

Особенности отображения выносов рек в Чёрном море в данных дистанционного зондирования

А. Ю. Иванов¹, Д. В. Хлебников¹, Б. В. Коновалов¹,
Н. В. Евтушенко², Н. В. Терлеева¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия*

² *Группа компаний «СКАНЭКС» Москва, 108811, Россия*

E-mail: ivanoff@ocean.ru

На основе анализа спутниковых оптических снимков среднего и высокого разрешения, а также радиолокационных изображений (РЛИ), на которых отобразились выносы рек восточного побережья Чёрного моря, исследованы особенности их проявления в данных ДЗЗ. Мощные выносы рек достаточно часто наблюдаются в прибрежной зоне восточной части Чёрного моря в течение всего года после интенсивных осадков или при таянии снега/ледников в горах. На снимках из космоса они наблюдаются как в поле цвета, так и в поле температуры поверхности моря (ТПМ), в видимом и ИК-диапазонах, а также на РЛИ в поле мелкомасштабного волнения. Совместный анализ космических снимков и РЛИ морской поверхности с привлечением подспутниковых измерений позволил получить новую информацию о явлении. Показано, что выносы рек обладают характерной структурой: они состоят из трёх хорошо различимых областей в видимом и ИК-диапазонах. Ядро выноса, или собственно плюм, наиболее чётко детектируется в поле ТПМ, в то время как шлейф трансформированных вод детектируется в открытом море на расстоянии до 30–40 км от берега. На РЛИ морской поверхности время от времени в зоне плюма образуются тёмные пятна, появление которых можно объяснить разницей температур речных и морских вод и трансформацией атмосферного погранслоя над водой выноса.

Ключевые слова: Чёрное море, речной сток, выносы рек, оптические и ИК-снимки, радиолокационные изображения, структура выноса реки

Одобрена к печати: 05.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202

Введение

Выносы рек — специфические мезомасштабные образования вод пониженной солёности и плотности, а часто и температуры, по сравнению с окружающим морем, которые формируются материковым речным стоком. Они также выявляются в распределениях гидрохимических и биооптических характеристик и взвешенных веществ на снимках из космоса. Пространственные масштабы выносов, приуроченных к устьям крупных и средних рек, могут существенно варьировать от десятков до сотен километров, при этом в прибрежных зонах морей нередко наблюдается чётко выраженная граница — прибрежный фронт, разделяющий речные и окружающие морские воды (Осадчиев, Завьялов, 2014; Hetland, Hsu, 2013; Horner-Devine et al., 2015).

Из спутниковых и подспутниковых наблюдений известно, что выносы рек обладают собственной внутренней динамикой, поставляют в море вещество материкового происхождения, взаимодействуют с прибрежной циркуляцией и мелководным рельефом дна и в конце концов исчезают, смешиваясь с окружающими водами. Выносы рек изучались с помощью численного моделирования, измерений *in situ* и нередко с привлечением данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В России особое внимание в последнее время уделялось выносу р. Мзымта и соседних рек, где различные измерения выполнялись неоднократно в 2007–2018 гг. (Осадчиев, Завьялов, 2014; Osadchiev, Korshenko, 2017).

Также хорошо известно, что на оптических снимках из космоса в приустьевой зоне моря в поле цвета моря выделяются области распространения распреснённых вод, определяющих границу речного выноса и его структуру (Осадчиев, Завьялов, 2014; Brando et al., 2015).

Анализируя видимые на снимках из космоса проявления речных выносов, можно получить информацию о его форме, площади, границах и направлении распространения, а затем сравнить с результатами подспутниковых измерений и численного моделирования (Осадчиев, Завьялов, 2014; Falcieri et al., 2014; Osadchiev, Korshenko, 2017). Однако по снимкам низкого разрешения определить границы распространения речных вод достаточно сложно, а оценки ряда их характеристик существенно зависят от выбранных спектральных диапазонов.

На помощь могут прийти данные ДЗЗ, полученные в других диапазонах электромагнитного спектра. По данным ИК-радиометров может быть определена температура поверхности моря (ТПМ), а радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) дадут информацию о состоянии поверхности моря. С другой стороны, проблема, каким образом отображаются выносы рек в данных ДЗЗ, в частности на радиолокационных (РЛ) изображениях (РЛИ) морской поверхности (МП), в современном дистанционном зондировании океана является одной из наиболее актуальных. Считается, что выносы рек часто формируют области как выглаживания на поверхности моря (и, соответственно, обширные тёмные пятна на РЛИ), так и области повышенной шероховатости, ограниченные с внешней стороны фронтальной границей (Ermakov, da Silva, 2005; Hessner et al., 2001). Однако современные исследования показывают, что до сих пор эта проблема не так однозначна, как представляется.

В связи с этим цель данной работы заключалась в изучении закономерностей отображения выносов рек, образованных пресноводным стоком в прибрежной зоне восточной части Чёрного моря, исключительно с помощью данных ДЗЗ и прежде всего космической радиолокации, а также в определении механизмов, определяющих формирование их оптических и РЛ-сигнатур. В настоящей статье также рассматривается и анализируется ряд случаев совместной регистрации выносов рек на оптических снимках и РЛИ.

Данные ДЗЗ и их анализ

Для анализа были выбраны доступные оптические снимки среднего и высокого разрешения спутников Landsat-8, Sentinel-2, RapidEye и др., а также снимки с Международной космической станции (МКС) и системы спутников ДЗЗ PlanetScope. В качестве данных радиолокации использовались РЛИ канадского спутника Radarsat-2 (режим SNA) и европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B (режим IW), оснащённых РСА. Район интереса — прибрежная зона черноморского побережья Кавказа. Для исследования использовались квази-синхронные оптические снимки и РЛИ, на которых отобразились выносы рек и связанные с ними проявления. Интерес представляла диагностика этих пятен на РЛИ с помощью данных видимого и оптического диапазона.

Анализ основан на технологии мультиспутникового и мультидатчикового зондирования и геоинформационных геопортальных решениях (веб-ГИС приложение «Геомиксер»), позволяющих интеграцию, визуализацию, совмещение, интерактивный анализ и интерпретацию самых разнообразных данных ДЗЗ (Иванов и др., 2014). Однако результаты были получены главным образом на основе анализа и интерпретации данных ДЗЗ, хотя по возможности для верификации результатов использовались подспутниковые данные, полученные в экспедициях ИО РАН в Чёрном море (Малые реки..., 2015).

Примеры совместного наблюдения

Случаи 23.05.2015 и 16.05.2013. Рассмотрим снимки на район интереса: РЛИ Sentinel-1A от 23.05.15 в 03:32 UTC и снимок с МКС от 25.05.2015 (рис. 1, слева, см. с. 193). На оптическом снимке светло-коричневыми тонами отобразились выносы рек Мзымта и Псоу, которые отчётливо видны на фоне окружающей воды. Они однозначно говорят о реальном распределении терригенной взвеси в приустьевой части моря и об интенсивности речного выноса 25 мая.

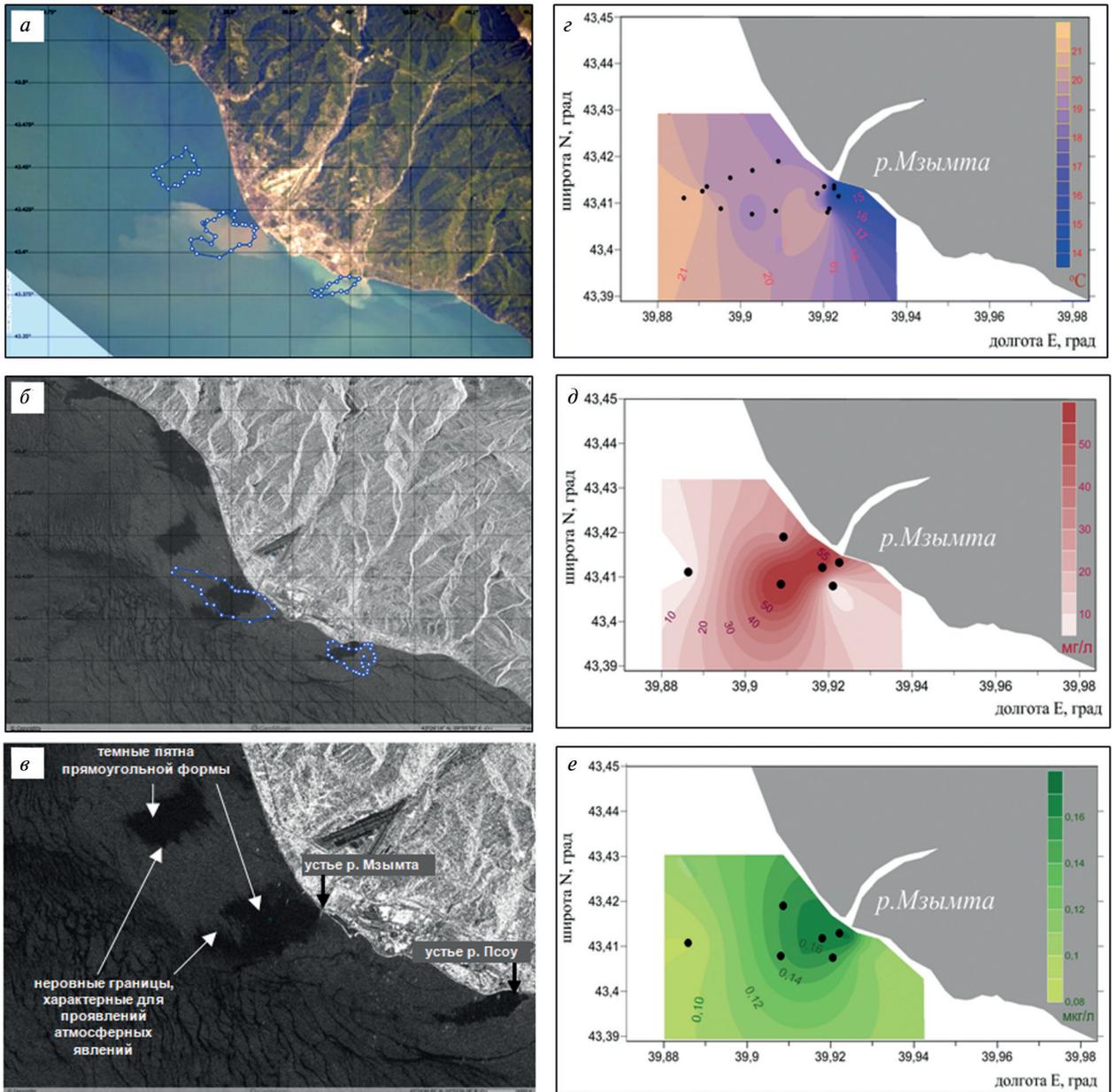


Рис. 1. Слева: фрагмент снимка с МКС от 25.05.15 выносов рек Мзымта и Псоу (а); РЛИ Sentinel-1А от 23.05.2015 (03:32 UTC) (б) и его фрагмент с тёмными пятнами (в) (ветер юго-восточный 2–3 м/с). Синими линиями на снимках показаны контуры пятен, видимые на РЛИ Sentinel-1А (23.05.2015) и на снимке с МКС (25.05.2015) соответственно. © ESA, СКАНЭКС. Справа: карты распределения ТПМ (z), взвешенного вещества (d) и хлорофилла фитопланктона (e) в выносе р. Мзымта 27.05.2015 по данным измерений *in situ*; точками показано положение станций, где происходили измерения и отбор проб (Малые реки, 2015)

На РЛИ, полученном двумя сутками ранее, видны три характерных обособленных пятна (рис. 1б, в), форма двух из которых близка к форме правильных прямоугольников (размеры 1,5×2,7 и 4,1×2,3 км). РЛИ и снимок с МКС были обработаны и совмещены, а пятна оконтурены в «Геомиксере». Контуры пятен на РЛИ и снимке с МКС на рисунках показаны синими линиями для того, что продемонстрировать достаточное хорошее совпадение сигнатур на обоих снимках.

Для дальнейшей верификации спутниковых результатов были привлечены подспутниковые данные о распределении ТПМ, минеральной взвеси и хлорофилла фитопланктона в выносе р. Мзымта. Измерения и пробы у поверхности моря на акватории, примыкающей к г. Адлер,

были получены 27 мая 2015 г. с борта НИС «Ашамба» во время экспедиции (Малые реки..., 2015). После отбора они были исследованы стандартными спектрофотометрическими методами. На основе этих данных были составлены карты распределения, представленные на *рис. 1 (справа)*. Их анализ в целом подтвердил наши предположения о достаточно интенсивном стоке и выносах Мзымты в 20-х числах мая 2015 г.

Корреляция яркости снимка с МКС (поля взвеси) и аномалий в поле интенсивности РЛИ на *рис. 1г, д* указывает на наличие связи между выносами рек и тёмными пятнами, возникающими на РЛИ. Подтверждением этому служат поле ТПМ по данным инструмента TIRS на ИСЗ Landsat-8 от 01.06.2015, 08:00 UTC и измерения с борта НИС. Согласно картам ТПМ термическая структура поверхностного слоя прибрежных вод во многом определялась положением холодного и опреснённого выноса р. Мзымта.

Область выноса характеризовалась низкими значениями солёности (до 2 епс) и температуры ($<14\text{ }^{\circ}\text{C}$), что создавало контраст порядка $2\text{--}3^{\circ}$ по сравнению с ТПМ окружающей воды Чёрного моря (Хлебников и др., 2017). В результате анализа всей совокупности данных сделан вывод, что главный механизм, приводящий к появлению данных сигнатур, — трансформация атмосферного погранслоя (АПС).

Аналогичными причинами, на наш взгляд, объясняются РЛ-сигнатуры, обнаруженные на РЛИ Radarsat-2 от 16.05.2013 (03:36 UTC) в приустьевой зоне р. Мзымта (*рис. 2а*, см. с. 195). На этом РЛИ видны три области тёмного тона (пониженного рассеяния) у побережья (показаны эллипсом), которые наблюдались при юго-восточном ветре $2\text{--}3\text{ м/с}$. На оптическом снимке Landsat-8, полученном 17.05.2013 (сутками позже), хорошо виден вынос р. Мзымта, распространяющийся в открытое море на 7 км (*рис. 2в*). Результаты восстановления ТПМ по данным TIRS также показали, что поверхность выноса холоднее окружающей морской воды и налицо контраст ТПМ в несколько градусов (*рис. 2б*).

Согласно современным представлениям, над областями холодной воды при ветре от слабого до умеренного происходит локальное изменение приводной стратификации атмосферы и АПС при переходе ветра с тёплой воды на холодную (Beal et al., 1997; Perlin et al., 2014), а контраст ТПМ в несколько градусов вполне достаточен для образования тёмных сигнатур на РЛИ. С другой стороны, проявления, видимые на этих двух РЛИ, кардинально отличаются от сигнатур плёночного происхождения, которые имеют больший контраст, более резкие и чёткие границы и сглаженные формы (Иванов, 2007). В итоге, рассматривая всю совокупность доступных данных, включая гидрометеорологические условия (ГМУ), можно прийти к заключению, что главным визуализирующим механизмом в данных случаях должен быть механизм, рассматривающий трансформацию АПС над аномалиями ТПМ, создаваемыми выносами реки. Иными словами, пятна возникают на РЛИ над линзами распреснённых вод р. Мзымта, которые имеют низкие значения ТПМ. Здесь заметим, что подобный механизм трансформации АПС рассматривался неоднократно, в том числе подтверждён экспериментально детальными подспутниковыми измерениями, а его анализу посвящено большое количество работ.

Случай 30.05.2017 – 01.06.2017 и 06.06.2017. Рассмотрим серию снимков, полученных в период с 30.05.2017 по 01.06. 2017 на приустьевую область р. Бзыбь; *рис. 3, слева*). На оптическом снимке PlanetScore от 30.05.2017 в поле взвеси виден мощный вынос р. Бзыбь с чёткими границами. На РЛИ Sentinel-1A, полученном 01.06.2017 (*рис. 3в*), хорошо виден этот же самый речной вынос как контрастное тёмное пятно с резкими границами. Тип поверхностных проявлений в виде обособленных тёмных сигнатур с резким границами и контрастом в общем случае не характерен для РЛ-образов речных выносов. С одной стороны, при отсутствии подспутниковых наблюдений можно предполагать механизм образования, описанный выше для случаев 23.05.2015 и 16.05.2013. Однако, судя по внешнему виду этого проявления, нельзя исключать вклад плёночного механизма в образование темной сигнатуры над ядром выноса, например, в том случае, если поверхностно-активные вещества (ПАВ) и нефтепродукты (НП), способные образовать плёнки на МП, выносятся со стоком реки. Уже в море они могут собраться в компактное пятно в приустьевой области и привести к выглаживанию МП и таким образом визуализировать ядро выноса в виде тёмного пятна на РЛИ.

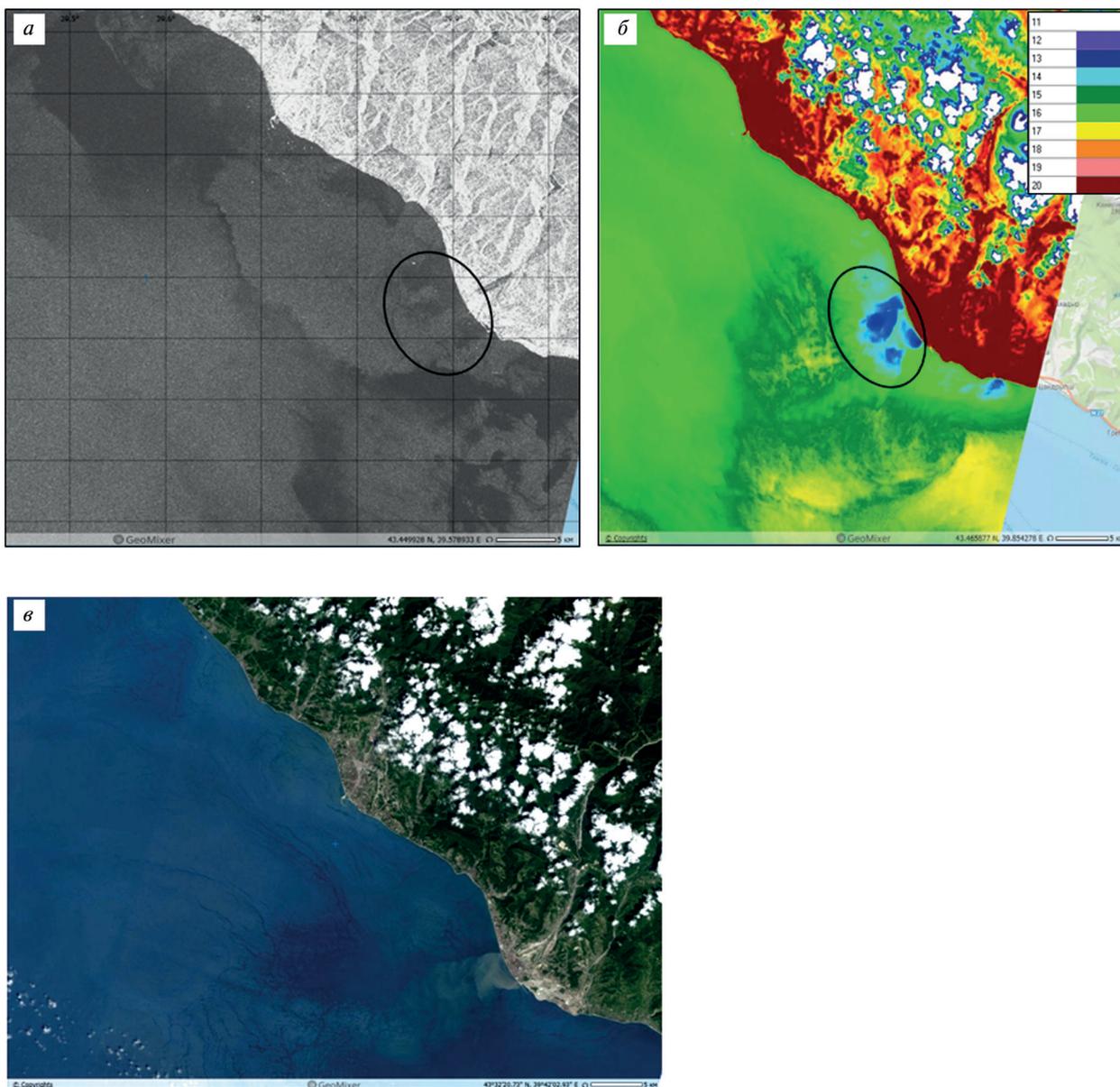


Рис. 2. Проявление выноса р. Мзымта в данных ДЗЗ: *а* — на фрагменте РЛИ Radarsat-2 от 16.05.2013 (03:36 UTC), на котором отобразились тёмные прямоугольные области у побережья (выделены эллипсом) при юго-восточном ветре 2–3 м/с; *б* — в поле ТПМ, восстановленного по данным TIRS на ИСЗ Landsat-8 от 17.05.2013 (08:09 UTC); шкала температур в градусах Цельсия показана в правом верхнем углу; *в* — вынос реки на оптическом снимке ИСЗ Landsat-8 от 17.05.2013 (08:09 UTC). © MDA, USGS, СКАНЭКС

Следует также отметить и резкую перемену ветра, который изменил направление с северо-западного (2–4 м/с) 31 мая на юго-восточный (3–4 м/с) 1 июня. К сожалению, ближайшая съёмка ИСЗ Landsat-8 состоялась только 06.06.2017, тем не менее поле ТПМ, восстановленное на эту дату, показало, что вода в ядре выноса р. Бзыбь была холоднее окружающей воды на несколько градусов — 11–13 °С против 14–15 °С (рис. 3б). С другой стороны, анализ архива съёмок высокого разрешения спутников PlanetScope за несколько лет показал, что пленки НП и ПАВ на поверхности приустьевых участков выносов этих рек визуально не наблюдались, т.е. можно заключить, что плёночный механизм в области собственно плюма не играет значительной роли.

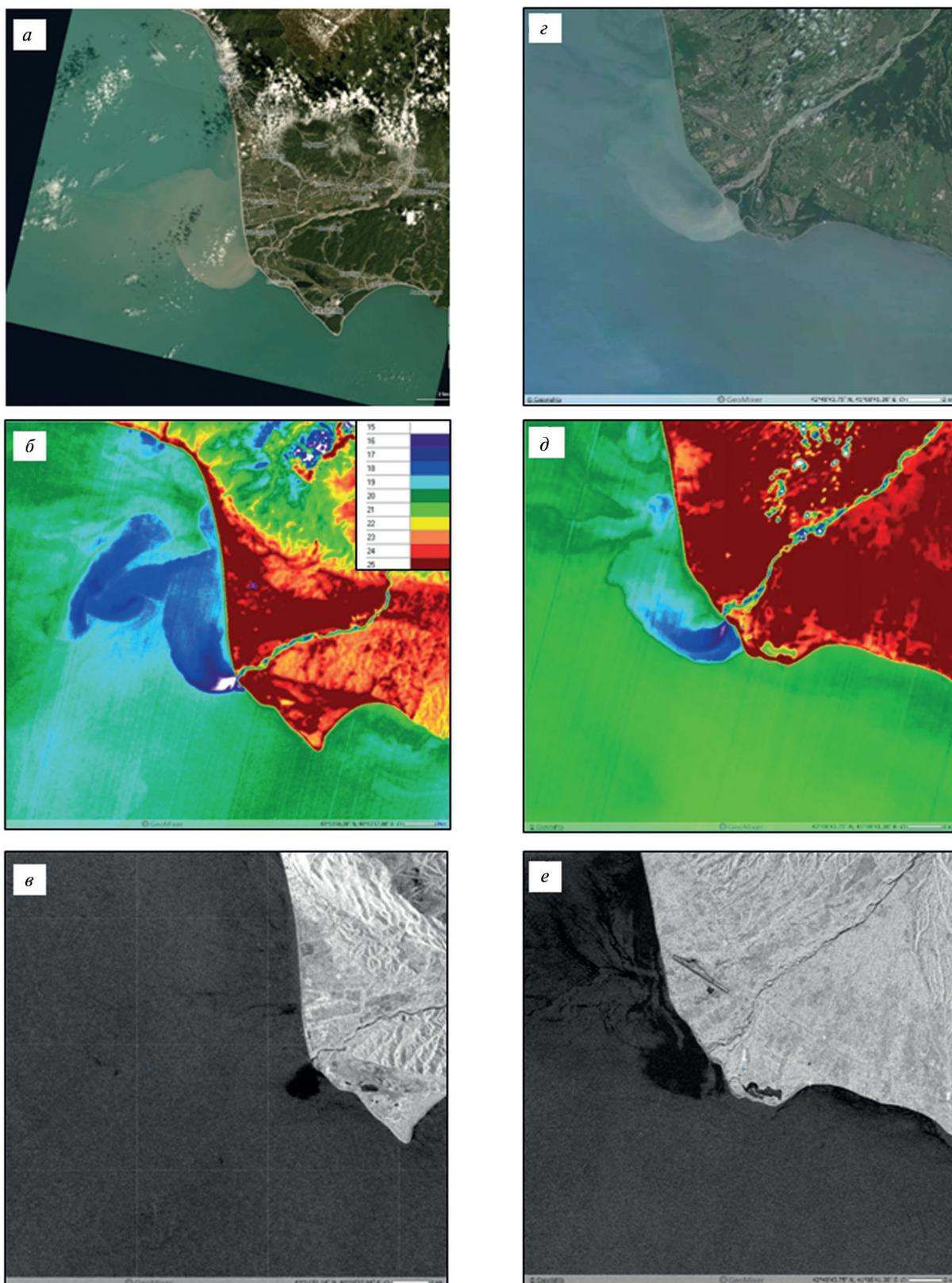


Рис. 3. Слева: вынос р. Бзыбь в данных ДЗЗ; а — на оптическом снимке PlanetScope от 30.05.2017 (07:22 UTC); б — в поле ТПМ по данным TIRS на ИСЗ Landsat-8 от 06.06.2017 (08:08 UTC); в — на РЛИ Sentinel-1A от 01.06.2017 в 03:26 UTC в виде тёмного пятна с резкими краями (юго-восточный ветер 3–4 м/с). Справа: вынос р. Кодори (Абхазия) в данных ДЗЗ от 06.06.2017; з, д — на оптическом снимке Landsat-8 (08:10 UTC) и в поле ТПМ; ядро, или собственно плум, наиболее чётко детектируется в поле температуры (цвета сине-фиолетовой гаммы); е — на квазисинхронном РЛИ Sentinel-1B (03:23 UTC). © Planet, USGS, ESA, СКАНЭКС

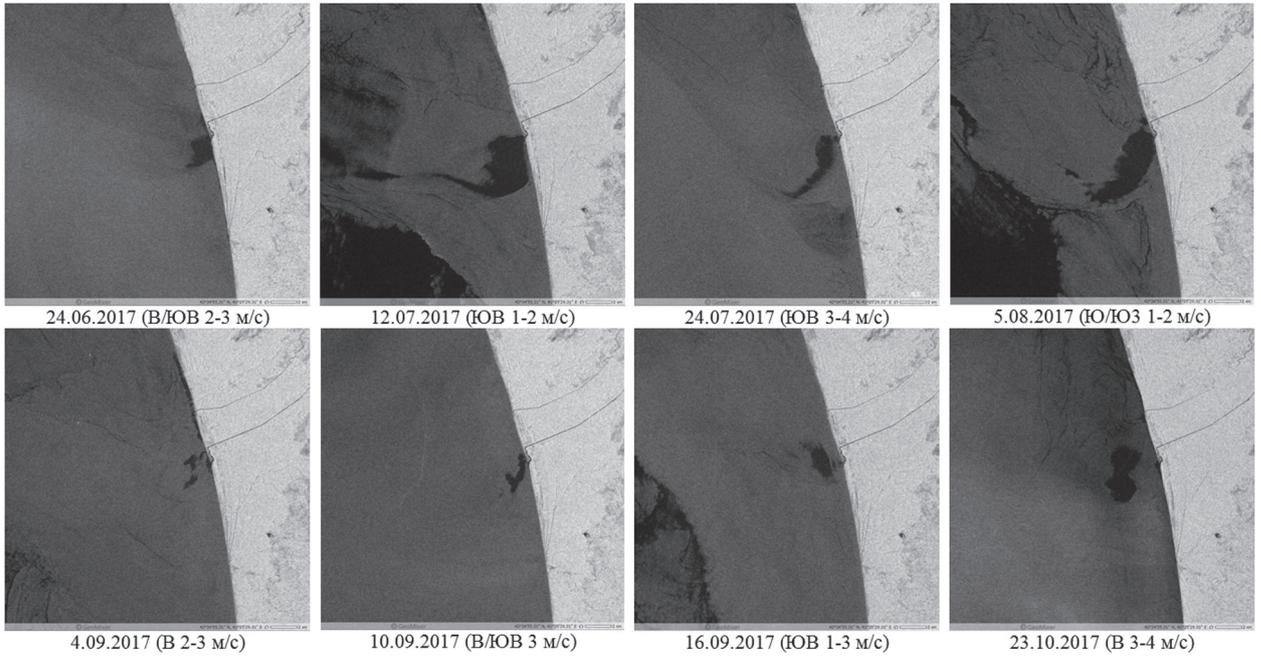


Рис. 4. Сликотипные сигнатуры выносов р. Хоб (пгт Приморск, Абхазия) на РЛИ спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B (в скобках указано направление и скорость ветра). © ESA, СКАНЭКС

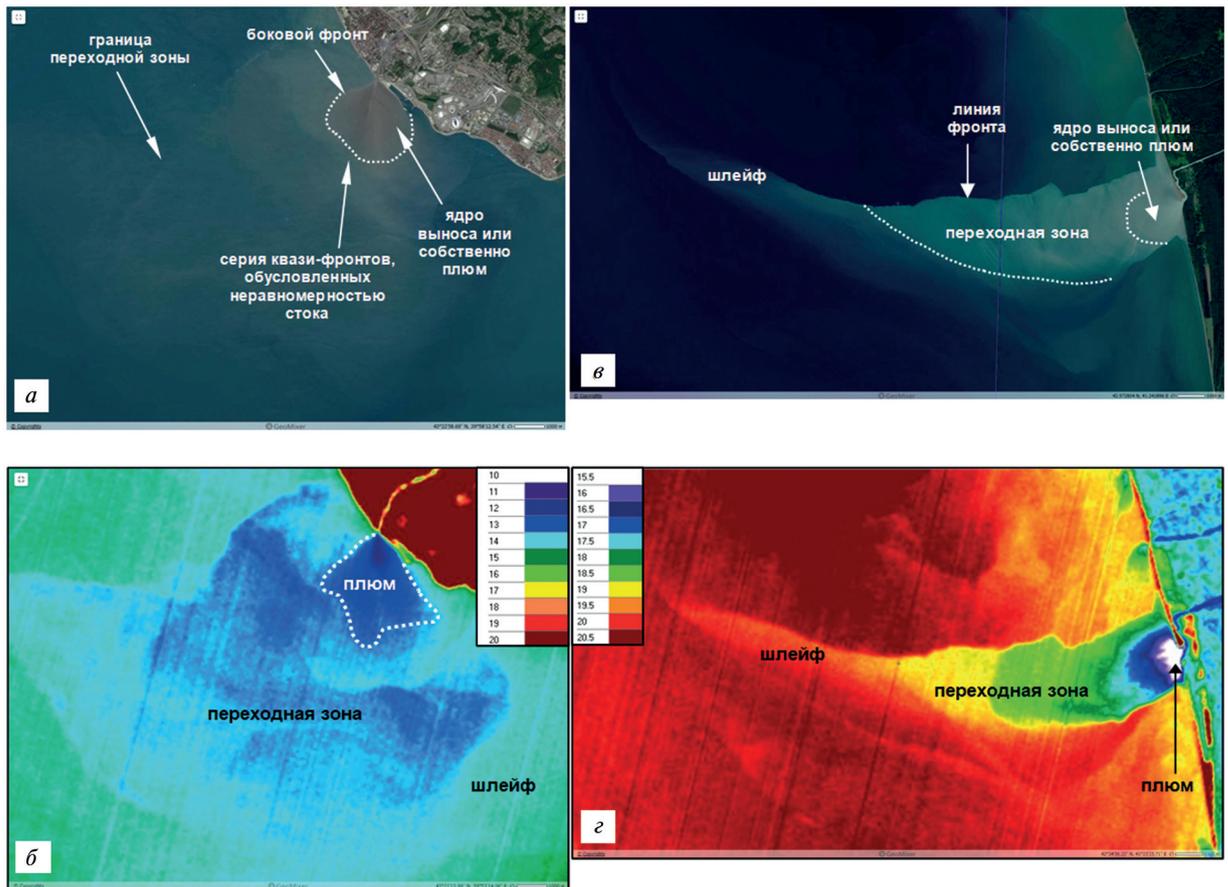


Рис. 5. Слева: вынос р. Мзымта и его структура на фрагменте оптического снимка (а) и в поле ТПМ (б), восстановленного по данным TIRS на ИСЗ Landsat-8 от 12.05.2017 (08:07 UTC); пунктирной линией показаны контуры собственно плюма, выделенные на снимке и в поле ТПМ. Справа: вынос р. Хоб (Абхазия): в — на оптическом снимке Sentinel-2A от 05.10.2017 (08:10 UTC); г — в поле ТПМ по данным ИСЗ Landsat-8 05.10.2017 (07:55 UTC) и его характерная структура. © USGS, ESA, СКАНЭКС

Аналогичная ситуация отобразилась 06.06.2017 на практически синхронных снимках Landsat-8 (08:10 UTC) и РЛИ Sentinel-1B (03:23 UTC) (рис. 3, справа), на которых зафиксировался мощный вынос р. Кодори, причём ядро, или собственно плюм, наиболее чётко выделяется в поле температуры (цвета сине-фиолетовой гаммы); он также виден в виде тёмного пятна на РЛИ.

Серия РЛИ за июнь—октябрь 2017 г. На рис. 4 (см. с. 197) показана серия РЛИ Sentinel-1A и Sentinel-1B, полученных в июне—октябре 2017 г. На РЛИ этой серии отобразились сликоподобные сигнатуры выносов р. Хоб (пгт Приморск) при скорости ветра, не превышающей 3–4 м/с. Анализ этих ситуаций с привлечением данных о промышленной наземной инфраструктуре сервиса Wikimapia показал, что, во-первых, Хоб вытекает из Гальского водохранилища с перепадными ГЭС, а во-вторых, промышленные объекты ниже по течению реки, которые можно было бы подозревать в сбросе сточных вод с НП/ПАВ, отсутствуют. Это позволяет утверждать, что основной механизм отображения выносов рек в этих случаях — значительный перепад температур (рис. 5, справа, см. с. 197).

Структура речного выноса на снимках из космоса

На основе анализа космических снимков, полученных в 2014–2017 гг. на восточную часть Чёрного моря (см. рис. 1–5), а также с учётом наработок других авторов (Лаврова и др., 2016; Garvine, 1982, 1995; Hetland, 2005; Hetland, Hsu, 2013; Horner-Devine et al., 2015; O'Donnell, 1990), структуру выносов рек (рис. 6) можно охарактеризовать следующим образом:

1. Ядро/тело выноса реки, или собственно плюм. Это крайне турбулизированное обособленное образование относительно небольшого размера (1–25 км²) с очень высокими градиентами почти всех характеристик (взвеси, ТПМ и солёности). Визуально на снимках оно выглядит как струеподобная или конусовидная область с характерным расширением, непосредственно примыкающая к устью реки (см. рис. 5). Благодаря экстремальным значениям всех характеристик эта зона отображается во всех данных ДЗЗ. На оптических снимках она имеет очень высокую яркость, цвет от белесоватого до светло-коричневого и даже тёмно-коричневого; однако наиболее чётко отбивается в поле ТПМ (см. рис. 3, 5) и нередко характеризуется выглаживанием мелкомасштабного волнения (как гидродинамическим, так и плёночным) — сликоподобными проявлениями (тёмным тоном РЛИ) (см. рис. 3, 4). Часто ограничена передними подковообразными фронтами, которые видны как на оптических снимках высокого разрешения, так и в виде тонких светлых линий на РЛИ. Часто на границах плюма наблюдаются импульсы выноса, поверхностные концентрические волны или поверхностные проявления короткопериодных внутренних волн на его периферии. По нашему мнению, только эту область целесообразно называть «речным плюмом», ибо она имеет генезис, характерный для интрузионных гидродинамических и геологических структур, как внедрение инородной субстанции (речной воды) в относительно однородную морскую среду.

2. Переходная зона — широкая зона, где накапливается и трансформируется большая часть речного стока. Здесь происходит интенсивное смешение речных и морских вод с перераспределением и выпадением осадков, флокуляцией, фрикционным (волно-ветровым) и конвективным перемешиванием. На снимках из космоса эта зона имеет переходный характер яркости изображения (цвета зеленоватой гаммы); в поле ТПМ в ИК-данных имеет слабые, но тем не менее различимые температурные контрасты. В данных космической радиолокации иногда отображается в виде областей, примыкающих к устьям рек, которые, как правило, немного темнее или светлее фона; фронтальные границы наблюдаются не всегда (см. рис. 5).

3. Шлейф (дальняя зона) — часто очень обширная зона слабо взмученных вод с крайне малыми градиентами почти всех характеристик (взвеси, ТПМ и солёности). Это зона, за пределами которой вода речного выноса окончательно теряет «память» о её начальных характеристиках, но всё ещё отличается от окружающей фоновой морской воды. Шлейф в виде нестационарной, часто осложнённой вихревыми движениями широкой полосы, направленный

вдоль берега в ту или иную сторону или в открытое море, может быть виден на оптических космических снимках на расстоянии 30–40 км от берега или охватывать широкую прибрежную полосу. В поле ТПМ в ИК-данных эта область практически не различима, в данных космической радиолокации не детектируется вовсе.

Заключение

В настоящей статье рассматриваются аспекты отображения выносов рек в данных ДЗЗ. В зависимости от типа водосбора, преобладающих терригенных осадков, интенсивности и режима речного стока, содержания взвеси и ПАВ в речных водах, их гидрохимических и гидробиологических характеристик выносы рек характеризуются большим разнообразием. Уже в море, в прибрежной зоне, под действием ветра, волнения и течений выносы рек подвергаются значительной трансформации, которая тем или иным образом изменяет их структуру и характеристики.

Данные ДЗЗ предоставляют хороший экспериментальный материал для исследования выносов рек и их динамики в прибрежных зонах морей. При этом наиболее информативными космическими датчиками для мониторинга их особенностей являются датчики, работающие в оптическом и ИК-диапазонах электромагнитного спектра. Изображения спектрорадиометров, синтезированные в разных комбинациях каналов видимого диапазона (например, 4-3-2, 5-4-3 или 7-5-3), лучше всего подходят для выявления участков прибрежных зон с различными оптическими свойствами.

В общем случае анализ данных ДЗЗ в видимом и ИК-диапазонах позволяет:

- измерить параметры выноса: размеры, площадь, «глубину внедрения» в открытое море и направление распространения;
- восстановить по спутниковым данным (при наличии соответствующих алгоритмов) содержание взвеси, хлорофилла и ТПМ в выносе реки;
- проследить пространственно-временную эволюцию и трансформацию (например, с использованием анимационных картин на основе последовательных снимков или биооптических продуктов);
- уточнить особенности и структурные элементы, более чётко определить границы собственно плюма и выявить сопутствующие явления в прибрежной зоне моря;
- проводить верификацию результатов численного моделирования.

В данных космической радиолокации выносы рек отображаются двумя способами. В первом случае, если имеется большой контраст температур, на РЛИ возникают тёмные контрастные пятна с резкими границами, практически совпадающими с границами собственно плюма (термогидродинамический механизм). Во втором случае к образованию тёмных сигнатур приводит трансформация атмосферного погранслоя (атмосферный механизм) над областями воды пониженной температуры как над собственно плюмом, так и над переходной зоной выноса реки. Оба механизма приводят к возникновению визуально схожих сигнатур при слабых ветрах, не превышающих 5–6 м/с. В общем случае проявление выносов рек в данных радиолокации зависит от комбинации ряда факторов или существенного вклада какого-то одного конкретного. Они могут проявляться на МП при одних ГМУ и не проявляться при других. В общем случае информативность РЛИ существенно зависит от факторов среды: скорости и направления ветра и течений, степени взволнованности моря и ряда других.

Таким образом, вполне очевидно, что набор соответствующих данных ДЗЗ — оптических, ИК и радиолокационных позволяет практически полностью охарактеризовать выносы рек в Чёрном море. На основе анализа данных ДЗЗ предложена усовершенствованная схема структурирования выносов рек на три зоны, которые видны на снимках из космоса (рис. 6, см. с. 200). Первая отчётливо видна в данных оптики, ИК и радиолокации, вторая — в оптике и ИК, а третья — только в оптике. Наконец, только ИК-данные дают реальную информацию о размерах и границах собственно плюма.

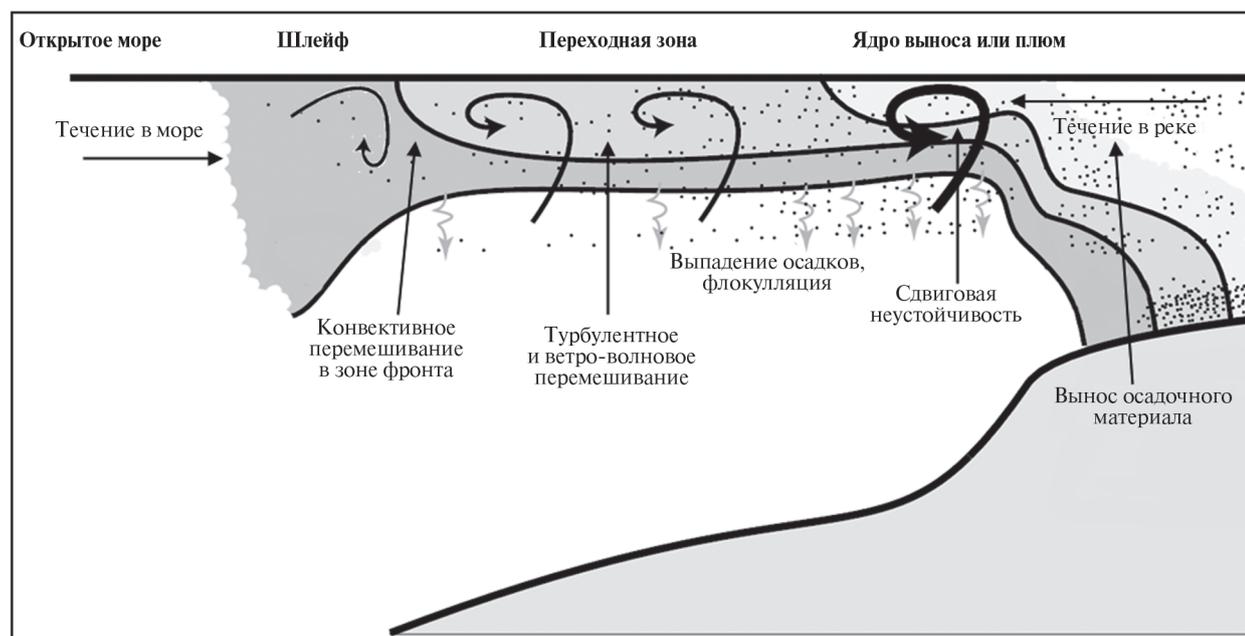


Рис. 6. Вынос реки и его структура с основными областями, выделенными по данным ДЗЗ (модифицированный рисунок из работы (Hetland, Hsu, 2013))

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № 0149-2018-0002); часть результатов получена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-50-00095).

Литература

1. Иванов А. Ю. Стики и плёночные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
2. Иванов А. Ю., Потанин М. Ю., Филимонова Н. А., Евтушенко Н. В., Антонюк А. Ю. Оперативный мониторинг морских акваторий: новые геоинформационные решения и интернет технологии // Земля из космоса. 2014. № 18. С. 28–36.
3. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
4. Малые реки Черного моря: Отчет об экспедиции «Черное море-2015» на НИС «Ашамба». М.: ИО РАН, 2015.
5. Осадчиев А. А., Завьялов П. О. Оценка изменчивости речного стока на основе спутникового мониторинга // Наука Кубани. 2014. № 1. С. 54–59.
6. Хлебников Д. В., Иванов А. Ю., Коновалов Б. В., Терлеева Н. В. Исследование выноса реки Мзымта в Черном море дистанционными (оптическими и радиолокационными) и спектрофотометрическими лабораторными методами // Труды 9-й Всероссийской конф. «Современные проблемы оптики естественных вод» (ONW'2017), Санкт-Петербург, 2017. С. 152–156.
7. Beal R. C., Kudryavtsev V. N., Thompson D. R., Grodsky S. A., Tilley D. G., Dulov V. A., Graber H. C. The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream // J. Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 5799–5814.
8. Brando V. E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellafore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F. M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S. High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event // Ocean Science. 2015. V. 11. P. 1–11.
9. Ermakov S., da Silva J. C. B. Satellite and 'in situ' observations of slicks in the Douro River plume // Proc. 2nd EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Porto, Portugal, 9–11 June 2005.
10. Falcieri F. M., Benetazzo A., Sclavo M., Russo A., Carniel S. Po River plume pattern variability investigated from model data // Continental Shelf Research. 2014. V. 87. P. 84–95.

11. *Garvine R. W.* A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters // *Tellus*. 1982. V. 34. P. 293–306.
12. *Garvine R. W.* A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges // *Continental Shelf Research*. 1995. V. 15. P. 1585–1596.
13. *Hessner K., Rubino A., Brandt P., Alpers W.* The Rhine outflow plume studied by the analysis of synthetic aperture radar data and numerical simulations // *J. Physical Oceanography*. 2001. V. 31. P. 3030–3044.
14. *Hetland R. D.* Relating river plume structure to vertical mixing // *J. Physical Oceanography*. 2005. V. 35. P. 1667–1688.
15. *Hetland R. D., Hsu T. J.* Freshwater and sediment dispersal in large river plumes / *Biogeochemical Dynamics at Major River-Coastal Interfaces*. Cambridge University Press, 2013. pp. 55–85.
16. *Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G.* Mixing and transport in coastal river plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. V. 47. P. 569–594.
17. *O'Donnell J.* The formation and fate of a river plume: A numerical model // *J. Physical Oceanography*. 1990. V. 20. P. 551–559.
18. *Osadchiv A., Korshenko E.* Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions // *Ocean Science*. 2017. V. 13. P. 465–482.
19. *Perlin N., de Szoeke S. P., Chelton D. B., Samelson R. M., Skyllingstad E. D., O'Neill L. W.* Modeling the atmospheric boundary layer wind response to mesoscale sea surface temperature perturbations // *Monthly Weather Review*. 2014. V. 142. P. 4284–4307.

Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data

A. Yu. Ivanov¹, D. V. Khlebnikov¹, B. V. Konovalov¹,
N. V. Evtushenko², N. V. Terleeva¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
Moscow 117997, Russia*

² *SCANEX Group, Moscow 108811, Russia
E-mail: ivanoff@ocean.ru*

Based on the analysis of medium and high resolution satellite optical and synthetic aperture radar (SAR) images, which show river outflows in the coastal zone of the eastern part of the Black Sea, their surface manifestations were studied. The powerful river outflows are often observed here throughout the year during intense precipitation and in spring time when snow and glaciers melt in the mountains. They are usually observed both in the fields of ocean color (suspended matter) and sea surface temperature (SST) in visible and infrared images. But they can also be seen in SAR images due to modulation of small-scale waves generated by wind. Joint analysis of satellite images obtained concurrently with ground measurements allowed obtaining new information about this phenomenon. In particular, it is shown that river outflows have a characteristic structure and consist of three distinct regions clearly identified in visible and infrared images, and spread into the open sea to a distance of 30–40 km. The actual plume is most clearly detected in the SST field rather than in ocean color. Dark patches that appeared from time to time on SAR images of the sea surface in the plume zone can be explained by the difference in the temperatures of river and surrounding sea waters and by the transformation of the atmospheric boundary layer over cold water of the plume.

Keywords: Black Sea, river outflows, outflow plumes, optical and infrared images, SAR images, structure of river outflow

Accepted: 05.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202

References

1. Ivanov A. Yu., Sliki i plenochnye obrazovaniya na kosmicheskikh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh (Slicks and oil films signatures on syntetic aperture radar images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 3, pp. 73–96.
2. Ivanov A., Potanin M., Filimonova N., Antonyuk A., Evtushenko N., Operational maritime monitoring: new geoinformation solutions and internet technologies, *Earth from Space*, 2014, No. 18, pp. 37–42.
3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovyye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatoriy* (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk), Moscow: IKI RAS, 2016, 334 p.
4. *Malye reki Chernogo morya. Otchet ob ekspeditsii "Chernoye more-2015" na NIS "Ashamba" 26–31 maya 2015* (Small rivers of the Black Sea, "Black Sea-2015" Report from expedition R/V Ashamba on 26–31 May 2015), Moscow: IO RAS, 2015.
5. Osadchiev A. A., Zavalov P. O., Otsenka izmenchivosti rechnogo stoka na osnove sputnikovogo monitoringa (Estimation of river discharge variability based on satellite monitoring), *Nauka Kubani*, 2014, No. 1, pp. 54–59.
6. Khlebnikov D. V., Ivanov A. Yu., Konovalov B. V., Terleeva N. V., Issledovaniye vynosa reki Mzymta v Chernom more distantsionnymi (opticheskimi i radiolokatsionnymi) i spektrofotometricheskimi laboratornymi metodami (Research of the Mzymta River plume in the Black Sea by means of remote sensing (optical and radiophysical) and spectrophotometry methods), *Trudy IX Vserossiyskoy konferentsii "Sovremennye problemy optiki yestestvennykh vod" (ONW'2017)* (Proc. IX All-Russia Conf. "Modern problems of the optics of natural waters" (ONW'2017)), Saint Petersburg, 2017, pp. 152–156.
7. Beal R. C., Kudryavtsev V. N., Thompson D. R., Grodsky S. A., Tilley D. G., Dulov V. A., Graber H. C., The influence of the marine atmospheric boundary layer on ERS-1 synthetic aperture radar imagery of the Gulf Stream, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, pp. 5799–5814.
8. Brando V. E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellafigliore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F. M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S., High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event, *Ocean Science*, 2015, Vol. 11, pp. 1–11.
9. Ermakov S., da Silva J. C. B., Satellite and 'in situ' observations of slicks in the Douro River plume, *Proc. 2nd EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone*, Porto, Portugal, 9–11 June 2005.
10. Falcieri F. M., Benetazzo A., Sclavo M., Russo A., Carniel S., Po River plume pattern variability investigated from model data, *Continental Shelf Research*, 2014, Vol. 87, pp. 84–95.
11. Garvine R. W., A steady state model for buoyant surface plume hydrodynamics in coastal waters, *Tellus*, 1982, Vol. 34, pp. 293–306.
12. Garvine R. W., A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges, *Continental Shelf Research*, 1995, Vol. 15, pp. 1585–1596.
13. Hessner K., Rubino A., Brandt P., Alpers W., The Rhine outflow plume studied by the analysis of synthetic aperture radar data and numerical simulations, *J. Physical Oceanography*, 2001, Vol. 31, pp. 3030–3044.
14. Hetland R. D., Relating river plume structure to vertical mixing, *J. Physical Oceanography*, 2005, Vol. 35, pp. 1667–1688.
15. Hetland R. D., Hsu T. J., Freshwater and sediment dispersal in large river plumes, In: *Biogeochemical Dynamics at Major River-Coastal Interfaces*, Cambridge University Press, 2013, pp. 55–85.
16. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G., Mixing and transport in coastal river plumes, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015, Vol. 47, pp. 569–594.
17. O'Donnell J., The formation and fate of a river plume: A numerical model, *J. Physical Oceanography*, 1990, Vol. 20, pp. 551–559.
18. Osadchiev A., Korshenko E., Small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea under average climatic and flooding discharge conditions, *Ocean Science*, 2017, Vol. 13, pp. 465–482.
19. Perlin N., de Szoek S. P., Chelton D. B., Samelson R. M., Skillingstad E. D., O'Neill L. W., Modeling the atmospheric boundary layer wind response to mesoscale sea surface temperature perturbations, *Monthly Weather Review*, 2014, Vol. 142, pp. 4284–4307.