

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

РЕГИСТРАЦИЯ ИЗ КОСМОСА ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛУБИННЫХ СТОКОВ В ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ ПРИ АВАРИЯХ СБРОСОВОГО КОЛЛЕКТОРА

© 2020 г. В. Г. Бондур^а, *, В. В. Замшин^а, А. Ш. Замшина^а, В. Е. Воробьев^а

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

*e-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 20.12.2019 г.

Приводятся результаты комплексных исследований антропогенных воздействий, вызванных глубинными стоками, на прибрежную акваторию вблизи г. Севастополь с использованием экспериментального образца системы наземно-космического мониторинга. На основании анализа космических данных оценен характер антропогенного загрязнения исследуемой акватории, связанного с аварийным разрывом коллектора сбросового устройства, имеющего проектную производительность 43800 тыс. м³/год (в период времени с 2014 по 2018 гг.), а также после ликвидации аварии в 2019 г. Выявлены особенности оптических аномалий, связанных с поступлением сбрасываемых вод в морскую среду в области разрыва коллектора, проявляющихся в изменениях нормированных индексов цвета морской поверхности, регистрируемых по космическим многоспектральным изображениям различного разрешения, составляющих величины от 1.25 до 1.45 при фоновых значениях ~1. После устранения разрыва коллектора в 2019 г. значения этих индексов были близки к 1. Зона, где проявлялись интенсивные загрязнения, имеет длину ~3.0 км и ширину ~0.8 км с центром в месте разрыва коллектора. С использованием данных дистанционного зондирования продемонстрирован положительный эффект, связанный с проведением восстановительных работ, рекомендованных по результатам выполненного космического мониторинга.

Ключевые слова: прибрежные акватории, дистанционное зондирование Земли, многоспектральная съемка, космический мониторинг, загрязнение морской среды, антропогенные воздействия, глубинные стоки

DOI: 10.31857/S0205961420020025

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных источников антропогенных загрязнений прибрежных акваторий является сброс отработанных хозяйственных и бытовых вод непосредственно в море через подводные коллекторы (Израэль, Цыбань, 2009; Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Bondur, 2005, 2011; Океанология на страте XXI века, 2008). При этом техническое состояние этих коллекторов зачастую не соответствует требованиям экологической безопасности, что приводит к негативным последствиям. Такая проблема свойственна и прибрежным акваториям Черного моря, имеющих важное социальное, рекреационное и хозяйственное значение (Иванов, Дулов, 2014; Бондур и др., 2012, 2017, 2018а, б, 2020).

Наиболее эффективным подходом к мониторингу антропогенных воздействий на прибрежные акватории является применение методов и средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сочетании с подспутниковыми измерениями, последующей обработкой получаемых данных и разработкой комплекса природоохранных

мероприятий (Бондур, 2004, 2010; Бондур и др., 2006б, 2007, 2012, 2017, 2018а,б, 2020; Бедрицкий и др., 2009; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Tsidilina, 2005).

Дистанционное выявление антропогенных загрязнений, вызванных поступлением в морскую среду глубинных стоков, осуществляется с использованием различных типов космических данных, в том числе оптических панхроматических и многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения, оптических много- и гиперспектральных изображений среднего пространственного разрешения, а также радиолокационных изображений (Бондур, 2004; Бондур и др., 2006б, 2007, 2012, 2017; Бондур, Зубков, 2005; Бондур, Гребенюк, 2001; Кучейко и др., 2019; Bondur, 2005, 2011; Bondur, Zamshin, 2018). При этом применяются различные методы обработки спутниковых данных, включая методы исследования индексов цвета, метод дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, методы статистической обработки и классификации изображений, а также методы моделирования (Бондур, 2004; Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур, Старченков, 2001; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др.,

2006а, б, 2007, 2009а,б, 2012, 2017, 2018б; Bondur, 2005, 2011). Для решения данной проблемы осуществляются также подспутниковые измерения гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и других значимых характеристик, а также метеорологических параметров в исследуемых акваториях (Бондур и др., 2006б, 2007, 2008, 2009а,б, 2010, 2012, 2017, 2018а; Бондур, Шарков, 1982; Bondur, Tsidilina, 2005; Bondur, Zamshin, 2018).

В настоящей работе изложены особенности проявления глубинных стоков в прибрежную акваторию Черного моря в районе расположения коллектора сбросового устройства главной очистительной системы г. Севастополь. Исследования проводились в период времени с 2014 по 2019 гг. до и после устранения разрыва коллектора сбросового устройства. Для этого использовались результаты обработки космических оптических многоспектральных изображений различного разрешения, полученных в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитных волн с привлечением подспутниковых данных.

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОЙ АКВАТОРИИ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ МОНИТОРИНГА

Наземно-космический мониторинг проводился в прибрежной акватории Южного берега Крыма вблизи г. Севастополь к югу от Гераклейского полуострова. В данной прибрежной акватории расположены несколько заглубленных коллекторов сбросовых устройств, через которые очищенные воды поступают в морскую среду (см. рис. 1, а). Главные очистные сооружения (ОС № 1) расположены в южной части г. Севастополь (см. рис. 1, а) и имеют проектную пропускную способность 43800 тыс. м³/год сбрасываемых очищенных вод.

Проведенные ранее исследования позволили выявить наличие повреждения коллектора сбросового устройства этой очистной системы, имеющего общую длину свыше 3-х километров (Бондур и др., 2017, 2018а, 2020; Bondur, Zamshin, 2018). Разрыв коллектора располагался приблизительно в 700 м от берега. Проведенный космический мониторинг показал, что при определенных гидрологических условиях глубинные стоки всплывали в районе разрыва коллектора в приповерхностный слой и на морскую поверхность (см. рис. 1, б), распространялись вдоль береговой линии, образуя плюм загрязнений (Бондур и др., 2017, 2018а, б, 2020; Иванов, Дулов, 2014; Bondur, Zamshin, 2018).

Космический мониторинг исследуемой акватории выполнялся в период времени с 2014 по 2019 гг. с использованием экспериментального образца региональной системы наземно-космического мониторинга, который обеспечивал возможность проведения комплексных измерений значимых параметров водной среды и их анома-

лий, связанных с глубинными стоками (Bondur, Zamshin, 2018). В настоящее время ведется расширение возможностей применяемого экспериментального образца системы мониторинга для обеспечения возможности захвата больших площадей акваторий и автоматизированного выделения других типов загрязнений, прежде всего, нефтяных (Бондур, 2004, 2010).

Глубинные стоки, поступавшие из разрыва коллектора, регистрировались на основании анализа спектральных характеристик, которые определялись по оптическим космическим многоспектральным изображениям, получаемым со спутников типа LANDSAT, РЕСУРС-П, КАНОПУС-В, SENTINEL-2, GEOEYE, WORLDVIEW. В ходе мониторинга проводился анализ спектральных яркостей морской поверхности, регистрируемых в R (красном), G (зеленом), B (голубом) и NIR (ближнем-ИК) каналах космической многоспектральной аппаратуры, а также с использованием результатов подспутниковых измерений (Бондур и др., 2017, 2018а, 2020; Bondur, Zamshin, 2018).

Для исследования спектральных характеристик использовались подходы к обработке много- и гиперспектральных изображений, развитые в работах (Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др. 2006б, 2017), предполагающие формирование и анализ “индексов цвета” по изображениям, полученным в различных спектральных каналах и прошедшим радиометрическую калибровку, а также атмосферную коррекцию. На основе этих подходов был разработан метод анализа спектральных характеристик космических многоспектральных изображений для выявления оптических аномалий, связанных с выпусками сточных вод, адаптированный к особенностям прибрежных акваторий Черного моря, который подробно рассмотрен в работе (Бондур и др., 2017). В частности, было показано, что наиболее информативными при мониторинге глубинных стоков по космическим многоспектральным изображениям высокого и среднего разрешения являются:

$$- \text{ индекс цвета } I_{GB} = G \times B, \quad (1)$$

$$- \text{ индекс цвета } I_{GNIR} = G/NIR, \quad (2)$$

где G, B, NIR – спектральные яркости в зеленом, синем и ближнем инфракрасном каналах съемочной аппаратуры соответственно.

Значения этих индексов зависят от условий освещения в моменты съемки, от типа используемой аппаратуры, от калибровочных характеристик и др. В связи с этим для обеспечения сопоставительного анализа распределений индексов цвета, полученных различной съемочной аппаратурой в различных условиях, выполнялась их нормировка на уровень значений, осредненный в пределах исследуемого участка акватории.

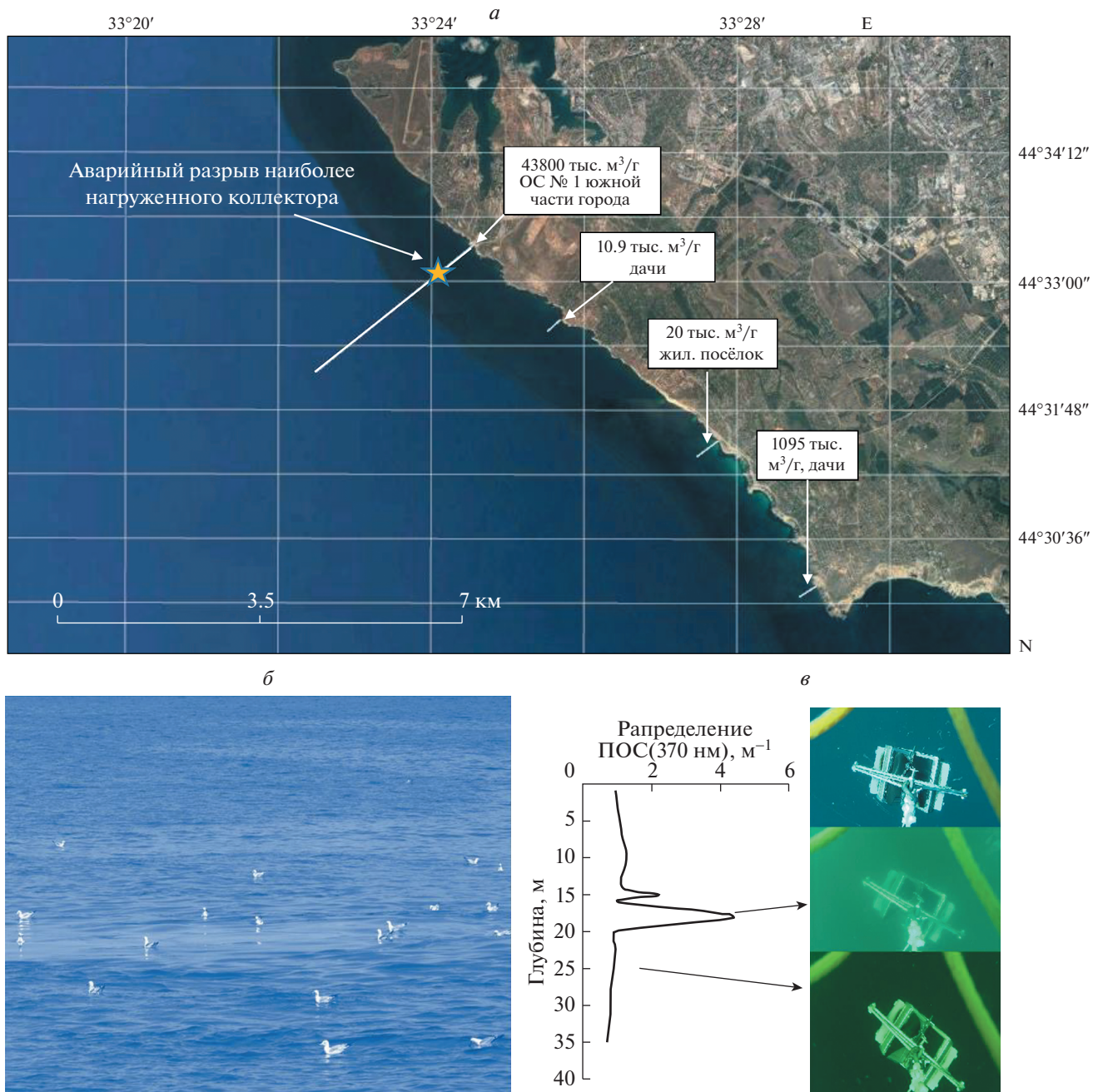


Рис. 1. *a* – карта исследуемой акватории с указанием расположения коллекторов сбросовых устройств очистных сооружений; *б* – снимок, иллюстрирующий выход глубинных стоков на морскую поверхность в районе аварийного разрыва коллектора; *в* – пример вертикального профиля показателя ослабления света (ПОС) на длине волны 370 нм, иллюстрирующий присутствие плюма глубинных стоков в районе разрыва коллектора, и кадры видеосъемки на различных глубинах (Бондур и др. 2017, 2020).

С учетом этого формулы для нормированных индексов имеют вид:

– нормированный индекс цвета

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

– нормированный индекс цвета

$$I_{GNIRnorm} = \frac{G_i / NIR_i}{\sum_{j=1}^n (G_j / NIR_j) / n}, \quad (4)$$

где G_i , B_i , NIR_i – спектральная яркость в зеленом, синем и ближнем-ИК каналах съемочной аппара-

ратуры соответственно для текущих пикселей (i) обрабатываемых многоспектральных изображений; n – количество пикселей изображений фонового участка акватории (j), используемого для нормировки.

Индекс I_{GBnorm} является наиболее универсальным, так как может быть вычислен по комплексу каналов многоспектрального изображения, полученного в видимой области спектра (без привлечения ИК-каналов). Это делает возможным его использование для обработки, в том числе, и “квиклуков” космических изображений.

Дистанционный мониторинг глубинных стоков в прибрежные акватории Черного моря с использованием космических оптических многоспектральных изображений сопровождался проведением большого количества разнородных подспутниковых измерений, позволяющих регистрировать плюм сбрасываемых вод. Например, на вертикальных профилях показателя ослабления света (ПОС), измеренных на различных длинах волн (см. рис. 1, *в*), плюм глубинных стоков выделялся, как слой повышенной мутности, где ПОС для всех оптических каналов возрастал в 2–3 и более раз (Бондур и др., 2020). Видеосъемка, выполненная с помощью подводной камеры, погружаемой вместе с зондирующим прибором, явно демонстрировала мутные воды внутри слоя плюма (см. рис. 1, *в*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Плюм глубинных стоков, поступавших из разрыва коллектора

С использованием описанной выше методики проводился анализ оптических космических многоспектральных изображений, полученных со спутников типа LANDSAT, РЕСУРС-П, КАНОПУС-В, SENTINEL-2, GEOEYE, WORLDVIEW. На рис. 2, *а, б* приведены типичные примеры проявлений плюма глубинных стоков, выявленные по многоспектральным космическим изображениям, полученным группировкой спутников Digital Globe/Maxar, взятым с геопортала Google Earth до ремонта коллектора сбросового устройства главных очистных сооружений (ОС № 1) г. Севастополь. Изображения представлены после синтеза в натуральных цветах. Анализ рис. 2, *а, б* показывает, что в зоне разрыва коллектора на расстоянии около 700 м от берега отчетливо проявляются плюмы глубинных стоков, причем разных направлений в зависимости от характера течений. Такие течения в этой акватории обычно распространяются вдоль берега в северо-западном или юго-восточном направлениях, что подтверждается результатами работы (Иванов, Дулов, 2014; Бондур и др., 2017).

На снимках, приведенных на рис. 2, плюмы хорошо дешифрируются без специальных методов обработки в связи с благоприятными гидро-

метеорологическими условиями и хорошим качеством используемых космических изображений высокого разрешения.

Результаты подспутниковых экспериментов показывают, что слой загрязненных вод, формирующийся в результате поступления стоков из разрыва коллектора, как правило, располагался в области пикноклина. Локализация слоев сточных вод в области пикноклина наблюдается как в натуральных, так и в модельных экспериментах (Бондур и др., 2018а, б). Таким образом, в случаях, когда пикноклин располагается достаточно близко к поверхности моря, плюм сточных вод, может отчетливо наблюдаться в оптическом диапазоне из космоса (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005). Колебания пикноклина приводят к генерации внутренних волн и деформациям спектров поверхностного волнения (Бондур, Гребенюк, 2001; Бондур и др., 2009), обнаруживаемых по космическим изображениям (Бондур, 2004; Bondur, 2005, 2011).

В общем случае, для уверенного дешифрирования плюмов глубинных стоков требуется применение специальных методов обработки изображений, в том числе основанных на анализе индексов цвета (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2006, 2017). Это связано также с необходимостью при осуществлении регулярного космического мониторинга использовать многоспектральные изображения, как высокого, так и среднего пространственного разрешения, полученные при различных условиях с помощью приборов, имеющих различные динамические диапазоны и чувствительность.

На рис. 3 в качестве примера приведены результаты обобщения исследуемых проявлений плюмов глубинных стоков из разрыва коллектора, выделенных по космическим оптическим многоспектральным изображениям различных типов, полученным в период с 2014 по 2016 гг., до устранения дефекта коллектора. На этом рисунке приведены также результаты подспутниковых исследований. На рис. 3, *а* приведена карта-схема выделенных по космическим оптическим изображениям зон интенсивного проявления плюма (приведено 13 случаев), наложенная на карту содержания фосфатов в приповерхностном слое моря, сформированную по данным подспутниковых гидрохимических измерений, выполненных 10 сентября 2015 года. На рис. 3, *б* приведены примеры площадных распределений различных параметров водной среды (температуры, солености, показателя ослабления света, содержания фосфатов), построенных по результатам обработки данных контактных измерений, а также карта исследуемого региона с указанием мест положения измерительных станций (рис. 3, *в*) и снимок научно-исследовательского судна, с которого были выполнены измерения (рис. 3, *г*). В процессе мониторинга измерялись также векторы

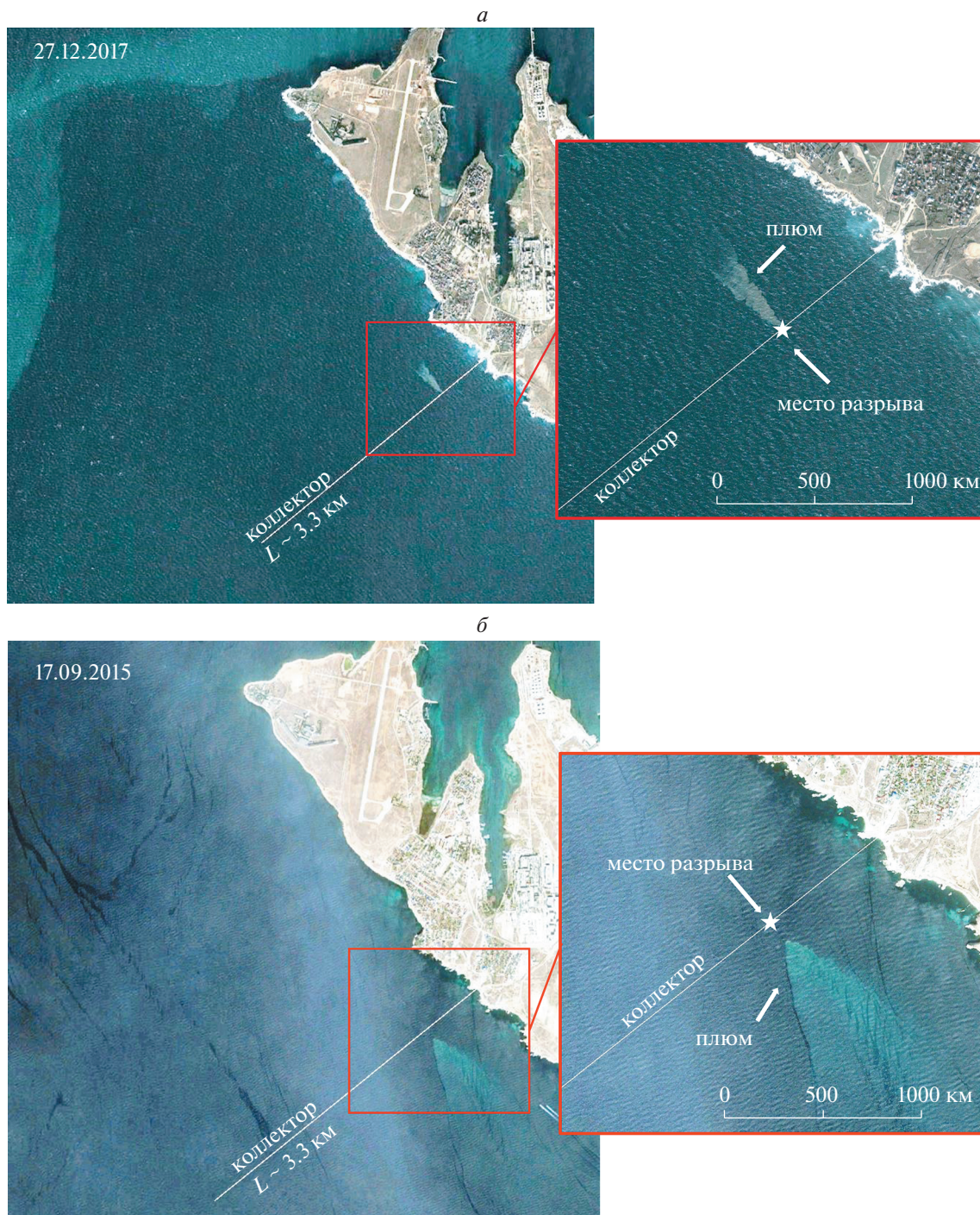


Рис. 2. Типичные формы проявлений плюма сточных вод на многоспектральных космических изображениях в зоне разрыва сбросового коллектора до его ремонта (синтез в натуральных цветах): *a* – при распространении плюма вдоль берега на северо-запад; *б* – при распространении плюма вдоль берега на юго-восток. Место разрыва коллектора показано звездочкой.

скорости течений, характеристики внутренних волн, характеристики турбулентности, гидрохимические и микробиологические характеристики вод (Бондур и др., 2018а, б, 2020).

Анализ рис. 3 показывает, что зоны распространения загрязнений, связанных с проявлениями глубинных стоков в области разрыва коллектора сбросового устройства у г. Севастополь, вы-

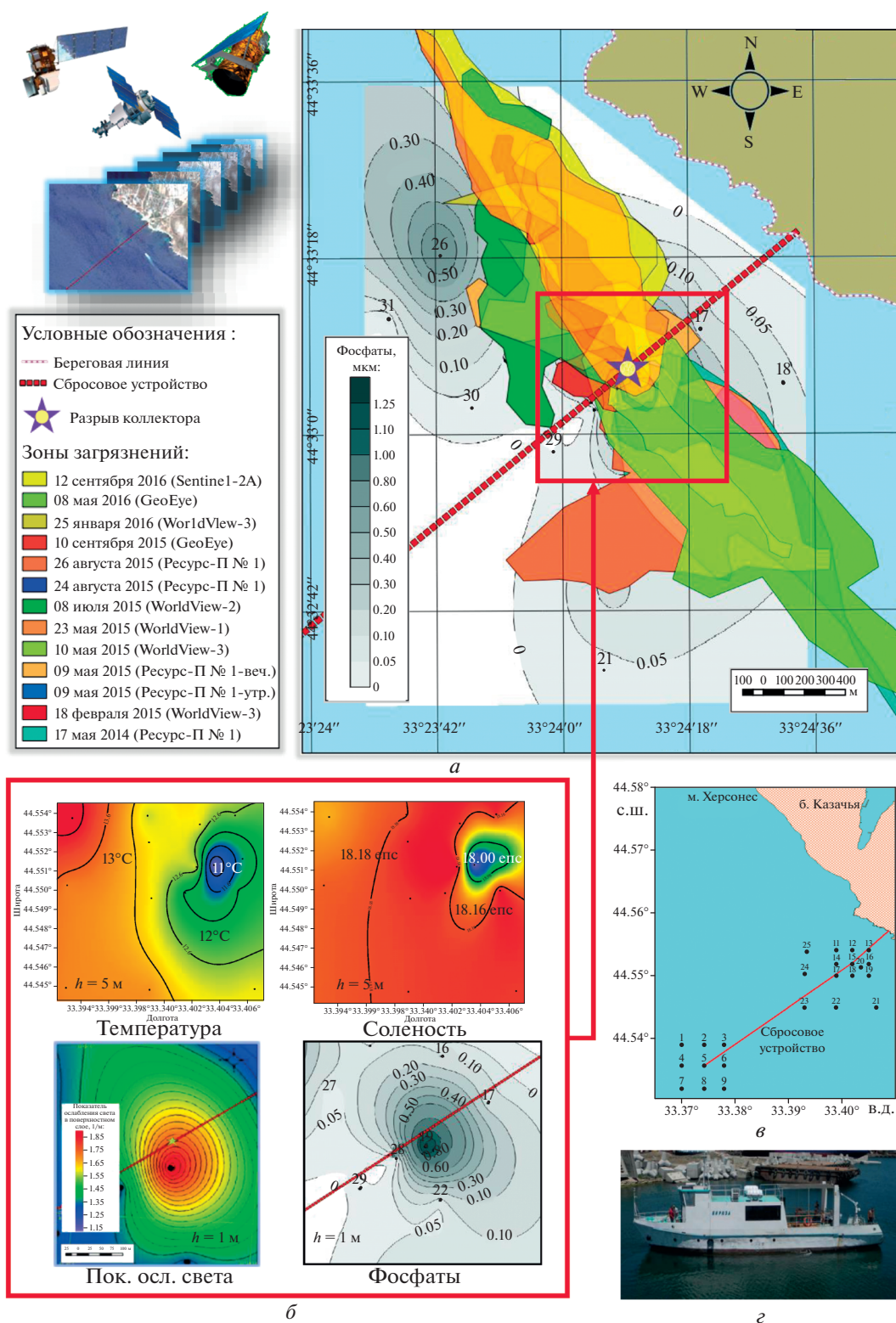


Рис. 3. Примеры результатов выделения плума сточных вод в прибрежной акватории у г. Севастополь по наземно-космическим данным, полученным в период с 2014 по 2016 гг., до ремонта разрыва коллектора: *а* – карта-схема выделенных по космическим оптическим изображениям зон интенсивного проявления плума (приведено 13 случаев), наложенная на карту содержания фосфатов в приповерхностном слое моря, сформированную по данным подспутниковых гидрохимических измерений, выполненных 10 сентября 2015 года; *б* – примеры распределений различных параметров водной среды (температуры, солёности, показателя ослабления света, содержания фосфатов), построенных по результатам обработки данных контактных измерений; *в* – карта исследуемого региона с указанием измерительных станций; *г* – снимок судна, с которого производились измерения.

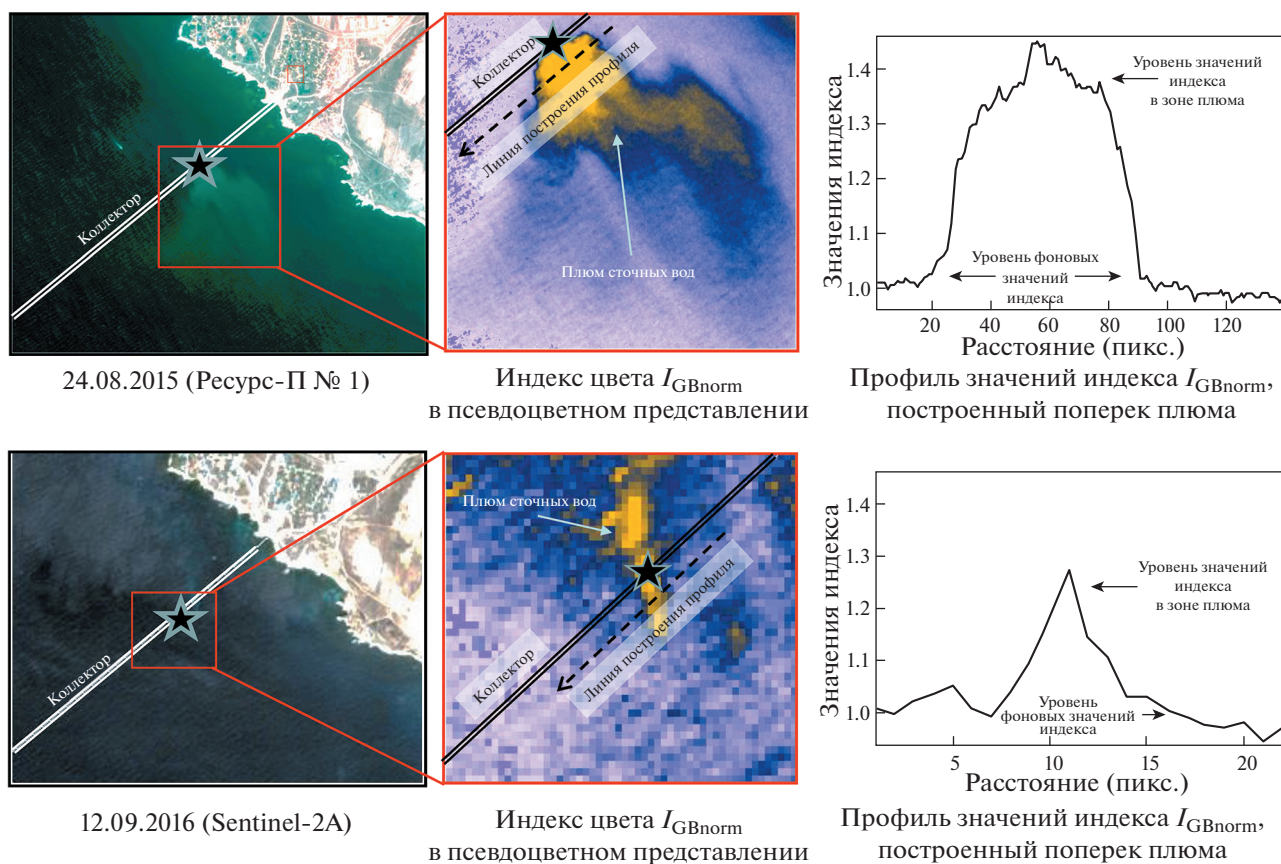


Рис. 4. Примеры количественной оценки особенностей проявления плюма сточных вод в районе аварийного разрыва коллектора у г. Севастополь, регистрируемого из космоса по результатам обработки космических оптических многоспектральных изображений с применением индекса цвета I_{GBnorm} .

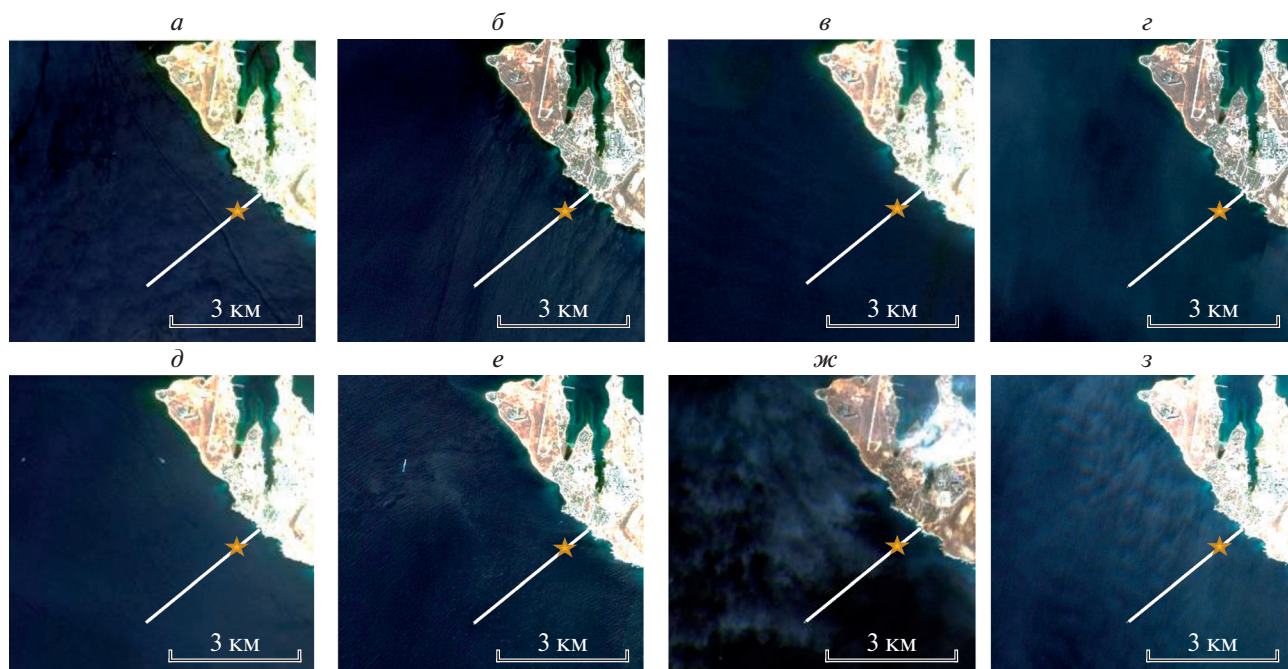


Рис. 5. Примеры космических оптических многоспектральных изображений среднего разрешения, полученных со спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B соответственно в августе (а, б), сентябре (в, г), октябре (д, е) и ноябре (ж, з) 2019 г. после ремонта коллектора (коллектор показан белой линией, место устраненного разрыва показано звездочкой).

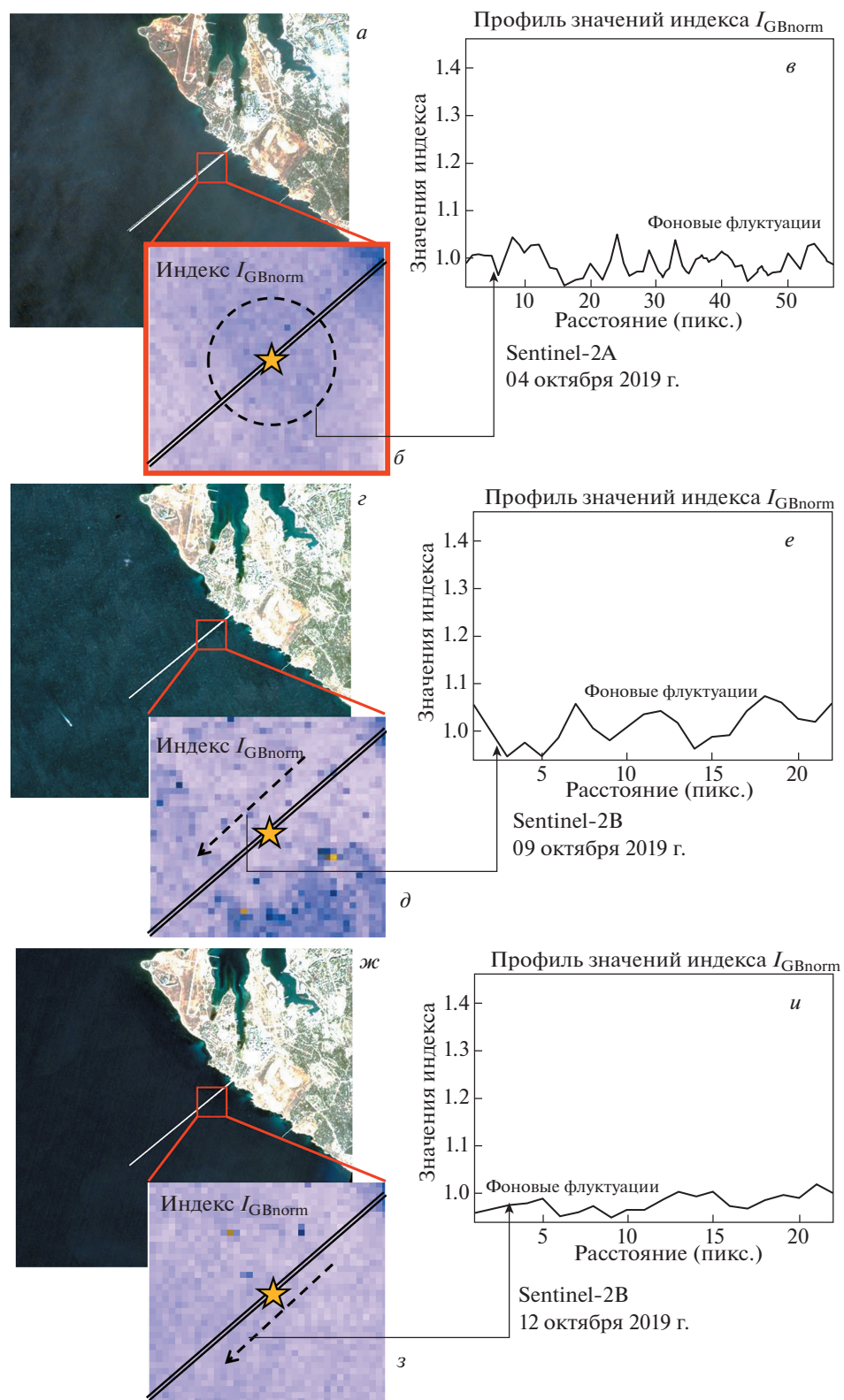


Рис. 6. Пример анализа спектральных свойств морской поверхности в зоне аварии после ее устранения: *a, г, ж* – космические оптические многоспектральные изображения, полученные 4 октября со спутника Sentinel-2A, 9 и 12 октября со спутника Sentinel-2B в 2019 г.; *б, д, з* – распределения индекса I_{GBnorm} в зоне типичного присутствия плюма для изображений, приведенных на рис. 6, *a, г, ж*; *в, е, и* – профили значений индекса I_{GBnorm} , построенные в местах наиболее вероятного проявления плюма по пунктирным линиям, показанным на рис. 6, *б, д, з*.

деленные на основании результатов комплексной обработки спутниковых и контактных данных, имеют, как правило, вытянутую форму и простираются вдоль берега на расстояния до 1.5 км как в юго-восточном, так и в северо-западном направлениях от места разрыва. Общая протяженность выделенной зоны, в пределах которой проявляются загрязнения, достигает в длину ~3 км, а в ширину ~0.8 км, с центром в месте разрыва коллектора. Расстояние от берега до места с наиболее частой встречаемостью загрязнений составляет ~0.7 км.

На рис. 4 представлены примеры проявления плюма сточных вод в районе аварийного разрыва коллектора у г. Севастополь, регистрируемого из космоса по результатам обработки космических оптических многоспектральных изображений с применением индекса цвета I_{GBnorm} , вычисляемого по формуле (3). Представленные примеры получены на основании обработки многоспектрального изображения высокого пространственного разрешения (спутник Ресурс-П № 1, размер пикселя ~2.5 м) и обработки изображения среднего разрешения (спутник Sentinel-2A, размер пикселя – 10.0 м). В левой части рисунка приведены фрагменты исходных космических изображений в натуральных цветах, в центре – пространственные распределения нормированного индекса цвета I_{GBnorm} . Справа на рис. 4 приведены профили значений этого индекса (выполненные в псевдоцветном представлении), построенные поперек направления распространения плюмов.

В работах (Бондур, 2004; Бондур, Зубков, 2005; Бондур и др., 2012, 2017) было показано, что на основании анализа таких информационных продуктов, как приведены на рис. 4, дешифровщики могут быть с высокой степенью достоверности ооконтурены зоны проявления оптических аномалий, обусловленных присутствием загрязнений в водной среде исследуемой акватории. Как видно из правой части рисунка, уровень значений индекса цвета I_{GBnorm} вблизи области разрыва коллектора выше уровня фоновых значений в 1.25–1.45 раза, что может уверенно интерпретироваться как оптическая аномалия, обусловленная всплыванием сточных вод в приповерхностные слои моря и непосредственно на морскую поверхность. Аномалии имеют компактную форму и их положение приурочено к зоне разрыва коллектора.

Аналогичные результаты были получены и в 2017–2018 гг. до ремонта коллектора сбросового устройства.

Эффект после ремонта коллектора

Результаты предварительного наземно-космического мониторинга, проведенного до ремонта коллектора, позволили предложить рекоменда-

ции по снижению антропогенной нагрузки на исследуемую акваторию, одной из которых являлось предложение по устранению разрыва коллектора сбросового устройства (Бондур, Zamshin, 2018). В соответствии с этой рекомендацией в августе 2019 г. был проведен ремонт поврежденного коллектора.

После ремонта коллектора за период времени с августа по ноябрь 2019 г. было проанализировано 39 безоблачных космических оптических изображений, полученных со спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B. Анализ этих космических изображений показал, что с момента завершения ремонтных работ по ликвидации аварийного разрыва коллектора характер антропогенных воздействий на исследуемую акваторию существенно изменился. На рис. 5 в качестве примеров представлено 8 фрагментов многоспектральных космических изображений, полученных со спутников Landsat-8 и Sentinel-2A/B в августе–ноябре 2019 г. На представленных фрагментах характерные оптические аномалии, локализованные вблизи места аварийного разрыва, не наблюдаются (см. рис. 5). Это свидетельствует об эффективности выполненных природоохранных мероприятий.

На рис. 6 приведен пример результатов анализа спектральных свойств морской поверхности в районе разрыва коллектора после его ремонта. На этом рисунке представлены типичные профили значений нормированного индекса цвета I_{GBnorm} в местах наиболее вероятного проявления плюма. В случае наличия загрязнений в поле значений индекса наблюдались бы явные положительные выбросы (см. рис. 4), однако в данном случае (рис. 6) их нет. Как видно из рис. 6, локальные области с повышенными значениями индекса I_{GBnorm} в районе коллектора отсутствуют, следовательно, проявления плюма сточных вод отсутствуют. Типичные значения этого индекса после устранения разрыва коллектора составляли $0.95 < I_{GBnorm} < 1.05$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием экспериментального образца региональной системы наземно-космического мониторинга прибрежных акваторий обнаружены из космоса и подтверждены по данным контактных измерений зоны антропогенных воздействий, обусловленные всплыванием глубинных стоков, поступавших из аварийного разрыва сбросового коллектора вблизи г. Севастополь (к юго-востоку от Гераклейского полуострова).

Показано, что плюмы глубинных стоков, достигающие поверхностных и подповерхностных слоев, могут регистрироваться с использованием результатов обработки данных, получаемых оптическими многоспектральными съемочными системами спутников типа Ресурс-П, Канопус-В, Landsat, Sentinel-2 и др. Выявлены особенности

оптических аномалий, связанных с поступлением сбрасываемых вод в морскую среду в области разрыва коллектора на расстоянии 700 м от берега, проявляющихся в изменениях нормированных индексов цвета, регистрируемых по космическим многоспектральным изображениям различного разрешения. Значения этих индексов в зонах оптических аномалий составляют величины $1.25 < I_{GBnorm} < 1.45$, при фоновых значениях ~ 1 . Зона, где проявлялись интенсивные загрязнения, имеет длину ~ 3.0 км и ширину ~ 0.8 км с центром в месте разрыва коллектора.

С использованием данных дистанционного зондирования выявлен положительный эффект от проведения ремонтно-восстановительных работ, в результате которых ликвидирован разрыв коллектора сбросового устройства очистных сооружений южной части г. Севастополь. После устранения разрыва коллектора в августе 2019 г. значения нормированных индексов цвета, вычисленных по многоспектральным космическим изображениям в зоне, где ранее был разрыв коллектора, составляли величины $0.95 < I_{GBnorm} < 1.05$, что соответствовало фоновым значениям. При этом не было ни одного случая регистрации плюма на основании 39 наблюдений, выполненных с августа по ноябрь 2019 г. после ремонта аварийного разрыва коллектора, что свидетельствует о явном положительном эффекте от природоохранных мероприятий, рекомендованных по результатам выполнения предыдущей фазы исследования.

Рассмотренный в настоящей статье участок прибрежной акватории не является единственным в российском секторе Черного моря, характеризующимся неисправным состоянием сбросовых коллекторов (см., например, (Бондур и др., 2012, 2017)). Мониторинг прибрежных акваторий в районах интенсивных антропогенных воздействий, связанных, в том числе, с глубинными стоками, должен продолжаться.

В настоящее время ведется расширение возможностей применяемого экспериментального образца системы мониторинга для обеспечения возможности захвата больших площадей акваторий и автоматизированного выделения других типов загрязнений, прежде всего, нефтяных.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполняется при поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60419X0223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бедрицкий А.И., Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Лаврова О.Ю., Островский А.Г. Космический мониторинг загрязнения российского сектора Азово-Черноморского бассейна в 2008 г. // Метеорология и гидрология. 2009. № 3. С. 5–19.

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии / В кн. “Новые идеи в океанологии”. М.: Наука. Т. 1. Физика. Химия. Биология, 2004. С. 55–117.

Бондур В.Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазовых территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.

Бондур В.Г., Иванов В.А., Дулов В.А., Горячкин Ю.Н., Замшин В.В., Кондратьев С.И., Ли М.Е., Муханов В.С., Совага Е.Е., Чухарев А.М. Структура и происхождение подводного плюма вблизи Севастополя // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018а. Т. 11. № 4. С. 42–54.

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. 2018б. Т. 54. № 4. С. 453–461.

<https://doi.org/10.1134/S0002351518040053>

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. 2012. № 4. С. 3–12.

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. 2017. № 6. С. 3–22.

<https://doi.org/10.7868/S020596141706001X>

Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В., Казаков В.И., Сереев Д.А., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Ч. 1. Механизм генерации внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009а. Т. 45. №6. С. 833–845.

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. 2009б. 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., Зубков Е.В. Выделение мелкомасштабных неоднородностей оптических характеристик верхнего слоя океана по многозональным спутниковым изображениям высокого разрешения. Ч. 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. № 2.

- 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., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В., Долотов Ю.С., Здороненков 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.
- 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.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. М.: Флинта Наука, 2009. 520 с.
- Кучейко А., Иванов А., Григорьев Н., Ушков Д., Терлеева Н.* Канализационные выбросы в прибрежной зоне Черного моря: наблюдение и дистанционный контроль из космоса. Экология и промышленность России. 2019; 23(12): 54–60.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-54-60>
- Океанология на старте XXI века / отв. ред. А.Л. Верещака; Ин-т океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: Наука, 2008. 566 с.*
- 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.* 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.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.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7>

Registering From Space the Features of Deep Wastewater Outfalls into Coastal Water Areas Due to Discharge Collector Breaks

V. G. Bondur¹, V. V. Zamshin¹, A. Sh. Zamshina¹, and V. E. Vorobyev¹

¹AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

Here we present the results from the comprehensive study of anthropogenic impacts on coastal water areas caused by deep wastewater discharges near the city of Sevastopol obtained using the experimental model of the ground to space monitoring system. The character of anthropogenic pollution of the studied water area (between 2014 and 2019) before the recovery of the 43 800 thous. m³/year nominal capacity wastewater discharge collector break (in 2019) and after it has been estimated using satellite data. We have revealed the features of optical anomalies due to wastewater discharges into the marine environment in the vicinity of the collector break manifested themselves in changes in marine surface color indices being equal to 1.25 to 1.45 against the background values (~1). After the collector recovery these index values were close to 1. The total area where pollution appeared was ~3.0 km long and ~0.8 km wide, and its center was at the pipeline break. Using satellite information, a positive effect has been demonstrated that was due to the repair and recovery of the wastewater discharge infrastructure at sea, recommended as a result of the previous monitoring stage.

Keywords: coastal water areas, remote sensing, multispectral imaging, satellite monitoring, sea pollution, anthropogenic impacts, deep wastewater discharges

REFERENCES

- Bedritskii A.I., Asmus V.V., Krovotyntsev V.A., Lavrova O.Yu., Ostrovskii A.G.* Space monitoring of pollution of the Russian sector of the Azov-Black Sea basin in 2008 // Russian Meteorology and Hydrology. 2009. Т. 34. № 3. С. 137–147.
- 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.* Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. ISRSE, 2005. 7 p.
- 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.* 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., Filatov N.N., Grebenyuk Yu.V., Dolotov Yu.S., Zdorovenov 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., 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*. 2009a. 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*. 2009b. 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., Dulov V.A., Goryachkin Yu.N., Zamshin V.V., Kondratiev S.I., Lee M.E., Mukhanov V.S., Sovga E.E., Chukharev A.M.* Structure and origin of the underwater plume near Sevastopol // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018a. V. 11. № 4. P. 42–54. doi: 10.7868/S2073667318040068
- Bondur V.G., Ivanov V.A., Vorobyev V.E., Dulov V.A., Dolotov V.V., Zamshin V.V., Kondratyev S.I., Li M.E., Malinovskiy V.V.* Nazemno-kosmicheskiy monitoring antropogennykh vozdeystviy na pribrezhnuyu zonu Krymskogo poluostrova (Ground to space monitoring of anthropogenic impacts on the coastal zone of the Crimean Peninsula) // *Physical oceanography*. 2020. № 2.
- 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*. 2018b. V. 54. № 4. P. 386–393. doi: 10.1134/S0001433818040205.
- Bondur V.G., Keeler R.N., Starchenkov S.A., Rybakova N.I.* Monitoring zagryazneniy pribrezhnykh akvatoriy s ispolzovaniem mnogospetralnykh sputnikovyykh izobrazheniy vysokogo prostranstvennogo razresheniya [Monitoring of the pollution of the ocean coastal water areas using space multispectral high resolution imagery] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2006b. № 6. P. 42–49.
- Bondur V.G., Sharkov E.A.* Statistical characteristics of foam formations on a disturbed sea-surface // *Okeanologiya*. 1982. V. 22. № 3. P. 372–379.
- 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., Vorobjev V.E., Grebenjuk 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., Vorobyev 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., Zhurbas V.M., Grebenyuk Yu.V.* Mathematical Modeling of Turbulent Jets of Deep-Water Sewage Discharge into Coastal Basins // *Oceanology*. 2006a. 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.
- Ivanov V.A., Dulov V.A.* Monitoring pribrezhnoy zony na Chernomorskom eksperimentalnom podsputnikovom poligone [Monitoring of the coastal zone at the Black Sea sea truth test site] / ed. by V.A. Ivanov and V.A. Dulov. Sevastopol. MHI Publ., 2014. 257 p.
- Izrael Yu.A., Tsyban A.V.* Antropogennaya ekologiya okeana [Anthropogenic Ecology of the Ocean]. Moscow: Flinta Nauka Publ., 2009. 520 p. (In Russian)
- Kucheiko A., Ivanov A., Grigoriev N., Ushkov D., Terleeva N.* Sewer Discharges in the Coastal Zone of the Black Sea: Observation and Monitoring from Space. Ecology and Industry of Russia. 2019; 23(12): 54–60. (In Russian) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-54-60>
- Okeanologiya na starte XXI veka [Oceanology at the turn of XXIst century] / Ed. by A.L. Vereschaka. Shirshov Institute of Oceanology Publ. Moscow: Nauka, 2008. 566 p. (In Russian).