасштабных характеристик морской поверхности с использованием различных приборов и оригинальных методик, таких как:

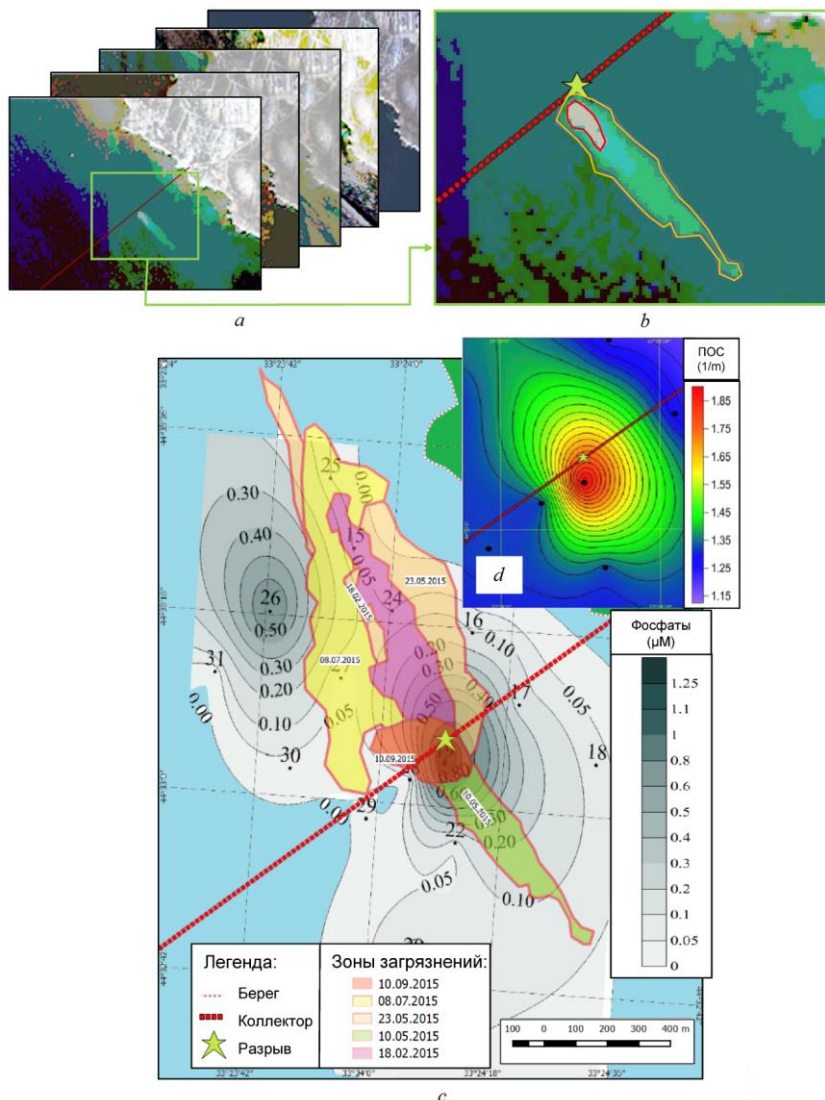
- измеритель спектрально-углового показателя рассеяния света и флюоресценции морской воды,
- универсальный спектрофотометр для измерения коэффициентов яркости моря,
- спектральный измеритель показателя ослабления света,
- спектральный измеритель вертикального профиля подводной облученности,
- солнечный фотометр для измерений спектральной оптической толщины атмосферы,
- стереосистема для оценки спектров коротких морских волн,
- лазерный локатор для исследования кривизны морской поверхности,
- видеорегистратор для выделения обрушений волн и др. (описание приборов и методик см., например, в [8]).

Работы выполнялись синхронно и квазисинхронно со съемками района со спутников «Ресурс-П» № 1/2, *GeoEye*, *Landsat-7/8*, *Sentinel-1/2* [24].

В качестве одного из результатов экспериментальных исследований следует отметить успешную валидацию методики восстановления спектров волн по спектрам спутниковых изображений высокого разрешения [25]. Другой важный результат – выявление аварийной ситуации в районе основного сброса сточных вод в г. Севастополе. В процессе отработки функций космического сегмента Системы мониторинга на спутниковых изображениях обнаружены оптические аномалии, которые естественно было бы связать с плюмом сточных вод [2, 24, 28]. В рамках судовых экспедиций был получен большой объем натуральных данных о физических и биохимических характеристиках этого плюма, достоверно показывающих, что он связан с подъемом сточных вод к поверхности моря вследствие разрыва сточной магистрали [26]. Таким образом, была выполнена надежная валидация результатов выделения по спутниковым изображениям оптических аномалий водной среды, обусловленных поступлением в прибрежные акватории глубинных стоков из аварийных разрывов коллекторов сбросовых устройств [2, 24].

На рис. 3 приведен пример комплексного анализа результатов обработки подспутниковых данных и многоспектральных космических изображений, полученных для тестового полигона в районе Гераклеийского п-ова (вблизи г. Севастополя). В этом примере для дистанционного обнаружения аномалий гидрооптических характеристик водной среды, обусловленных поступлением в водную среду глубинных стоков, использовались пространственные распределения значений индексов цвета, получаемые в результате специализированной обработки многоспектральных космических изображений высокого разрешения [2, 12, 13, 24].

На рис. 3, *a* представлены фрагменты временного ряда обработанных космических изображений, полученных 18 февраля, 10 и 25 мая, 8 июля и 10 сентября 2015 г. с борта спутников *GeoEye-1* и *WorldView-2, 3*. На рис. 3, *b* демонстрируется увеличенный фрагмент обработанного изображения, полученного 10 мая 2015 г. со спутника *WorldView-3*. На фрагменте отчетливо выделяется оптическая аномалия, примыкающая с юго-востока к линии расположения коллектора (в районе аварийного разрыва).



**Р и с. 3.** Примеры обработки космических оптических многоспектральных изображений: *a* – исходный набор спутниковых изображений; *b* – фрагмент изображения за 10.05.2015 г.; *c* – оптические аномалии, выявленные по спутниковым данным и наложенные на распределение фосфатов; *d* – данные контактных гидрооптических измерений

**Fig. 3.** Examples of processing space optical multi-spectral images: *a* – initial set of satellite images; *b* – fragment of the image for 10.05.2015; *c* – satellite derived optical anomalies imposed on the phosphate distribution; *d* – data of contact hydrooptical measurements

На рис. 3, *c* приведена обобщенная карта-схема зарегистрированных в экспериментах 2015 г. аномалий, вызванных распространением глубинных стоков из разрыва коллектора. На этом рисунке показано также измеренное контактными датчиками распределение содержания фосфатов на глубинах от 0 до 5 м (в области разрыва коллектора сбросового устройства наблюдается повышенное содержания фосфатов). На рис. 3, *d* приведены результаты подспутниковых судовых измерений показателя ослабления света на длине вол-

ны 370 нм, в поле распределения которого также наблюдается резкая аномалия в районе аварийного разрыва. Анализ рис. 3, с показывает, что обнаруженный разрыв коллектора сбросового устройства (условно обозначен звездочкой) располагается на расстоянии около 800 м от берега, тогда как сбросовое устройство имеет общую длину 3,3 км. Отсюда следует вывод об аварийном разрыве магистрали.

### Заключение

На основе концепции наземно-космического мониторинга прибрежных акваторий был создан подспутниковый сегмент наземно-космической системы мониторинга антропогенных воздействий на шельфовые зоны черноморского побережья Российской Федерации, обеспечивающий сбор, обработку и хранение информации, получаемой с контактных датчиков. Для отработки функций подспутникового сегмента системы мониторинга выполнен ряд натурных исследований, в ходе которых одновременно с космической съемкой измерялись распределения значимых параметров водной среды.

В процессе выполнения работ осуществлены: валидация методики восстановления спектров морского волнения по спектрам спутниковых изображений высокого разрешения, валидация результатов выделения по спутниковым изображениям оптических аномалий водной среды, обусловленных поступлением в прибрежные акватории глубинных стоков из аварийных разрывов коллекторов сбросовых устройств. На основании обработки полученных экспериментальных данных количественно оценен уровень антропогенных воздействий на прибрежные акватории для ряда тестовых участков. Выявлено аварийное состояние коллекторов глубинных стоков. Собрана обширная база наземных и космических данных. Продемонстрирована эффективность комплексного наземно-космического мониторинга для выявления антропогенных воздействий на прибрежные акватории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев Ю. П.* Введение в экологию Черного моря. Одесса : Эвен, 2006. 221 с.
2. Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 3–22.
3. *Oguz T., Velikova V.* Abrupt transition of the northwestern Black Sea shelf ecosystem from a eutrophic to an alternative pristine state // Marine Ecology Progress Series. 2010. Vol. 405. P. 231–242. <https://doi.org/10.3354/meps08538>
4. *Borja A.* Grand challenges in marine ecosystems ecology // Frontiers in Marine Science. 2014. Vol. 1. Article 1. <https://doi.org/10.3389/fmars.2014.00001>
5. *Acocella V.* Grand challenges in Earth science: research toward a sustainable environment // Frontiers in Earth Science. 2015. Vol. 3. Article 68. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00068>
6. Satellite sensor requirements for monitoring essential biodiversity variables of coastal ecosystems / F. E. Muller-Karger [et al.] // Ecological Applications. 2018. Vol. 28. P. 749–760. <https://doi.org/10.1002/eap.1682>
7. *Ghosh M. K., Kumar L., Roy C.* Monitoring the coastline change of Hatiya Island in Bangladesh using remote sensing techniques // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 101. P. 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.12.009>

8. Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В. А. Иванова, В. А. Дулова. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. 526 с.
9. Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, острова Оаху, Гавайи) / В. Г. Бондур [и др.] // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 6. С. 827–846.
10. *Bondur V., Tsidilina M.* Features of formation of remote sensing and sea truth databases for the monitoring of anthropogenic impact on ecosystems of coastal water areas // *Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE*, 2005. P. 192–195.
11. *Keeler R., Bondur V. G., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*. 2004. Vol. 45, no. 4. P. 53–58.
12. Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных космических изображений высокого разрешения / В. Г. Бондур [и др.] // *Исследование Земли из космоса*. 2006. № 6. С. 42–49.
13. *Бондур В. Г., Зубков Е. В.* Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Часть 1. Эффекты сброса дренажных каналов в прибрежные акватории // *Исследование Земли из космоса*. 2005. № 4. С. 54–61.
14. *Bondur V.* Complex satellite monitoring of coastal water areas // *Proceedings of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE*, 2005. 7 p. URL: [http://www.aerocosmos.info/pdf/1/2005\\_31\\_ISRSE\\_Bondur.pdf](http://www.aerocosmos.info/pdf/1/2005_31_ISRSE_Bondur.pdf) (date of access: 10.12.2019).
15. *Bondur V. G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water - Evaluation and Management* / Ed. F. S. García Einschlag. London : Intech Open Limited, 2011. P. 155–180. doi:10.5772/16134
16. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова [и др.]. М. : ИКИ РАН, 2011. 470 с.
17. *Robinson I. S.* Discovering the Ocean from Space. The unique applications of satellite oceanography. Springer, 2010. 638 p. doi:10.1007/978-3-540-68322-3
18. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М. : ИКИ РАН, 2016. 336 с.
19. A Combined Approach of Field Data and Earth Observation for Coastal Risk Assessment / M. F. Bruno [et al.] // *Sensors*. 2019. Vol. 19, iss. 6. 1399. <https://doi.org/10.3390/s19061399>
20. *Бондур В. Г., Старченков С. А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2001. № 3. С. 118–143.
21. *Бондур В. Г., Журбас В. М., Гребенюк Ю. В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // *Океанология*. 2006. Т. 46, № 6. С. 805–820.
22. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Сабинин К. Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории острова Оаху (Гавайи) // *Океанология*. 2008. Т. 48, № 5. С. 661–671.
23. *Бондур В. Г., Гребенюк Ю. В., Сабинин К. Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45, № 5. С. 641–651.
24. *Bondur V. G., Zamshin V. V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas // *Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development-2016"*. Cham : Springer, 2018. P. 625–637. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7\\_66](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_66)
25. Восстановление спектров морского волнения по спектрам космических изображений в широком диапазоне частот / В. Г. Бондур [и др.] // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 6. С. 716–728. doi:10.7868/S0002351516060055

26. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя / В. Г. Бондур [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 4. С. 42–54. doi:10.7868/S2073667318040068
27. *Dolotov V. V., Dolotov A. V.* GIS for monitoring of anthropogenic pressure to the sea shelf zones // *Indicators of climatic changes in marine ecosystems: Collection of articles of the IV International Conference GeoiD'2016 (October 3–7, 2016, Sukhum, Abkhazia)*. Rostov-on-Don: SSC RAS Publishers, 2016. P. 16–27. URL: [https://www.researchgate.net/publication/312470190\\_GIS\\_for\\_monitoring\\_of\\_anthropogenic\\_pressure\\_to\\_the\\_sea\\_shelf\\_zones](https://www.researchgate.net/publication/312470190_GIS_for_monitoring_of_anthropogenic_pressure_to_the_sea_shelf_zones) (date of access: 10.12.2019).
28. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 43–60.

*Об авторах:*

**Бондур Валерий Григорьевич**, научный руководитель НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), доктор технических наук, академик, вице-президент РАН, **ORCID ID: 0000-0002-2049-6176**, **ResearcherID: G-3130-2014**, **SPIN-код: 3671-9808**, **Scopus Author ID: 6602420154**, [vgbondur@aerocosmos.info](mailto:vgbondur@aerocosmos.info)

**Иванов Виталий Александрович**, руководитель научного направления по прибрежным исследованиям, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: I-7436-2013**

**Воробьев Владимир Евгеньевич**, врио директора НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0003-0834-496X**, **ResearcherID: G-3172-2014**, **SPIN-код: 4803-5315**, **Scopus Author ID: 57200694592**, [office@aerocosmos.info](mailto:office@aerocosmos.info)

**Дулов Владимир Александрович**, заведующий лабораторией прикладной физики моря, отдел дистанционных методов исследований ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0038-7255**, **ResearcherID: F-8868-2014**, **SPIN-код: 8303-6244**, **Scopus Author ID: 6602725409**, [dulov@mhi-ras.ru](mailto:dulov@mhi-ras.ru)

**Долотов Вячеслав Валентинович**, старший научный сотрудник, отдел гидрофизики шельфа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-1485-2883**, **ResearcherID: N-3047-2017**, **SPIN-код: 1496-5526**, **Scopus Author ID: 6602997067**, [vdolotov@mail.ru](mailto:vdolotov@mail.ru)

**Замшин Виктор Викторович**, заведующий отделом обработки аэрокосмической информации НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0003-4285-172X**, **ResearcherID: G-3224-2014**, **SPIN-код: 1416-0616**, **Scopus Author ID: 57205502046**, [office@aerocosmos.info](mailto:office@aerocosmos.info)

**Кондратьев Сергей Иванович**, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат химических наук, **ORCID ID: 0000-0002-2049-7750**, **ResearcherID: F-8972-2019**, **SPIN-код: 1496-5526**, **Scopus Author ID: 35784380700**, [skondratt@mail.ru](mailto:skondratt@mail.ru)

**Ли Михаил Ен Гон**, главный научный сотрудник, заведующий отделом оптики и биофизики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-2292-1877**, **ResearcherID: R-4344-2018**, **SPIN-код: 2479-6915**, **Scopus Author ID: 56142710400**, [michael.lee@mhi@gmail.com](mailto:michael.lee@mhi@gmail.com)

**Малиновский Владимир Васильевич**, старший научный сотрудник, отдел дистанционных методов исследований, лаборатория прикладной физики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5799-454X**, **ResearcherID: F-8709-2014**, **SPIN-код: 9206-3020**, **Scopus Author ID: 23012976200**, [vladimir.malinovsky@mhi-ras.ru](mailto:vladimir.malinovsky@mhi-ras.ru)