

Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами

К. Р. Назирова¹, О. Ю. Лаврова¹, Е. В. Краюшкин¹,
Д. М. Соловьев², Е. В. Жук², Я. О. Алферьева³

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

² Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия

E-mail: knazirova@cosmos.ru

Представлены результаты натурных измерений параметров плюма р. Мзымта, проведённых в апреле 2018 г. синхронно со спутниковой съёмкой. На основе данных приборов MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8 и OLCI Sentinel-3 по стандартным алгоритмам определялось общее содержание взвешенного вещества и сравнивалось с данными измерений *in situ* с помощью датчика мутности и полученными в результате отбора проб воды. Показано, что количественные значения концентрации взвешенного вещества, определённые по спутниковым данным, примерно совпадают с измеренными *in situ* только в районе маргинального фильтра. Резкая фронтальная граница, выделенная по натурным измерениям, располагалась на расстоянии не более 500 м от устья, мористее которой значения концентрации взвешенного вещества уменьшались почти в 10 раз. Значения этого параметра, полученные по спутниковым данным, изменялись плавно практически до видимой границы плюма. Результаты натурных измерений позволили также оценить адекватность получаемых на основе спутниковых данных пространственных характеристик плюмов. Оценены площади плюма и максимальное удаление его границы от береговой черты. Рассмотрена зависимость площади плюма от уровня воды в р. Мзымта. Внешняя граница плюма, проявляющаяся на спутниковых изображениях видимого диапазона за счёт оптических различий морских и мутных речных вод, не наблюдается отчётливо в измеренных *in situ* параметрах, таких как температура, солёность и мутность. В то же время натурные измерения позволяют выявить пространственные неоднородности в плюме, не различимые в данных спутникового зондирования. По измерениям *in situ* была определена глубина «интрузии» речных вод, которая составила не более 3–4 м.

Ключевые слова: речной плюм, спутниковые изображения видимого диапазона, измерения *in situ*, общее содержание взвешенного вещества, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, Мзымта, Чёрное море

Одобрена к печати: 05.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243

Введение

Речной сток — главный источник поступления в море растворённых и взвешенных веществ, в том числе продуктов антропогенного загрязнения. Эти вещества во многих случаях существенно и негативно влияют на экосистемы прибрежных районов (Завьялов и др., 2014). Поэтому мониторинг приустьевых областей и понимание динамики распространения речных вод на морских шельфах — важная практическая задача.

Попадая из реки в море, материковые воды образуют прилегающие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и температурой, отличной от окружающей, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики. Такие структуры в современной литературе принято называть «плюмами» (Завьялов и др., 2014). Пространственные масштабы плюмов варьируются от нескольких до десятков квадратных километров. На эволюцию речных плюмов оказывает влияние совокупность большого количества факторов, таких как батиметрия, сила Кориолиса, интенсивность речного стока, ветер, течения, приливы и другие прибрежные процессы.

На сегодняшний день уже множество научных работ посвящено изучению таких динамических процессов в данном регионе, как синоптическая изменчивость течений, сезонная и межгодовая динамика речного плюма, его взаимосвязь с ветровым режимом, а также исследованиям по изучению качества прибрежных вод: распределению минеральной и общей взвеси, растворённой органики и других химических показателей.

Традиционно можно выделить два способа получения данных: контактный (натурные судовые измерения) и бесконтактный (данные дистанционного зондирования). Также в своих исследованиях учёные используют лабораторные эксперименты и численное моделирование процессов в приустьевых зонах (Журбас и др., 2011).

Так, например, в цикле работ (Завьялов и др., 2014), посвящённых исследованию малых рек российского побережья Чёрного моря, на основе многолетних судовых измерений приведены количественные характеристики отклика гидрофизических полей в шельфовой зоне на воздействие материкового стока, описаны основные закономерности динамики плюма при тех или иных воздействиях. К работам на основе натурных измерений также относится статья (Короткина и др., 2011) о синоптической изменчивости течений в прибрежной акватории Сочи. Но как отмечают сами авторы, данные исследования имеют очень локальный и периодический характер, а для таких процессов необходим непрерывный мониторинг. И появляется необходимость использовать второй метод исследования — бесконтактный.

Развитие спутниковых средств и доступность данных дистанционного зондирования из космоса уже за более чем двадцатилетний период позволяют проводить круглогодичный мониторинг распространения взвешенного вещества по большим акваториям. Поскольку речные плюмы сильно отличаются от окружающих их морских вод своими оптическими свойствами, подавляющее число работ, посвящённых спутниковым наблюдениям плюмов, для своих целей используют сканеры цвета (Ocean Color Data). Первоначально исследования базировались на данных спектрорадиометра среднего разрешения MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на искусственных спутниках Земли (ИСЗ) Aqua/Terra, данных SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) ИСЗ SeaStar, MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) ИСЗ Envisat (Miller, McKee, 2004; Warrick et al., 2004). Для этих сенсоров были разработаны алгоритмы получения количественных оценок концентрации взвешенного вещества (SPM — suspended particulate matter), которые широко используются и в настоящее время. Основное достоинство прибора MODIS — это ежедневное получение данных над всем земным шаром с широкой полосой обзора, многолетняя работа на орбите (что позволило получить многолетние ряды данных), свободный доступ не только к самим данным, но и к различным продуктам, получаемым на их основе, таким как поле температуры морской поверхности (SST — Sea Surface Temperature), исходящее из воды излучение (WLR — Water-Leaving Radiance), общее содержание взвешенного вещества (TSM — Total Suspended Matter), концентрация хлорофилла *a* (*Chl-a* concentration). Поэтому многие научные работы, посвящённые изучению речных выносов дистанционными спутниковыми методами, до сих пор базируются на данных MODIS (Doxaran et al., 2013; Ody et al., 2016). Основной недостаток данных MODIS, существенный при изучении тонкой структуры речного плюма, — это пространственное разрешение 250 м в видимом диапазоне, перечисленные же продукты имеют пространственное разрешение 500 и 1000 м.

В связи с запуском Европейским космическим агентством серии спутников Sentinel, которые имеют на борту целый ряд взаимодополняющих друг друга приборов, дистанционное зондирование Земли в целом и Мирового океана в частности перешло на качественно новый уровень (Lavrova et al., 2016). Прибор MSI (Multispectral Imager Instrument), установленный на спутниках Sentinel-2A/B, позволяет получать информацию в видимом диапазоне с разрешением 10 м для отдельных каналов. А это уже открывает новые возможности для изучения не только динамики распространения взвешенного вещества (например, (Лаврова и др., 2016; Gernez et al., 2015)), но и изучению гидродинамических процессов, которые генерируются выносом рек. Прежде всего, это работы, посвящённые генерации внутренних волн фронтами разрозненных вод (Da Silva et al., 2002; Lavrova, Mityagina, 2017; Lavrova et al., 2014; Nash, Moum, 2005; Pan et al., 2007; Stashchuk, Vlasenko, 2009).

Существенный недостаток изучения характеристик речных плюмов, на наш взгляд, состоит в том, что совместное использование результатов измерений *in situ* и данных дистанционного зондирования (ДДЗ) является номинальным, каждый источник информации используется отдельно, притом чаще отдаётся предпочтение прямым (натурным) измерениям, а ДДЗ применяют как вспомогательный метод для получения только качественных характеристик (Zajaczkowski et al., 2010).

Остаётся открытым вопрос, насколько достоверны количественные оценки, например полного содержания взвешенного вещества, получаемые на основе данных дистанционного зондирования, особенно в таких сложных районах, как приустьевые. Действительно ли спектральная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы после проведения атмосферной коррекции данных оптических сенсоров даёт реальную информацию о параметрах приповерхностного слоя моря в прибрежной зоне? Для решения этой проблемы необходимы регулярные подспутниковые измерения. Проведённые нами натурные измерения в приустьевой зоне р. Мзымта, результаты которых описаны в данной статье, были направлены на получение и совместный анализ синхронных спутниковых и натуральных данных.

Район и методы исследования

Северо-восточная часть Чёрного моря характеризуется наличием узкого шельфа, ширина которого не превышает нескольких километров и находится под значительным влиянием речного стока — рек Мзымта, Хоста, Кудепста, Херота (Короткина и др., 2011). Наиболее крупная из этих рек — Мзымта, её среднегодовое расхождение составляет $1,56 \text{ км}^3$ (Джаошвили, 2002). Протяжённость р. Мзымта — 89 км, она имеет смешанное питание: ледниковое и дождевое; впадает в Чёрное море в районе Адлера (Большой Сочи). В период активного таяния снега уровень воды в реке может подниматься до 5 м. Во время половодья и сильных сезонных дождей её плюм чётко идентифицируется на спутниковых изображениях видимого диапазона, вследствие чего её можно рассматривать как естественную лабораторию для изучения параметров плюма дистанционными методами. Этому также способствует наличие большого количества безоблачных или малооблачных дней в году. В данном районе неоднократно проводились натурные измерения, в первую очередь группой учёных из Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН под руководством П. О. Завьялова (Завьялов и др. 2014). Тем полезнее сравнить современную ситуацию, на которую, возможно, оказало влияние строительство олимпийских объектов вдоль русла р. Мзымта и порта в районе её устья, с результатами предыдущих исследований. К тому же ранее данные спутникового зондирования использовались только для качественной оценки параметров плюма.

Наши синхронные со спутниковой съёмкой натурные измерения параметров плюма р. Мзымта были проведены в период с 20 по 29 апреля 2018 г. (рис. 1, см. с. 230). Измерения проводились с маломерного судна «Арабелла» с помощью акустического доплеровского профилографа скорости течения ADCP RDI WH 300 кГц совместно с выполнением гидрологических станций STD-зондирования прибором YSI EXO Multiparameter Sonde, оснащённого дополнительными датчиками мутности и флуоресценции. Производился также отбор проб воды с поверхностного горизонта для дальнейшего лабораторного анализа с целью определения концентрации взвешенного вещества в самой реке и на ближайшей станции в приустьевой зоне моря.

В течение экспедиционных работ выполнено пять выходов в море: 21, 24, 25, 26 и 28 апреля 2018 г. Были проведены две подробные съёмки галсами у устья р. Мзымта и четыре поперечных разреза через весь плюм. Всего было выполнено 70 станций STD-зондирования. Карта-схема расположения станций STD-зондирования представлена на рис. 2 (см. с. 230).

В период проведения экспедиционных работ было получено и проанализировано 13 спутниковых снимков: пять радиолокационных изображений SAR-C Sentinel-1, четыре изображения MSI Sentinel-2, два — OLI/TIRS Landsat-8, по одному — OLCI Sentinel-3 и ETM+ Landsat-7 (табл. 1). Ежедневно для получения общей картины в исследуемой акватории анализировались спутниковые данные среднего разрешения MODIS Aqua/Terra и VIIRS NPP.



Рис. 1. Район спутниковых наблюдений и экспериментальных работ

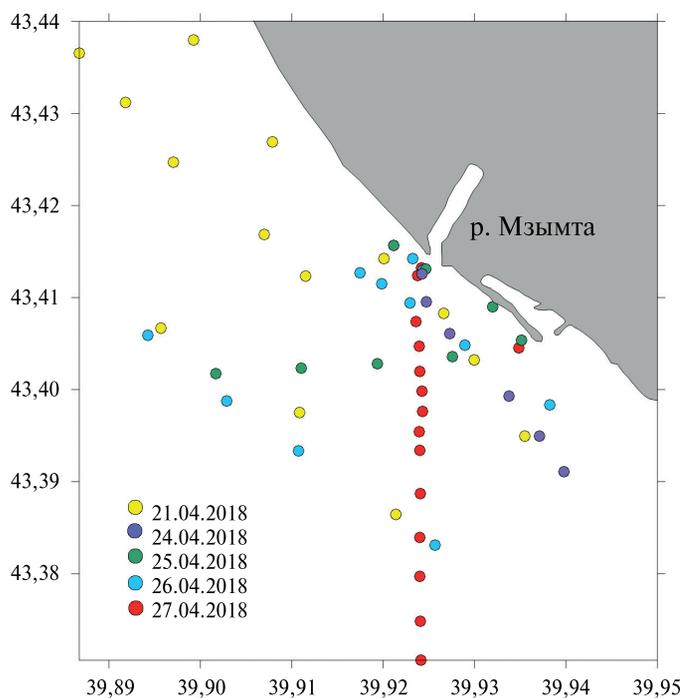


Рис. 2. Схема расположения станций STD-зондирования в плюме р. Мзымта в апреле 2018 г.

Таблица 1. Спутниковые данные высокого пространственного разрешения, полученные в период экспедиционных работ в апреле 2018 г.

| Дата | Выход в море | Спутниковые данные | Время спутниковой съёмки (GMT) |
|------------|--------------|--------------------|--------------------------------|
| 21.04.2018 | Да | MSI (Sentinel-2B) | 08:15 |
| | | ETM+ Landsat-7 | 08:08 |
| | | SAR-C Sentinel-1A | 15:11 |
| 22.04.2018 | Нет | OLI Landsat-8 | 08:00 |
| 23.04.2018 | Нет | MSI (Sentinel-2) | 08:17 |
| 25.04.2018 | Да | SAR-C Sentinel-1A | 03:32 |
| | | OLCI (Sentinel-3) | 08:01 |
| 26.04.2018 | Да | SAR-C Sentinel-1B | 03:24 |
| | | MSI (Sentinel-2A) | 08:26 |
| | | SAR-C Sentinel-1A | 15:19 |
| 27.04.2018 | Нет | SAR-C Sentinel-1B | 15:10 |
| 28.04.2018 | Да | MSI (Sentinel-2B) | 08:17 |
| 29.04.2018 | Нет | OLI Landsat-8 | 08:07 |

Все спутниковые данные в оперативном режиме интегрировались в информационную систему See The Sea (STS) (Лупян и др., 2012), анализировались, и на основе полученной информации планировались измерения на следующий день. По полученным оптическим данным с использованием стандартных алгоритмов, рекомендуемых Европейским космическим агентством и внедрённых в систему SNAP, строились карты поверхностной температуры, карты полного содержания взвешенного вещества и концентрации хлорофилла *a*. В дальнейшем был проведён совместный анализ спутниковой информации и результатов подспутниковых измерений, который позволил получить следующие результаты и сделать предварительные выводы.

Результаты

Выделение границы плюма реки Мзымты по спутниковым данным

Несмотря на то, что речной плюм чётко выделяется на спутниковых оптических изображениях, задача определения его пространственного размера и границы оказалась далеко не тривиальной. Во-первых, вследствие того, что в исследуемом районе находится ещё и устье р. Псоу (см. рис. 1), не всегда можно однозначно разделить плюмы этих двух рек. Во-вторых, встаёт вопрос: какое пороговое значение использовать для «очерчивания» границ плюма. Лучше всего границы плюма идентифицировались на цветосинтезированных изображениях в псевдо-естественных цветах (TrueColor image). Границы хорошо выражены за счёт контрастных оптических различий речных и морских вод (так обычно принято считать, а как именно происходит распределение измеренных величин, будет показано ниже). На основе карт *Chl-a* определить точные границы плюма невозможно. Они размываются, вынос р. Мзымта выглядит более обширным и однородным. Повышенное значение концентрации *Chl-a* в прибрежной зоне может быть вызвано не только выносом речных вод. В поле TSM структура плюма выглядит сложнее, область с максимальными значениями более локализована. Однако здесь как раз и возникает проблема порогового значения концентрации взвешенного вещества, которое могло бы служить индикатором границы плюма, особенно для приустьевой области, где наблюдается наибольшая концентрация терригенного вещества (рис. 3, см. с. 232).

На рис. 4 (см. с. 232) разными цветами представлены границы плюмов, выделенные по картам TSM за 21, 23, 26 и 28 апреля 2018 г. Для большой точности использовались данные MSI Sentinel-2A/B. Были приблизительно оценены площади плюмов и максимальное расстояние выделенной границы от береговой черты. Результаты оценок представлены в табл. 2. Как показывают полученные оценки, максимальная площадь плюма составила 71,7 км², а максимальное удаление границы плюма от береговой черты — 7,9 км.

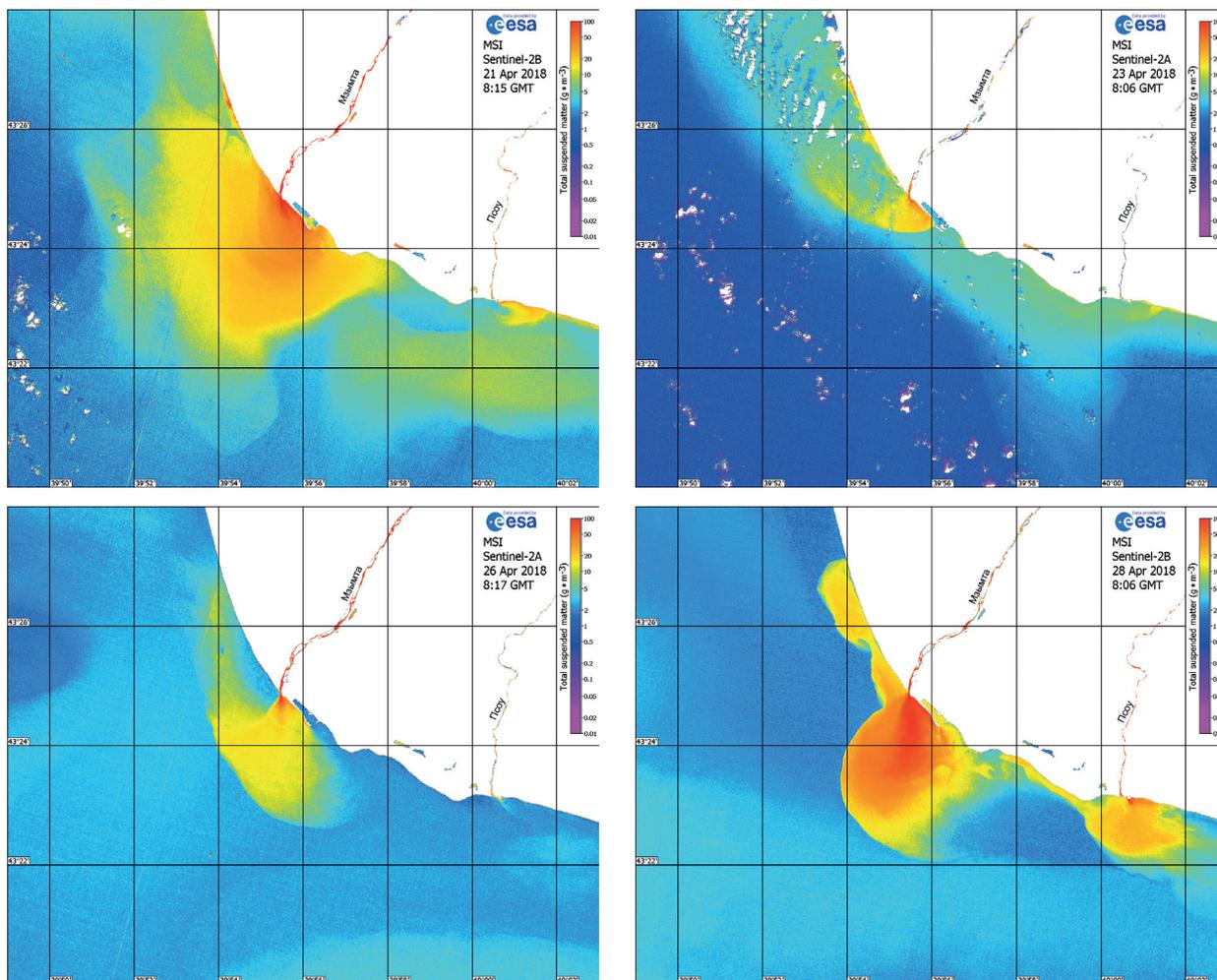


Рис. 3. Проявление плюма р. Мзымта на карте TSM, полученной по данным MSI Sentinel-2 в период проведения натурных измерений

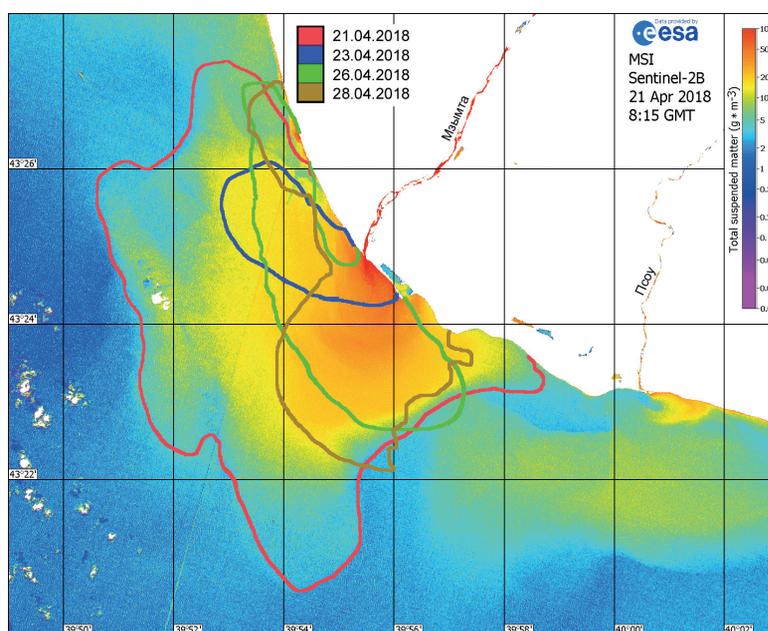


Рис. 4. Условные границы плюма р. Мзымта, определённые по картам TSM

Таблица 2. Основные пространственные характеристики плюма р. Мзымта и гидрометеоданные на момент спутниковой съёмки

| Дата | Площадь плюма, км ² | Максимальное удаление границы плюма от берега, км | Уровень р. Мзымта на водомерном посту Казачий Брод, см | Скорость ветра, м/с | Направление ветра |
|------------|--------------------------------|---|--|---------------------|-------------------|
| 21.04.2018 | 71,7 | 7,9 | 127 | 2,8 | ЮЮЗ |
| 23.04.2018 | 8,9 | 1,37 | 111 | 3,6 | ЮЮВ |
| 26.04.2018 | 21,9 | 2,9 | 109 | 2,6 | ЗЮЗ |
| 28.04.2018 | 20,97 | 4,8 | 121 | 3,2 | ЗЮЗ |

Чем может объясняться такое сильное изменение как площади плюма, так и направления его распространения за столь короткий промежуток времени? Возможны три причины: резкое изменение интенсивности речного выноса, скорости и направления ветра и структуры прибрежного течения.

Поскольку мы не имели возможности получить данные о расходе реки, то использовали данные об уровне воды в ней (рис. 5, табл. 2), определённые на водомерном посту в пос. Казачий Брод (расстояние от устья ~14 км), любезно предоставленные нам Лебедевым С. А. (ГЦ РАН).

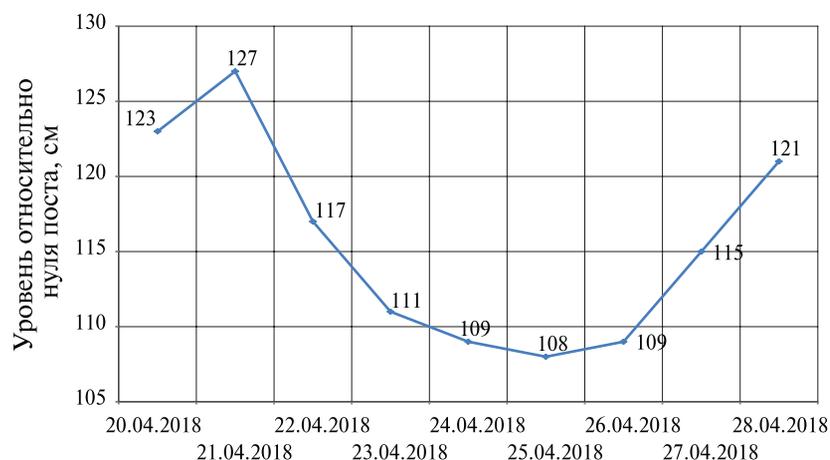


Рис. 5. Уровень р. Мзымта относительно нуля водомерного поста в пос. Казачий Брод

В момент проведения экспедиционных работ скорость ветра была в пределах от 1 до 4 м/с, направление постоянно менялось в течение суток. В табл. 2 представлены средние значения за пятичасовой период до момента спутниковой съёмки. Данные о скорости и направлении ветра в узле с координатами 43,4° с. ш. и 39,91° в. д. были получены с метеорологического сервиса <https://www.meteoblue.com> в рамках совместных исследований с ИКИ РАН. Что касается характера прибрежного течения, то, как показали наши измерения с помощью ADCP, его направление в целом совпадало с направлением Основного черноморского течения (ОЧТ), скорость не превышала 10 см/с. На спутниковых радиолокационных изображениях SAR-C Sentinel-1 25–26 апреля наблюдалось усиление вихревой активности мористее района работ, однако она не оказала значительного влияния на распространение выноса речных вод.

Таким образом, можно сделать вывод, что пространственные размеры плюма определялись интенсивностью стока реки, а ветровое поле несколько видоизменяло его направление распространения. При усилении юго-юго-западного ветра 23 апреля плюм прижат к берегу. Резкая граница плюма наблюдалась на его юго-восточной части. В остальные дни прослеживалась резкая, перпендикулярная берегу западная граница плюма.

Пространственные характеристики выноса р. Мзымта по измерениям *in situ*

Стоит отметить, что в ходе экспедиционных работ в апреле 2018 г. различить морские и речные воды с борта маломерного судна было затруднительно. В открытом море граница речного плюма не имела чёткого фронтального раздела, за исключением западного фронта (первые 300–400 м от берега, далее визуальную границу сложно было идентифицировать). На *рис. 6* представлены две фотографии фронта р. Мзымта западнее устья (25 апреля — *слева* и 26 апреля — *справа*). Оба снимка были сделаны с борта судна примерно в одно и то же время с одного и того же ракурса (т. е. при условии одинаковой освещённости) во время проведения STD-зондирования. Данные изображения демонстрируют, как в течение суток могут изменяться оптические свойства речных вод вследствие изменения состава и увеличения интенсивности стока реки (см. *рис. 5*). Ниже будет показано, как изменились количественные значения концентрации взвешенного вещества и мутности вод в эти дни.



Рис. 6. Граница речных и морских вод западнее устья р. Мзымта 25 апреля (*слева*) и 26 апреля (*справа*) 2018 г.

Для определения пространственной структуры плюма были проанализированы данные измерений *in situ* на всех 70 станциях. В настоящей статье мы остановимся на результатах натурных измерений за 28 апреля, когда зондирование проводилось на разрезе, перпендикулярном к берегу практически до границы плюма. Было сделано 16 станций, расположенных примерно на расстоянии 200 м друг от друга (*рис. 7*).

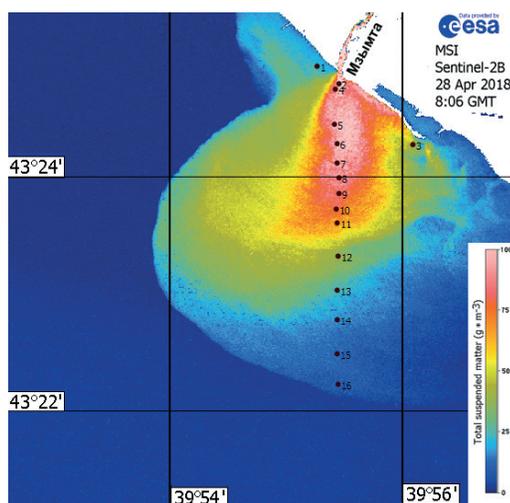


Рис. 7. Схема расположения станций зондирования на разрезе 28 апреля 2018 г.

Измерялись следующие параметры: температура воды (T), солёность (S), мутность ($Turb$). Значения всех измеренных в этот день параметров в верхнем горизонте (на глубине 0,3 м) представлены в табл. 3, а на рис. 8 отражены их пространственные распределения. Анализ результатов измерений показал следующее: границы распространения речных вод идентифицируются не так однозначно по натурным измерениям, как по спутниковым данным. Была выделена точка (станция № 4), после которой уменьшение/увеличение исследуемых характеристик происходило постепенно, равномерно и между соседними точками — незначительно. Данная станция располагается на расстоянии 200–400 м от береговой зоны (в зависимости от интенсивности стока). Назовём условно эту область «выходом на стационарный режим». Другими словами, используя термины гидрологов, выделенную точку можно обозначить границей маргинального фильтра. Принято считать, что в среднем для рек мира в этой зоне откладывается 93–95 % от взвешенных и 20–40 % от растворённых веществ речного стока, включая загрязнения (Лисицын, 1994).

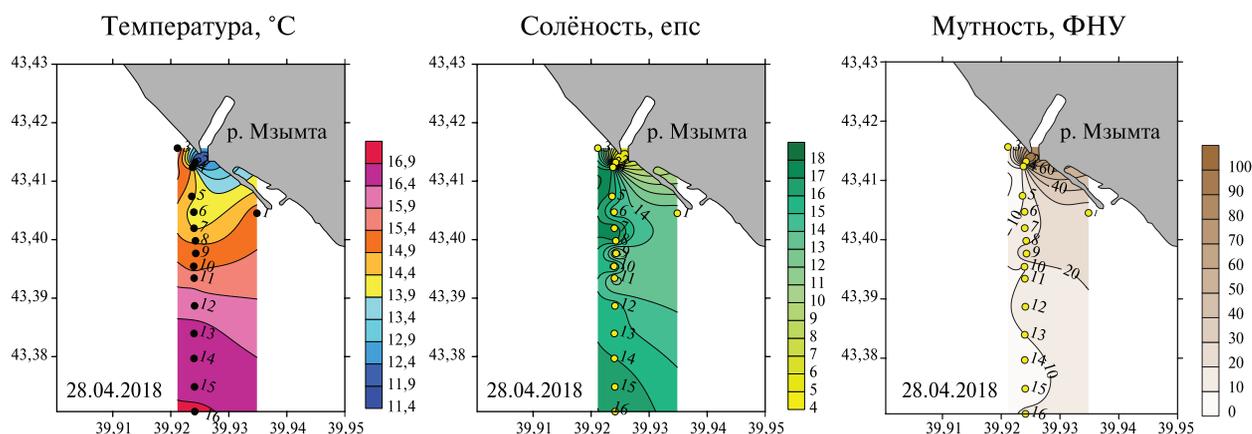


Рис. 8. Пространственные распределения полей температуры, солёности и мутности по данным CTD-зондирования 28 апреля 2018 г. в верхнем слое

Таблица 3. Значения температуры воды, солёности и мутности по данным измерений *in situ* на разрезе 28 апреля 2018 г.

| № станции | Широта, град с. ш. | Долгота, град в. д. | Температура, °C | Солёность, епс | Мутность, ФНУ |
|-----------|--------------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------|
| 2 | 43,4132 | 39,9242 | 11,356 | 3,77 | 105,50 |
| 4 | 43,4123 | 39,9237 | 14,771 | 16,79 | 11,80 |
| 5 | 43,4074 | 39,9236 | 14,513 | 16,58 | 9,08 |
| 6 | 43,4047 | 39,9239 | 14,138 | 13,99 | 12,19 |
| 7 | 43,4019 | 39,9240 | 14,367 | 17,86 | 16,17 |
| 8 | 43,3998 | 39,9242 | 14,804 | 17,33 | 15,53 |
| 9 | 43,3976 | 39,9243 | 15,240 | 10,58 | 32,11 |
| 10 | 43,3954 | 39,9239 | 15,173 | 17,08 | 9,30 |
| 11 | 43,3934 | 39,9240 | 15,775 | 12,24 | 11,18 |
| 12 | 43,3886 | 39,9241 | 16,078 | 15,56 | 13,79 |
| 13 | 43,3839 | 39,9240 | 16,691 | 15,23 | 9,98 |
| 14 | 43,3796 | 39,9240 | 16,681 | 16,03 | 6,96 |
| 15 | 43,3748 | 39,9240 | 16,614 | 16,73 | 4,87 |
| 16 | 43,3706 | 39,9241 | 17,067 | 16,77 | 11,69 |

Как показали результаты измерений, хорошо идентифицируется только граница маргинального фильтра, после которой значения мутности уменьшаются сразу практически в 10 раз со 105,5 до 11,8 ФНУ на расстоянии в 200 м. Мористее значения мутности уменьшаются плавно; на отдельных станциях, таких как № 7–9, наоборот, происходит увеличение значений мутности, что говорит о наличии неоднородностей в самом плюме. Резкие изменения на станции № 4 наблюдаются также в температуре воды (с 11,4 до 14,7 °С) и в значениях солёности (с 3,77 до 16,79 епс). Следует отметить, что неоднородность, или «заток», более разрозненных вод, выявленный на станциях № 7–9 в значениях мутности, отразился также и в значениях солёности (см. табл. 3).

При вдольбереговых измерениях, проведённых 26 апреля, когда западная граница чётко идентифицировалась вблизи берега, как на спутниковых изображениях, так и при наблюдениях с борта судна (см. рис. 3 и б) удалось зафиксировать резкий скачок в значениях всех измеренных параметров. В частности, на соседних станциях мутность уменьшилась с 45 до 2 ФНУ. На разрезе, перпендикулярном к берегу, «поймать» яркую дальнюю границу плюма на основе результатов натуральных измерений в поле температуры, солёности и мутности невозможно, в отличие от спутниковых наблюдений. Из чего можно сделать следующий вывод: на спутниковых изображениях достаточно тонкого подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным, 5 ФНУ) для проявления яркой границы плюма как в изображениях TrueColor, так и в поле TSM. Качественно на изображениях TrueColor практически была незаметна разница в проявлении плюма в приустьевой области и на дальних точках разрезов, хотя значения мутности в некоторых случаях различаются более чем в 20 раз.

Оценка границы выноса речных вод по глубине

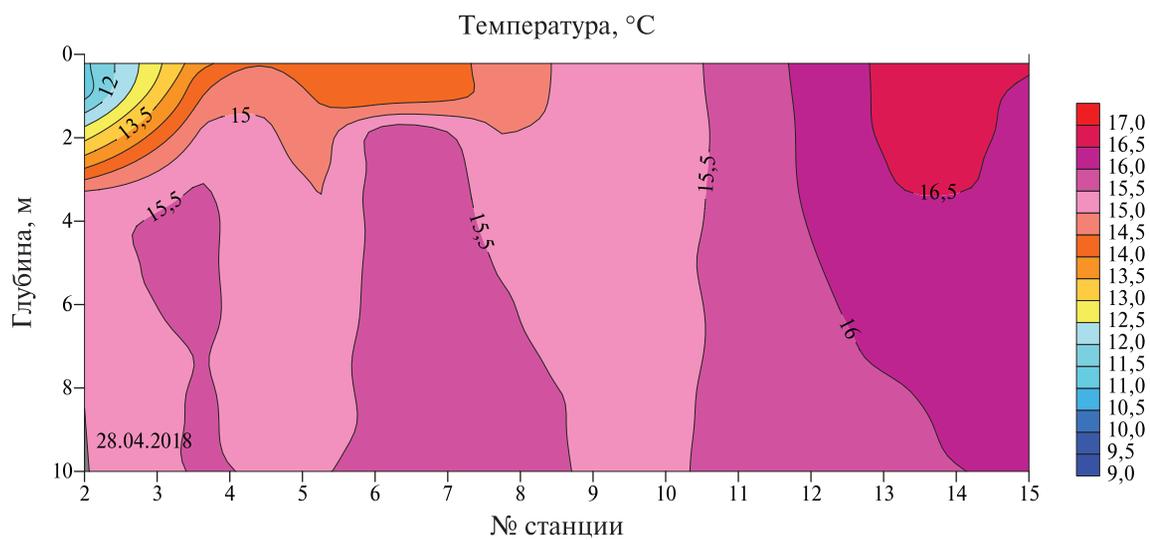
Как показали наши измерения, несмотря на километровые пространственные (поверхностные) размеры плюма, глубина «интрузии» речных вод составила не более 3–4 м. В поле температуры и солёности это тонкая линза, распространяющаяся до 8 км от берега (в период нашей экспедиции). Стоит отметить, что в поле мутности морских вод (по данным измерений *in situ*) речные воды представлены более мощным слоем, чем, например, в поле солёности. В приустьевой зоне в приповерхностном слое значения *T*, *S* и *Turb* могут отличаться в несколько раз (для мутности — в десятки раз) по сравнению со значениями на 5 м или на станции в 200 м от берега.

Так, например, при зондировании 28 апреля 2018 г. были получены следующие значения: температура в поверхностном слое на глубине 0,5 м — 11,5 °С, на глубине 3 м — 15 °С. Значения солёности соответственно изменялись с 4 до 17 епс; мутность — с 110 до 10 ФНУ (рис. 9, см. с. 237).

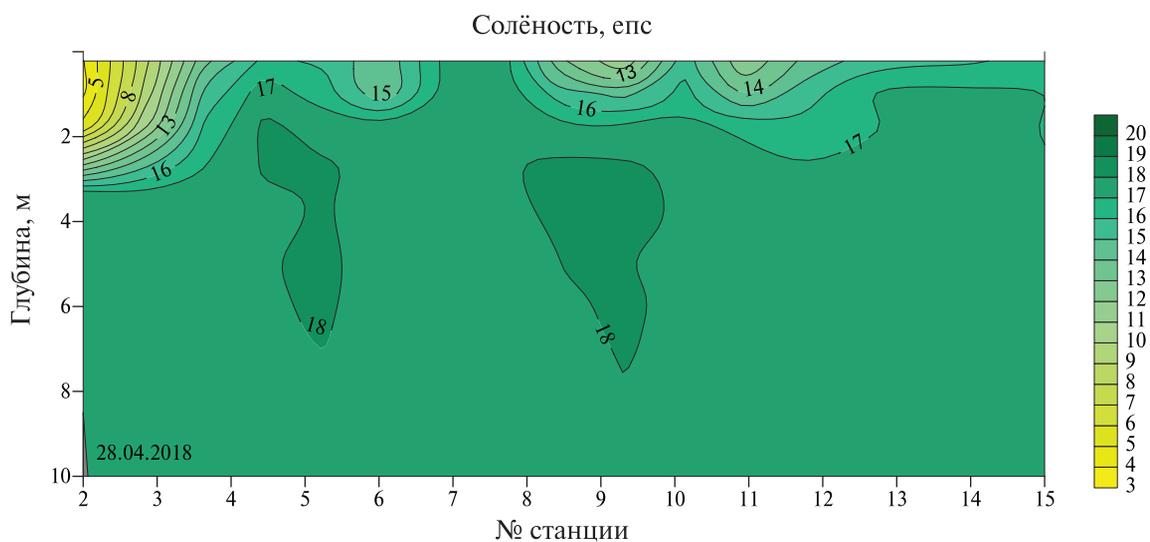
Характерные значения температуры, солёности и мутности на разных горизонтах, измеренные *in situ* 28 апреля 2018 г., представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения температуры, солёности и мутности на разных горизонтах за 28 апреля 2018 г.

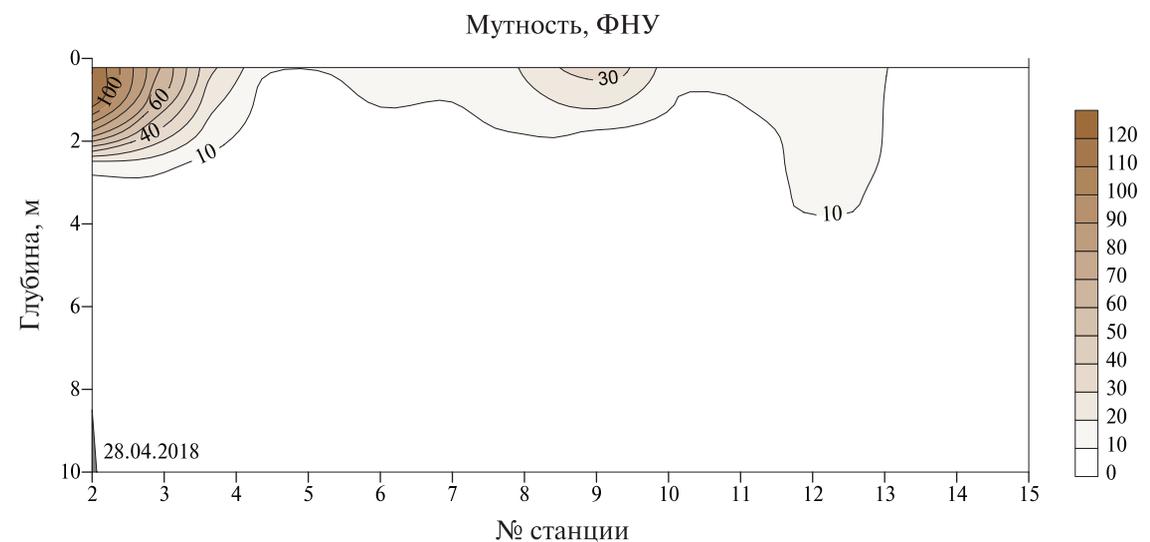
| Параметры | Станция № 2 (у устья) | | Станция № 4 (200 м от берега) | | Станция № 15 (4,38 км от берега) | |
|-----------------|-----------------------|------|-------------------------------|------|----------------------------------|----|
| | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 5 |
| Глубина, м | 0 | 5 | 0 | 5 | 0 | 5 |
| Температура, °С | 9 | 15,5 | 14 | 15,5 | 17 | 16 |
| Солёность, епс | 3 | 18 | 15 | 18 | 16 | 18 |
| Мутность, ФНУ | 105,5 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 |



а



б



в

Рис. 9. Распределение температуры, солёности, мутности по глубине на станциях зондирования 28 апреля 2018 г.

Сравнительный анализ значений мутности вод на основе спутниковых данных и измерений *in situ*

Безусловно, преимущество натуральных измерений заключается в возможности получения разных параметров воды от поверхности до дна на каждом горизонте. Спутниковые данные — это некая интегральная величина в «столбе» морской воды, которую мы принимаем за значения в приповерхностном слое. Мощность этого «столба» может быть разной (от десятков сантиметров до десятков метров) и зависит от многих характеристик (освещённости, угла наклона солнечных лучей, концентрации взвеси). Стоит отметить, что единицы измерения, которые мы получаем дистанционными методами и контактными, различны. Восстановленные по спутниковым данным на основе стандартных алгоритмов значения TSM (Total Suspended Matter) — концентрация полного взвешенного вещества, измеряемая в граммах на кубический метр. А на основе оптического датчика мутности STD-зонда YSI EXO Multiparameter Sonde мы получаем условную единицу мутности — ФНУ (*англ.* FNU, Formazine Nephelometric Unit). Для её определения используют фотометрический метод измерения в рамках Международного стандарта ISO 7027, действующего с 1 ноября 2016 г. Помимо этого, на основе нефелометрического метода измерения принято использовать альтернативную ФНУ единицу — НТУ (*англ.* NTU, Nephelometric Turbidity Unit). Не существует стандартного преобразования между единицами мутности (НТУ, ФНУ) и количественными измерениями концентрации взвешенного вещества ($\text{г}/\text{м}^3$). Ситуация усложняется за счёт того, что восстановленная по спутниковым данным концентрация взвешенного вещества относится к третьему типу определения мутности, включая совершенно иной физический подход. Поэтому открытым остаётся вопрос сопоставления этих данных. Ниже представлена сравнительная таблица значений мутности в приповерхностном слое по данным STD-зондирований и ДДЗ в реперных точках (табл. 5) за 28 апреля 2018 г. Значение мутности по данным STD-зондирований взято как некоторое интегральное значение в максимальной близости к морской поверхности и с учётом особенностей использования прибора соответствует горизонту с глубиной 0,3 м.

Таблица 5. Значения мутности в приповерхностном слое и TSM за 28 апреля 2018 г.

| Параметры | Станция № 1 (у устья) | Станция № 4 (200 м от берега) | Станция № 15 (4,38 км от берега) |
|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| TSM, $\text{г}/\text{м}^3$ (ДДЗ) | 114 | 80 | 15 |
| Мутность, ФНУ (STD) | 105,5 | 20 | 0 |

Основным выводом на данный момент является тот факт, что общепринятые рекомендованные алгоритмы пересчёта взвешенного вещества по спутниковым данным требуют существенной доработки. При их применении для областей, подверженных речным выносам, отмечается сильное зашумление выходных данных. Они также малочувствительны к различиям на небольших расстояниях при высоких значениях мутности и склонны к завышению истинных значений. Возможно, различия спутниковых данных и натуральных измерений связаны со сложностью обратной задачи для оптических спутниковых сканеров цвета, так как измеряются лишь косвенные характеристики: спектральные величины яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы в нескольких спектральных каналах. Огромный вклад вносит атмосферное влияние. Несмотря на учтённую атмосферную коррекцию, именно она может вносить различия между результатами, полученными разными методами: дистанционными и натуральными измерениями приборами непосредственно в толще воды.

Была предпринята попытка определения концентрации взвеси непосредственно с помощью отбора проб. На станции № 2, которая находилась вблизи устья, 28 апреля были взяты пробы воды. Полученные значения несколько превосходили данные прибора MSI: $132 \text{ г}/\text{м}^3$ — по данным проб, $114 \text{ г}/\text{м}^3$ — по спутниковой информации. Отметим, что на этой

же станции датчик мутности показал 105,5 ФНУ. На более удалённых станциях не удалось взять пробы, достаточные для определения концентрации взвешенного вещества. Более детальное изучение вопроса о связи значений мутности, измеренных различными способами и с помощью лучшего технического оснащения, планируется провести в следующих экспедициях.

Верификация спутниковых данных

С целью проследить динамику влияния речных вод на прибрежную гидрологическую структуру были выбраны несколько станций (в приустьевой области — станция № 2 и в открытом море, примерно 1 км от береговой зоны, — станция № 7), натурные измерения в которых проводились несколько дней подряд: 25, 26 и 28 апреля. Значения концентрации взвешенного вещества в координатах этих же станций были взяты из данных спутникового зондирования MSI Sentinel-2 26 и 28 апреля соответственно (25 апреля пролёта спутника не было). Полученные данные представлены в *табл. 6*.

Таблица 6. Значения температуры, солёности и мутности за разные дни

| Дата | Температура | | Солёность | | Мутность | | | |
|------------|---------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|------------------------------|----------------------|------------------------------|
| | <i>In situ</i> , °С | | <i>In situ</i> , епс | | <i>In situ</i> , ФНУ | TSM по MSI, г/м ³ | <i>In situ</i> , ФНУ | TSM по MSI, г/м ³ |
| | Ст. № 2 | Ст. № 7 | Ст. № 2 | Ст. № 7 | Ст. № 2 | | Ст. № 7 | |
| 25.04.2018 | 11,0 | 15,6 | 2,65 | 15,3 | 22,83 | — | 3,8 | — |
| 26.04.2018 | 11,9 | 15,2 | 4,94 | 14,0 | 45,35 | 101,6 | 8,0 | 16,64 |
| 28.04.2018 | 11,3 | 14,4 | 3,77 | 17,0 | 105,50 | 114,0 | 15,0 | 86,22 |

Температура и солёность, по данным натурных измерений, за эти дни изменялась не сильно. В приустьевой области температура воды была примерно 11 °С, на станции № 7 — в среднем 15 °С. Солёность изменялась на 2–3 единицы. В приустьевой области она составляла примерно 3–4 епс, а на станции № 7 — 15–16 епс. А вот значение мутности морской воды как в приустьевой области (станция № 2), так и мористее на станции № 7, по данным СТД-зондирований, увеличилось в 5 раз за эти дни (см. *табл. 6*), что нашло отражение даже на фотографиях, сделанных с борта судна (см. *рис. 6*). Такие резкие изменения связаны с усилением интенсивности стока реки, что, в свою очередь, связано с процессами таяния снега в горной её части, увеличением уровня реки и вместе с ним — с выносом речным потоком большего количества терригенного вещества. Основанием для этой гипотезы являются увеличивающиеся средние значения температуры воздуха от 14 до 23 °С во второй половине апреля (по данным <https://www.meteoblue.com>).

По данным спутникового мониторинга также отмечается небольшое увеличение концентрации взвешенного вещества 28 апреля по сравнению с 26-м, но стоит отметить, что порядок измеренных значений не сопоставим с измерениями *in situ* (и 26-го, и 28 апреля значения более 100 единиц).

Заключение

На примере проведённых в апреле 2018 г. экспериментальных работ в приустьевой зоне р. Мзымта синхронно с наблюдениями из космоса показано, что спутниковые данные позволяют получать адекватную информацию о пространственных характеристиках речных плюмов. Однако результаты спутниковых наблюдений необходимо верифицировать на основе

данных регулярных натуральных измерений. В первую очередь это касается получения количественных характеристик, таких как полное содержание взвешенного вещества и концентрация хлорофилла *a*. Стандартные алгоритмы, применяемые для определения этих величин по спутниковым данным, дают несколько завышенные значения и плохо отражают тонкую структуру мелкомасштабных речных плюмов. Отмечается сильное зашумление выходных данных в приустьевой области. Количественные значения концентрации взвешенного вещества, определённые по спутниковой информации, примерно совпадают с измеренными *in situ* только в районе маргинального фильтра, который располагался, по данным наших измерений, на расстоянии 200–500 м от устья р. Мзымта. Мористее значения концентрации взвешенного вещества уменьшались почти в 10 раз. Значения этого параметра, полученные по спутниковым данным, изменялись плавно от 100 до 10 г/м³ практически до видимой границы плюма.

Результаты натуральных измерений позволили также оценить адекватность получаемых на основе спутниковых данных пространственных характеристик плюмов. Внешняя граница плюма, проявляющаяся на спутниковых изображениях видимого диапазона за счёт различий в оптических свойствах морских и мутных речных вод, не наблюдается отчётливо в измеренных *in situ* параметрах, таких как температура, солёность и мутность. В то же время натурные измерения позволяют выявить пространственные неоднородности в плюме, неразличимые в данных спутникового зондирования. Как показали наши измерения, для проявления чёткой и ярко выраженной границы плюма на «контрастных» изображениях прибрежной зоны в естественных цветах (TrueColor) достаточно тонкого подповерхностного слоя с небольшими величинами мутности (по нашим данным, не превышающими 5 ФНУ).

Анализ и обобщение полученных результатов экспедиционных работ позволили уточнить представления о гидрологических характеристиках речных плюмов и наметить направление дальнейших исследований. Планируется более детальное изучение вопроса о связи значений мутности, измеренных различными способами, использование новых приборов для моментального измерения мутности морской воды в тонком приповерхностном слое и расширение работ по отбору проб воды. Выбранный вектор исследований, надеемся, позволит продвигаться в разработке методики восстановления количественных значений мутности прибрежных вод на основе совместного анализа натуральных и спутниковых данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00715). Оперативный анализ спутниковых данных осуществлялся с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» (Лупян и др., 2015), в частности с помощью информационной системы See The Sea (Лупян и др., 2012), развиваемой и поддерживаемой в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Авторы благодарны всем участникам экспедиционных работ и команде яхты «Арабелла», с борта которой проводились натурные измерения.

Литература

1. Джаошвили Ш. Реки Черного моря: Технический отчет № 71. Европейское агентство по охране окружающей среды, 2002. 58 с.
2. Журбас В. М., Завьялов П. О., Свиридов А. С., Лыжков Д. А., Андрулионис Е. Е. О переносе стока малых рек вдольбереговым бароклинным морским течением // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 440–449.
3. Завьялов П. О., Маккавеев П. Н., Коновалов Б. В., Осадчиев А. А., Хлебопашев П. В., Пелевин В. В., Грабовский А. Б., Ижицкий А. С., Гончаренко И. В., Соловьев Д. М., Полухин А. А. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // Океанология. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308.
4. Короткина О. А., Завьялов П. О., Осадчиев А. А. Субмезомасштабная изменчивость полей течений и ветра в акватории г. Сочи // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–807.
5. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 335 с.

6. *Лисицын А. П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
7. *Лулян Е. А., Матвеев А. А., Уваров И. А., Бочарова Т. Ю., Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый сервис See The Sea — инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
8. *Лулян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А.* Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
9. *Da Silva J. C. B., New A. L., Srokosz M. A., Smyth T. J.* On the observability of internal tidal waves in remotely-sensed ocean colour data // *Geophysical Research Letters*. 2002. V. 29. No. 12. DOI: 10.1029/2001GL013888.
10. *Doxaran D., Lamquin N., Park Y. J., Mazeran C., Ryu J. H., Wang M., Poteau A.* Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite data // *Remote Sensing Environment*. 2013. V. 146. P. 36–48.
11. *Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C., Lubac B., Cerisier S., Barille L.* Toward Sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries // *Remote Sensing*. 2015. V. 7. P. 9507–9528.
12. *Lavrova O., Mityagina M.* Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2017. V. 9. Iss. 9. P. 892. DOI: 10.3390/rs9090892.
13. *Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Serebryany A. N., Sabinin K. D., Kalashnikova N. A., Krayushkin E. V., Khymchenko I.* Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE*. 2014. V. 9240. ID. 924016. DOI: 10.1117/12.2067047.
14. *Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strohkov M. A., Bocharova T. Yu., Kashnitsky A. V.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions: Proc. SPIE*. 2016. V. 9999. ID. 99990G. DOI: 10.1117/12.2241312.
15. *Miller R. L., McKee B. A.* Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters // *Remote Sensing Environment*. 2004. V. 93. P. 259–266.
16. *Nash J. D., Moum J. N.* River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // *Nature*. 2005. V. 437. P. 400–403.
17. *Ody A., Doxaran D., Vanhellemont Q., Nechad B., Novoa S., Many G., Bourrin F., Verney R., Pairaud I., Gentili B.* Potential of High Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to Study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. P. 245. DOI: 10.3390/rs8030245.
18. *Pan J., Jay D. A., Orton P. M.* Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112. C07014.
19. *Stashchuk N., Vlasenko V.* Generation of internal waves by a supercritical stratified plume // *J. Geophysical Research*. 2009. V. 114. C01004.
20. *Warrick J. A., Mertes L. A. K., Siegel D. A., Mackenzie C.* Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS // *Intern. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. P. 1995–2002.
21. *Zajęczkowski M., Darecki M., Szczuciński W.* Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdansk during the May 2010 flood // *Oceanologia*. 2010. V. 52(2). P. 311–317.

Features of river plume parameter determination by *in situ* and remote sensing methods

K. R. Nazirova¹, O. Yu. Lavrova¹, E. V. Krayushkin,¹
D. M. Soloviev², E. V. Zhuk², Ya. O. Alferyeva³

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

² *Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*

³ *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*
E-mail: knazirova@cosmos.ru

The paper presents the results of measurements of plume parameters of the Mzymta River conducted in April 2018 concurrently with satellite imaging. From the data of Sentinel-2 MSI, Landsat-8 OLI and Sentinel-3 OLCI instruments, the total suspended matter content was determined by standard algorithms and compared with that measured *in situ* using a turbidity meter and water sampling. It is shown that values of suspended matter concentration determined from satellite data approximately coincide with those measured *in situ* only in the region of the marginal filter. A sharp frontal boundary, distinguished from *in situ* measurements, was located at a distance of no more than 500 m from the river mouth, farther seaward suspended matter concentration fell almost 10 times. The values of this parameter, obtained from satellite data, changed gradually almost to the visible boundary of the plume. The results of *in situ* measurements also made it possible to assess the validity of the spatial characteristics of plumes obtained from satellite data. Plume areas and the maximum distance of the plume edge from the coastline were estimated. The dependence of the plume area on water level in the river was considered. The outer boundary of the plume that appears in visible satellite data due to the optical differences of sea and turbid river waters is not as clearly observed in *in situ* measurements of temperature, salinity and turbidity. At the same time, *in situ* measurements make it possible to detect spatial inhomogeneities in the plume that are not distinguishable in satellite data. From the *in situ* measurements, the depth of river water intrusion into the sea was determined, which did not exceed 3–4 m.

Keywords: river plume, ocean color satellite data, *in situ* measurements, total suspended matter, MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8, Mzymta, Black Sea

Accepted: 05.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243

References

1. Dzhaoshvili Sh., *Rivers of the Black Sea, Technical Report No. 71*, European Environment Agency, 2010, 58 p.
2. Zhurbas V. M., Zavialov P. O., Sviridov A. S., Lyzhkov D. A., Andrulionis E. E., On transport of small river run-off by a longshore baroclinic sea current, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 3, pp. 415–423.
3. Zavialov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V., Osadchiev A. A., Khlebopashev P. V., Pelevin V. V., Grabovskiy A. B., Izhitskiy A. S., Goncharenko I. V., Soloviev D. M., Polukhin A. A., Hydrophysical and hydrochemical characteristics of the sea areas adjacent to the estuaries of small rivers of the Russian coast of the Black Sea, *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 3, pp. 265–280.
4. Korotkina O. A., Zavialov P. O., Osadchiev A. A., Synoptic variability of currents in the coastal zone of Sochi, *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 5, pp. 545–556.
5. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAN, 2016, 335 p.
6. Lisitzin A. P., A marginal filter of the oceans, *Oceanology*, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–747.
7. Loupian E. A., Matveev A. A., Uvarov I. A., Bocharova T. Yu., Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., *Sputnikovyi servis See The Sea — instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana* (Satellite service See The Sea — a tool for investigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
8. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr

- kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
9. Da Silva J. C. B., New A. L., Srokosz M. A., Smyth T. J., On the observability of internal tidal waves in remotely-sensed ocean colour data, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, No. 12, DOI: 10.1029/2001GL013888.
 10. Doxaran D., Lamquin N., Park Y. J., Mazeran C., Ryu J. H., Wang M., Poteau A., Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite data, *Remote Sensing Environment*, 2013, Vol. 146, pp. 36–48.
 11. Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C., Lubac B., Cerisier S., Barille L., Toward Sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (Take5) Experiment in the Loire and Gironde Estuaries, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 9507–9528.
 12. Lavrova O., Mityagina M., Satellite survey of internal waves in the Black and Caspian Seas, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 9, p. 892, DOI: 10.3390/rs9090892.
 13. Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Serebryany A. N., Sabinin K. D., Kalashnikova N. A., Krayushkin E. V., Khymchenko I., Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE*, 2014, Vol. 9240, ID. 924016, DOI: 10.1117/12.2067047.
 14. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Strochkov M. A., Bocharova T. Yu., Kashnitsky A. V., River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions, Proc. SPIE*, 2016, Vol. 9999, ID. 99990G, DOI: 10.1117/12.2241312.
 15. Miller R. L., McKee B. A., Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters, *Remote Sensing Environment*, 2004, Vol. 93, pp. 259–266.
 16. Nash J. D., Moum J. N., River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature*, 2005, Vol. 437, pp. 400–403.
 17. Ody A., Doxaran D., Vanhellefont Q., Nechad B., Novoa S., Many G., Bourrin F., Verney R., Pairaud I., Gentili B., Potential of High Spatial and Temporal Ocean Color Satellite Data to Study the Dynamics of Suspended Particles in a Micro-Tidal River Plume, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, p. 245, DOI:10.3390/rs8030245.
 18. Pan J., Jay D. A., Orton P. M., Analyses of internal solitary waves generated at the Columbia River plume front using SAR imagery, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, C07014.
 19. Stashchuk N., Vlasenko V., Generation of internal waves by a supercritical stratified plume, *J. Geophysical Research*, 2009, Vol. 114, C01004.
 20. Warrick J. A., Mertes L. A. K., Siegel D. A., Mackenzie C., Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS, *Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 1995–2002.
 21. Zajączkowski M., Darecki M., Szczuciński W., Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdansk during the May 2010 flood, *Oceanologia*, 2010, Vol. 52(2), pp. 311–317.