

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ ЧЕРНОГО МОРЯ

© 2020 г. В. В. Замшин^а, *, В. Е. Воробьев^а

^аНаучно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

*E-mail: office@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 24.08.2020 г.

Рассмотрены особенности и результаты применения системы комплексного наземно-космического мониторинга для исследования антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря в период времени с мая 2014 г. по июль 2020 г. Использовалась информация, полученная с помощью оптической и радиолокационной аппаратуры различных космических аппаратов много-спутниковой группировки дистанционного зондирования Земли, а также с помощью гидрофизических, гидрооптических, гидрохимических и гидробиологических датчиков, установленных на научно-исследовательских судах, океанографической платформе и заякоренных станциях. На основании результатов регистрации значимых параметров водной среды выявлены и проанализированы источники различных загрязнений, обусловленных пленками нефти, нефтепродуктов, глубинными стоками и др. С использованием индексов цвета для анализа многоспектральных космических изображений зарегистрировано 133 случая вспышки глубинных стоков и обнаружены аварийные разрывы коллекторов сбросовых устройств в акваториях у г. Севастополь и г. Геленджик. Начиная с августа 2019, выявлены улучшения экологического состояния прибрежной акватории в районе г. Севастополь, связанные с выполнением предложенных рекомендаций по принятию мер для улучшения экологического состояния водной среды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, многоспутниковые системы, комплексный мониторинг, прибрежные акватории, нефтегазопроявления, геоинформационные системы, антропогенные воздействия

DOI: 10.31857/S0205961420050097

ВВЕДЕНИЕ

Исследование характера и последствий систематических антропогенных воздействий на прибрежные акватории морей и океанов является одной из важнейших задач обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Особую значимость исследование антропогенных воздействий приобретает в относительно мелководных и замкнутых морских акваториях, приуроченных к густонаселенным прибрежным районам, ввиду их наибольшего загрязнения и низкой ассимиляционной емкости экосистем (Израэль, Цыбань, 2009; Бондур, 2010; Bondur, 2011). Такими акваториями, подверженными повышенному риску антропогенных загрязнений, являются и некоторые прибрежные акватории Черного моря. Это обусловлено интенсивной рекреационной деятельностью, жилой застройкой побережья, разрыванием инфраструктуры нефтегазового комплекса, судоходством и другими факторами (Иванов, Дулов, 2014; Иванов и др., 2016; Зайцев, 2006).

Одним из наиболее эффективных способов выявления антропогенных загрязнений на обширных акваториях является проведение регулярного космического мониторинга с применением большого числа космических изображений, получаемых многоспутниковыми средствами ДЗЗ (Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Савин, 1992; Костяной, 2017; Лаврова и др., 2011; Савин, Бондур, 2000) в сочетании с локальными подспутниковыми измерениями (Бондур и др., 2007, 2012, 2017; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005). Результаты наземно-космического мониторинга и комплексного анализа полученных данных используются для последующей выработки рекомендаций по принятию управленческих решений и организации природоохранных мероприятий (Бондур и др., 2020а; Bondur, 2011).

Данные, получаемые в разное время различными космическими системами и наземными средствами, формируются с использованием различной аппаратуры, различными методами, основанными на различных физических принципах

(Бондур, 2004; Бондур и др., 2007; Бондур, Гребенюк, 2001; Иванов, Дулов, 2014; Bondur, 2005, 2011). Кроме того, при проведении мониторинга используются картографические, нормативные, справочные и иные материалы, которые имеют, как правило, различные виды и форматы (Bondur, Tsidilina, 2005; Ivanov, Zatyagalova, 2008). Вследствие этого для проведения комплексного наземно-космического мониторинга прибрежных акваторий необходимо проведение скоординированных мероприятий и создание единого технологического цикла сбора, обработки и анализа данных, обеспечивающего рациональное и эффективное использование массивов данных. Для реализации такого подхода должна использоваться комплексная наземно-космическая система мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории (Бондур, 2004, 2010; Бондур и др., 2020б; Савин, Бондур, 2000; Bondur, Zamshin, 2018).

В настоящей статье рассмотрены основные особенности разработанной системы и приведены примеры ее применения для комплексного наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря.

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

Для проведения мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря была разработана комплексная наземно-космическая система. Данная система разрабатывалась в соответствии с принципами построения сложных информационных систем мониторинга объектов окружающей среды (Бондур, Савин, 1992; Савин, Бондур, 2000). Система предполагает делимость на конечное число частей – подсистем, каждая из которых состоит из взаимосвязанных элементов. Подсистемы функционируют не изолированно друг от друга, а во взаимодействии, и управляются одним из центральных элементов. Объединение подсистем осуществляется системой связи, обеспечивающей циркуляцию информации (Савин, Бондур, 2000). В пределах всей системы обеспечивается согласованность интерфейсов обмена данными и открытость ее частей для модернизации и развития.

Обобщенная блок-схема комплексной системы наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря, приведена на рис. 1. В состав комплексной системы мониторинга антропогенных воздействий входят следующие основные компо-

ненты (Бондур и др., 2020б; Bondur, Zamshin, 2018):

- многоспутниковая группировка средств дистанционного зондирования Земли, функционально включающая в свой состав космические аппараты с оптической аппаратурой сверхвысокого (<1 м), высокого (1–10 м), среднего (10–100 м) и низкого (>100 м) разрешения, а также радиолокационной аппаратурой X, C, L, P диапазонов, позволяющие получать изображения морской поверхности с различным уровнем детальности в различных диапазонах спектра электромагнитных волн;

- подсистема сбора космических данных (антенные комплексы и виртуальные станции приема спутниковых изображений, средства для работы с удаленными базами космических данных через Интернет);

- подсистема сбора данных подспутниковых измерений, включающая средства измерений, расположенные на судах, заякоренных станциях, платформах и фиксирующие гидрофизические, гидродинамические, гидробиологические, гидрооптические, гидрохимические параметры исследуемой среды;

- подсистема сбора и анализа априорных данных, в том числе:

- топографических, физических, батиметрических карт;

- данных о расположении в регионе исследований источников загрязнения, сбросовых устройств, промышленных предприятий и других инфраструктурных объектов, маршрутах водного транспорта, рекреационных зонах, речной сети и т.п.;

- сведений об объемах, химическом и физическом составе стоков, поступающих в прибрежные акватории от промышленных и хозяйственно-бытовых предприятий, ливневых систем и т.п.;

- информации о текущем состоянии экосистем исследуемых прибрежных акваторий, состоянии береговой линии;

- фоновых гидродинамических, химических и иных параметров среды в районах исследований, установленных по результатам предшествующих многолетних наблюдений;

- подсистема обработки и анализа данных подспутниковых наблюдений, включающая средства обработки и хранения данных;

- подсистема комплексной обработки и анализа космических данных и результатов подспутниковых измерений, обеспечивающая предварительную и тематическую обработку спутниковой информации и формирование информационных продуктов по результатам совместной обработки

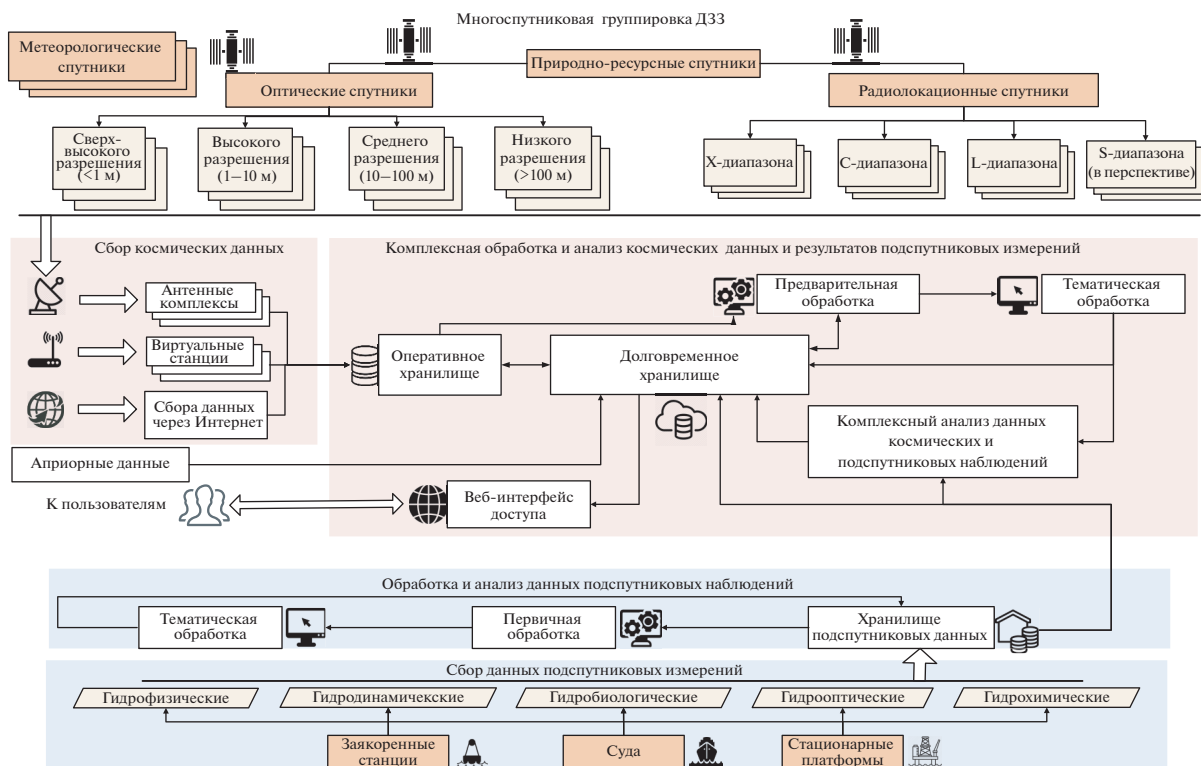


Рис. 1. Блок-схема системы комплексного наземно-космического мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря.

и анализа массивов разнородных данных, а также хранение и управление данными.

Создание такой комплексной системы позволило обеспечить: совместное использование данных с российских и зарубежных многоспутниковых космических систем ДЗЗ; формирование единого информационного пространства для мониторинга прибрежных акваторий; повышение эффективности комплексного использования космической и подспутниковой информации за счет оптимизации процесса получения и обработки данных; повышение оперативности и качества представления информации для решения задач охраны окружающей среды; улучшение качества и сокращение сроков подготовки и принятия решений по организации природоохранных мероприятий (Бондур и др., 2020б).

ИССЛЕДУЕМЫЕ АКВАТОРИИ, ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Выбор районов проведения исследований осуществлялся, исходя из следующих основных положений: наличия источников антропогенных загрязнений прибрежных акваторий (источников

нефтяных загрязнений, глубинных стоков и др.); значительного уровня антропогенных загрязнений; типичности исследуемых процессов в выбранных регионах и др.

Исследования с помощью созданной системы проводились на трех тестовых участках прибрежных акваторий Черного моря: прибрежные акватории в районе г. Севастополь и п. Качивели (южный берег Крыма); прибрежная акватория вблизи г. Геленджик (Краснодарский край).

Выбранные прибрежные акватории характеризовались наличием подводных трубопроводов (коллекторов, заглубленных сбросовых устройств), по которым городские стоки поступали в толщу вод, что приводило к высоким уровням антропогенных воздействий и неблагоприятному состоянию экосистем этих акваторий (Иванов и др., 2016; Иванов, Дулов, 2014). В прибрежной акватории в районе п. Качивели расположена стационарная океанографическая платформа, позволяющая непрерывно проводить подспутниковые измерения и осуществлять валидацию спутниковой информации (Иванов, Дулов, 2014).

Проводимые исследования включали следующие основные фазы:

– Фаза 1. Адаптация методов тематической обработки массивов космических и подспутнико-

вых данных к особенностям исследуемого региона, используемой группировке космических аппаратов ДЗЗ и средствам подспутниковых измерений. Настройка и валидация методов обработки данных ДЗЗ с использованием результатов подспутниковых измерений.

– *Фаза 2.* Сбор актуальных и архивных данных с многоспутниковой группировки космических аппаратов ДЗЗ, а также наземных данных. Формирование и предварительная обработка ретроспективного ряда космических оптических и радиолокационных изображений, а также результатов подспутниковых измерений.

– *Фаза 3.* Проведение тематической обработки сформированных массивов космических и подспутниковых данных для получения информационных продуктов, характеризующих значимые параметры водной среды, позволяющие выделять зоны антропогенных воздействий (глубинные стоки, загрязнения нефтью, нефтепродуктами и др.), а также анализировать экологическое состояние исследуемых прибрежных акваторий.

– *Фаза 4.* Сопоставление результатов обработки космической информации с результатами наземных измерений и комплексный анализ полученных данных.

– *Фаза 5.* Разработка научно-обоснованных рекомендаций по природоохранным мероприятиям, опирающихся на результаты, полученные в процессе исследований с использованием разработанной системы.

– *Фаза 6.* Проведение мониторинга антропогенных воздействий на прибрежные акватории в дежурном режиме для отслеживания результатов выполнения рекомендаций по рациональному природопользованию.

Сбор и обработка космических данных осуществлялись в течение всего периода исследований, включая периоды проведения подспутниковых экспериментов. Во время проведения подспутниковых измерений с учетом временной сетки судовых работ планировался и выполнялся комплекс оптических и радиолокационных съемок с космических аппаратов Ресурс-П, Канопус-В, GeoEye, WorldView, TerraSAR-X, Sentinel-1,2, Landsat-8, Метеор-М и др.

Применяемые методы обработки космических оптических и радиолокационных изображений подразделялись на следующие основные классы:

– методы, использующие текстурные (в том числе пространственно-спектральные) информативные признаки космических оптических и радиолокационных изображений высокого (2.5–10 м) и сверхвысокого (0.5...2.0 м) пространственного разрешения, получаемых с различных спутников, таких как Ресурс-П, Канопус-В, GeoEye, World-

View, TerraSAR-X, Sentinel-1 (Бондур, 2004; Бондур, Старченков, 2001; Bondur, 2005, 2011).

– методы, использующие спектральные информативные признаки, регистрируемые по много и гиперспектральным космическим оптическим изображениям, получаемым со спутников типа Landsat-8, Ресурс-П, Sentinel-2, GeoEye, WorldView (Бондур, 2014; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006б, 2017; Pugach et al., 2018).

Основная часть подспутниковых измерений проводилась с использованием аппаратуры, установленной на научно-исследовательских судах “Бирюза”, “Ашамба” и на яхте “Вита” (Бондур и др., 2017; 2020б; Иванов и др., 2016). Кроме того, проводились измерения с помощью заякоренных буйковых станций, а также со стационарной океанографической платформы у п. Кацивели (Бондур и др., 2012, 2016, 2020б). В ходе подспутниковых исследований с помощью различных датчиков (Бондур и др., 2007; Bondur, Tsidilina, 2005; Keeler et al., 2004) измерялись различные характеристики морской поверхности и подповерхностного слоя, необходимые для валидации и интерпретации космической информации, а также настройки автоматизированных методов ее обработки, в том числе: спектры морского волнения (Бондур, Мурынин, 2015; Бондур и др., 2016), характеристики пенной активности (Бондур, Шарков, 1982), вертикальные профили температуры, плотности, солености (Бондур и др., 2007; Bondur, Tsidilina, 2005), гидрооптических, гидрохимических и микробиологических характеристик вод (Иванов и др., 2016), векторы скоростей течений, характеристики внутренних волн, турбулентности и др. (Бондур и др., 2008, 2009, 2017б, 2020б).

Обработка подспутниковой информации производилась в подсистеме обработки и анализа данных подспутниковых наблюдений комплексной системы мониторинга (Иванов и др., 2016; Бондур и др., 2020б). В результате обработки формировались пространственно-временные распределения значимых параметров водной среды, пригодные для выполнения дальнейшего анализа.

В ходе мониторинга использовались различные методы комплексной обработки данных космических и подспутниковых наблюдений, основанные на сопоставлении, совместной обработке (в том числе, усвоении в моделях) и интерпретации разнородной информации в рамках единого координатно-временного пространства (Бондур, 2014; Бондур и др., 2007; Бондур, Старченков, 2001; Bondur, Tsidilina, 2005; Bondur, 2005, 2011). Такие возможности реализованы в системе мониторинга за счет использования стандартизованных протоколов обмена и способов представления получаемых данных и результатов их обработки с

применением геоинформационных технологий (Bondur, Tsidilina, 2005; Ivanov, Zatyagalova, 2008). Основные особенности и ключевые результаты применения методов, используемых при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря, рассмотрены в работах (Бондур и др., 2012, 2017, 2020б; Bondur, Zamshin, 2018). По результатам обработки космических и подспутниковых данных формировались выходные информационные продукты комплексной системы мониторинга. Эти информационные продукты, являющиеся файлами с фиксированной структурой и набором метаданных, подразделялись на 3 группы: “космические изображения”; “пространственные распределения”; “карты-схемы”.

Информационные продукты группы “космические изображения” включали следующие типы данных: космические оптические панхроматические, много и гиперспектральные, радиолокационные изображения и их фрагменты, в том числе цветокодированные, а также мозаики изображений, сформированные на их основе (Бондур и др., 2012, 2020б; Bondur, Zamshin, 2018).

В группу “пространственные распределения” входили результаты обработки как космических изображений, так и данных подспутниковых измерений, имеющих растровое представление, например, пространственное распределение температуры морской поверхности, пространственное распределение скоростей и направлений течений на заданном горизонте глубин и др. Информационные продукты группы “карты-схемы” включали различные комбинации растровых и векторных данных, сформированных в том числе с использованием результатов тематической обработки данных дистанционного зондирования, например, карты-схемы аномалий пространственно-частотных спектров поверхностного волнения (Bondur, 2005, 2011), карты-схемы аномалий оптических характеристик водной среды (Бондур и др., 2012), карты-схемы движения судов, карты-схемы станций подспутниковых измерений, карты-схемы покрытия района исследований космическими изображениями (Бондур и др., 2020б; Bondur, Zamshin, 2018).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Многочисленные нефтяные слики были выявлены в прибрежных акваторий Крыма с помощью описанной выше системы по космическим радиолокационным и оптическим изображениям, полученным со спутников Sentinel-1 A/B, Sentinel-2 A/B, Landsat-8 в 2017–2018 гг.. Механизмы,

ответственные за возможности дистанционной регистрации таких сликов, были проанализированы в работах (Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Ермаков и др., 2006).

Рисунок 2 иллюстрирует обобщенную карту-схему обнаруженных нефтяных сликов, которые обозначены черными полигонами. Слева на рис. 2 показан ряд обработанных космических изображений, содержащих нефтепроявления. На карте-схеме, представленной справа вверху на рис. 2, показаны основные судоходные трассы (синие линии) и потенциальные природные источники нефтепроявлений (прямоугольники со звездочками). Внизу на рис. 2 проиллюстрированы примеры нефтяных сликов зарегистрированных на радиолокационном, оптическом многоспектральном и оптическом панхроматическом изображениях. Из анализа рис. 2 следует, что наиболее плотные скопления нефтепроявлений локализируются вблизи судоходных трасс, при этом оценки формы и текстуры этих нефтепроявлений свидетельствуют об их антропогенном происхождении (Иванов и др., 2020). Меньшая часть нефтепроявлений локализована в районах расположения природных источников. Отметим, что подобная ситуация характерна и для некоторых других морей России, в том числе для Каспийского моря (Ivanov, Zatyagalova, 2008).

Значительная часть исследований, проведенных с применением комплексной наземно-космической системы, была посвящена сопоставлению и совместному анализу информационных продуктов, формируемых на основании обработки данных дистанционного зондирования и результатов контактных измерений. На рис. 3 в качестве примера приведены результаты восстановления спектра морского волнения, восстановленного по космическому изображению высокого пространственного разрешения в соответствии с методами, описанными в работе (Бондур, Мурынин, 2015), со спектром, полученным при контактных измерениях с помощью решетки струнных волнографов с океанографической платформы вблизи поселка Качивели (Бондур и др., 2016).

На рис. 3, а приведен двумерный пространственный спектр уклонов морской поверхности, восстановленный по космическому панхроматическому изображению, полученному 24 сентября 2015 г. со спутника GeoEye. Рисунок 3, б иллюстрирует одномерный пространственный спектр возвышений, полученный по спутниковым данным, а рис. 3, в – совмещение частотных спектров морской поверхности: восстановленного по спутниковому изображению и полученному с помощью решетки струнных волнографов (Бондур и др., 2016), а также по аппроксимации Тоба (Тоба, 1973)

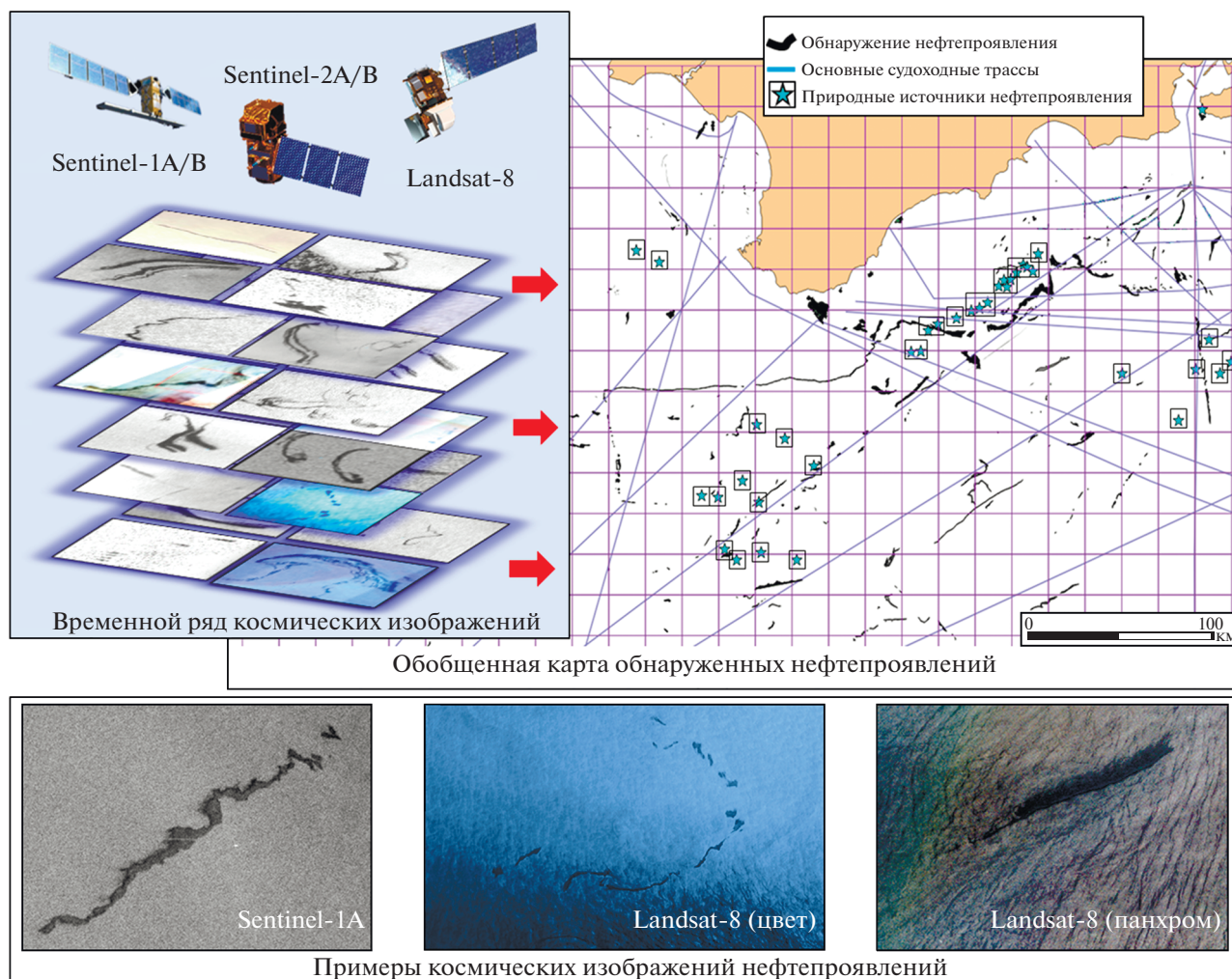


Рис. 2. Обобщенная карта-схема и примеры нефтепроявлений, обнаруженных в прибрежных акваториях Крыма в 2017–2018 гг. по данным космических радиолокационных и оптических съемок, выполненных со спутников Sentinel-1 A/B, Sentinel-2 A/B, Landsat-8.

$$\Psi(\omega) = \alpha g u_* \omega^{-4}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi/f$ – циклическая частота, u_* – динамическая скорость ветра, α – коэффициент для двух линий, равный 0.06 и 0.11 (Бондур и др., 2016).

Анализ рис. 3 показал, что наблюдается хорошее совпадение частотных спектров $\Psi(\omega)$, полученных с использованием разработанных дистанционных методов (Бондур, Мурынин, 2015), а также контактным методом. Мера расхождения спектров, полученных по спутниковым $\Psi_{\text{сп}}(\omega)$ и контактными данными $\Psi_{\text{кон}}(\omega)$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(1 - \frac{\Psi_{\text{сп}}(\omega_n)}{\Psi_{\text{кон}}(\omega_n)} \right)^2} \quad (2)$$

составила $\Delta \approx 0.07$ (Бондур и др., 2016).

Обнаружение проявлений глубинных стоков с помощью комплексной наземно-космической системы производилось по различным космическим данным. На рис. 4 в качестве примера приведены результаты обработки оптического панхроматического изображения, полученного 17 апреля 2016 года со спутника Ресурс-П № 1 в районе г. Севастополь с использованием метода дистанционной пространственно-частотной спектроскопии (Бондур, 2004). Справа на рис. 4 показано исходное космическое изображение, на которое наложена карта с пространственным распределением аномалий, в зонах глубинных стоков, выделенных по появлению дополнительных “квази-монохроматических” спектральных гармоник в спектрах фрагментов обработанного изображения (Бондур, 2004; Bondur, 2005, 2011). Слева на рис. 4 показаны примеры фрагментов космического изображения и соответствующих им двумер-

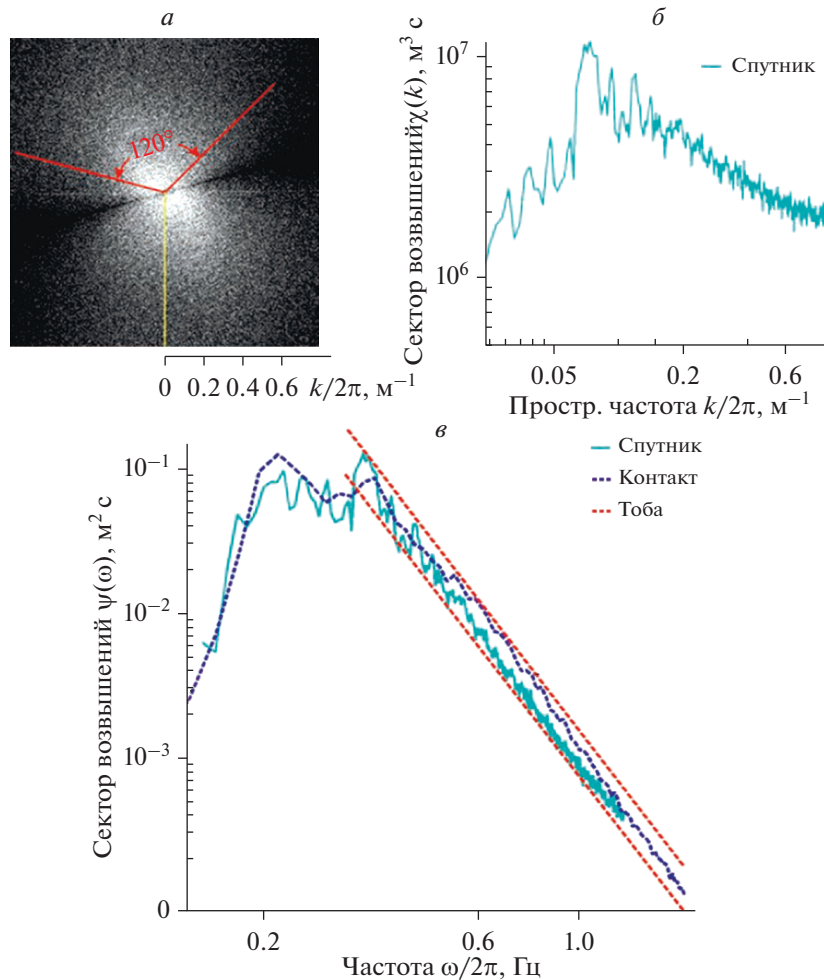


Рис. 3. Пример сопоставления спектров морского волнения, полученных по спутниковым и контактными данным комплексного эксперимента, проведенного 24 сентября 2015 г. в условиях развивающегося ветрового волнения в акватории у п. Кацивели (Бондур и др., 2016).

ных пространственных спектров для фонового (зеленый) и аномального (красный) участков акватории. В иллюстрируемом примере выявлены “квазимонохроматические” спектральные гармоники, соответствующие длине волны $\Lambda \sim 57$ м. Механизмы появления таких спектральных гармоник связанных с генерацией высокочастотных внутренних волн и их взаимодействием с поверхностным волнением в зонах проявления глубинных стоков описаны в работах (Бондур, 2004; Bondur, 2005, 2011).

Фрагменты обработанного космического оптического изображения, которым соответствуют аномальные спектры, раскрашены различными цветами в зависимости от интенсивности проявления поверхностных аномалий, выявляемых по дополнительным спектральным гармоникам (см. рис. 4, справа). Темно-красный цвет соответствует максимальному уровню проявления аномалий,

светло желтый – минимальному. Фоновые фрагменты не раскрашены.

Механизмы дистанционной регистрации глубинных стоков апробированы на основании результатов экспериментальных исследований (Бондур, 2004; Бондур и др., 2007; Bondur, 2005, 2011), а также при исследованиях в гидрофизическом бассейне (Бондур и др., 2009б) и на основании результатов математического моделирования (Бондур и др., 2006б; 2018; Bondur, 2011) в различных акваториях.

Анализ рис. 4 показал, что на исследуемом участке акватории зона проявления антропогенных воздействий, связанных с глубинными стоками, представлена в виде двух соединяющихся областей, приуроченных к местам расположения различных сбросовых устройств. Зафиксированные проявления “квазимонохроматических” спектральных гармоник, вызванных внутренними волнами, генерируемых глубинными стоками

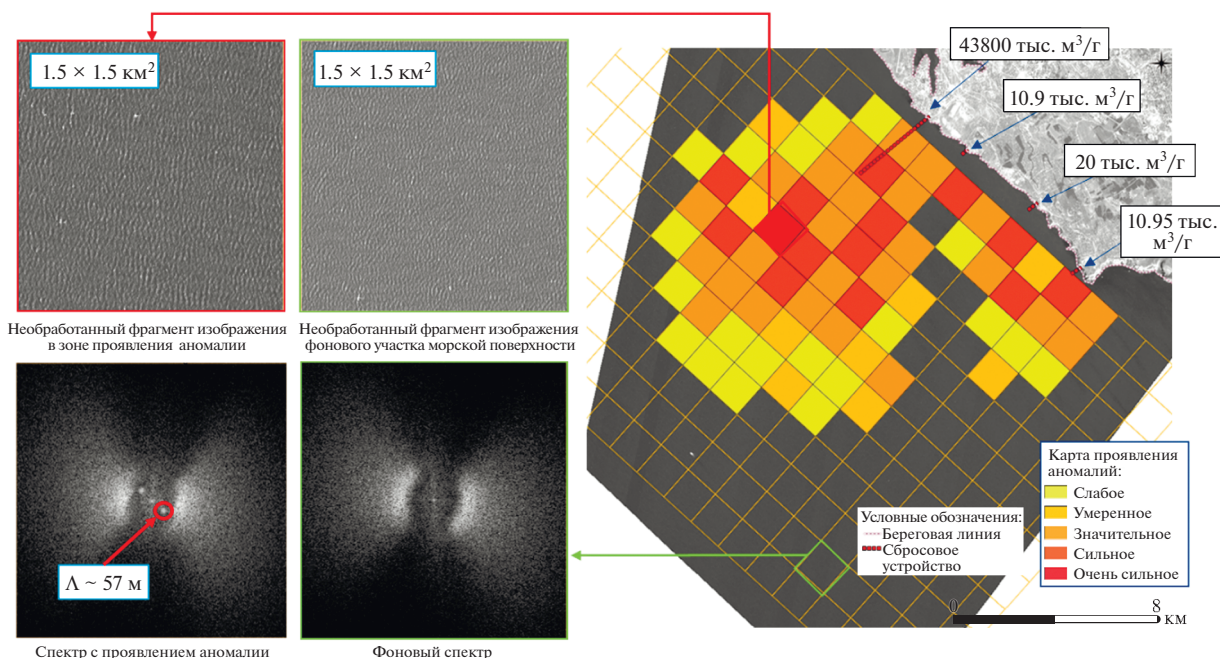


Рис. 4. Примеры результатов пространственной спектральной обработки космического оптического панхроматического изображения, полученного 17 апреля 2016 г. с борта спутника Ресурс-П № 1 и выявления на ее основе областей распространения аномалий, связанных с поверхностными проявлениями глубинных стоков в районе г. Севастополь.

(Bondur, 2005, 2011), обнаружены на значительной площади исследуемой акватории (до 14 км от берега). При этом наиболее протяженная аномалия приурочена к диффузору основного сбросового устройства, производительностью 43800 тыс. м³/год. Кроме того, выявлены проявления аномалий и у второстепенных сбросовых устройств с производительностями 1095, 20 и 10.9 тыс. м³/год (см. рис. 4).

На рис. 5 представлены примеры результатов обработки космических радиолокационных изображений. На рис. 5, а (слева) приведен фрагмент исходного космического радиолокационного изображения (поляризация VV), полученного 14 сентября 2016 г. с борта спутника Sentinel-1A для прибрежной акватории у г. Геленджик в месте расположения коллектора сбросового устройства.

Представленный фрагмент прошел процедуру геопривязки и радиометрической калибровки. Справа на рис. 5, а приведены примеры карт-схем результатов обработки радиолокационных изображений, иллюстрирующих пространственные распределения участков морской поверхности, приуроченных к коллектору сбросового устройства. Эти участки характеризуются отрицательными контрастами удельной эффективной поверхности рассеяния радиолокационных сигналов (УЭПР) различной степени (Бондур и др., 2020а, б) в зонах умеренного (желтый цвет) и сильного (красный цвет) проявления антропо-

генных воздействий. На рис. 5, б приведена цветкодированная карта-схема результатов обработки радиолокационного изображения, приведенного на рис. 5, а, с нанесенным местоположением коллектора сбросового устройства, в районе которого выделяются зоны, характеризующиеся отрицательными контрастами УЭПР, составляющие величины 2.5–4 дБ.

Полученные результаты обработки радиолокационных изображений подтверждают результаты, полученные при проведении аналогичных исследований в других акваториях (Bondur, 2005, 2011).

На основании комплексного анализа пространственно-совмещенных временных рядов информационных продуктов различных типов, а также априорных данных, в исследуемых акваториях проводились определения положения зон антропогенных загрязнений, их пространственно-геометрических и физических параметров, а также оценивалась их динамика. На рис. 6 в качестве примера приведены две карты-схемы, полученные для тестового участка у г. Севастополь, объединяющие попарно результаты пространственной спектральной обработки космического оптического панхроматического изображения, полученного 17 апреля 2016 г. со спутника Ресурс-П № 1, с результатами обработки космического оптического многоспектрального изображения, по-

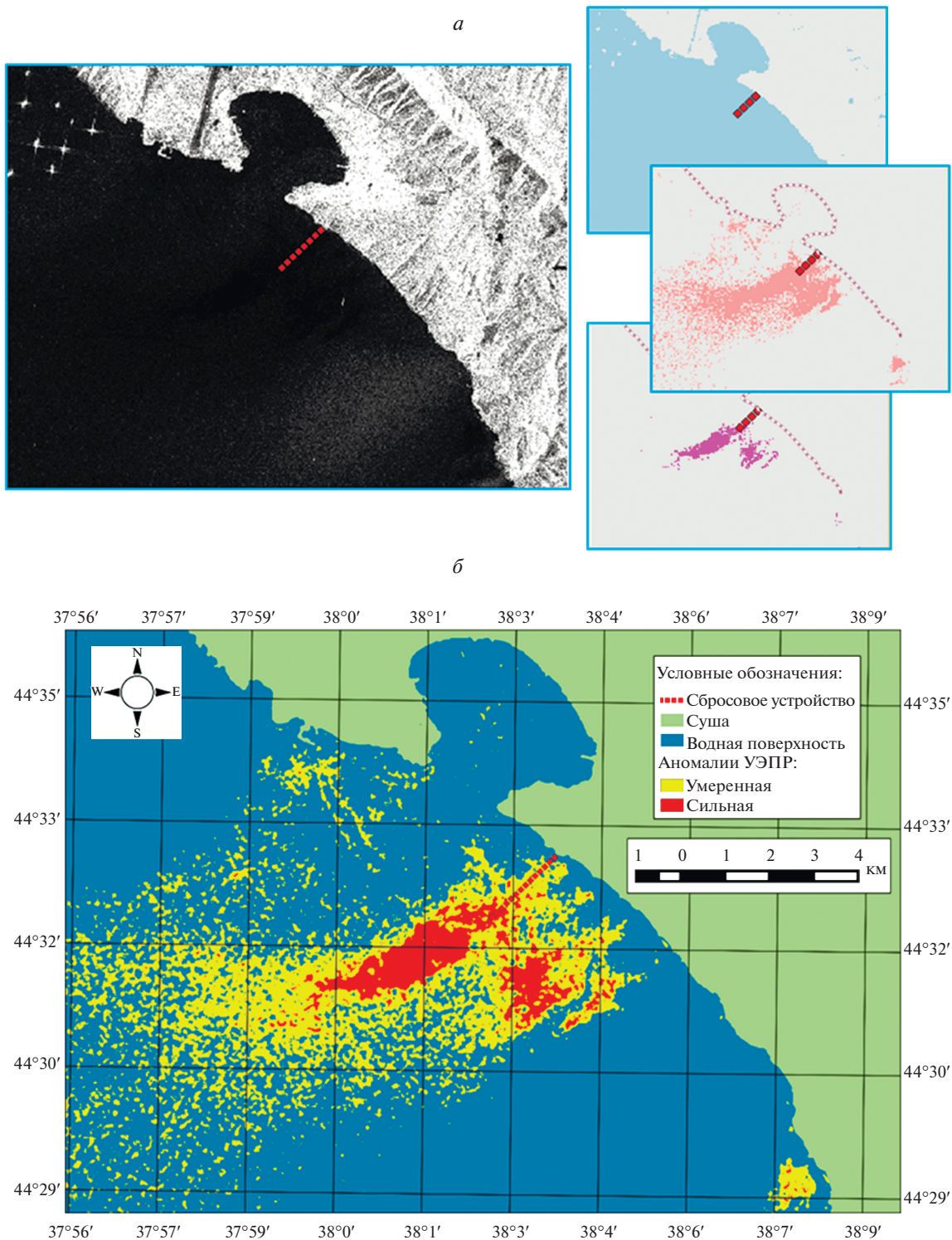


Рис. 5. Примеры результатов обработки космического радиолокационного изображения прибрежной акватории в районе г. Геленджик, полученного 14 сентября 2016 г. с борта спутника Sentinel-1A.

лученного 22 июля 2015 г. со спутника Landsat-8 (слева), и результатами обработки космического радиолокационного изображения, полученного 21 мая 2016 г. со спутника Sentinel-1A (справа).

Рисунок 6 наглядно иллюстрирует типичные поверхностные проявления внутренних волн и загрязнений, выявленные на обширных площадях мористой части исследуемой акватории на ос-

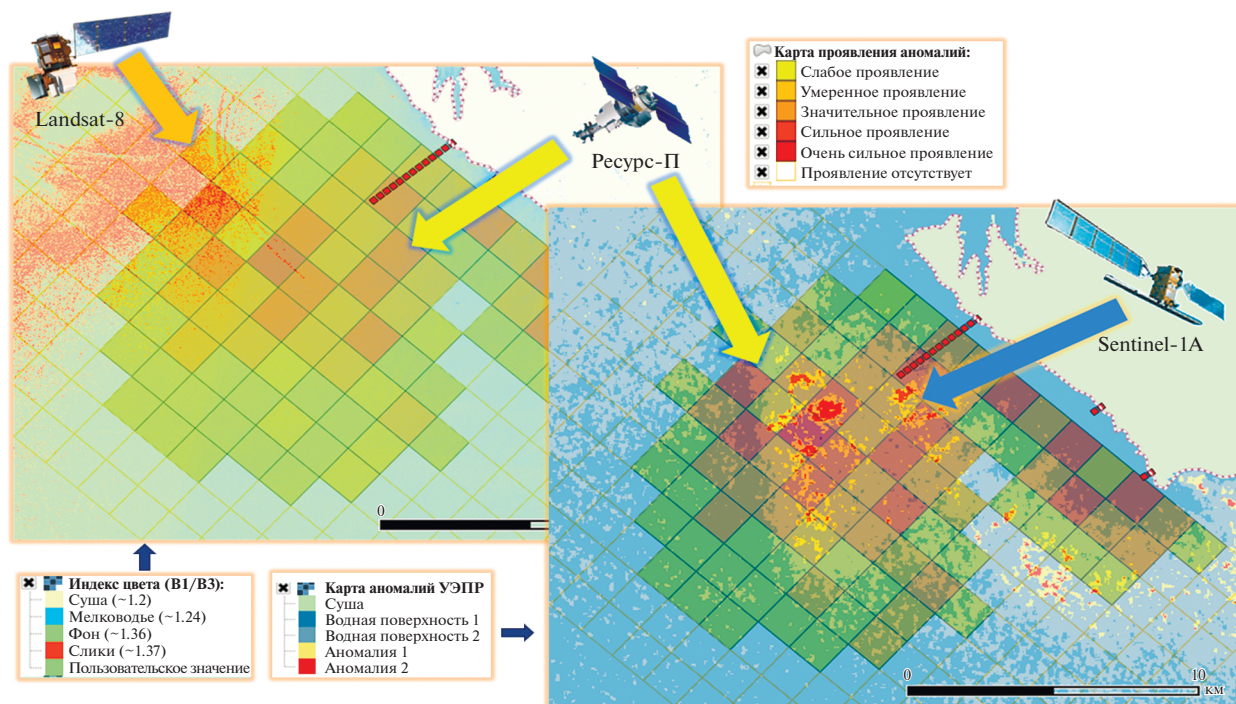


Рис. 6. Карты-схемы, объединяющие попарно результаты пространственной спектральной обработки космического оптического панхроматического изображения, полученного 17 апреля 2016 г. со спутника Ресурс-П № 1, с результатами обработки космического оптического многоспектрального изображения, полученного 22 июля 2015 г. со спутника Landsat-8 (слева), и результатами обработки космического радиолокационного изображения, полученного 21 мая 2016 г. со спутника Sentinel-1A (справа).

новании результатов анализа индексов цвета (данные Landsat-8), аномалий УЭПР с преимущественно отрицательным контрастом (данные Sentinel-1A), трансформаций спектров поверхностного волнения (результаты пространственной спектральной обработки данных Ресурс-П № 1), связанных с поверхностными проявлениями высокочастотных внутренних волн (Bondur, 2005, 2011), а также с непосредственным воздействием всплывающих струй глубинных стоков.

Проведенный мониторинг позволил определить и проанализировать ряд важных особенностей исследуемых акваторий, являющихся сложными природно-техногенными комплексами, функционирующими в условиях высокой антропогенной нагрузки. Совместный анализ информации, накопленной в ходе исследования, свидетельствует о том, что масштаб последствий антропогенных воздействий, а также интенсивность их влияния на экологические процессы в исследуемом регионе во многом определяются характером ветровых процессов, циркуляцией водных масс в прибрежной зоне, орографией береговой линии, процессами переноса в системе шельф – глубоководная часть бассейна, а также состоянием коллекторов сбросовых устройств и режимом работы очистных сооружений.

Одним из эффективных методов дистанционного обнаружения аномалий гидрооптических характеристик морской поверхности и приповерхностного слоя, вызванных негативными антропогенными воздействиями, является анализ многоспектральных космических изображений высокого и среднего пространственного разрешения (Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006б, 2012; Pugach et al., 2018).

В пределах выбранных тестовых участков в процессе выполняемого мониторинга проводилась обработка многоспектральных космических изображений путем вычисления и анализа полей распределений нормированного индекса цвета (Бондур и др., 2006б, 2017а)

$$I_{GBnorm} = \frac{G_i \times B_i}{\sum_{j=1}^n (G_j \times B_j) / n}, \quad (3)$$

где G_i , B_i , NIR_i – спектральная яркость в зеленом, синем и ближнем-ИК каналах съемочной аппаратуры соответственно для текущих пикселей (i) обрабатываемых многоспектральных изображений; n – количество пикселей изображений фонового участка акватории (j), используемого для нормировки.

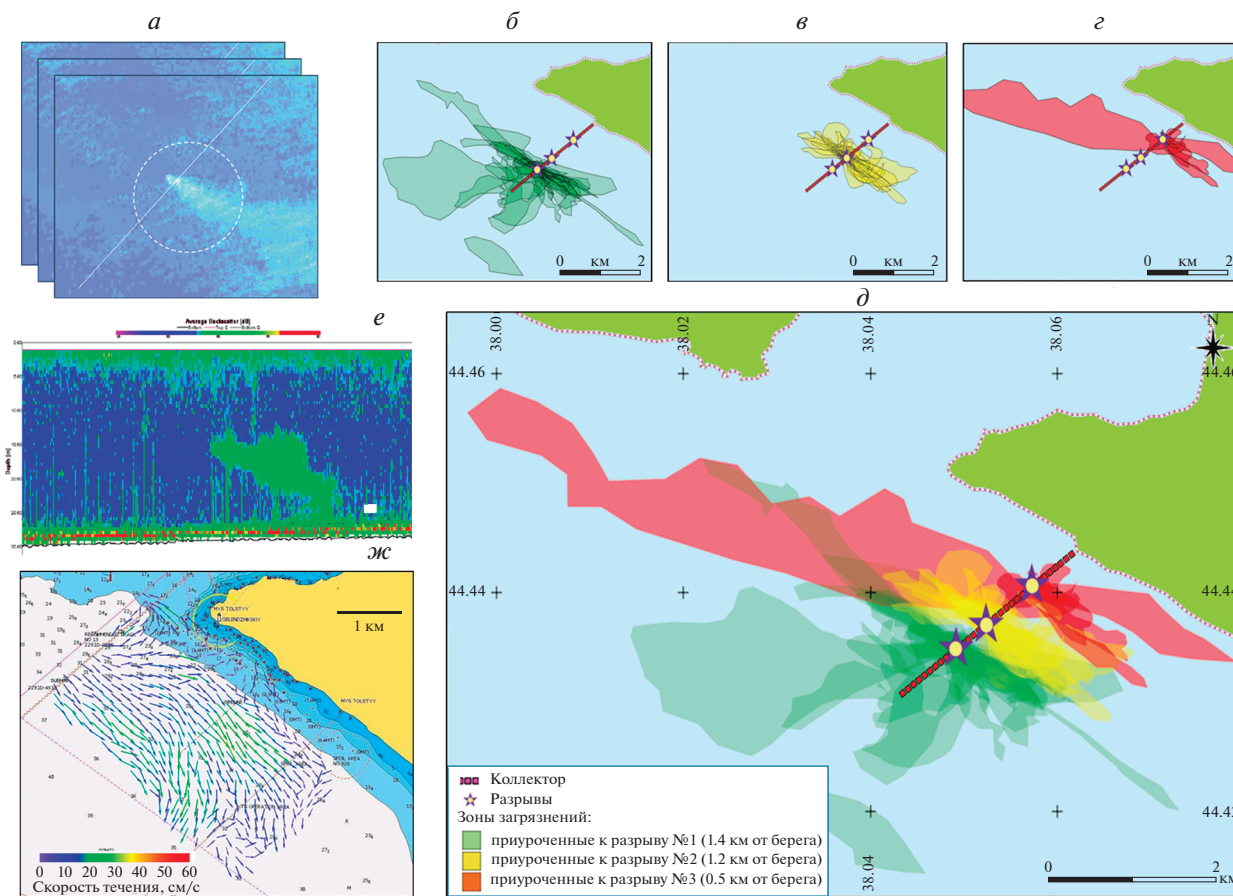


Рис. 7. Пространственно-геометрические характеристики плюмов сточных вод, выявленных в прибрежной акватории у г. Геленджик в период мониторинга с мая 2014 г. по июль 2020 г.

При обработке исходных рядов космических многоспектральных изображений, путем вычисления и анализа распределений индексов цвета I_{GBnorm} формировался ряд пространственно-совмещенных карт-схем границ обнаруженных зон оптических аномалий, вызванных поступлением в исследуемую акваторию глубинных стоков. В акватории у г. Геленджик на основании анализа I_{GBnorm} зафиксированы в общей сложности 84 случая всплытия глубинных стоков.

На рис. 7 показаны пространственные распределения нормированного индекса цвета I_{GBnorm} в зонах проявления глубинных стоков в районе г. Геленджик и их приуроченность к различным участкам коллектора сбросового устройства. Рисунок 7, а иллюстрирует примеры подвергавшихся обработке исходных космических многоспектральных изображений. На рис. 7, б, в, г приведены карты-схемы обнаруженных зон всплытия глубинных стоков, приуроченных к первому, второму и третьему разрывам соответственно. Обобщающая карта 84-х зон загрязнений приведена на рис. 7, д, (цвета показанных зон зависят

от приуроченности плюма к конкретному разрыву коллектора). На рис. 7, е приведен пример регистрации плюма глубинных стоков на вертикальном разрезе мощности сигнала обратного рассеяния звука, полученном 7 октября 2015 г. при проведении подспутниковых измерений с помощью ADCP. Рисунок 7, ж иллюстрирует проявления глубинных стоков в поле придонных течений, полученном по результатам реконструкции съемки с ADCP на тестовом участке у г. Геленджик, выполненной 7 октября 2015 г. Наблюдалось хорошее соответствие данных, полученных дистанционными и контактными методами (Бондур и др., 2020а, б).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что в этом коллекторе сбросового устройства в районе г. Геленджик выявлено 3 аварийных разрыва (см. рис. 7, д).

На рис. 8, а показаны пространственные распределения аномалий нормированного индекса цвета I_{GBnorm} , выявленных в зонах глубинных стоков в районе разрыва коллектора главного сбросового устройства г. Севастополь (приведено

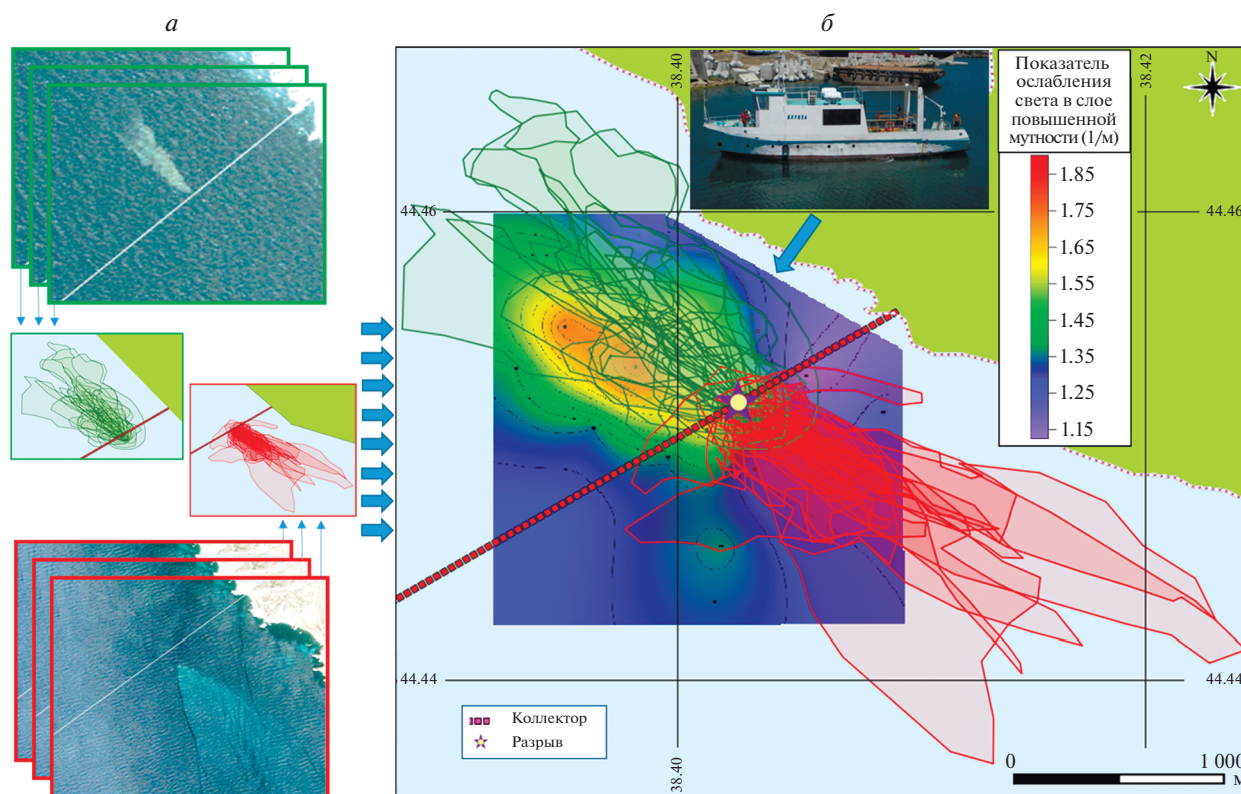


Рис. 8. Пространственно-геометрические характеристики плюмов сточных вод, выявленных в прибрежной акватории у г. Севастополь при распространении на северо-запад (зеленые контуры) и юго-восток (красные контуры). Период мониторинга: май 2014–август 2019.

49 случаев, зафиксированных с мая 2014 г. по август 2019 г.). На рис. 8, б приведена карта-схема, объединяющая все выявленные зоны загрязнения, а также один из примеров результатов обработки данных подспутниковых судовых измерений — карту распределения показателя ослабления света в слое максимальной мутности, полученную 10 сентября 2015 года (Иванов и др. 2016).

Анализ рис. 8 показывает, что зоны загрязнения имеют, как правило, вытянутую форму и простираются вдоль берега на расстояния до 1.5 км как в юго-восточном (красные контуры), так и в северо-западном (зеленые контуры) направлениях. Общая длина выделенной зоны загрязнения достигает ~3 км, ширина — до ~0.8 км. Расстояние от берега до места с наивысшей встречаемостью загрязнений составляет 0.7 км (Бондур и др., 2020а, б). Как и в случае антропогенных воздействий на прибрежную акваторию у г. Геленджик для глубинных стоков у г. Севастополь наблюдалось хорошее соответствие данных, полученных дистанционными и контактными методами.

Таким образом показано, что детально исследованные тестовые участки в прибрежных акваториях у г. Геленджик и г. Севастополь характеризуются сильными антропогенными воздействиями и

наличием аварийных ситуаций, связанных с разрывами коллекторов сбросовых устройств.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ДОСТИГНУТЫЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

На основании комплексного анализа собранной и обработанной информации, полученной в ходе мониторинга, разработаны рекомендации по рациональному природопользованию прибрежных акваторий Черного моря, учитывающих опыт предыдущих исследований (Bondur, 2005, 2011). Основные положения предложенных рекомендаций заключались в следующем:

а) Рекомендации общего характера:

1. Учет особенностей гидродинамического режима прибрежной шельфовой зоны.
2. Учет особенностей стратификации морской среды.
3. Учет особенностей распространения береговых стоков.
4. Учет сезонной изменчивости биологической продуктивности.
5. Формирование информационно-экологической базы данных.

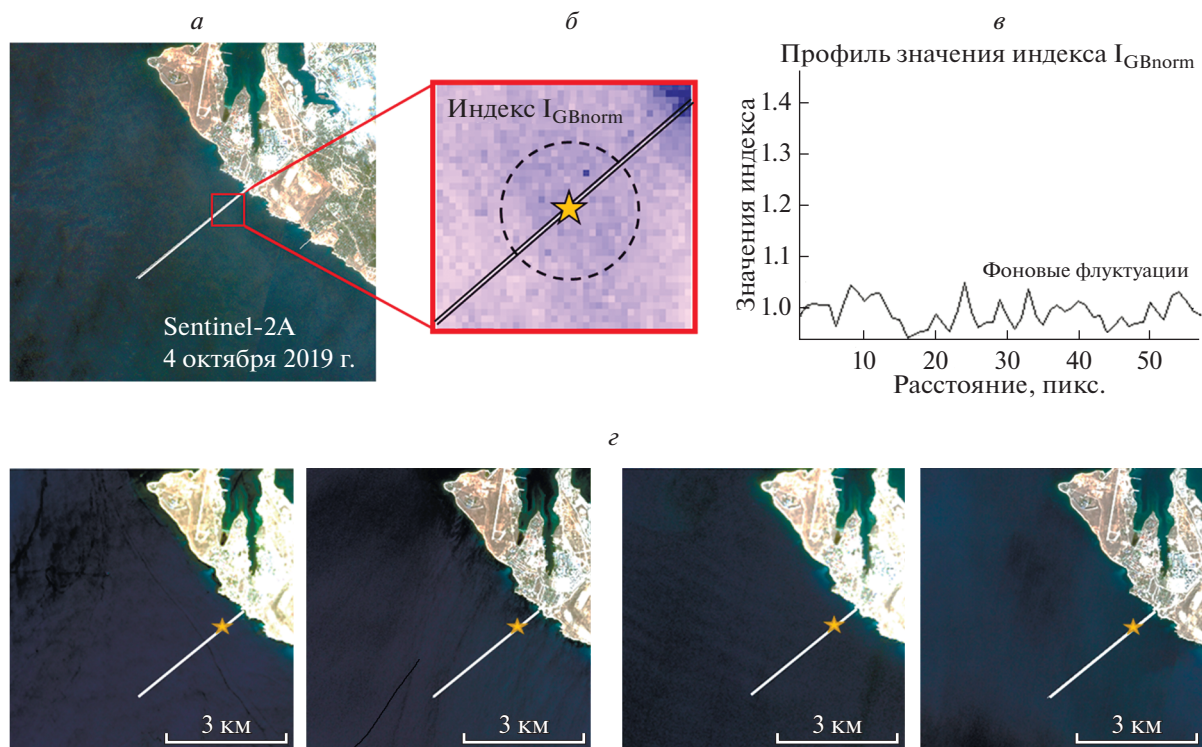


Рис. 9. Примеры анализа многоспектральных космических изображений водной среды после устранения аварийного разрыва коллектора сбросового устройства в прибрежной акватории у г. Севастополь.

б) Рекомендации по обслуживанию и усовершенствованию сбросовых устройств:

1. Проверка коллекторов сбросовых устройств на исправность.
2. Ремонт аварийных разрывов коллекторов.
3. Усовершенствование системы очистки и захоронения глубинных стоков.
4. Подключение хозяйственно-бытовых стоков, сбрасываемых второстепенными сбросовыми устройствами, к очистным сооружениям.

В августе 2019 года была выполнена одна из ключевых рекомендаций, разработанных по результатам мониторинга. Был проведен ремонт поврежденного коллектора сбросового устройства, расположенного в районе г. Севастополь, в зоне действия которого складывалась наиболее сложная ситуация (Бондур и др., 2020).

На рис. 9 приведены примеры анализа серии многоспектральных космических изображений, полученных с конца августа 2019 г. по середину 2020 г., после устранения разрыва коллектора сбросовой системы главных очистных сооружений г. Севастополя.

Рисунок 9, а иллюстрирует космическое оптическое многоспектральное изображение, полученное 4 октября 2019 г. со спутника Sentinel-2A. На рис. 9, в приведено распределение значений

индекса цвета I_{GBnorm} , построенное вдоль кругового профиля, показанного на рис. 9, б, в месте наиболее вероятного проявления плюма. Анализ рис. 9, а, б, в, а также других космических многоспектральных изображений, полученных после устранения разрыва коллектора (см. рис. 9, г), свидетельствует об отсутствии поступления глубинных стоков в прибрежную акваторию у г. Севастополь через ранее имевший место аварийный разрыв трубопровода (Бондур и др., 2020а). Это привело к ликвидации очага интенсивных локальных антропогенных воздействий на этом тестовом участке (см. рис. 9).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целях решения задач обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования в районах интенсивных антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря разработана и использована региональная наземно-космическая система комплексного мониторинга, позволяющая в едином технологическом цикле реализовать сбор, обработку и анализ различной космической и подспутниковой информации. Для применения такой комплексной наземно-космической системы развиты существующие, а также разработаны и реализованы в виде

программных модулей новые тематически ориентированные и регионально-адаптированные методы обработки спутниковых изображений различных спектральных диапазонов и различного пространственного разрешения, использующие как спектральные, так и текстурные (включая пространственно-спектральные) информативные признаки, а также методы комплексного анализа космических и подспутниковых данных.

С применением разработанных научно-технических решений и созданной системы выполнен комплексный мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря, в ходе которого собирались, обрабатывались и анализировались данные более чем с 30 различных типов оборудования, включая космические оптические и радиолокационные средства ДЗЗ высокого и среднего пространственного разрешения, а также гидрологические, гидрооптические, гидрохимические и гидробиологические датчики, установленные на судах, заякоренных станциях, а также на океанографической платформе.

В результате проведенного комплексного мониторинга получены и проанализированы значимые параметры водной среды, зарегистрированные дистанционными методами и подтвержденные результатами подспутниковых измерений, которые позволили выявить особенности пространственного распределения нефтяных загрязнений, интенсивные антропогенные воздействия, связанные с глубинными стоками в прибрежные акватории у городов Севастополь и Геленджик, а также обнаружить аварийные состояния коллекторов сбросовых устройств.

С использованием результатов комплексного наземно-космического мониторинга разработаны рекомендации по снижению негативных воздействий на исследованные прибрежные акватории. В соответствии с этими рекомендациями устранен аварийный разрыв коллектора сбросового устройства главных очистных сооружений г. Севастополя, что привело к существенному улучшению экологической обстановки в прибрежной акватории этого региона Черного моря.

Перспективными направлениями развития разработанной комплексной наземно-космической системы мониторинга является расширение перечня регистрируемых значимых параметров водной среды, реализация функции обнаружения естественных и антропогенных нефтегазопоявлений на основе методов машинного обучения, а также масштабирование созданной региональной системы для проведения мониторинга в акваториях других морей.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0223).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии / В кн. "Новые идеи в океанологии. М.: Наука. Т1: Физика. Химия. Биология, 2004. С. 55–117.
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–16.
<https://doi.org/10.7868/S0205961414010035>
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исслед. Земли из космоса. № 4. 2012. С. 3–12+4 цв. вклейки.
- Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Замшин В.В., Серебряный А.Н., Латушкин А.А., Ли М.Е., Мартынов О.В., Хурчак А.П., Гринченко Д.В.* Мониторинг антропогенных воздействий на прибрежные акватории Черного моря по многоспектральным космическим изображениям // Исслед. Земли из космоса. 2017а. № 6. С. 3–22.
<https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исслед. Земли из космоса. 2001. № 6. С. 49–67.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Изменчивость внутренних приливов в прибрежной акватории о. Оаху (Гавайи) // Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д.* Спектральные характеристики и кинематика короткопериодных внутренних волн на Гавайском шельфе // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009а. Т. 45. № 5. С. 641–651.
- Бондур В.Г., Журбас В.М., Гребенюк Ю.В.* Математическое моделирование турбулентных струй глубинных стоков в прибрежные акватории // Океанология. 2006а. Т. 46. № 6. С. 805–820.
- Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сергеев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И.* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Часть 1. Механизм генерации внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009б. Т. 45. № 6. С. 833–845.
- Бондур В.Г., Дулов В.А., Мурынин А.Б., Юровский Ю.Ю.* Исследование спектров морского волнения в широ-

- ком диапазоне длин волн по спутниковым и контакт-ным данным // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 7–24.
<https://doi.org/10.7868/S0205961416010048>
- Бондур В.Г., Замшин В.В., Замшина А.Ш., Воробьев В.Е.* Регистрация из космоса особенностей глубинных стоков в прибрежные акватории при авариях сбросового коллектора // Исслед. Земли из космоса. 2020а. № 2. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0205961420020025>
- 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 // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 4. С. 54–61.
- 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.* Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова // Морской гидрофизический журн. 2020 б. Т. 36. № 1. С. 103–115.
<https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
- Бондур В.Г., Иванов В.А., Фомин В.В.* Особенности распространения загрязненных вод из подводного источника в стратифицированной среде прибрежной акватории // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 453–461.
<https://doi.org/10.1134/S0002351518040053>
- Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006б. № 6. С. 42–49.
- Бондур В.Г., Мурынин А.Б.* Методы восстановления спектров морского волнения по спектрам аэрокосмических изображений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 6. С. 3–14.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415060020>
- Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В.* Характеристики инерционных колебаний по данным экспериментальных измерений течений на российском шельфе Черного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017 б. Т. 53. № 1. С. 135–142.
<https://doi.org/10.7868/S0002351516050035>
- Бондур В.Г., Савин А.И.* Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здоровеннов Р.Э., Петров М.П., Цидилина М.Н.* Исследования гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
- Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // Океанология. 1982. Т. 22. № 3. С. 372–379.
- Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Гуцин Л.А.* Пленки на морской поверхности и их дистанционное зондирование // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 2. С. 86–98.
- Зайцев Ю.П.* Введение в экологию Черного моря // Одесса: Эвен, 2006. 224 с.
- Иванов В.А., Дулов В.А.* Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / под ред. В.А. Иванова и В.А. Дулова. Севастополь, МГИ НАН Украины, 2014, 527 с.
- Иванов А. Ю., Матросова Е.Р., Кучейко А.Ю., Филимонова Н.А., Евтушенко Н.В., Терлеева Н.В., Либина Н.В.* Поиск и обнаружение естественных нефтепроявлений в морях России по данным космической радиолокационной съемки // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 5 (в настоящем выпуске).
- Иванов В.А., Совга Е.Е., Катунина Е.В.* Оценки антропогенных воздействий на экосистему акватории Гераклейского полуострова в районе расположения глубинных стоков // Процессы в геосредах. 2016. № 5(1). С. 62–68.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. М.: Флинта Наука, 2009. 520 с.
- Костяной А.Г.* Спутниковый мониторинг параметров климатической системы Земли. Океан // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. С. 57–85.
- Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России: М.: ИКИ РАН. 2011. 480 с.
- Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- Bondur V.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book Waste Water—Evaluation and Management, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180.
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>
- 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 // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas, in book K.V. Anisimov et al. (eds.), Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Re-

search and Development – 2016”, 2018. P. 625–637.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>

Ivanov A., Zatyagalova V. A. GIS approach to mapping of oil spills in the marine environment // *International J. of Remote Sensing*. 2008. V. 29. № 21. P. 6297–6313.

Keeler R., Bondur V., Vithanage D. Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.

Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. № 1. P. 87–103.

<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>

Toba J. Local balance in the air-sea boundary process // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.

Applying the System for Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on the Coastal Water Areas of the Black Sea

V. V. Zamshin¹ and V. E. Vorobyev¹

¹*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia*

Here we discuss the features and operation of the comprehensive ground-space monitoring system to study anthropogenic impact on the coastal Black Sea water areas in the period between May 2014 and July 2020. We used data from optic and radar instruments placed on various spacecraft of the multi-satellite remote sensing constellation, as well as from hydrophysical, hydrooptical, hydrochemical, and hydrobiological sensors places on research vessels, a oceanographic platform, and moored stations. The results of registration of significant water environment parameters have allowed us to reveal and analyze the sources of various pollutions such as oil films, oil products, deep wastewater discharges, etc. The analysis of multispectral satellite imagery using color indices have allowed us to register 133 cases of wastewater surfacing and to reveal failures of wastewater collectors in the water areas near the cities of Sevastopol and Gelendzhik. Improvements in the ecological state of the coastal waters in the area of Sevastopol (starting from August 2019) were revealed. This fact was related to the implementation of recommendations for environmental conservancy developed during the monitoring.

Keywords: remote sensing, multisatellite systems, comprehensive monitoring, coastal water areas, oil and gas seeps, geoinformation systems, anthropogenic impact

REFERENCES

Bondur V.G. Aerokosmicheskie Metody v Sovremennoy Okeanologii [Aerospace Methods in Modern Oceanology] // *New Ideas in Oceanology*. V. 1. Physics. Chemistry. Biology. Moscow: Nauka. 2004. P. 55–117 (In Russian).

Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. DOI: 10.1134/S0001433811090039

Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // *31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*. ISRSE, 2005. 7 p.

Bondur V.G. Modern Approaches to Processing Large Hyperspectral and Multispectral Aerospace Data Flows. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 9. P. 840–852. DOI: 10.1134/S0001433814090060

Bondur V.G. Satellite monitoring and mathematical modeling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // in book *Waste Water – Evaluation and Management*, ISBN 978-953-307-233-3, InTech, Croatia. 2011. P. 155–180. <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.

Bondur V.G., Dulov V.A., Murynin A.B., Yurovsky Yu. Yu. A study of sea-wave spectra in a wide wavelength range from

satellite and in-situ data // *Izvestia, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 888–903. DOI: 10.1134/S0001433816090097

Bondur V.G., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V., Dolotov Yu.S., Zdrovennov R.E., Petrov M.P., Tsidilina M.N. Studies of hydrophysical processes during monitoring of the anthropogenic impact on coastal basins using the example of Mamala Bay of Oahu Island in Hawaii // *Oceanology*. 2007. V. 47. № 6. P. 769–787. DOI: 10.1134/S0001437007060033

Bondur V.G., Grebenuk Y.V. Remote indication of anthropogenic influence on marine environment caused by depth wastewater plume: Modelling, experiments // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2001. № 6. P. 49–67.

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Ezhova E.V., Kazakov V.I., Sergeev D.A., Soustova I.A., Troitskaya Yu.I. Surface manifestations of internal waves investigated by a subsurface buoyant jet: 1. The Mechanism of Internal-Wave Generation // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009b. V. 45. № 6. P. 779–790. DOI: 10.1134/S0001433809060115

Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D. The spectral characteristics and kinematics of short-period internal waves on the Hawaiian shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009a. V. 45. № 5. P. 598–607. DOI: 10.1134/S0001433809050077

- Bondur V.G., Grebenyuk Yu.V., Sabinin K.D.* Variability of internal tides in the coastal water area of Oahu Island (Hawaii) // *Oceanology*. 2008. V. 48. № 5. P. 611–621. DOI: 10.1134/S0001437008050019
- Bondur V.G., Ivanov V.A., Fomin V.V.* Peculiarities of polluted water spreading from a submarine source in stratified coastal environment // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 4. P. 386–393. DOI: 10.1134/S0001433818040205
- Bondur V.G., Ivanov V.A., Vorobiev V.E., Dulov V.A., Dolotov V.V., Zamshin V.V., Kondratiev S.I., Lee M.E., Malinovsky V.V.* Ground to Space Monitoring of Anthropogenic Impacts on the Coastal Zone of the Crimean Peninsula // *Physical Oceanography*, [e-journal]. 2020. b. 27(1). P. 387–396. doi:10.22449/1573-160X-2020-1-387-396
- Bondur V.G., Keeler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I.* Monitoring Zagryazneniy Pribrezhnykh Akvatoriy s Ispol'zovaniem Mnogospektralnykh Sputnikovykh Izobrazheniy Vysokogo Prostranstvennogo Razresheniya [Monitoring of the pollution of the ocean coastal water areas using space multispectral high resolution imagery] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2006a. № 6. P. 42–49 (In Russian).
- Bondur V.G., Murynin A.B.* Methods for retrieval of sea wave spectra from aerospace image spectra // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 877–887. DOI: 10.1134/S0001433816090085
- Bondur V.G., Sabinin K.D., Grebenyuk Yu.V.* Characteristics of inertial oscillations according to the experimental measurements of currents on the Russian shelf of the Black Sea. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 1. P. 120–126. DOI: 10.1134/S0001433816050030
- Bondur V.G., Savin A.I.* Design a system to monitor the environment for purposes relating to ecology and natural-resources // *Soviet J. of Remote Sensing*. 1993. V. 10. № 6. P. 1078–1093.
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statisticheskie kharakteristiki elementov lineynoy geometrii pennykh struktur na poverkhnosti morya po dannym opticheskogo zondirovaniya [Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface] // *Okeanologiya*. 1982. V. 22. № 3. P. 372–379 (In Russian).
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs for aerospace imagery processing and classification] // *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography*. 2001. № 3. P. 118–143.
- Bondur V.G., Tsidilina M.* Features of Formation of Remote Sensing and Sea truth Databases for The Monitoring of Anthropogenic Impact on Ecosystems of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. P. 192–195.
- Bondur V.G., Vorobiev V.E., Grebenyuk Y.V., Sabinin K.D., Serebryany A.N.* Study of fields of currents and pollution of the coastal waters on the Gelendzhik Shelf of the Black Sea with space data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. V. 49. № 9. P. 886–896. DOI: 10.1134/S000143381309003X
- Bondur V.G., Vorobiev V.E., Zamshin V.V., Serebryany A.N., Latushkin A.A., Li M.E., Martynov O.V., Hurchak A.P., Grinchenko D.V.* Monitoring anthropogenic impact on some coastal water areas of the Black Sea using multispectral satellite imagery // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. № 9. P. 1008–1022. DOI: 10.1134/S0001433818090098
- Bondur V.G., Zamshin V.V.* Comprehensive Ground-Space Monitoring of Anthropogenic Impact on Russian Black Sea Coastal Water Areas, in book K.V. Anisimov et al. (eds.), *Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development – 2016”*, 2018. P. 625–637. DOI: 10.1007/978-3-319-62870-7
- Bondur V.G., Zamshin V.V., Zamshina A.Sh., Vorobiev V.E.* Registratsiya iz kosmosa osobennosti glubinnnykh stokov v pribrezhnye akvatorii pri avariakh sbrosovogo kollektora // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2020 a. № 2. P. 3–14. DOI: 10.31857/S0205961420020025
- Bondur V.G., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V.* Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // *Oceanology*. 2006b. V. 46. № 6. P. 757–771. DOI: 10.1134/S0001437006060014
- Bondur V.G., Zubkov E.V.* Showing up the small-scale ocean upper layer optical inhomogeneities by the multispectral space images with the high surface resolution. Part 1. The canals and channels drainage effects at the coastal zone. // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2005. № 4. P. 54–61 (In Russian).
- Ermakov S.A., Sergievskaya I.A., Gushchin L.A.* Plenki na morskoy poverkhnosti i ih distantcionnoe zondirovanie (Remote sensing of films of marine surface) // *Sovremennye problemy distantcionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. 2006. V. 3. № 2. P. 86–98 (In Russian).
- Israel Yu.A., Tsyban A.V.* Antropogennaia ekologiya okeana (Anthropogenic ocean ecology) Moscow: Flinta Nauka, 2009. 520 p. (In Russian).
- Ivanov A., Zatyagalova V.* A GIS approach to mapping of oil spills in the marine environment // *International J. of Remote Sensing*. 2008. V.29. № 21. P. 6297–6313.
- Ivanov A.Yu., Matrosova E.R., Kucheiko A.Yu., Filimonova N.A., Evtushenko N.V., Terleeva N.V., Libina N.V.* Poisk i obnaruzhenie estestvennykh nefteproyavleniy v moryakh Rossii po dannym kosmicheskoy radiolokatsionnoy s"emki [Natural oil seeps in the seas of the Russian Federation studied using the data of synthetic aperture radars] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2020. № 5 (in this issue).
- Ivanov V.A., Dulov V.A.* Monitoring pribrezhnoi zony na Chernomorskom eksperimentalnom podsputnikovom poligone [Monitoring of the coastal zone at the Black Sea Experimental Sea Truth Test Area] / eds. V.A. Ivanova i V.A. Dulova. Sevastopol, MGI NAN Ukrainy, 2014, 527 p. (In Russian).
- Ivanov V.A., Sovga E.E., Katunina E.V.* Ocenki antropogennykh vozdeystviy na ekosistemu akvatorii Geracleiskogo poluostrova v rayone raspolozheniia glubinnnykh stokov [Assessment of anthropogenic impacts on the ecosystem of the Heracleian Peninsula in the area of deep outflows] // *Protsesty v geosredakh*. № 5 (1) 2016. P. 62–68 (In Russian).

- Keeler R., Bondur V., Vithanage D.* Sea truth measurements for remote sensing of littoral water // *Sea Technology*, April, 2004. P. 53–58.
- Kostianoy A.G.* Sputnykovy monitoring parametrov klimaticheskoi sistemy Zemli – Okean [Satellite monitoring of the parameters of the Earth's climate system. The Ocean] // *Fundamentalnaia i prikladnaia klimatologiya*, 2017. P. 57–85 (In Russian).
- Lavrova O.Iu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mitiagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A.* Kompleksnyi sputnykovy monitoring morey Rossii [Integrated satellite monitoring of the seas of Russia] Moscow: IKI RAN Publ. 2011. 480 p. (In Russian).
- Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // *Ocean Science*. 2018. V. 14. № 1. P. 87–103. DOI: 10.5194/os-14-87-2018
- Savin A.I., Bondur V.G.* Scientific fundamentals of creation and diversification of the global aerospace systems // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2000. V. 13. № 1. P. 38–53.
- Toba J.* Local balance in the air-sea boundary process. // *Oceanogr. Soc. Japan*. 1973. V. 29. P. 209–225.
- Zaitsev Iu.P.* Vvedenie v ekologiiu Chernogo moria [Introduction to the ecology of the Black Sea] // Odessa: Even, 2006. 224 p.