Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ*

О. Ю. Лаврова¹, К. Р. Назирова¹, Я. О. Алферьева², П. Д. Жаданова^{1,3}, А. Я. Строчков¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия

³ Московский физико-технический институт (НИУ) Долгопрудный, 141701, Россия

Исследование прибрежных районов Мирового океана, находящихся под влиянием речного стока, — важная научная и практическая задача. Это связано с тем, что вместе с речными водами в шельфовые районы помимо взвешенных и растворённых терригенных и биогенных веществ могут поступать антропогенные загрязнения. В связи с развитием в последние годы отечественного туризма, в частности в Республике Дагестан, назрела необходимость экологического мониторинга курортной прибрежной зоны в районе Махачкалы, где сильно влияние выносов рек Сулак и Терек. Исследования основных параметров плюмов этих рек, их сходства и различий базировались на совместном использовании данных дистанционного зондирования из космоса и измерений in situ, выполненных одновременно со спутниковыми наблюдениями. В качестве спутниковых данных использовались данные высокого пространственного разрешения приборов MSI (англ. Multispectral Instrument) спутников Sentinel-2 и OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager и Thermal Infrared Sensor) спутников серии Landsat. Натурные измерения проводились 6 и 9 июня 2022 г. в приустьевых зонах рек Терек и Сулак. Основной целью исследований было сравнение значений мутности морской воды, полученных с помощью портативного мутномера и определённых по данным спутникового зондирования с использованием различных стандартных алгоритмов. Одновременно с СТД-зондированием (англ. Conductivity, Temperature and Depth) в приповерхностном слое брались пробы воды для оценки концентрации взвешенного вещества весовым методом и для определения минерального состава взвеси. Анализ полученных данных показал, что мутность вод в плюме р. Терек существенно выше мутности в плюме р. Сулак. Для определения мутности в приустьевой зоне р. Терек по спутниковым данным наилучшие результаты показало использование алгоритма Dogliotti, разработанного именно для вод с большой мутностью. Для вод плюма р. Сулак ни один из алгоритмов не показал значения мутности, близкие к измеренным in situ, что может быть объяснено разницей в сутки между спутниковым зондированием и натурными измерениями, учитывая, что положение границы плюма р. Сулак сильно меняется во времени. По данным рентгенофазового анализа было установлено, что вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый. Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное различие состава взвеси в выносе этих рек проявлено в количественном соотношении минералов у границ плюмов. Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности вод, определённой как in situ, так и по спутниковым данным.

Ключевые слова: речные плюмы, мутность воды, концентрация взвешенного вещества, спутниковые данные оптического диапазона, измерения *in situ*, алгоритмы ACOLITE, MSI Sentinel-2, OLI/TIRS Landsat-8, -9, Каспийское море, Терек, Сулак

Одобрена к печати: 31.10.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283

Введение

Исследование прибрежных районов Мирового океана, находящихся под влиянием речного стока, в настоящее время остаётся одной из наиболее приоритетных задач. Это связано с тем, что вместе с речными водами в шельфовые районы помимо взвешенных и рас-

творённых терригенных и биогенных веществ могут поступать антропогенные загрязнения. Динамика мелкомасштабных прибрежных процессов исследована недостаточно и в каждом районе Мирового океана имеет свои особенности. Поэтому задача мониторинга и оценки физико-химических характеристик приустьевых областей весьма актуальна. Несмотря на высокую точность, контактные измерения, в силу своей трудоёмкости и высокой стоимости судовых измерений, создают определённую фрагментацию информации о процессах, связанных с распространением речной воды в море. Эту проблему можно решить только с помощью спутниковых методов дистанционного зондирования, которые дают уникальную возможность наблюдать практически одновременно весь район исследования неоднократно, день за днём, на протяжении многих лет. Морские акватории, находящиеся под сильным влиянием речного стока, высокодинамичны, изменчивы и наиболее сложны для численного моделирования и получения количественной информации с применением спутниковых методов. Поэтому для каждого исследуемого района необходимо проводить верификацию спутниковых данных и вносить потенциально возможные корректировки в используемые алгоритмы расчётов количественных характеристик, таких как концентрация взвешенного вещества и мутность. В приустьевых областях, подверженных влиянию речного стока, основная трудность заключается именно в получении количественных оценок, в то время как качественной информации достаточно много. На спутниковых изображениях в истинных цветах (англ. True Color Images) плюмы (прилежащие к устью мезомасштабные структуры, выделяющиеся пониженной солёностью и температурой, отличной от окружающей, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики (Завьялов и др., 2014)), можно чётко идентифицировать по контрасту между мутной речной водой и окружающей её относительно чистой морской водой (Лаврова и др., 2016; Lavrova et al., 2016). Существует ряд исследований по верификации результатов спутниковых наблюдений с помощью результатов квазисинхронных натурных измерений (Abascal-Zorrilla et al., 2020; Babin et al., 2003; Chen et al., 2013; Constantin et al., 2016; Devlin et al., 2015; Doxaran et al., 2002; Gernez et al., 2015; Ody et al., 2016; Ou et al., 2009; Ouillon et al., 1997; Petus et al., 2009). Этот далеко не полный перечень показывает, что подобные работы ведутся в различных регионах мира, что свидетельствует об их важности. Сложность заключается в отсутствии единой методики исследования. В разные годы для разных регионов земного шара используются различные методы исследования, разные приборы контактных измерений и различные данные дистанционного зондирования. Проблема адекватной интерпретации спутниковых данных и получения количественных значений, пригодных для использования вместо дорогостоящих натурных измерений, всё ещё далека от решения.

Количественные оценки мутности морской воды и концентрации взвешенного вещества могут быть получены по данным спутникового дистанционного зондирования с использованием различных алгоритмов, которые, строго говоря, должны учитывать множество факторов, в том числе меняющийся химический состав морской воды, прибрежных шельфовых вод, поступление распреснённых вод из эстуариев и рек, геометрические характеристики параметров спутникового зондирования в данный момент, свойства орбитальной аппаратуры, текущие климатические условия в районе исследований и многое другое (Berdeal et al., 2002; Cai et al., 2015; Güttler et al., 2013; Kopelevich et al., 2007; Lavrova et al., 2015; Mulligan et al., 2010; Osadchiev, 2015; Ou et al., 2009; Pruszak et al., 2005; Warrick et al., 2007). На данный момент научное сообщество, после многочисленных сравнений и одновременных измерений, пришло к выводу, что невозможно разработать универсальный алгоритм оценки стандартных характеристик морской воды только на основе имеющихся данных со спутниковых оптических датчиков из-за чрезвычайного разнообразия набора характеристик и неоднозначности их интерпретации при определённых условиях наблюдения. Среди общепринятых следует выделить алгоритм C2RCC (англ. Case 2 Regional Coast Colour) и алгоритмы, имеющие общее название ACOLITE. Именно эти алгоритмы были использованы в наших исследованиях, результаты которых представлены в настоящей статье.

Отработка методики определения мутности воды и концентрации взвешенного вещества осуществлялась для приустьевых районов рек Сулак и Терек, которые впадают в Каспийское

море. Следует отметить, что для плюмов этих рек ранее подобные исследования никем не проводились.

Район исследования

В связи с развитием в последние годы отечественного туризма, в частности в Республике Дагестан, назрела необходимость экологического мониторинга курортной прибрежной зоны в районе Махачкалы, где сильно влияние выносов рек Сулак и Терек (рис. 1). Бассейн р. Сулак занимает часть предгорий и горных склонов Большого Кавказа, а также Прикаспийскую низменность. Сулак берёт начало в месте слияния рек Андское Койсу и Аварское Койсу. Длина Сулака составляет 169 км. В горах Сулак имеет типично горное течение, полугорное (16 % длины) — в предгорьях и равнинное — в Прикаспийской низменности. При впадении в Каспийское море Сулак образует дельту площадью около 44 км². Сток р. Сулак зарегулирован двумя водохранилищами: Чирюртовым и более крупным Чиркейским, расположенным в 142 км от моря. На Чиркейском вдхр. вода сбрасывается ежедневно через турбину ГЭС (гидроэлектростанция), и объём сброса может довольно сильно меняться изо дня в день. Примерно раз в год осуществляется сброс через водосброс, но это не связано с повышением уровня воды в водохранилище. Естественная мутность воды во время паводков когда-то могла достигать 40 кг/м³ (при среднегодовом значении 3,09 кг/м³). При регулировании стока реки на Чиркейском вдхр. мутность воды снизилась до 380 г/м³, а объём взвешенных наносов в устье реки уменьшился с 14,7 до 1,8 млн т/год.



Рис. 1. Район проведения подспутниковых измерений в приустьевых зонах рек Сулак и Терек в июне 2022 г.

Река Терек (см. *рис. 1*) берёт начало на склоне Главного Кавказского хребта в Трусовском ущелье, из ледника горы Зилга-Хох на высоте 2713 м н. у. м. (над уровнем моря). Протекает по территориям Грузии, Северной Осетии, Кабардино-Балкарии, Ставропольского края, Чечни и Дагестана. Длина реки — 623 км, площадь водосборного бассейна — 43 200 км². Впадает в Каспийское море, образуя дельту (площадь — около 4000–6000 км²).

Судя по спутниковым данным, плюм р. Терек распространяется на бо́льшие расстояния, чем плюм р. Сулак. Одна из возможных причин этого — большая дисперсность взвешенных в воде частиц. Известно, что при движении воды происходит частичное осаждение и гидромеханическая дифференциация минерального вещества. От устья к краю плюма уменьшается количество взвеси, размерность частиц и их фазовый состав. Поэтому одна из поставленных в данной работе задач требовала рассмотреть минеральный состав плюмов этих рек и проверить связь между мутностью воды в плюме и минеральным составом взвеси.

Данные и методы

Для разработки методики сопоставления результатов спутниковых наблюдений с измерениями *in situ* были проведены квазисинхронные натурные измерения мутности, концентрации взвешенного вещества и минерального состава в приустьевых зонах рек Сулак и Терек в начале июня 2022 г.

При измерениях с маломерного судна использовалось следующее оборудование: высокоточный CTD-зонд (*англ*. Conductivity, Temperature and Depth) RBR-concerto канадской фирмы Richard Brancker Reaserch Ltd, оснащённый дополнительными измерителями мутности (датчиком обратного рассеивания света) Seapoint Turbidity и флюоресценции Turner Design Cyclops-7 для определения концентрации хлорофилла *a* с частотой опроса датчиков до 6 Гц. Датчик мутности работает в нефелометрических единицах мутности (*англ*. Nephelometric Turbidity Unit — NTU). Диапазон измерения составляет от 0,05 до 15 000 NTU (отклонение ±2%), рабочая температура измерителя — 0–65 °C (температурный коэффициент <0,05%/°C), допустимая глубина — до 6000 м.

При СТD-зондировании поверхностные значения были получены в среднем для горизонта 0,35-0,50 м. В силу технических особенностей прибора на глубине менее 0,35 м измерения не выполняются. В более тонком приповерхностном слое мутность воды дополнительно измерялась портативным турбидиметром (мутномером) TN400 фирмы Apera Instruments (США) в пробах воды, отобранных одновременно с СТD-зондированием в первых десятках сантиметров (0,10-0,15 м). Данный прибор оснащён инфракрасным источником света, использующим нефелометрический метод, соответствующий стандарту ISO7207 (обратное рассеивание сигнала под углом 90°). Методика измерения обратного рассеивания света идентична датчику Seapoint Ltd, установленному на СТD-зонде. Диапазон измерений турбидиметра составляет от 0 до 1000 NTU. Точность измерений — от 0,01 до 1 NTU в зависимости от выбранного диапазона. В каждой пробе проводилось два мгновенных измерения. Для анализа полученных результатов использовалось их среднее.

Одновременно с зондированием на тех же станциях брались пробы морской воды в приповерхностном слое для оценки концентрации взвешенного вещества весовым методом. Пробы были также использованы для определения минерального состава взвеси. С помощью полученных результатов проводилась верификация спутниковых данных и оптических датчиков мутности, использующих нефелометрические единицы измерения.

Пробоотбор и пробоподготовка были произведены в соответствии с (ГОСТ..., 2014). Объём каждой пробы составил примерно 1,5 л. Все пробы были взвешены в лабораторных условиях с точностью до 0,01 г. Для определения концентрации взвешенного вещества был использован гравиметрический метод (Neukermans et al., 2012; Van Der Linde, 1998). Пробы морской воды фильтровали с использованием вакуумной установки Lafil 400-LF30 производства фирмы Rocker (Тайвань) и стекловолоконных фильтров WHATMAN GF/F, изготовленных из гидрофобного боросиликатного стекла. Эти фильтры способны задерживать мелкодисперсные частицы размером до 0,7 мкм. Пробы воды фильтровали в день отбора.

Рентгенофазовый анализ образцов был выполнен в лаборатории кристаллохимии и рентгеноструктурного анализа кафедры кристаллографии и кристаллохимии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова. Для исследования навеску пробы истирали до состояния тонкой пудры (около 0,01 мм). Полученным порошком заполняли кювету диаметром 20 мм и толщиной 2 мм и проводили съёмку на дифрактометре Rigaku Miniflex-600, рабочий ток — 15 мА, рабочее напряжение — 40 кВ; съёмка осуществлялась с рентгеновской трубкой с Си-антикатодом. Полученную дифрактограмму обрабатывали по программе МАТСН, определяли минеральные фазы, содержащиеся в пробе, и их процентное содержание в образце.

В качестве спутниковых данных использовались данные оптических сенсоров MSI (англ. Multispectral Instrument) Sentinel-2A/B, OLI (англ. Operational Land Imager) Landsat-8 и OLI-2 Landsat-9. Спутник Landsat-9 был запущен 27 сентября 2021 г., а данные стали доступны для научной общественности 10 февраля 2022 г. Он оснащён двумя инструментами: OLI-2 и TIRS-2 (англ. Thermal Infrared Sensor 2), которые практически идентичны приборам OLI и TIRS, установленным на спутнике Landsat-8. Наличие на орбите двух спутников Landsat позволяет получать больше информации над одним и тем же местом, а главное — увеличивается число квазисинхронных данных приборов MSI и OLI. Измерения проводились 6 июня в прибрежной зоне от устья р. Терек до устья р. Сулак. Было выполнено зондирование и взяты пробы на 19 станциях. 9 июня измерения проводились в приустьевой зоне р. Сулак на 20 станциях зондирования. Для понимания общей ситуации в исследуемом районе были проанализированы все малооблачные спутниковые изображения за период с 31 мая по 12 июня 2022 г., список которых представлен в *табл.* 1. Обработка и анализ спутниковых данных проводились с помощью инструментария информационной системы See the Sea, которая является составной частью Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лаврова и др., 2019; Лупян и др., 2019).

По спутниковым данным строились следующие продукты: цветосинтезированное изображение в естественных цветах (англ. True Color Image — TCI); температура поверхности моря (англ. Sea Surface Temperature — SST); полное содержание взвешенного вещества (англ. Total Suspended Matter — TSM); концентрация взвешенного вещества (англ. Suspended Particulate Matter — SPM); мутность (англ. Turbidity — Turb).

Дата	Время (UTC)	Прибор	Спутник	Продукты, полученные по спутниковым данным	Район	Время судовых из- мерений (UTC)
31 мая	07:36 07:57	OLI-2/TIRS-2 MSI	Landsat-9 Sentinel-2B	TCI, SST, SPM, TSM, Turb	Терек, Сулак	Измерения не проводились
1 июня	07:30	OLI/TIRS	Landsat-8	-		
6 июня	07:41	OLCI	Sentinel-3	TSM		07:10-11:20
7 июня	07:47	MSI	Sentinel-2B	TCI, SPM, TSM, Turb	Терек	Измерения
8 июня	07:36	OLI/TIRS	Landsat-8	TCI, SST, SPM, TSM, Turb	Терек, Сулак	
9 июня	07:30	OLI-2/TIRS-2	Landsat-9	TCI, SST (облачность)	Сулак	07:10-10:00
12 июня	07:47	MSI	Sentinel-2A	TCI, SPM, TSM, Turb	Терек, Сулак	Измерения не проводились

Таблица 1. Информация о спутниковых данных, полученных во время проведения натурных измерений в 2022 г.

 Π р и м е ч а н и е: UTC — *англ*. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время; OLCI — *англ*. Ocean and Land Colour Instrument.

Данные Landsat-8, -9 и Sentinel-2 уровня 1 были загружены с сайта https://earthexplorer. usgs.gov/, и с помощью программного обеспечения ACOLITE версии 20220222.0 (Vanhellemont, 2019; Vanhellemont, Ruddick, 2015) проведена атмосферная коррекция с использованием метода DSF (*англ*. Dark-Spectrum Fitting) и вычислены показатели мутности и концентрации взвешенного вещества. DSF-метод — текущий алгоритм атмосферной коррекции по умолчанию в ACOLITE. Из-за высокой отражательной способности, наблюдаемой в исследуемом регионе и превышающей пороговое значение отражательной способности ρ_{TOA} (*англ*. Top of Atmosphere Reflectance), которое по умолчанию равно 0,0215, был выбран более высокий порог ρ_{ТОА} ≤ 0,085. При таком значении маскируются все пиксели суши. В ACOLITE также доступна дополнительная коррекция бликов, что было использовано в нашей работе.

Для расчёта полей мутности и концентрации взвешенного вещества использовались алгоритмы C2RCC (Brockmann et al., 2016; Doerffer, Schiller, 2007), а также реализованные и доступные в программном комплексе ACOLITE алгоритмы Nechad 2015 (Nechad et al., 2010, 2015) и Dogliotti (Dogliotti et al., 2015).

Алгоритм ACOLITE специально разработан для морских прибрежных и внутренних вод и поддерживает обработку данных Landsat-8, -9 и Sentinel-2 (Caballero, Stumpf, 2020; Martins et al., 2017; Warren et al., 2019).

Поскольку в дни проведения натурных измерений либо не было съёмки со спутников серии Landsat и Sentinel-2, либо присутствовала облачность (см. *табл. 1*), было проведено исследование, за какие близкие дни наиболее подходят спутниковые изображения высокого пространственного разрешения для сравнения с натурными измерениями. Для этого был проведён анализ положения границ плюмов рек Терек и Сулак за период с 31 мая по 12 июня 2022 г. с целью определения их пространственной изменчивости. Анализ показал, что положение границы плюма Терека не сильно менялось в данный период, за исключением 1 июня (*puc. 2*). Наиболее подходящим с точки зрения сравнения с измерениями *in situ* оказалось спутниковое изображение, полученное MSI Sentinel-2B 7 июня. Оно не только было наиболее близким по времени с проведением натурных измерений, но и определённая по нему граница плюма совпадает с той, которая была определена 6 июня. Станции зондирования, которые были определены как внутри, так и вне плюма во время проведения измерений, оказались по разные стороны границы, установленной по данному изображению (синяя линия на *рис. 2, 3*, см. с. 270).



Рис. 2. Границы плюма р. Терек, определённые по спутниковым изображениям, полученным с 31 мая по 12 июня 2022 г. Красными точками отмечены положения станций зондирования от 6 июня 2022 г.

Что касается границы плюма р. Сулак, то она достаточно сильно менялась в период с 31 мая по 12 июня (*puc. 4*, см. с. 270). Для сравнения с данными *in situ* было выбрано изображение, наиболее близкое по времени к измерениям в приустьевой зоне р. Сулак, проведённым

9 июня, а именно изображение, полученное 8 июня с помощью сенсоров OLI/TIRS спутника Landsat-8. Из-за сильной пространственной изменчивости плюма часть станций зондирования, которые находились внутри плюма, на спутниковом изображении оказались вне его (*puc. 5*, см. с. 271). Это, естественно, не могло не сказаться на результатах сравнения.



Рис. 3. Положения станций зондирования, проведённых в приустьевой зоне р. Терек 6 июня 2022 г.



Рис. 4. Границы плюма р. Сулак, определённые по спутниковым изображениям, полученным с 31 мая по 12 июня 2022 г. Красными точками отмечены положения станций зондирования от 9 июня 2022 г.



Рис. 5. Положения станций зондирования, проведённых в приустьевой зоне р. Сулак 9 июня 2022 г.

Результаты

Выявление зависимости между мутностью воды и концентрацией взвеси, определённых по данным натурных измерений

Во время проведения натурных измерений 6 и 9 июня 2022 г. была, в частности, определена мутность воды двумя приборами: портативным турбидиметром (мутномером) TN400 и установленным на CTD-зонде измерителем мутности Seapoint Turbidity. На тех же станциях зондирования брались пробы воды с верхнего горизонта для дальнейшего определения концентрации взвеси и её минерального состава. Следует отметить, что измерения в плюме р. Сулак проводились дважды: 6 и 9 июня, а в плюме р. Терек только 6 июня. Значения мутности воды, измеренные портативным турбидиметром, и установленной в лабораторных условиях концентрации взвеси в пробах воды представлены в *табл. 2*. Как видно из таблицы, значения мутности, измеренной на ближайших к устьям станциях (см. *рис. 3*, 5) в плюме р. Терек, значительно превышают значения мутности в плюме р. Сулак: 608 NTU — максимальное измеренное значение в плюме р. Терек и 137 NTU — в плюме р. Сулак. Поскольку не существует единой формулы пересчёта из значений мутности, имеющих размерность NTU, в значения концентрации взвешенного вещества, которая измеряется в граммах на кубический метр, была предпринята попытка найти взаимосвязь между этими двумя величинами для тестовых районов. На рис. 6 (см. с. 273) приведено сопоставление данных подспутниковых измерений мутности воды и концентрации взвеси для плюмов рек Терек и Сулак. Данные (см. *табл. 2*) можно аппроксимировать простой линейной функцией y = 0.83x; величина достоверности аппроксимации в этом случае $R^2 = 0.9$. При аппроксимации квадратичной функцией достоверность увеличивается до $R^2 = 0.99$ для р. Терек и $R^2 = 0.98$ для р. Сулак (см. *рис. 6*). Массовая концентрация взвеси в воде растёт несколько быстрее, чем её мутность. Вероятно, это связанно с изменением размера взвешенных в воде частиц. Вклад каждой крупной частицы в увеличение мутности воды меньше, чем её вклад в увеличение массы взвеси.

Время	Номер станции	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Мутность воды, NTU	Концентрация взвеси, г/м ³	Район измерений		
6 июня 2022 г.								
11:18	1	43.58448	47.5969	50.9	38.7	Приустьевая зона		
11:20	2	43.58501	47.59708	25.2	23.1	р. Терек		
11:26	3	43,57858	47,59528	608,5	786,3	_		
11:36	4	43,57225	47,59239	377,5	413,6	-		
11:41	5	43,56986	47,58963	42,8	29,6	_		
11:50	6	43,5732	47,61118	63,6	45,1	-		
11:54	7	43,57055	47,62677	31,7	27,1	-		
11:59	8	43,5681	47,64625	14,3	8,4	-		
12:05	9	43,56577	47,66943	4,9	3,6			
12:49	10	43,33991	47,5395	15,0	10,8	Бух. Сулак		
12:54	11	43,33823	47,54109	118,0	115,6	-		
13:07	12	43,25939	47,55192	14,2	9,1	Приустьевая зона		
13:11	13	43,2584	47,55233	80,1	53,3	р. Сулак		
13:18	14	43,25011	47,56622	17,0	28,0			
13:22	15	43,25104	47,55922	21,8	11,0			
13:26	16	43,25242	47,55528	50,5	37,9			
13:30	17	43,25416	47,55035	119,0	103,2			
13:35	18	43,25649	47,54775	133,5	107,7			
14:18	19	43,25839	47,53567	114,5	107,4	В р. Сулак		
			9 июня	2022 г.				
10:22	1	43,25566	47,54758	137,0	128,2	Приустьевая зона		
10:27	2	43,25372	47,55058	130,0	117,6	р. Сулак		
10:31	3	43,25397	47,55501	82,3	61,2			
10:34	4	43,2533	47,55755	38,3	23,,0			
10:38	5	43,25314	47,56214	20,5	10,7			
10:43	6	43,2537	47,56899	18,8	8,6			
10:48	7	43,25461	47,57697	12,0	10,8			
10:56	8	43,25822	47,59407	7,8	5,1			
11:06	9	43,26461	47,61996	6,3	4,3			
11:16	10	43,27798	47,64831	5,0	3,2			
11:33	11	43,28698	47,55991	16,6	10,8			
11:39	12	43,27731	47,55798	17,4	8,8			
11:45	13	43,26286	47,55409	16,6	7,7			
11:49	14	43,25646	47,55202	101,0	86,8			
11:53	15	43,25028	47,54913	119,5	81,1			
11:57	16	43,23946	47,,5414	47,2	20,7			
12:02	17	43,22365	47,533	22,5	9,3			
12:09	18	43,20107	47,52025	11,6	6,3			
12:16	19	43,17827	47,50396	12,1	7,0			
12:44	20	43,25745	47,53656	139,5	120,1	В р. Сулак		

Таблица 2. Результаты in situ измерений в плюмах рек Сулак и Терек 6 и 9 июня 2022 г.



Рис. 6. Сопоставление значений мутности, определённых с помощью портативного турбидиметра, и концентрации взвешенного вещества в пробах воды: *а* — для р. Терек, измерения 6 июня 2022 г.; *б* — для р. Сулак, измерения 6 и 9 июня 2022 г.

Также характерная особенность приведённых на *рис.* 6 данных состоит в том, что при низких значениях мутности отклонение измеренных значений от линии аппроксимации небольшое, при росте количества взвеси разброс значительно увеличивается. Это может быть вызвано как увеличением погрешности измерений в пробах большой мутности, так и разным гранулометрическим составом взвеси.

Сравнение результатов измерения мутности воды по данным спутникового зондирования и подспутниковых измерений

Одна из основных задач данной работы заключалась в том, чтобы выявить, какой «стандартный» алгоритм определения TSM (SPM) по спутниковым данным даёт результаты, которые наилучшим образом коррелировали бы с результатами, полученными *in situ*. Подобная работа выполнялась нами в течение нескольких лет для плюма р. Мзымты (Чёрное море). В предыдущих работах было получено, что выбор алгоритма напрямую зависит от мутности реки (Назирова и др., 2019; Lavrova et al., 2021; Nazirova et al., 2021). Как показали наши предыдущие исследования, для небольшой мутности воды (до 30 NTU) неплохие результаты дают алгоритмы C2RCC и Nechad 2015. Для значений мутности выше 100 NTU наиболее реалистичные результаты показал алгоритм Dogliotti.

Как видно из табл. 2, на ближайших к устью р. Терек станциях (см. рис. 3) по данным in situ значения мутности достигали 608,5 NTU (ст. 3) и 377,5 NTU (ст. 4) соответственно. Причём на близких по расположению станциях, но уже несколько удалённых от устья (ст. 1, 6), значения мутности резко падают до 50-60 NTU. Как было отмечено, в момент проведения натурных измерений 6 июня не имелось спутниковой информации с высоким пространственным разрешением. Для достаточно узкого плюма Терека (порядка 1,5 км) данные прибора OLCI Sentinel-3 (пространственное разрешение 300 м), который осуществлял съёмку в этот день, непригодны для сравнения значений мутности по спутниковым данным и натурных измерений. Сравнение проводилось с данными, полученными на следующий день, 7 июня, сенсором MSI спутника Sentinel-2B. На рис. 7 (см. с. 274) представлен график сопоставления (диаграмма рассеяния) значений мутности, полученных *in situ* с помощью портативного турбидиметра 6 июня 2022 г. в приустьевой зоне р. Терек, и определённых по данным MSI Sentinel-2В за 7 июня с использованием алгоритма Dogliotti. Полученные значения аппроксимируются прямой, проходящей через начало координат и имеющей угловой коэффициент 0,85. Величина достоверности аппроксимации составляет $R^2 = 0.97$. Значения мутности, установленные по спутниковым данным, имеют несколько меньшие значения, чем при измерениях in situ.



Рис. 7. Сравнение значений мутности, полученных *in situ* с помощью портативного турбидиметра 6 июня 2022 г. и определённых по данным MSI Sentinel-2B за 7 июня с использованием алгоритма Dogliotti



Рис. 8. Сравнение значений мутности, полученных *in situ* с помощью портативного турбидиметра 9 июня и определённых по данным OLI/ TIRS Landsat-8 за 8 июня с использованием алгоритмов Nechad 2015 и Dogliotti

Как показали наши исследования, плюм р. Сулак более динамичен и положение его границы сильно менялось в период проведения измерений (см. рис. 4). К тому же на приустьевую зону р. Сулак приходилось меньше безоблачных изображений. Например, изображение от 7 июня не содержало облаков над плюмом р. Терек и было полностью покрыто облаками над плюмом р. Сулак. Вследствие этого не было проведено сравнение определённых 6 июня значений мутности на станциях в приустьевой зоне р. Сулак со спутниковыми данными. Данные *in situ* измерений, проведённых 9 июня в этом районе, сравнивались с результатами, полученными по спутниковым данным от 8 июня. Максимальные измеренные *in situ* значения мутности на ближайших к устью станциях (см. puc. 5) не превышали 140 NTU, что значительно ниже, чем у устья р. Терек. Для данных прибора OLI/TIRS спутника Landsat-8 от 8 июня для определения значений мутности были применены алгоритмы Nechad 2015 и Dogliotti. Результаты сопоставлений представлены на *рис. 8.* Из них следует, что для значений мутности ниже 30 NTU результаты применения этих двух алгоритмов практически идентичны, как и в предыдущих наших работах для плюма р. Мзымты. Для значений, больших 50 NTU, результаты применения этих алгоритмов расходятся. Причём ни один из них не даёт высокую корреляцию с результатами измерений мутности *in situ*. И оба алгоритма дают сильно заниженные значения по сравнению с измеренными.

Такое расхождение может быть объяснено тем, что измерения проводились не синхронно со спутниковой съёмкой, а для сильно меняющегося во времени плюма р. Сулак — это имеет принципиальное значение.

Определение качественного и количественного минерального состава взвеси в пробах воды рек Терек и Сулак

На основе рентгенофазового анализа проведена оценка минерального состава взвеси в пробах воды, отобранных на станциях зондирования в плюмах рек Терек и Сулак. Как известно, при поступлении терригенного материала в море происходит его механическая дифференциация, обусловленная различной скоростью погружения обломков (Лисицын, 1994). В соответствии с законом Стокса главным фактором, влияющим на скорость погружения взвеси, становится линейный размер частиц: чем мельче взвесь, тем медленнее она тонет и тем дальше она может переноситься водными потоками. Этот механизм лежит в основе изменения минерального и химического состава взвеси в зависимости от расстояния до устья реки.

Причиной изменения количественного соотношения минералов в разных частях плюма представляется их разная устойчивость к механическому воздействию. Например, кварц обладает высокой сопротивляемостью к механическому разрушению, которая определяется главным образом его высокой твёрдостью. Все глинистые минералы относятся к группе силикатов со слоистыми структурами и имеют низкую твёрдость, низкую гидромеханическую устойчивость и, как следствие, большую дисперсность. Разница в среднем размере зёрен безводных алюмосиликатных и глинистых минералов, по всей видимости, выступает основным фактором, приводящим к изменению количественного минерального состава взвеси в разных частях плюма.

По результатам проведённого рентгенофазового анализа было установлено, что взвесь рек Терек и Сулак состоит преимущественно из кварца, различных гидрослюд и кальцита. В меньшем количестве в ней содержится хлорит, смешаннослойные образования «слюда – смектит» и плагиоклаз. В небольшом количестве присутствуют смектит, каолинит, доломит и щелочной полевой шпат.

Обнаруженные минеральные фазы были поделены на три группы:

- 1. Безводные силикаты и алюмосиликаты. В эту группу входят наиболее твёрдые минералы: кварц, щелочной полевой шпат и плагиоклаз. Их твёрдость равна 5–7 по шкале Мооса.
- 2. Глинистые минералы. В эту группу входят водные силикаты: гидрослюды, хлорит, смешаннослойные образования «слюда смектит», смектит, каолинит. Для них характерна относительно низкая твёрдость 1,5–3 по шкале Мооса и низкая плотность. За счёт этого они легко разрушаются, формируют тонкообломочный материал и переносятся водой на значительные расстояния.
- Карбонатные минералы. Кальцит и доломит имеют относительно низкую твёрдость 3–4 по шкале Мооса. Они при попадании в солёную воду моря частично растворяются. В виде истинных растворов минералы этой группы могут переноситься на десятки и сотни километров.

В *табл. 3* в процентном соотношении представлены основные группы минералов, обнаруженные в пробах воды с наиболее близко расположенных к устьям рек станций (см. *рис. 3, 5*).

Вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый (*puc. 9*). Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное отличие состава взвеси в выносе этих рек проявлено в количественном со-

отношении минералов у границ плюмов. В стоке обеих рек зафиксирован рост количества глинистого материала относительно алюмосиликатов. Наиболее ярко он проявлен в плюме р. Терек, в то время как для Сулака даже у края плюма отмечается только небольшое преобладание глинистого материала над алюмосиликатами. Относительно небольшой рост соотношения глинистого и алюмосиликатного материала в выносе р. Сулак, по всей видимости, свидетельствует о достаточно высокой дисперсности алюмосиликатов в её устье. Возможно, крупные частицы безводных алюмосиликатных минералов осаждаются ранее и не попадают в приустьевую зону этой реки.

Рис. 9. Количественное соотношение в процентах минерального состава взвеси в выносах рек Терек и Сулак в разных частях плюма



Дата	Река	Номер станции	Силикаты и алюмосиликаты	Глинистые минералы	Карбонатные минералы
6 июня	Терек	1	33	61	7
		2	23	55	23
		3	37	41	22
		4	38	36	26
		5	38	55	7
	Сулак	13	47	50	3
		14	57	25	18
		17	37	35	29
		18	36	44	20
9 июня	Сулак	1	41	33	26
		2	34	41	25
		3	34	44	23
		4	23	63	14
		14	37	40	23
		15	43	50	7
		16	44	54	2
		20	53	40	8

Таблица 3. Минеральный состав взвеси в выносах рек Терек и Сулак (мас. %)

П р и м е ч а н и е: К силикатам и алюмосиликатам отнесены кварц, щелочной полевой шпат и плагиоклаз. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, смешаннослойными образованиями «слюда – смектит», смектитом, хлоритом и каолинитом; карбонаты — кальцитом и доломитом.

Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности речных плюмов. В наиболее мутной приустьевой зоне во взвеси преобладает относительно крупнообломочный материал, содержащий большое количество зёрен кварца и полевых шпатов. Вдоль границы плюмов, в областях с относительно небольшой мутностью, преобладает тонкодисперсный глинистый материал. Нами высказано предположение о возможном присутствии зависимости между значениями мутности воды в плюме и минеральным составом взвеси. Для количественной характеристики минерального состава предложено использовать эмпирический коэффициент K = (масса безводных алюмосиликатных минералов)/(масса глинистых минералов).



Рис. 10. Сопоставление значений мутности плюмов рек Терек (*a*) и Сулак (*б*), полученных с помощью портативного турбидиметра, и коэффициента *К*, который отражает отношение алюмосиликатных минералов к глинистым минералам

Среднее на пяти станциях отношение суммы алюмосиликатных минералов к сумме глинистых (K) в выносе Терека составляет K = 0,72. Ближе к устью оно увеличивается до 1,1. В выносе Сулака среднее за два дня измерений значение K = 0,98, у устья оно возрастает до 1,2.

Как показывает анализ *рис.* 10 (см. с. 276), в выносах рек Терек и Сулак действительно присутствует тенденция к увеличению коэффициента *К* при увеличении мутности воды. В пробах с высокой мутностью отмечается большое количество безводных алюмосиликатов. При уменьшении мутности проб наряду с валовым уменьшением массы взвешенного вещества выявлен рост относительного количества глинистого материала.

Эта зависимость проявлена как для данных, полученных *in situ*, так и для значений мутности, установленных по данным спутника. Более детальное изучение выносов рек района позволит собрать более представительную статистику.

Заключение

На основе данных спутникового зондирования в оптическом диапазоне с высоким пространственным разрешением и подспутниковых измерений in situ проведено исследование основных параметров плюмов рек Терек и Сулак, впадающих в Каспийское море севернее г. Махачкалы. Основной целью исследований было сравнение значений мутности морской воды, полученных с помощью портативного мутномера и полученных по данным спутникового зондирования с использованием различных стандартных алгоритмов. Одновременно с CTD-зондированием в приповерхностном слое брались пробы воды для оценки концентрации взвешенного вещества весовым методом и для определения минерального состава взвеси. Анализ полученных данных показал, что мутность вод в плюме р. Терек существенно выше мутности в плюме р. Сулак. На станциях зондирования вблизи устья р. Терек измеренные значения мутности достигали 608 NTU, в то время как значения мутности у устья р. Сулак не превышали 140 NTU. Как показали наши предыдущие исследования для приустьевой зоны р. Мзымты, для существенно разных значений мутности надо применять различные стандартные алгоритмы определения этого параметра на основе спутниковых данных. Для определения мутности в приустьевой зоне р. Терек наилучшие результаты показало использование алгоритма Dogliotti, разработанного именно для вод с большой мутностью. Для вод плюма р. Сулак ни один из алгоритмов не показал значения мутности, близкие к измеренным in situ, что может быть объяснено разницей в сутки между спутниковым зондированием и натурными измерениями, учитывая, что положение границы плюма р. Сулак сильно меняется во времени. По данным рентгенофазового анализа было установлено, что вблизи устьев минеральный состав взвеси в Тереке и Сулаке почти одинаковый. Он характеризуется содержанием безводных алюмосиликатов, глинистого и карбонатного материала примерно в равном количестве. Существенное различие состава взвеси в выносе этих рек проявлено в количественном соотношении минералов у границ плюмов. Изменение минерального состава взвеси сопровождается значительным изменением мутности вод, полученной как in situ, так и по спутниковым данным.

Следует отметить, что исследования параметров плюмов на основе спутниковых данных и измерений *in situ* проводятся впервые в данном районе.

Авторы надеются, что планируемые в будущем исследования и натурные измерения позволят расширить результаты, представленные в данной работе.

Авторы благодарят всех участников подспутниковых измерений, проведённых в июне 2022 г. в приустьевых зонах рек Терек и Сулак. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-20060. Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea, развитие которой осуществляется в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

- 1. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. Межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2014. 36 с.
- 2. 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.
- 3. 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.
- 4. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И.А., Лупян Е.А. Текущие возможности и опыт использования информационной системы See the Sea для изучения и мониторинга явлений и процессов на морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 266–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 5. Лисицын А. П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 7. *Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В., Соловьев Д. М., Жук Е. В., Алферьева Я. О.* Особенности выявления параметров речного плюма контактными и дистанционными методами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 227–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
- 8. *Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N., Ngoc D. D., Anthony E. J., Gardel A.* Dynamics of the Estuarine Turbidity Maximum Zone from Landsat-8 Data: The Case of the Maroni River Estuary, French Guiana // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2173. https://doi.org/10.3390/rs12132173.
- 9. *Babin M.A., Morel V., Fournier-Sicre F.F., Stramski D.* Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. P. 843–859. https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.2.0843.
- Berdeal I., Hickey B., Kawase M. Influence of wind stress and ambient flow on high discharge river plume // J. Geophysical Research. 2002. V. 107(C9). Art. No. 3130. P. 13-1–13-24. https://doi.org/10.1029/2001JC000932.
- 11. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A. Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters // Proc. Living Planet Symp. 2016. ESA-SP 740. 6 p.
- Caballero I., Stumpf R. P. Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B // Optics Express. 2020. V. 28. P. 11742–11766. https://doi.org/10.1364/OE.390316.
- Cai L., Tang D., Li X., Zheng H., Shao W. Remote sensing of spatial-temporal distribution of suspended sediment and analysis of related environmental factors in Hangzhou Bay, China // Remote Sensing Letters. 2015. V. 6(8). P. 597–603. https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1062158.
- 14. *Chen J.*, *D'Sa E.*, *Cui T.*, *Zhang X.* A semi-analytical total suspended sediment retrieval model in turbid coastal waters: A case study in Changjiang River Estuary // Optics Express. 2013. V. 21. P. 13018–13031. https://doi.org/10.1364/oe.21.013018.
- Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S. Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // Continental Shelf Research. 2016. V. 112. P. 14–30. https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009.
- 16. *Devlin M. J., Petus C., da Silva E., Tracey D., Wolff N. H., Waterhouse J., Brodie J.* Water Quality and River Plume Monitoring in the Great Barrier Reef: An Overview of Methods Based on Ocean Colour Satellite Data // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 12909–12941. https://doi.org/10.3390/rs71012909.
- Doerffer R., Schiller H. The MERIS Case 2 water algorithm // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28(3–4). P. 517–535. https://doi.org/10.1080/01431160600821127.
- Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuatine waters // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 156. P. 157–168. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.
- Doxaran D., Froidefond J. M., Castaing P. A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters // Intern. J. Remote Sensing. 2002. V. 23. P. 5079–5085. https://doi.org/10.1080/0143116021000009912.

- Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C., Lubac B., Cerisier S., Barillé 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. https://doi. org/10.3390/rs70809507.
- 21. *Güttler F.N., Niculescu S., Gohin F.* Turbidity retrieval and monitoring of Danube Delta waters using multisensor optical remote sensing data: An integrated view from the delta plain lakes to the western-northwestern Black Sea coastal zone // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 132. P. 86–101. https://doi. org/10.1016/j.rse.2013.01.009.
- Kopelevich O., Sheberstov S., Burenkov V., Vazyulya S., Likhacheva M. Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data // Proc. SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. 2007. V. 6615. Art. No. 661507. https:// doi.org/10.1117/12.740441.
- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu. Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. V. 9638. Art. No. 96380D. https://doi.org/10.1117/12.2193905.
- 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 // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2016. V. 9999. Art. No. 99990G. https://doi.org/10.1117/12.2241312.
- Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Soloviev D. M., Alferieva Ya. O., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu. Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2021. V. 11857. Art. No. 1185705. https://doi.org/10.1117/12.2599809.
- 26. *Martins V.S., Barbosa C. C. F., De Carvalho L.A.S., Jorge D.S. F., Lobo F.D.L., Novo E. M. L. M.* Assessment of Atmospheric Correction Methods for Sentinel-2 MSI Images Applied to Amazon Floodplain Lakes // Remote Sensing. 2017. V. 9. Art. No. 322. https://doi.org/10.3390/rs9040322.
- 27. *Mulligan R. P., Perrie W., Solomon S.* Dynamics of the Mackenzie River plume on the inner Beaufort shelf during an open water period in summer // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2010. V. 89. P. 214–220. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.06.010.
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Strochkov A. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea // Remote Sensing. 2021. V. 13. Art. No. 143. https://doi. org/10.3390/ rs13010143.
- 29. *Nechad B., Ruddick K. G., Park Y.* Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters // Remote Sensing of Environ. 2010. V. 114. P. 854–866. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022.
- Nechad B., Ruddick K., Schroeder T., Oubelkheir K., Blondeau-Patissier D., Cherukuru N., Brando V., Dekker A., Clementson L., Banks A. C., Maritorena S., Werdell J., Sá C., Brotas V., Caballero de Frutos I., Ahn Y.-H., Salama S., Tilstone G., Martinez-Vicente V., Foley D., McKibben M., Nahorniak J., Peterson T., Siliò-Calzada A., Röttgers R., Lee Z., Peters M., Brockmann C. CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // Earth System Science Data. 2015. V. 7. P. 319–348. http://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015.
- 31. *Neukermans G., Loisel H., Meriaux X., Astoreca R., McKee D.* In situ variability of mass-specific beam attenuation and backscattering of marine particles with respect to particle size, density, and composition // Limnology and Oceanography. 2012. V. 57. P. 124–144. http://doi.org/10.4319/lo.2012.57.1.0124.
- 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(3). Art. No. 245. https:// doi.org/10.3390/rs8030245.
- Osadchiev A.A. Estimation of river discharge based on remote sensing of a river plume // Proc. SPIE. Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2015. V. 9638. Art. No. 96380H. http://dx.doi.org/10.1117/12.2192672.
- 34. *Ou S.*, *Zhang H.*, *Wang D.* Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer // Environmental Fluid Mechanics. 2009. V. 9(5). P. 471–492. https://doi.org/10.1007/s10652-009-9146-3.
- Ouillon S., Forget P., Froidefond J.-M., Naudin J.-J. Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhone River plume // Marine Technology Society J. 1997. V. 31(2). P. 15–20.
- Petus C., Chust G., Gohin F., Doxaran D., Froidefond J.-M., Sagarminaga Y. Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery // Continental Shelf Research. 2009. V. 30. Iss. 5. P. 379–392. http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007.

- 37. *Pruszak Z., van Ninh P., Szmytkiewicz M., Ostrowski R.* Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta) // Oceanologia. 2005. V. 47(3). P. 365–385.
- 38. *Van Der Linde D. W.* Protocol for determination of total suspended matter in oceans and coastal zones: JRC Technucal Note I.1998.98.182. 1998.
- Vanhellemont Q. Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 175–192. https:// doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010.
- 40. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 // Remote Sensing of Environment. 2015. V. 161. P. 89–106. https://doi.org/10.1016/j. rse.2015.02.007.
- Warren M. A., Simis S. G. H., Martinez-Vicente V., Poser K., Bresciani M., Alikas K., Spyrakos E., Giardino C., Ansper A. Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 225. P. 267–289. https://doi. org/10.1016/j.rse.2019.03.018.
- 42. Warrick J.A., DiGiacomo P.M., Weisberg S.B., Nezlin N.P., Mengel M., Jones B. H., Ohlmann J. C., Washburn L., Terrill E.J., Farnsworth K.L. River plume patterns and dynamics within the Southern California Bight // Continental Shelf Research. 2007. V. 27. P. 2427–244. https://doi.org/10.1016/j. csr.2007.06.015.

Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and *in situ* measurements

O. Yu. Lavrova¹, K. R. Nazirova¹, Ya. O. Alferyeva², P. D. Zhadanova^{1,3}, A. Ya. Strochkov¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: olavrova@iki.rssi.ru ² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny 141700, Russia

The study of coastal areas of the World Ocean under the influence of river flow is an important scientific and practical task. This is because, in addition to suspended and dissolved terrigenous and biogenic substances, anthropogenic pollution may enter shelf areas together with river waters. With the development of domestic tourism in recent years, particularly in the Republic of Dagestan, there is a growing need for ecological monitoring of the resort coastal zone near the city of Makhachkala where the influence of outflows of the Sulak and Terek rivers is strong. Studies of the main parameters of the rivers plumes, their similarities and differences were based on a joint use of satellite remote sensing data and in situ measurements performed simultaneously with satellite observations. High spatial resolution satellite data from Sentinel-2 MSI and Landsat OLI/TIRS sensors were used. In situ measurements were conducted on June 6 and 9, 2022, in the mouth areas of the Terek and Sulak rivers. The main objective was to compare sea water turbidity obtained using a portable turbidity meter and determined from satellite data using different standard algorithms. Simultaneously with CTD sounding, water samples were taken in the near-surface layer to assess suspended matter concentration by weight method and to determine the mineral composition of suspended solids. Analysis of obtained data showed that water turbidity in the Terek plume is significantly higher than in the Sulak plume. The best results in determining turbidity in the mouth zone of the Terek River from satellite data were obtained using Dogliotti algorithm that was developed specifically for waters with high turbidity. For the Sulak plume, none of the algorithms showed turbidity values close to in-situ measurements. This can be explained by the difference of a day between the satellite survey and the corresponding *in situ* measurements, given that the position of the Sulak plume boundary changes greatly over time. According to the X-ray phase analysis, the mineral composition of the suspended sediments near the Terek and Sulak estuaries is almost the same. It is characterized by approximately equal contents of anhydrous aluminosilicates, clayey and carbonate materials. Significant difference in the suspended sediment composition is manifested in the quantitative ratio of minerals at the plume boundaries. Changes in the mineral composition of suspended sediment are accompanied by significant changes in the turbidity of waters determined both in situ and from satellite data.

Keywords: river plume, turbidity of sea water, total suspended matter, satellite Ocean Color Data, *in situ* measurements, ACOLITE algorithms, MSI Sentinel-2, OLI/TIRS Landsat-8, -9, Caspian Sea, Terek River, Sulak River

Accepted: 31.10.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283

References

- 1. *GOST 31861-2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob* (Water. General requirements for sampling), Moscow: Standartinform, 2013, 36 p. (in Russian).
- Zav'yalov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiev A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskii A. B., Izhitskii A.S., Goncharenko I.V., Solov'ev 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, DOI: 10.1134/S0001437014030151.
- 3. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostyanoi A. G., *Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk*, Moscow: IKI RAS, 2016, 335 p. (in Russian).
- Lavrova O.Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A., Loupian E. A., Current capabilities and experience of using the See the Sea information system for studying and monitoring phenomena and processes on the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 266– 287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-266-287.
- 5. Lisitsyn A. P., Marginal filter of oceans, Okeanologiya, 1994, Vol. 34, No. 5, pp. 735–747 (in Russian).
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A. M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Solov'ev D. M., Zhuk E. V., Alfer'eva Ya. O., Features of river plume parameter determination by in situ and remote sensing methods, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 227–243 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243.
- 8. Abascal-Zorrilla N., Vantrepotte V., Huybrechts N., Ngoc D. D., Anthony E. J., Gardel A., Dynamics of the Estuarine Turbidity Maximum Zone from Landsat-8 Data: The Case of the Maroni River Estuary, French Guiana, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Issue 13, Art. No. 2173, https://doi.org/10.3390/rs12132173.
- 9. Babin M.A., Morel V., Fournier-Sicre V., Fell F., Stramski D., Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration, *Limnology and Oceanography*, 2003, Vol. 48, Issue 2, pp. 843–859, https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.2.0843.
- Berdeal I., Hickey B., Kawase M., Influence of wind stress and ambient flow on high discharge river plume, J. Geophysical Research, 2002, Vol. 107, Issue C9, Art. No. 3130, pp. 13-1–13-24, https://doi. org/10.1029/2001JC000932.
- 11. Brockmann C., Doerffer R., Peters M., Kerstin S., Embacher S., Ruescas A., Evolution of the C2RCC Neural Network for Sentinel 2 and 3 for the Retrieval of Ocean Colour Products in Normal and Extreme Optically Complex Waters, *Proc. Living Planet Symp.*, 2016, ESA-SP 740, 6 p.
- 12. Caballero I., Stumpf R. P., Atmospheric correction for satellite-derived bathymetry in the Caribbean waters: from a single image to multi-temporal approaches using Sentinel-2A/B, *Optics Express*, 2020, Vol. 28, Issue 8, pp. 11742–11766, https://doi.org/10.1364/OE.390316.
- Cai L., Tang D., Li X., Zheng H., Shao W., Remote sensing of spatial-temporal distribution of suspended sediment and analysis of related environmental factors in Hangzhou Bay, China, *Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 6, No. 8, pp. 597–603, https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1062158.
- Chen J., D'Sa E., Cui T., Zhang X., A semi-analytical total suspended sediment retrieval model in turbid coastal waters: A case study in Changjiang River Estuary, *Optics Express*, 2013, Vol. 21, Issue 11, pp. 13018– 13031, https://doi.org/10.1364/oe.21.013018.
- 15. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S., Estimation of water turbidity and analysis of its spatiotemporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data, *Continental Shelf Research*, 2016, Vol. 112, pp. 14–30, https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009.

- Devlin M. J., Petus C., da Silva E., Tracey D., Wolff N. H., Waterhouse J., Brodie J., Water Quality and River Plume Monitoring in the Great Barrier Reef: An Overview of Methods Based on Ocean Colour Satellite Data, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 10, pp. 12909–12941, https://doi.org/10.3390/rs71012909.
- 17. Doerffer R., Schiller H., The MERIS Case 2 water algorithm, *Intern. J. Remote Sensing*, 2007, Vol. 28, Issue 3–4, pp. 517–535, https://doi.org/10.1080/01431160600821127.
- Dogliotti A. I., Ruddick K. G., Nechad B., Doxaran D., Knaeps E., A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuatine waters, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 156, pp. 157–168, https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020.
- 19. Doxaran D., Froidefond J. M., Castaing P., A reflectance band ratio used to estimate suspended matter concentrations in sediment-dominated coastal waters, *Intern. J. Remote Sensing*, 2002, Vol. 23, Issue 23, pp. 5079–5085, https://doi.org/10.1080/0143116021000009912.
- Gernez P., Lafon V., Lerouxel A., Curti C., Lubac B., Cerisier S., Barillé 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, Issue 8, pp. 9507–9528, https://doi.org/10.3390/rs70809507.
- 21. Güttler F. N., Niculescu S., Gohin F., Turbidity retrieval and monitoring of Danube Delta waters using multi-sensor optical remote sensing data: An integrated view from the delta plain lakes to the western-northwestern Black Sea coastal zone, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 132, pp. 86–101, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.009.
- 22. Kopelevich O., Sheberstov S., Burenkov V., Vazyulya S., Likhacheva M., Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data, *Proc. SPIE, Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters*, 2007, Vol. 6615, Art. No. 661507, https:// doi.org/10.1117/12.740441.
- Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu., Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data, *Proc. SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, Vol. 9638, Art. No. 96380D, https://doi.org/10.1117/12.2193905.
- 24. 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, *Proc. SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2016, Vol. 9999, Art. No. 99990G, https://doi.org/10.1117/12.2241312.
- 25. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Soloviev M. D., Alferieva O. Ya., Strochkov A. Ya., Bocharova T. Yu., Remote sensing of suspended particulate matter: case studies of the Sulak (Caspian Sea) and the Mzymta (Black Sea) mouth areas, *Proc. SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2021, Vol. 11857, Art. No. 1185705, https://doi.org/10.1117/12.2599809.
- Martins V.S., Barbosa C.C.F., De Carvalho L.A.S., Jorge D.S.F., Lobo F.D.L., Novo E.M.L.M., Assessment of Atmospheric Correction Methods for Sentinel-2 MSI Images Applied to Amazon Floodplain Lakes, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9, Issue 4, Art. No. 322, https://doi.org/10.3390/rs9040322.
- 27. Mulligan R. P., Perrie W., Solomon S., Dynamics of the Mackenzie River plume on the inner Beaufort shelf during an open water period in summer, *Estuarine*, *Coastal and Shelf Science*, 2010, Vol. 89, Issue 3, pp. 214–220, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2010.06.010.
- Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O., Shur Y., Soloviev D., Bocharova T., Strochkov A., Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 1, Art. 143, https:// doi.org/10.3390/rs13010143.
- 29. Nechad B., Ruddick K.G., Park Y., Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, Issue 4, pp. 854–866, https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022.
- Nechad B., Ruddick K., Schroeder T., Oubelkheir K., Blondeau-Patissier D., Cherukuru N., Brando V., Dekker A., Clementson L. Banks A. C., Maritorena S., Werdell J., Sá C., Brotas V., Caballero de Frutos I., Ahn Y.-H., Salama S., Tilstone G., Martinez-Vicente V., Foley D., McKibben M., Nahorniak J., Peterson T., Siliò-Calzada A., Röttgers R., Lee Z., Peters M., Brockmann C., CoastColour Round Robin data sets: A database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters, *Earth System Science Data*, 2015, Vol. 7, Issue 2, pp. 319–348, http://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015.
- 31. Neukermans G., Loisel H., Meriaux X., Astoreca R., McKee D., In situ variability of mass-specific beam attenuation and backscattering of marine particles with respect to particle size, density, and composition, *Limnology and Oceanography*, 2012, Vol. 57, Issue 1, pp. 124–144, http://doi.org/10.4319/lo.2012.57.1.0124.
- 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, Vol. 8, Issue 3, Art. No. 245, https://doi.org/10.3390/rs8030245.

- 33. Osadchiev A.A., Estimation of river discharge based on remote sensing of a river plume, *Proc. SPIE*, *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, Vol. 9638, Art. No. 96380H, http://dx.doi.org/10.1117/12.2192672.
- 34. Ou S., Zhang H., Wang D., Dynamics of the buoyant plume off the Pearl River estuary in summer, *Environmental Fluid Mechanics*, 2009, Vol. 9, Issue 5, pp. 471–492, https://doi.org/10.1007/s10652-009-9146-3.
- 35. Ouillon S., Forget P., Froidefond J.-M., Naudin J.-J., Estimating suspended matter concentrations from SPOT data and from field measurements in the Rhone River plume, *Marine Technology Society J.*, 1997, Vol. 31, No. 2, pp. 15–20.
- Petus C., Chust G., Gohin F., Doxaran D., Froidefond J.-M., Sagarminaga Y., Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery, *Continental Shelf Research*, 2009, Vol. 30, Issue 5, pp. 379–392, http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007.
- 37. Pruszak Z., van Ninh P., Szmytkiewicz M., Ostrowski R., Hydrology and morphology of two river mouth regions (temperate Vistula Delta and subtropical Red River Delta), *Oceanologia*, 2005, Vol. 47, No. 3, pp. 365–385.
- 38. Van Der Linde D.W., *Protocol for determination of total suspended matter in oceans and coastal zones*, JRC Technical Note I.1998.98.182, 1998.
- Vanhellemont Q., Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 175–192, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010.
- 40. Vanhellemont Q., Ruddick K., Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 161, pp. 89–106, https://doi. org/10.1016/j.rse.2015.02.007.
- Warren M.A., Simis S.G.H., Martinez-Vicente V., Poser K., Bresciani M., Alikas K., Spyrakos E., Giardino C., Ansper A., Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 225, pp. 267–289, https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.018.
- 42. Warrick J. A., DiGiacomo P. M., Weisberg S. B., Nezlin N. P., Mengel M., Jones B. H., Ohlmann J. C., Washburn L., Terrill E. J., Farnsworth K. L., River plume patterns and dynamics within the Southern California Bight, *Continental Shelf Research*, 2007, Vol. 27, Issue 19, pp. 2427–244, https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.06.015.