УДК 551.46.0:629.78

Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения

© 2015 В.А. Дулов*, М.В. Юровская*, И.Е. Козлов**

** Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*
E-mail: dulov1952@gmail.com
*** Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила 02.09.2015 г.

Рассмотрены возможности использования данных высокого пространственного разрешения со спутников *Landsat*-8 и *Sentinel*-1 для исследования и мониторинга прибрежной зоны Севастополя. Приведен обзор наблюдаемых явлений морской среды, описаны физические механизмы их проявлений на спутниковых снимках. Сформирована база спутниковых данных и выполнен их анализ. Обсуждаются данные о мезомасштабных структурах в поле шероховатости морской поверхности, паводках и распространении взвеси. Сделан вывод об уменьшении радиолокационного сигнала в областях загрязнений. Выполнен поиск проявлений сброса сточных вод в Севастополе. Получены свидетельства генерации внутренних волн заглубленной струей из диффузора сброса сточных вод вблизи м. Херсонес.

Ключевые слова: *Landsat*-8, *Sentinel*-1, прибрежная зона, мезомасштабные структуры, загрязнения прибрежных вод, сточные воды.

Введение

В последнее время данные со спутников *Landsat*, имеющие пространственное разрешение 15 – 100 м, стали свободно доступными. Это дало отсутствующую ранее возможность регулярно наблюдать со спутников океанические явления масштабами 100 – 1000 м. Аналогичные возможности открывают данные радиолокатора с синтезированной апертурой *Sentinel*-1 *C-SAR* с разрешением ~80 м, которые появились в открытом доступе с октября 2014 г. Перечисленные спутниковые данные с высоким пространственным разрешением востребованы, прежде всего, для исследования и мониторинга прибрежных зон. При этом далеко не полный перечень важных практических приложений включает мезомасштабную динамику вод [1 – 3], мониторинг экологического состояния акваторий [1, 2, 4], распространение взвесей [5], контроль загрязнения морской поверхности техногенными пленками [2, 6], мониторинг источников сточных вод [2, 4, 7].

С целью пилотных исследований новых возможностей спутниковой информации высокого разрешения была сформирована база данных по акватории, прилегающей к г. Севастополю. В базу вошли все многоканальные снимки *Landsat*-8 (*Level* 1), сделанные в период с мая 2013 г. по август 2015 г., а также все радиолокационные изображения *Sentinel*-1 за май – август 2015 г. В настоящей работе представлены результаты анализа этих снимков.

Цель работы – охарактеризовать информативность спутниковых данных высокого разрешения для исследования и мониторинга прибрежных зон Крыма. Приведен обзор явлений, которые можно наблюдать с помощью спутниковых снимков, описаны также физические механизмы их проявлений как основа для дальнейших разработок подходов к получению количественных характеристик самих явлений.

Данные и методика

Данные спутника *Landsat*-8. Каждый снимок спутника *Landsat*-8 охватывает прямоугольную область на земной поверхности размером 180 × × 185 км. Повторяемость съемки района Севастополя составляет 16 сут, причем она всегда происходит примерно в 8:30 UTC (11:30 по местному летнему времени). Для анализа были отобраны все снимки *Landsat*-8 (около 20), сделанные в период с мая 2013 г. по август 2015 г. при отсутствии или небольшом количестве облаков над морем.

Продукт *Landsat*-8 *Level* 1 представляет собой набор изображений для 11 каналов, а также файл с оценкой качества снимка и текстовый файл, содержащий характеристики геометрии съемки и константы для перевода кода изображений в спектральные яркости или яркостную температуру. В таблице приведены длины электромагнитных волн, пространственное разрешение изображений и отношение сигнал/шум для каждого канала [8]. Панхроматический канал оптического диапазона (8-й) имеет максимальное разрешение 15 м, в то время как разрешение тепловых каналов 100 м. Особенностью сенсоров *Landsat*-8 является то, что отношения сигнал/шум для них на порядок величины превосходят соответствующие характеристики каналов спутника *Landsat*-7.

Каналы спутника *Landsat*-8

Канал	Длина волны, мкм	Пространственное разрешение, м	Отношение сигнал/шум
1	0,43 – 0,45	30	238
2	0,45 – 0,51	30	364
3	0,53 – 0,59	30	302
4	0,64 – 0,67	30	227
5	0,85 – 0,88	30	204
6	1,57 – 1,65	30	265
7	2,11 – 2,29	30	334
8	0,50 – 0,68	15	149
9	1,36 – 1,38	30	165
10	10,60 – 11,19	100	238
11	11,50 – 12,51	100	364

Для анализа данных выполнялись следующие операции:

– исключались из рассмотрения пиксели изображений, где система формирования продукта *Level* 1 уверенно фиксировала наличие облаков либо

происходил сбой записи (соответствующая информация включена в файл качества);

– выполнялся переход к спектральным яркостям либо яркостной температуре (для тепловых каналов) с помощью текстового файла;

– исключались облака и суша (для этого мы использовали 5-й канал, соответствующий ближнему ИК-диапазону, где яркость суши и облаков определенно превышает яркость моря);

– рассматривались фрагменты изображений с характерным размером 10 – 50 км, где контраст наблюдаемых структур повышался путем выделения заданного диапазона яркостей, а иногда и путем эквализации гистограммы.

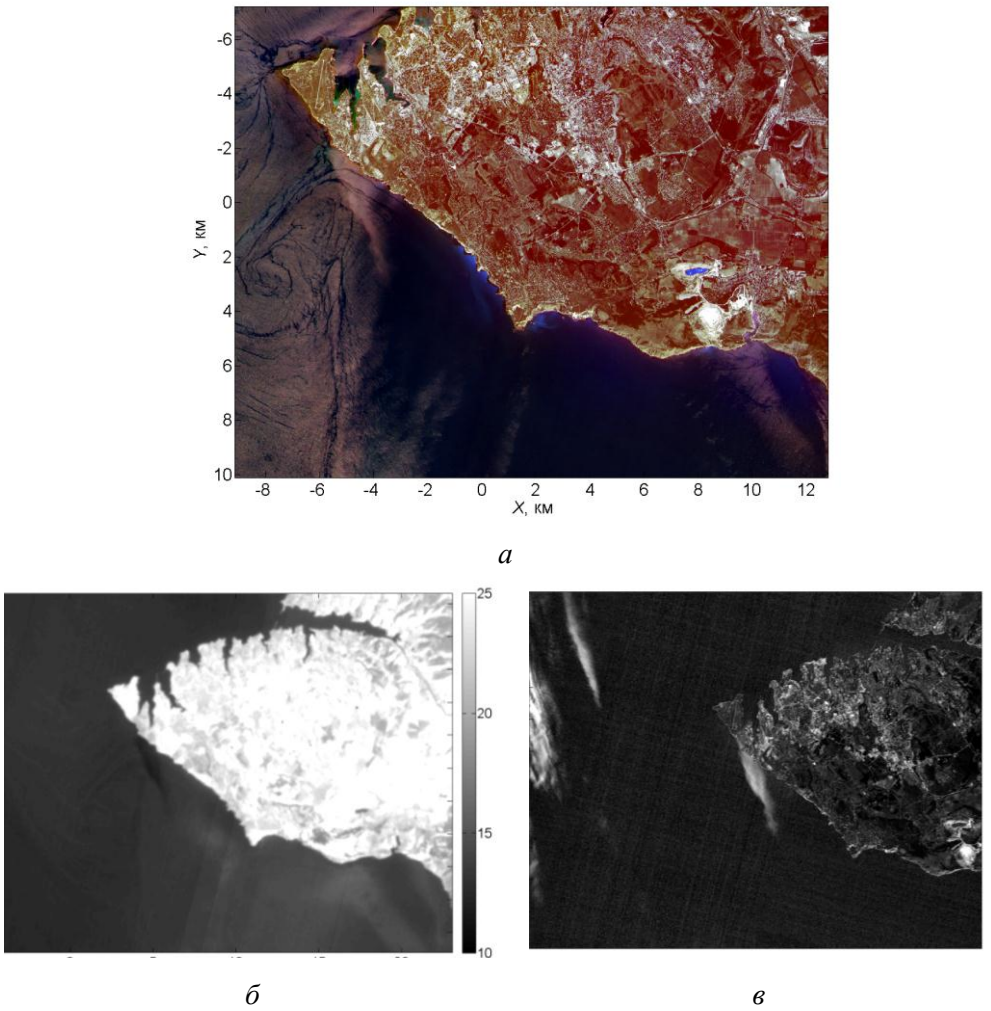
Приведенные ниже цветные и тоновые рисунки получены двумя методами – цветокодировкой яркостей одного канала (для температуры морской поверхности, а также в случаях, когда не выполнялась эквализация гистограммы) и формированием цветового композита формата *RGB* из видоизмененных сигналов трех каналов – синего (2-й канал, матрица *B*), ближнего ИК (5-й канал, матрица *G*) и панхроматического (8-й канал, матрица *R*). Во втором случае 2-й и 5-й каналы приводились к разрешению 15 м с помощью интерполяции. При этом получались цветовые контрасты, похожие на реальные, однако их оттенки могут отличаться от реальных из-за предшествующих преобразований яркости. После этого на изображение накладывалась область суши.

Данные спутника *Sentinel*-1**.** Спутник *Sentinel*-1 оборудован радаром с синтезированием апертуры (*SAR*), который работает в *C*-диапазоне на длине электромагнитной волны 5,6 см. Повторяемость радиолокационной съемки района исследований составляет примерно 5 – 7 сут, в районе Севастополя она обычно проводится в 04:00 и 16:00 UTC. Использованные в работе радиолокационные изображения представляют собой данные уровня *L*1, полученные в режиме съемки *Interferometric Wide Swath* для двух поляризаций – ВВ и ВГ (излучение на вертикальной поляризации, прием – на вертикальной и горизонтальной) с интерполяцией на регулярную сетку (продукт типа *GRDH*) с пространственным разрешением 20 × 22 м по дальности и азимуту и размером изображений 250 × 150 км. За период с мая по август 2015 г. было получено 33 спутниковых изображения *Sentinel*-1. Для последующего анализа проводилось сглаживание изображений адаптивным *Lee*-фильтром с размером скользящего окна 3 × 3 или 5 × 5. Ниже обсуждаются данные для ВВ-поляризации, которые оказались наиболее информативными.

Особенности данных спутника *Landsat*-8 для района Севастополя. При использовании спутниковых снимков оптического диапазона традиционно применяются два подхода. Первый подход связан с получением количественных оценок концентрации хлорофилла, взвешенного вещества и окрашенной растворенной органики [1, 9], он требует выделения из яркостей каждого канала доли, связанной с восходящим из воды излучением, – атмосферной коррекции [10]. Этот подход применим вне зоны солнечного блика. Второй подход нацелен на выделение океанических мезомасштабных структур, связанных с изменчивостью шероховатости морской поверхности – ее среднеквадратичного уклона [11, 12]. Подход применим в зоне солнечного блика, когда яркость каналов красного или ближнего ИК-диапазонов обусловлена глав-

ным образом вкладом в сигнал прямых отражений солнечного света. Информация, извлекаемая при этом из оптических спутниковых изображений, во многом аналогична спутниковым радиолокационным данным. Возможность применения того или иного подхода определяется географической широтой, местным временем съемки и временем года.

На рис. 1 приведен пример снимка со спутника *Landsat*-8 за 16 мая 2014 г. На цветовом композите отчетливо видны воды различного состава, которые локализованы в бухтах Северная, Стрелецкая, Омега, Камышовая и Казачья, а также около м. Фиолент и в районе стока вод Балаклавского рудоуправления. Эти воды различаются по цвету и его оттенкам, которые хорошо выделяются на фоне окружающей чистой воды. То есть из снимков *Landsat*-8, сделанных в районе Севастополя, может быть извлечена количественная информация в соответствии с первым традиционным подходом.



а

б *в*

Рис. 1. Пример изображения со спутника *Landsat*-8 (16 мая 2014 г.): цветовой композит (*а*), температура поверхности (*б*), перистые облака в 9-м канале (*в*)

В то же время левая часть снимка охвачена нитевидными узорами сликов естественного происхождения. Подобные явления наблюдаются повсеместно в Мировом океане [13], в том числе и в прибрежных водах Черного моря [6], отражая динамику приповерхностного слоя. На рис. 1, *а* нити сликов образуют картину в виде вихрей и грибовидного течения, которая в основных чертах повторяется на рис. 1, *б*, где приведена температура поверхности. Вдоль ярко выраженного фронта температуры также видна полоса почти прямолинейного слика. Слики как области, где подавляется шероховатость морской поверхности, наблюдаются на радиолокационных изображениях [6, 11, 13] и на спутниковых оптических изображениях в зонах солнечного блика [11, 12]. На рис. 1, *а* показано, что снимки *Landsat*-8 в районе Севастополя отражают поле шероховатости морской поверхности, которое можно пытаться восстановить в соответствии со вторым традиционным подходом.

Обзор рассматриваемых снимков *Landsat*-8 показал, что в окрестностях Севастополя всегда имеет место промежуточный режим, когда вклад прямого солнечного отражения от морской поверхности является существенной, хотя и не доминирующей составляющей яркости оптических каналов. Таким образом, традиционные подходы к использованию этих снимков, строго говоря, не применимы. Тем не менее снимки содержат обилие информации, которая может быть использована на качественном уровне. Это демонстрируется в последующих разделах статьи.

Данные *Landsat*-8 содержат также специальный канал (9-й), предназначенный для регистрации перистых облаков. Эти облака почти прозрачны во всех других каналах, но могут существенно искажать наблюдаемые на изображениях особенности. На рис. 1, *а* южнее м. Херсонес выделяется примыкающая к берегу «розовая» область, которая в общих чертах повторяется и в поле температуры на рис. 1, *б*. На рис. 1, *в* показан фрагмент того же изображения (охватывающий бóльшую площадь), но для 9-го канала. На нем четко выделяются перистые облака. Как следует из рисунков, обсуждаемая особенность является проявлением перистого облака в видимых и ближнем ИК-каналах. При анализе изображений мы контролировали правильность выводов, учитывая также данные 9-го канала.

Структуры в поле шероховатости морской поверхности

В работе [12] выполнена интерпретация оптических изображений, полученных со спутников *MODIS/Terra* и *MODIS/Aqua* в зоне солнечного блика для акватории Черного моря в весенне-летний период 2013 г. Пространственное разрешение этих данных составляет 250 м. С привлечением методики [11] были рассчитаны поля характеристики шероховатости морской поверхности – дисперсии ее уклонов *mss* (mean square slope). В полях шероховатости был выделен и обсужден ряд мезомасштабных явлений – внутренние волны, вихреобразные структуры, фронты и особенности прибрежной динамики, антропогенные слики и следы движущихся судов. Используя в настоящей работе данные *Landsat*-8 с пространственным разрешением 30 м, мы обнаружили обилие аналогичных структур, существующих в поле шероховатости морской поверхности.

Рисунок 2 иллюстрирует применяемый подход для разделения эффектов шероховатости и цвета вод в данной работе. Структуры, связанные с изменчивостью шероховатости, наблюдаются одновременно во всех каналах с 1-го по 8-й, в то время как структуры, связанные с восходящим из водной толщи излучением, наблюдаются только в оптических каналах 1 – 4, 8 и отсутствуют в каналах ближнего и среднего ИК-диапазона. На рис. 2 приведен фрагмент изображения во 2-м (синем) и 5-м (ближнем ИК) каналах. Для обоих каналов выделяются полосы повышенной яркости, исходящие из б. Казачьей (а также и из других бухт, но менее контрастные). Эти особенности следует отнести к эффектам шероховатости. В то же время в синем канале наблюдается контрастная особенность в виде яркого вытянутого пятна, ориентированного вдоль береговой черты южнее м. Херсонес (рис. 2, *а*). Эта особенность есть во всех оптических каналах, но отсутствует в каналах 5 – 7 (рис. 2, *б*). Поэтому ее следует отнести к подповерхностным явлениям.

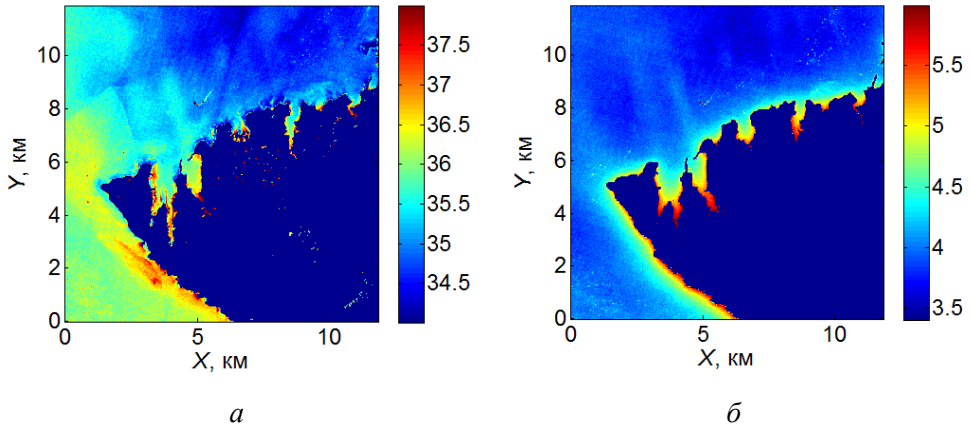


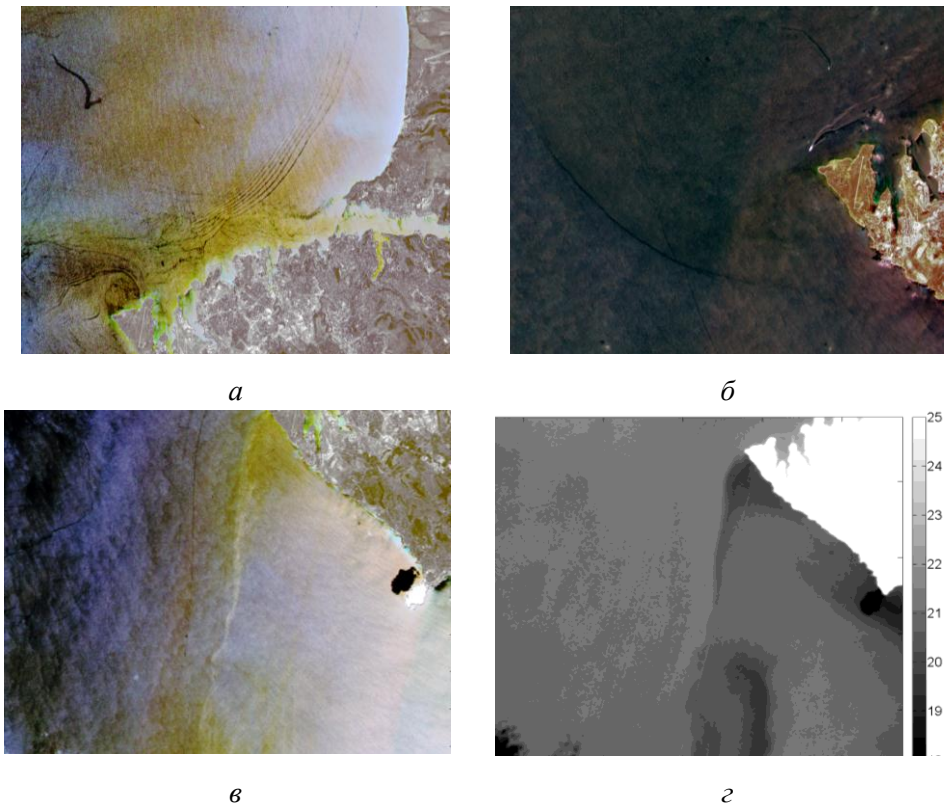
Рис. 2. Фрагмент изображения со спутника *Landsat*-8 (8 ноября 2014 г.): спектральная яркость в каналах *2* (*а*) и *5* (*б*). Единицы цветовой шкалы – Вт/ср/мкм

Повышение *mss* поверхности может приводить как к повышению яркости изображения в зоне солнечного блика, так и к ее понижению [11, 12]. В рассматриваемых изображениях *Landsat*-8 наиболее уверенно идентифицируются слики – области подавления шероховатости (пониженных значений *mss*) под воздействием поверхностно активных веществ (ПАВ). Во всех изображениях слики имеют отрицательный контраст (рис. 1, *а*). Поэтому далее будем считать, что повышение яркости в структуре, связанной с изменчивостью шероховатости, соответствует повышению *mss*.

В ряде работ описаны ветровые струи, наблюдавшиеся на радиолокационных изображениях Черного моря [14, 15]. Такие струи формируются вследствие обтекания ветровым потоком береговых орографических особенностей и распространяются на десятки километров от берега, приводя к повышению *mss* подстилающей водной поверхности. На рис. 2 отображено, по-видимому, похожее явление, но на меньших пространственных масштабах. Воздушные потоки с повышенной скоростью могут формироваться в балках (оврагах),

прилегающих к бухтам, как склоновый ветер. Их проявления в виде исходящих из бухт полос повышенной яркости на расстояниях до нескольких километров от берега можно видеть на рис. 2. Это явление в достаточной степени не изучено, и спутниковые данные с повышенным пространственным разрешением предоставляют новые возможности для его исследования.

На рис. 3 приведены примеры различных структур в поле шероховатости, наблюдаемых в данных спутника *Landsat*-8. На рис. 3, *а* четко различимы пакеты внутренних волн, нитевидные естественные слики, которые у м. Херсонес закручиваются в виде вихрей, антропогенный слик в левом верхнем углу рисунка. На рис. 3, *б* можно видеть следы движущихся кораблей и области пленочных антропогенных загрязнений характерной формы, которые сопутствуют несанкционированному сливу нефтепродуктов с судов в море [6].



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Фрагменты изображений со спутника *Landsat*-8: цветовые композиты от 1 августа 2013 г. (*а*), 6 июля 2015 г. (*б*), 16 июля 2013 г. (*в*) и температура морской поверхности 16 июля 2013 г. (*г*)

Естественные слики возникают из-за образования ПАВ вследствие жизнедеятельности микроорганизмов. При этом пленки ПАВ концентрируются вдоль зон конвергенции в приповерхностном слое, и рисунок, образующийся на изображении, оказывается связанным с динамикой вод [6, 13]. Чередующиеся зоны конвергенции и дивергенции при распространении внутренних волн видны в оптическом диапазоне благодаря скоплению естественных ПАВ

в зонах конвергенции. Конвергенцию поверхностного течения можно ожидать при натекании одной массы воды на другую, поэтому пленки ПАВ могут скапливаться вдоль мезомасштабных фронтов. Рассмотренный выше рис. 1, *а, б* демонстрирует именно такой эффект, когда фронт поверхностной температуры виден в оптическом диапазоне благодаря вытянутому вдоль него слику. Однако с повышением скорости ветра до 4 – 7 м/с на морской поверхности возникают обрушения ветровых волн, которые разрушают поверхностные пленки. При этом в зонах конвергенции вследствие гидродинамических причин (см., например, [16]) повышается спектральная плотность коротких волн и возрастает интенсивность обрушений. В результате зона конвергенции как область повышения шероховатости морской поверхности должна проявляться в анализируемых данных в виде района повышенной яркости. На рис. 3, *в* приведен пример данных, допускающий такую трактовку. На рис. 3, *г* показано соответствующее поле температуры, характеризуемое отчетливым фронтом. Как видно из рис. 3, *в*, вдоль фронта вытянута яркая полоса. Эта полоса видна в каналах 1 – 8 и может быть интерпретирована как повышение шероховатости поверхности в зоне конвергенции.

Существует обширная литература по проблеме различения антропогенных и естественных сликов, а также идентификации областей локального понижения яркости оптических и РЛ-изображений, которые выглядят подобно сликам (см. [6] в качестве обзора). Антропогенные слики, связанные с разливом нефтепродуктов, в отличие от нитевидных естественных ПАВ характеризуются четкой границей, повышенным контрастом. Слики, наблюдаемые в левом верхнем углу на рис. 3, *а* и по диагонали на рис. 3, *б*, отнесены к антропогенным в соответствии с такими критериями. Часто связь слика с породившим его судном видна непосредственно, как на рис. 3, *б* к северу от м. Херсонес. При этом суда выглядят как яркие точки, за которыми при их движении возникает характерный след в виде ярких «усов», связанный с корабельными волнами (корабельные следы представлены также на рис. 5, *а* ниже). На рис. 3, *б* антропогенный слик тянется за судном в пространстве между «усами». Слик, вытянутый по диагонали рисунка, по-видимому, отмечает траекторию прошедшего корабля.

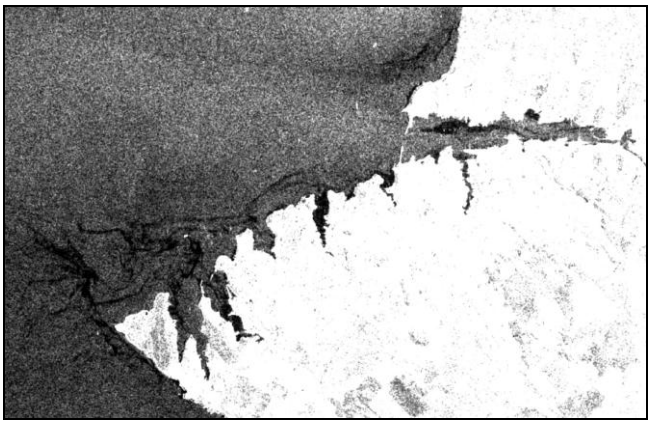


Рис. 4. Фрагмент радиолокационного изображения со спутника *Sentinel*-1 от 13 июля 2015 г. (03:56 UTC)

Описанные структуры в поле шероховатости морской поверхности, естественно, наблюдаются и в радиолокационных изображениях рассматриваемой акватории. Для примера на рис. 4 приведен фрагмент изображения со спутника *Sentinel*-1, где отчетливо видны вытянутые полосы сликов. Рисунок также демонстрирует загрязненность бухт Севастополя поверхностными пленками.

Паводки и распространение взвеси

Взвешенное вещество за счет рассеяния излучения приводит к повышению яркости на изображениях в оптических каналах, особенно в красном, а при высоких концентрациях в слое, непосредственно прилегающем к поверхности, и в ближнем ИК-диапазоне [17]. Рассмотрение взвесей как трассеров в движущихся водных массах позволяет анализировать динамику вод в прибрежных зонах [1, 2]. В работе [5] на основе анализа снимков со спутников серии *Landsat* были установлены закономерности распространения взвеси у западного побережья Крыма и их связь с направлением ветра. Севернее Севастопольской бухты источниками взвеси в морской воде являются речные паводки, размыв песчаных пляжей и, возможно, перенос взвешенного вещества течениями с севера, из Каламитского залива. На снимках *Landsat*-8 в оптических и ближнем ИК-каналах прибрежная полоса в этом районе, как правило, выглядит ярче, чем мористые области.

В мае – июне 2015 г. в районе Севастополя имели место аномально интенсивные осадки. Продолжительные дожди привели к аномальным паводкам рек Кача и Бельбек. В результате произошло затопление полей, прорыв водоема рыбного хозяйства, размылись дороги, обрушилась часть берега. В море был ясно виден фронт между водами желтого и голубого цвета. Эти события были задокументированы специалистами, которые выезжали в места локальных катастроф (личное сообщение Ю.Н. Горячкина, 2015 г.). На рис. 5, *а, б* приведены снимки за 4 июня и 6 июля 2015 г., соответствующие моментам катастрофических выбросов взвеси в море. Они демонстрируют плюмы, исходящие из устьев рек Кача и Бельбек, и распространение загрязнений в прибрежной зоне. На рис. 5, *в* показана температура морской поверхности, соответствующая рис. 5, *а*. Температура в устьях рек ниже, чем в окружающей области моря. На рис. 5, *а, в* видно, что загрязнения распространяются в море на расстояния до 10 км и более вследствие прибрежной вихревой динамики вод.

Ряд примеров распространения взвеси на большие расстояния описан в работе [5]. На рис. 5, *г – е* показаны дополнительные детали таких явлений. Изображение на рис. 5, *г* можно интерпретировать как отрыв области загрязнений с продольным размером примерно 3 – 4 км от основной массы взмученных вод. Рисунок 5, *д* демонстрирует, как загрязнения распространяются вдоль береговой линии Севастополя и у м. Херсонес устремляются в открытое море в виде пятен с характерным размером в несколько километров. Как правило, подобные картины в какой-то мере объясняются динамикой вод, которая проявляется в поверхностной температуре. На рис. 5, *е* показано поле температуры, соответствующее рис. 5, *д*, которое можно трактовать как раз-

витие мезомасштабной турбулентности на границе раздела масс воды с различной температурой. Тогда захват загрязненной воды порциями в виде наблюдаемых пятен может быть связан именно с хаотичностью этого процесса.

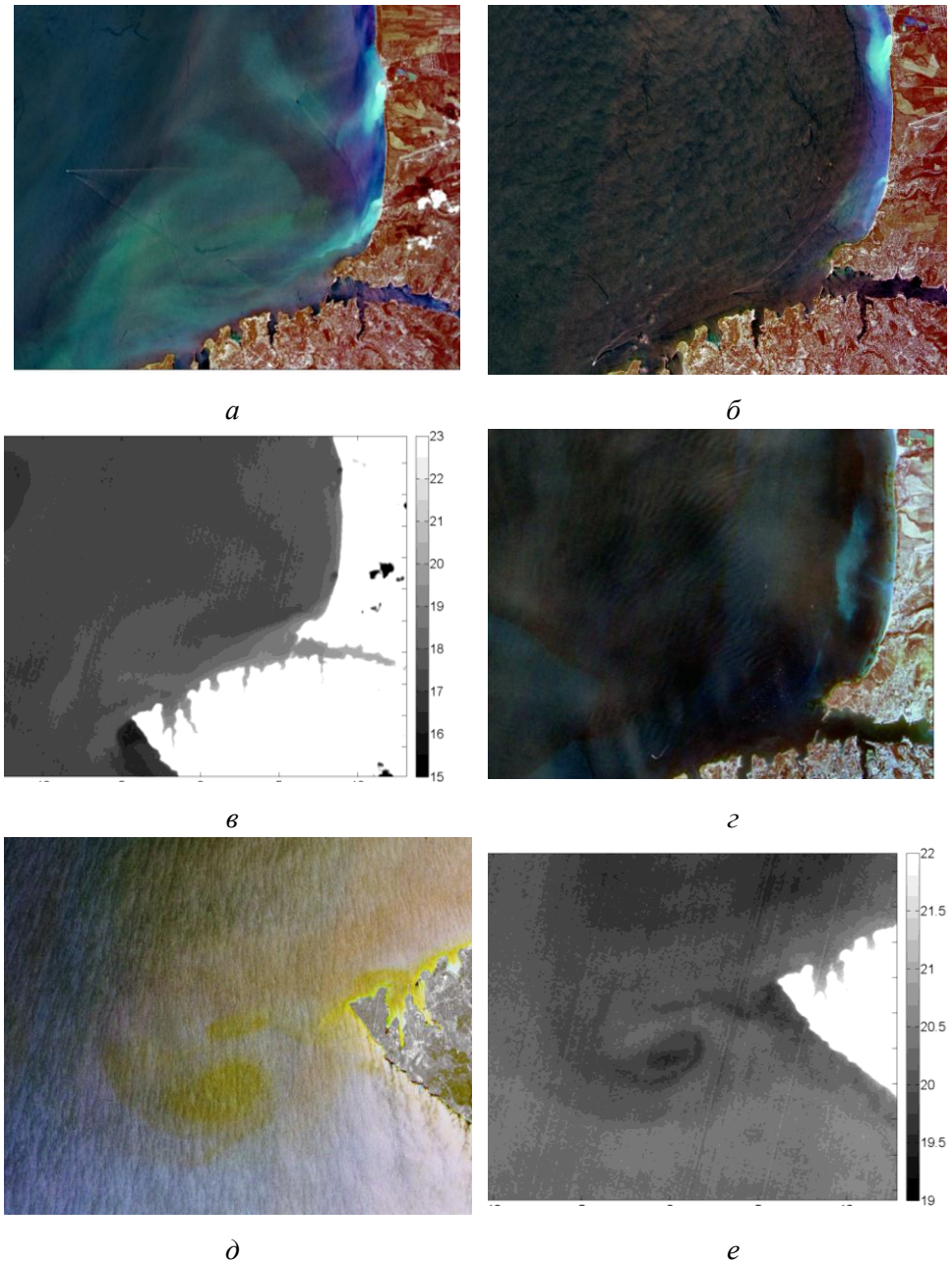
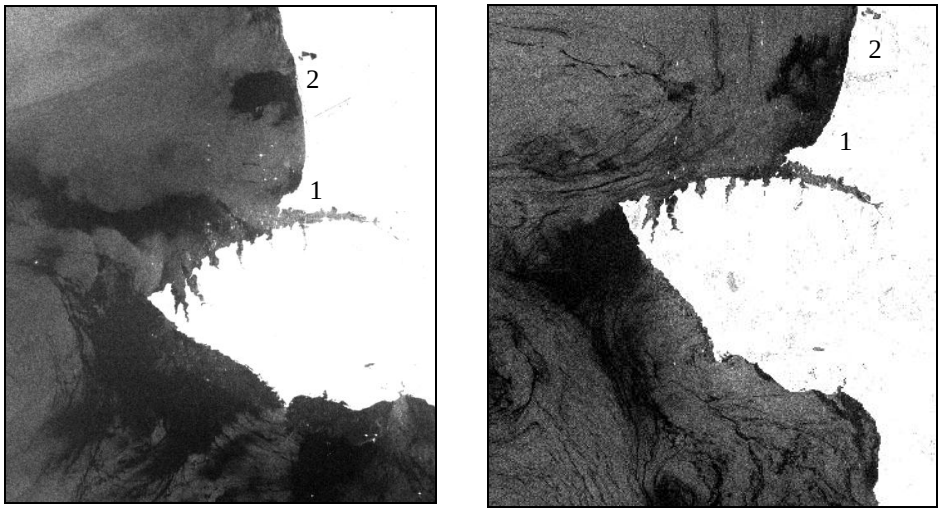


Рис. 5. Паводки и распространение взвеси в районе севернее Севастополя: паводки 4 июня (*а*) и 6 июля (*б*) 2015 г.; распространение замутненных вод 8 ноября (*г*) и 19 июля (*д*) 2014 г. Температура морской поверхности 4 июня 2015 г. (*в*) и 19 июля 2014 г. (*е*)

При стоке вод с суши в море попадают поверхностно активные вещества, что должно приводить к подавлению гравитационно-капиллярной ряби и, как следствие, ослаблению радиолокационного рассеяния. Снимки со спутника *Sentinel*-1 за период паводков 2015 г., приведенные на рис. 6, действительно демонстрируют отрицательные РЛ-контрасты в области, охваченной мутными водами. Необходимо отметить, что РЛ-изображения прежде всего показывают изменчивость поля скорости ветра, которая отражается в спектральной плотности коротких ветровых волн. Эффекты скорости ветра и воздействия ПАВ неразделимы по «яркости» одного канала РЛ-изображения. Но учитывая размеры и местоположение темных областей на рис. 6 и полагая, что границы сликов ПАВ выглядят более четкими, чем границы областей локального ослабления ветра, можно прийти к выводу, что особенности, отмеченные на рисунке цифрами, относятся к стокам вод из рек Бельбек (*1*) и Кача (*2*). На рис. 6, *а* (21 мая 2015 г.) можно видеть область размером ~14 км^2, расположенную в районе распространения мутных вод вследствие паводка на р. Кача. Область того же размера и в том же районе можно видеть и на рис. 6, *б* (9 июля 2015 г.). Здесь также видны нитевидные слики, связанные с ПАВ естественного происхождения, которые уже обсуждались в связи с рис. 4. Такие слики можно наблюдать при небольших скоростях ветра (менее 4 – 7 м/с), когда не происходит разрушения пленок в результате обрушений ветровых волн. Тот факт, что они не наблюдаются в верхней части рис. 4, но появляются в его нижней части, свидетельствует о более высокой скорости ветра в области севернее Севастопольской бухты. Это дает косвенное подтверждение, что темные области *1* и *2* не связаны с локальным ослаблением ветра.



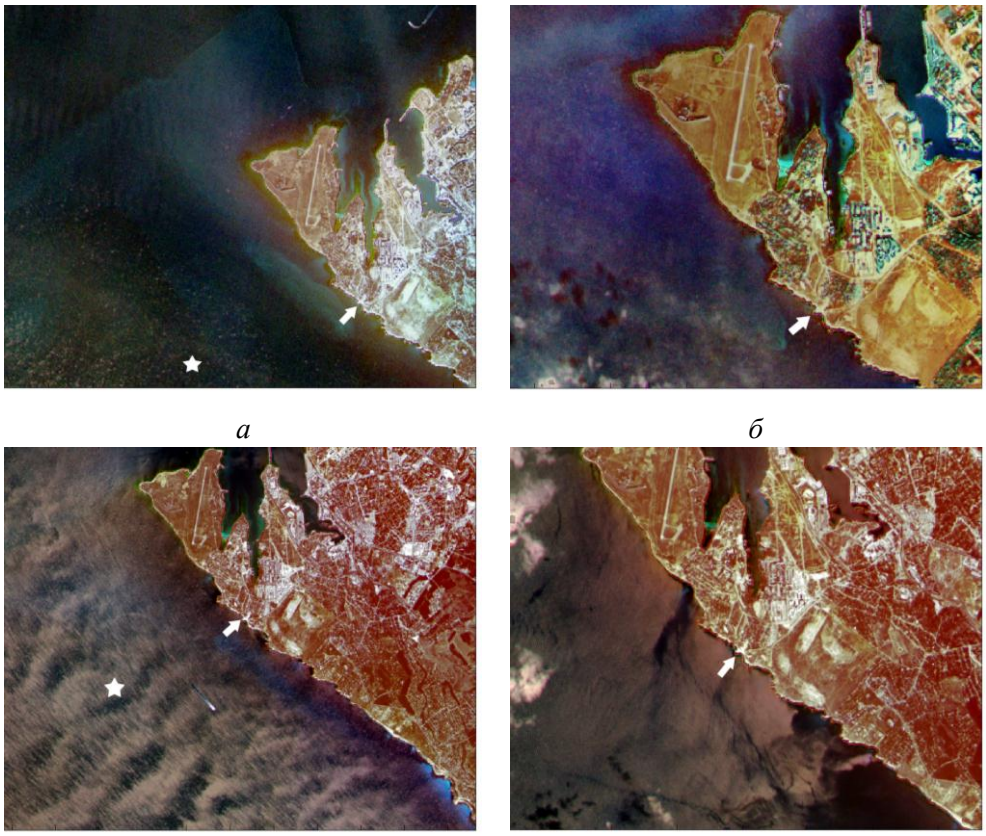
а *б*

Рис. 6. Фрагменты радиолокационного изображения со спутника *Sentinel*-1 с примерами наблюдения зон пониженного рассеяния РЛ-сигнала в области интенсивного речного стока 21 мая (*а*) и 9 июля (*б*) 2015 г.

Проблема дистанционного мониторинга сточных вод

Осуществление контроля загрязнений окружающей среды городскими и промышленными стоками с применением спутниковых технологий является актуальной проблемой современности. Обзор состояния проблемы и последних достижений приведен в работах [2, 4, 7, 18]. Основной сброс севастопольских городских стоков в море осуществляется через трубопровод, часть которого длиной 3,3 км лежит на морском дне южнее м. Херсонес [19]. Диффузор трубы расположен на глубине более 50 м для предотвращения подъема сточных вод в приповерхностный слой. Однако подъем принципиально возможен при определенных гидрологических условиях [4, 7]. В этом случае масса сточных вод («факел», «плюм») может наблюдаться аэрокосмическими методами, если она отличается от окружающей воды своими оптическими характеристиками. Наблюдение основного стока Севастополя с помощью оптического сканера со спутника «Ресурс» описано в работе [18], данные о стоке на Гавайских о-вах приведены в [4, 18], в Геленджике – в [2, 20]. Подъем ПАВ из сточных вод к морской поверхности должен приводить к образованию обширного слика. О наблюдении предположительно такого явления в районе основного стока Севастополя вблизи м. Херсонес сообщалось в работе [7], где анализировалось радиолокационное изображение со спутника «Алмаз». Взаимодействие затопленной струи сточных вод с градиентом плотности в пикноклине может порождать внутренние волны [7, 21], наблюдения которых могут служить для диагностики стока [4]. Эти результаты мотивировали поиск проявлений сточных вод в данных *Landsat*-8 и *Sentinel*-1 в рамках настоящей работы.

На рис. 7, *а* приведен фрагмент изображения со спутника *Landsat*-8 от 8 ноября 2014 г., предположительно содержащий плюм сточных вод. Длина плюма ~3 км, ширина ~600 м. Изображение плюма связано именно с восходящим из воды излучением, поскольку оно есть во всех оптических каналах, но исчезает в ближнем ИК-диапазоне (см. рис. 2, включающий обсуждаемое изображение плюма). Аналогичные плюмы в том же месте были идентифицированы также на снимках от 5 ноября 2013 г., 8 января 2014 г. и 19 мая 2015 г. Изображения первых двух из них были существенно менее контрастными (рис. 7, *б*), 19 мая 2015 г. длина плюма достигала 4 км, он находился примерно на том же расстоянии от берега, но был сдвинут в юго-восточном направлении (рис. 7, *в*). На рис. 7 отмечены точка входа трубопровода в море (стрелка) и примерное положение диффузора (звездочка). Все обнаруженные плюмы были расположены существенно ближе к берегу, чем их предполагаемый источник – диффузор сточной трубы. Это обстоятельство порождает предположение, что наблюдаемые плюмы связаны с иным источником. На рис. 7, *г* приведен фрагмент изображения со спутника *Landsat*-8 от 3 июля 2014 г., где плюм отсутствует, но хорошо выделены слики, исходящие от берега в точке, расположенной примерно на километр севернее точки входа трубопровода в море. В той же точке (рис. 7, *а* – *в*) можно видеть сток вод с повышенной мутностью. Возможно, именно он и привел к образованию обсуждаемых плюмов.



а *б*

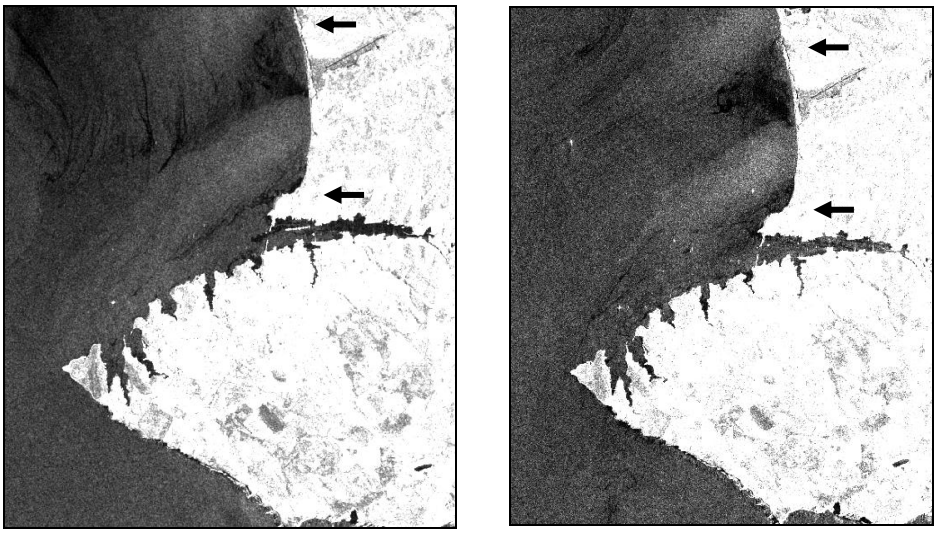
в *г*

Рис. 7. Фрагменты изображений со спутника *Landsat*-8 с возможными проявлениями городских стоков. Цветовые композиты от 8 ноября 2014 г. (*а*), 8 января 2014 г. (*б*), 19 мая 2015 г. (*в*), 3 июля 2014 г. (*г*). Звездочкой отмечено примерное положение диффузора основного городского стока, стрелкой – точка входа трубы в море

К северу от Севастопольской бухты также имеются городские стоки, однако затруднительно выделить их проявления по данным *Landsat*-8 на фоне речных стоков и размывов песчаных пляжей. Тем не менее после прекращения аномальных стоков, связанных с паводками 2015 г., данные *Sentinel*-1 устойчиво содержали области пониженной яркости, исходящие от берега в точках, где расположены основные стоки Северной стороны Севастополя. На рис. 8 показаны фрагменты РЛ-изображений, где положения стоков отмечены стрелками (см. также рис. 4, где видна область пониженной яркости, исходящая из береговой точки, которая отмечена на рис. 8 нижней стрелкой).

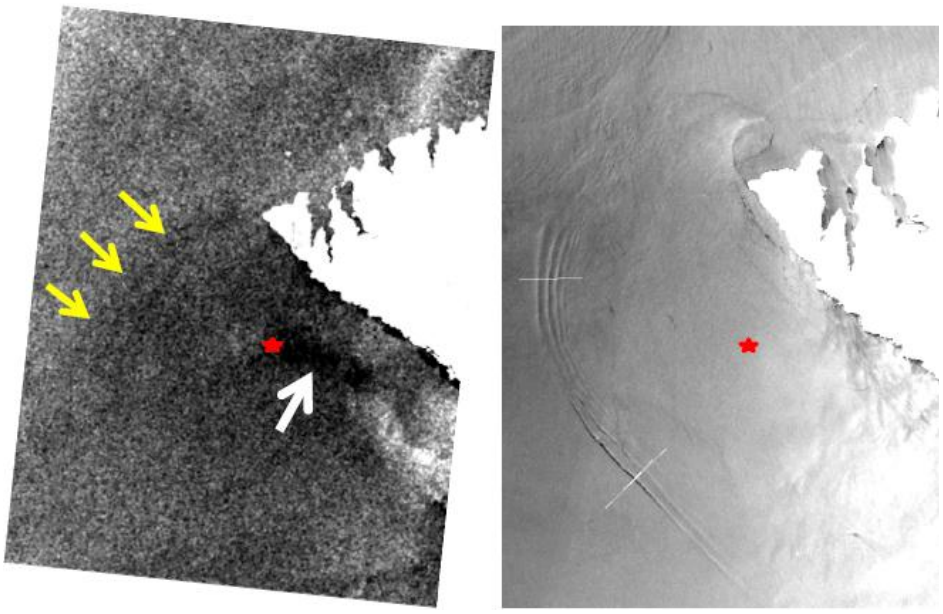
Направление распространения внутренних волн на спутниковых изображениях можно грубо определить, полагая, что пакет волн исходит из точечного центра, а их гребни являются фрагментами окружностей с центром в этой точке. Тогда внутренние волны на рис. 3, *а* следует считать распростра-

няющимися в сторону берега. В большинстве случаев, когда внутренние волны были выявлены в рассматриваемых данных, они распространялись в сторону берега. Если плавучая струя возбуждает внутренние волны, они будут распространяться в сторону моря от центра, где локализованы затопленные сточные воды. Рис. 9 демонстрирует именно такую ситуацию. На рис. 9, *а* показан фрагмент изображения со спутника *Sentinel*-1 за 6 августа 2015 г. На нем к юго-востоку от м. Херсонес видна темная область со слабо выраженным контрастом (отмечена белой стрелкой). Скорость приводного ветра равнялась ~9 м/с, т. е. указанная особенность явно не связана с локальным падением скорости ветра. В то же время темная область локализована вблизи расположения диффузора трубы основного городского стока Севастополя (отмечен красной звездочкой). Поэтому происхождение этой области может быть связано с выходом на поверхность пленок ПАВ от заглубленного стока. На этом же изображении к западу от темной области наблюдается пакет внутренних волн (отмечен стрелками), распространяющийся от особенности в западном направлении. Таким образом, эту ситуацию можно интерпретировать как генерацию внутренних волн заглубленной струей в соответствии с теоретическими представлениями [7, 21]. Сходную ситуацию удалось обнаружить также в данных спутника *Landsat*-8. На рис. 9, *б* приведен снимок, сделанный в ближнем ИК-диапазоне 22 июля 2015 г. Здесь отсутствуют поверхностные проявления непосредственно над заглубленным стоком, положение которого отмечено звездочкой. Однако пакет внутренних волн распространяется явно из района диффузора основного стока Севастополя.



а *б*

Рис. 8. Фрагменты радиолокационных изображений со спутника *Sentinel*-1 с примерами наблюдения зон пониженного рассеяния РЛ-сигнала в областях предполагаемого сброса сточных вод 25 июля (*а*) и 18 августа (*б*) 2015 г. Стрелки показывают положение городских стоков



а *б*

Рис. 9. Пример наблюдения аномалий на морской поверхности в районе глубинного стока Севастополя в радиолокационном изображении со спутника *Sentinel*-1 от 6 августа 2015 г. (*а*) и в оптическом изображении со спутника *Landsat*-8 (ближний ИК-канал) от 22 июля 2015 г. (*б*)

Заключение

Таким образом, данные высокого пространственного разрешения, получаемые со спутников *Landsat*-8 и *Sentinel*-1, открывают широкий спектр возможностей для исследования и мониторинга прибрежных зон. Многоканальные изображения *Landsat*-8 позволяют наблюдать особенности морской среды, которые влияют либо на шероховатость морской поверхности, либо на ее цветовые характеристики. Оба класса явлений могут быть разделены при анализе: эффекты, связанные с изменением шероховатости, как правило, проявляются во всех каналах, в то время как подповерхностные явления видны только в каналах оптического диапазона. К уверенно наблюдаемым структурам, влияющим на шероховатость, можно отнести пакеты внутренних волн, нитевидные естественные слики, которые отражают прибрежную динамику в виде вихрей и фронтов, следы движущихся кораблей, области пленочных антропогенных загрязнений характерного вида, которые сопутствуют несанкционированному сливу нефтепродуктов в море. Температурные фронты в штилевых условиях проявляются благодаря скоплению ПАВ в зоне конвергенции и образованию слика, вытянутого вдоль фронта и наблюдаемого в виде темной нити. В ветровых условиях температурный фронт также может наблюдаться, но уже как яркая нить, благодаря усилению шероховатости и обрушений волн в зоне конвергенции. Локальные орографические особенности могут порождать ветровые струи с характерным масштабом в несколько

километров, которые отражаются в поле шероховатости и наблюдаются в виде полос повышенной яркости. Указанные особенности поля шероховатости можно наблюдать также в радиолокационных данных *Sentinel*-1.

Подповерхностные процессы, наблюдаемые в оптических каналах спутника *Landsat*-8, включают прежде всего перенос и распространение взвешенного вещества вследствие паводков и размыва песчаных пляжей. При этом на морской поверхности в загрязненных областях концентрируются ПАВ, благодаря чему эти области могут наблюдаться также и в радиолокационных изображениях *Sentinel*-1. Особое внимание в настоящей работе уделено поиску проявлений основного сброса сточных вод Севастополя в спутниковых данных. Были выявлены возможные проявления в виде плюма, который отличается от окружающей воды по оптическим характеристикам и имеет продольный размер 2 – 4 км, поперечный ~0,5 км. Это образование наблюдалось между диффузором основного стока и береговой линией, причем существенно ближе к берегу, чем к диффузору. Однако мы не уверены в том, что обнаруженная особенность действительно является результатом сброса сточных вод через заглубленный диффузор, а не проявлением не известного нам источника загрязнений. Подчеркнем, что в данных *Landsat*-8 постоянно наблюдается распространение ПАВ и вод с аномальными оптическими характеристиками из одной и той же точки, расположенной в километре севернее.

В пользу существования проявлений плавучей струи сточных вод в спутниковых данных говорят следующие наблюдения. В радиолокационном изображении со спутника *Sentinel*-1 была обнаружена расположенная над диффузором область менее шероховатой поверхности с характерным размером в несколько километров. Объяснением выглаживания поверхности над плавучей струей может служить подъем ПАВ, выделившихся из заглубленных сточных вод. При этом из района выглаживания распространялись внутренние волны. Именно так должно происходить при взаимодействии плавучей струи с пикноклином в соответствии с математическим и лабораторным моделированием [7, 21]. Распространение внутренних волн из района диффузора было обнаружено также в данных *Landsat*-8 за другую дату.

Авторы выражают благодарность профессору В.Н. Кудрявцеву (РГГМУ, Санкт-Петербург; МГИ, Севастополь) за обсуждение работы и ценные идеи, а также Ю.Н. Горячкину (МГИ, Севастополь) за полезную информацию о рассматриваемых явлениях.

Работа выполнена в МГИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0110) и РФФИ (научный проект № 15-35-50726 «Спутниковые мультиполяризационные РСА-измерения в прибрежных водах Черного моря вблизи Крыма: пилотные исследования»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Robinson I.S.* Discovering the Ocean from Space. The unique applications of satellite oceanography // Series: Springer Praxis Books, Subseries: Geophysical Sciences. – UK: Springer and Praxis Publishing, 2010. – 638 p.
2. *Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А. и др.* Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с.
3. *Станичный С.В., Соловьев Д.М., Кубряков А.А. и др.* Характеристики поверхностного слоя моря в районе Южного берега Крыма по спутниковым данным – межгодовая и сезонная изменчивость // Мониторинг прибрежной зоны на Черноморском экспериментальном подспутниковом полигоне / Под ред. В.А. Иванова, В.А. Дулова. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. – С. 335 – 372.
4. *Bondur V.G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // Waste Water – Evaluation and Management. – Croatia: InTech, 2011. – P. 155 – 180.
5. *Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – 12, № 1. – С. 63 – 71.
6. *Малиновский В.В., Иванов В.А., Sandven S., Дулов В.А.* Наблюдения загрязнений поверхности моря по радиолокационным данным // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – Вып. 13. – С. 99 – 111.
7. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В.* Дистанционная индикация антропогенных воздействий на морскую среду, вызванных заглубленными стоками: моделирование, эксперименты // Исследование Земли из космоса. – 2001. – № 6. – С. 49 – 67.
8. *Landsat-8 (L8)* Data Users Handbook, LSDS-1574 Version 1.0 // Department of the Interior U.S. Geological Survey, June 2015. – 105 p. – http://landsat.usgs.gov/landsat8.php.
9. *Robinson I.S.* Measuring the Oceans from Space. The principles and methods of satellite oceanography / Series: Springer Praxis Books, Subseries: Geophysical Sciences. – UK: Springer and Praxis Publishing, 2004. – 669 p.
10. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // Appl. Opt. – 1994. – 33, № 3. – P. 443 – 452.
11. *Kudryavtsev V., Myasoedov A., Chapron B. et al.* Joint sun-glitter and radar imagery of surface slicks // Rem. Sens. Environ. – 2012. – 120. – P. 123 – 132. – doi:10.1016/j.rse.2011.06.029.
12. *Юровская М.В., Кудрявцев В.Н., Шапрон Б., Дулов В.А.* Интерпретация оптических спутниковых изображений Черного моря в зоне солнечного блика // Морской гидрофизический журнал. – 2014. – № 4. – С. 68 – 82.
13. *Beal R., Kudryavtsev V., Thompson D., Grodsky S. et al.* Large and small scale circulation signatures of the ERS-1 SAR over the Gulf Stream // Proc. Second ERS-1 Symposium (11 – 14 Oct. 1993). – Hamburg (Germany): ESA, 1994. – P. 340 – 346.
14. *Малиновский В.В., Пустовойтенко В.В., Кудрявцев В.Н.* Использование информации РЛСБО ИСЗ «Січ-1» для наблюдения Черного и Азовского морей // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 1998. – С. 162 – 173.
15. *Иванов А.Ю., Антонюк А.Ю.* Аномально сильные боры в Черном море по данным спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. – 2013. – № 1. – С. 32 – 43.
16. *Дулов В.А., Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е.* Проявление динамики воды в прибрежной зоне в поле обрушений ветровых волн // Морской гидрофизический журнал. – 1999. – № 4. – С. 3 – 17.
17. *Wang J., Lu X., Liew S. et al.* Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China // Earth Surf. Process. Landform. – 2009. – 34. – P. 1082 – 1092.

18. *Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии / Отв. ред. М.Е. Виноградов, С.С. Лаппо. – М.: Наука, 2004. – С. 55 – 117.

19. *Долотов В.В., Коновалов С.К., Романов А.С. и др.* Биогеохимический потенциал как основа для районирования морской среды Севастопольской бухты // Морские ресурсы прибрежной зоны Украины / Под ред. П.Ф. Гожика, В.А. Иванова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. – С. 206 – 221.

20. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В. и др.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из космоса. – 2012. – № 4. – С. 3 – 11.

21. *Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Ежова Е.В. и др.* Поверхностные проявления внутренних волн, излучаемых заглубленной плавучей струей. Ч. 3. Поверхностные проявления внутренних волн // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2010. – 46, № 4. – С. 1 – 10.

Coastal zone of Sevastopol on high resolution satellite images

V.A. Dulov*, M.V. Yurovskaya*, I.E. Kozlov**

**Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*
e-mail: dulov1952@gmail.com
***Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia*

Possibilities of application of high spatial resolution data from the satellites *Landsat*-8 and *Sentinel*-1 are considered for investigation and monitoring of the Sevastopol coastal zone. The observed phenomena in the marine environment are reviewed; physical mechanisms of their manifestations on satellite images are described. Satellite data are analyzed and arranged into a database. The data on mesoscale structures in the field of the sea surface roughness, floods and suspended matter spreading are discussed. It is concluded that a radar signal in the polluted areas decreases. Manifestations of wastewater discharge in Sevastopol are searched. Evidences of internal waves generated by the buried jet from the wastewater diffuser near the Cape Chersonesos are obtained.

Keywords: *Landsat*-8, *Sentinel*-1, coastal zone, mesoscale structures, pollution of coastal waters, wastewater.