

Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям

К. Р. Назирова¹, О. Ю. Лаврова¹, Я. О. Алферьева², Н. А. Князев¹

¹ Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mails: knazirova@gmail.com, olavrova@cosmos.ru

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
E-mail: yanaalf@bk.ru

Статья посвящена исследованию пространственно-временной изменчивости плюмов рек Терек и Сулак, впадающих в Каспийское море, и определению трёхмерной структуры этих плюмов на основе совместного анализа спутниковых данных и синхронных подспутниковых измерений *in situ*. В качестве спутниковой информации использовались данные видимого диапазона высокого пространственного разрешения сенсоров MSI (англ. MultiSpectral Instrument) Sentinel-2 и OLI/OLI-2 (англ. Operational Land Imager) Landsat-8, -9. Синхронные со спутниковой съёмкой измерения *in situ* основных параметров плюмов были проведены в июне 2023 г. с маломерного судна. В результате спутникового мониторинга приустьевых зон рек Терек и Сулак за период с 2014–2022 гг. было определено, что 73 км береговой черты побережья Дагестана севернее г. Махачкалы потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами этих рек. Анализ полученных спутниковых изображений показал, что наблюдается ярко выраженная пространственная асимметрия в направлении распространения выносов рек. Для обеих рек на большом временном интервале существует доминирующее направление распространения, а именно юго-восточное. Была выявлена сезонная изменчивость проявления на спутниковых изображениях плюмов рек Терек и Сулак. На основе спутниковых данных и синхронных подспутниковых измерений *in situ* в июне 2023 г. была получена трёхмерная структура плюмов рек Терек и Сулак и определено пространственное распределение основных параметров: температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a*. Было установлено, что глубина проникновения речных вод не превышает 1,5–2 м и, несмотря на количество взвешенного вещества, выносимого с речным стоком, и расхода реки, основная масса взвеси аккумулируется в одной и той же локализованной области, примерно в 500 м от берега. На основе рентгенофазового анализа проб воды, отобранных на ближайших к устьям станциях и на границах плюмов, был определён минеральный состав взвеси и его изменение в различных областях плюмов. Неоднократное совпадение границ области влияния речных вод, установленных по спутниковым данным и измеренных *in situ*, позволяет с уверенностью использовать методы дистанционного зондирования для мониторинга приустьевых районов без привлечения натуральных данных.

Ключевые слова: речные плюмы, мутность воды, концентрация взвешенного вещества, минеральный состав взвеси, спутниковые данные видимого диапазона, измерения *in situ*, MSI Sentinel-2, OLI/OLI-2 Landsat-8, -9, Каспийское море, Терек, Сулак

Одобрена к печати: 18.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303

Введение

Приустьевые области в прибрежных зонах являются одними из наиболее сложных и интересных акваторий Мирового океана. Распреснённые речные воды и воды внутренних водоёмов, соединённых с морем проливами и каналами, перемешиваются с солёной морской водой, в результате чего в прибрежной зоне формируется динамическая структура — плюм (англ. plume). Как правило, смешивающиеся водные массы, будь то морская вода, речная вода или воды заливов, существенно отличаются друг от друга по многим физическим и химическим характеристикам, включая солёность, температуру, плотность, концентрацию взвешенных

и растворённых веществ и т. д. В результате этого сформированный плюм за счёт градиента плотности, во-первых, распространяется относительно тонким слоем по поверхности моря и, во-вторых, имеет собственную внутреннюю динамику, отличную от окружающих его вод моря. Поскольку вместе с речным стоком и водами внутренних водоёмов в прибрежные морские воды могут поступать продукты антропогенного загрязнения, мониторинг и теория динамики распространения плюмов в прибрежных зонах морей представляются важной задачей океанологии. Пространственные размеры плюмов варьируются от нескольких до десятков и сотен километров. На эволюцию плюмов оказывает влияние совокупность большого количества факторов: прибрежные течения, донная батиметрия, сила Кориолиса, интенсивность и объём речного стока, ветровое воздействие, приливные колебания и другие процессы (Horner-Devine et al., 2006; O'Donnell et al., 1998).

Одна из важных задач при изучении речных плюмов — проблема определения их пространственных границ. Как правило, эта граница задаётся некоторым фиксированным значением солёности, если соответствующая ему изогалина расположена в области резкого градиента. Но в силу внешнего волнового, ветрового воздействия прибрежных течений на плюм, происходит размывание границ и формирование сложной пространственно-неоднородной внутренней структуры плюма.

С середины 1960-х гг. начали активно проводить специализированные исследования распреснённых водных масс, нацеленные в первую очередь на изучение речных выносов крупных рек (Симонов, 1969; Park, 1966). В этих работах было заложено базовое понимание структуры речных плюмов, показана стабильность скачка солёности, описаны особенности больших горизонтальных и малых вертикальных пространственных масштабов, присущих речным плюмам. В последующие десятилетия в связи с совершенствованием океанологических измерительных приборов, а также с развитием методов и средств дистанционного зондирования усложнялись и углублялись методы исследования, которые всё чаще были направлены на более детальные и мелкомасштабные процессы взаимодействия речных и морских прибрежных вод (Иванов, Ильин, 1995; Назирова и др., 2019; Осадчиев и др., 2021; Devlin et al., 2015; Estourne et al., 1997; Osadchiev, 2015). Стало уделяться больше внимания выносам малых рек, особенно тех, устья которых расположены в рекреационных зонах.

Стоит отметить большое количество научных статей, посвящённых исследованию динамических процессов, тесно связанных с нестационарными движениями речных плюмов и их взаимодействием с примыкающими морскими водами (Короткина и др., 2011; Lavrova et al., 2018; Nash, Mount, 2005). Отдельное направление исследований посвящено изучению роли прибрежных течений в процессах переноса и перемешивании стока малых рек (Айбулатов и др., 2008; Журбас и др., 2011; Clark, Mannino, 2022; Nazirova et al., 2021).

Наиболее распространённым направлением исследований становится изучение морфометрических особенностей речного плюма, характеристик отклика гидрофизических полей в шельфовой зоне при воздействии материкового стока, закономерностей динамики плюма при ветровом воздействии и разном объёме речного стока (Завьялов и др., 2014; Cai et al., 2015).

Цель настоящей работы — исследование пространственно-временной изменчивости плюмов рек Терек и Сулак и определение трёхмерной структуры этих плюмов, плюмов на основе совместного анализа спутниковых данных и синхронных подспутниковых измерений *in situ*.

Район исследования

Шельфовая зона северо-западной части Среднего Каспия, простирающаяся от Аграханского п-ова до Махачкалы, характеризуется малыми глубинами, которые в среднем не превышают 20 м. В данном районе в море впадают две реки — Терек и Сулак (рис. 1, см. с. 287).

Река Терек берёт начало на склоне Главного Кавказского хребта в Трусовском ущелье, из ледника горы Зилга-Хох, на высоте 2713 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 широкую дельту. Объём водного стока — 11,1 км³/год, сток взвешенных наносов — около 15,4 млн т/год (Лаврова и др., 2022). Терек относится к рекам тянь-шанского типа водного режима с растянутым летним половодьем и осложнёнными летними паводками. Половодье в низовьях реки начинается в мае и продолжается около 150 дней.

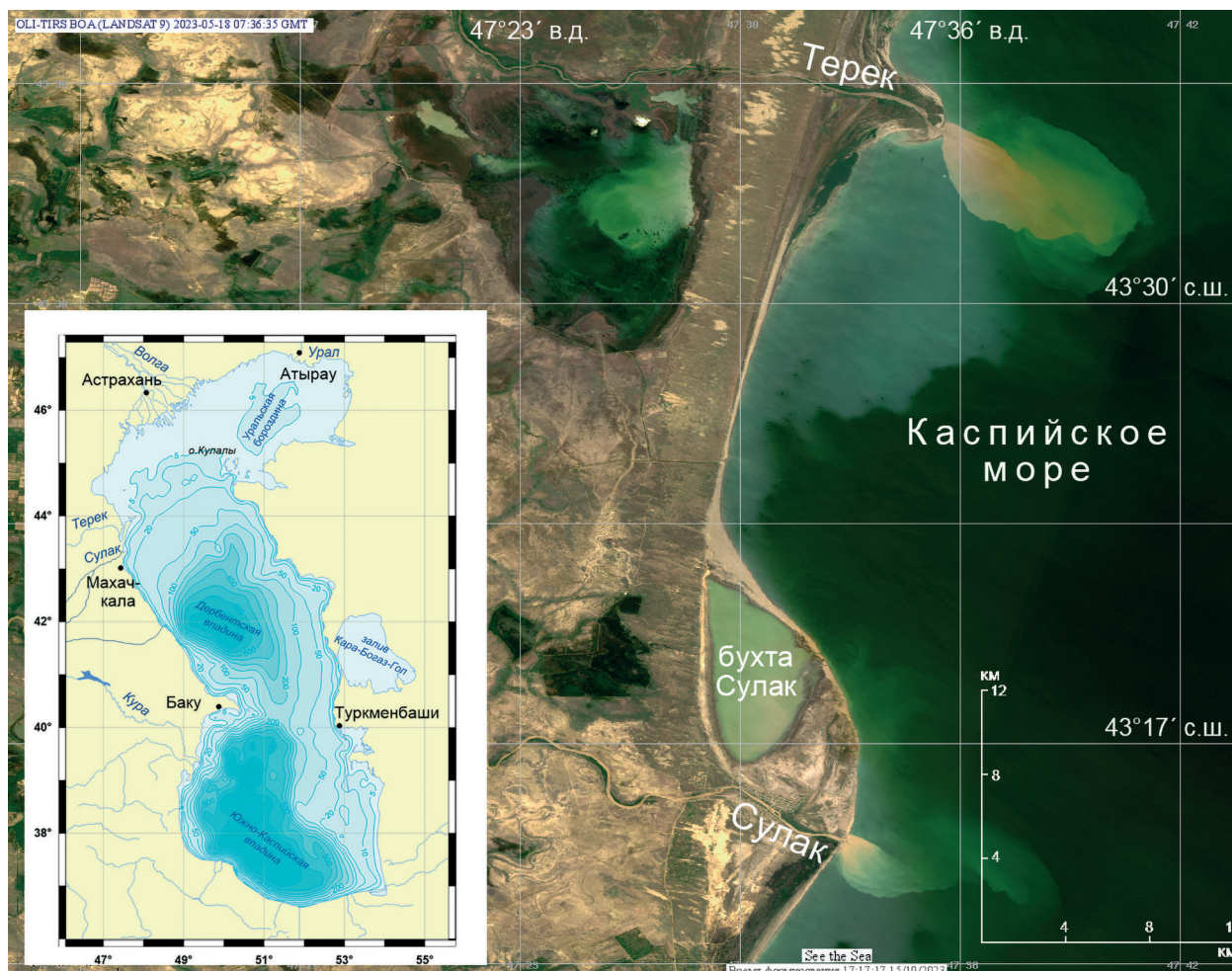


Рис. 1. Район спутникового мониторинга и подспутниковых измерений

Район дельты р. Терек — одно из так называемых «уязвимых» мест в Каспийском море. Река Терек несёт в море много терригенного вещества, аккумуляция которого способствует выдвиганию дельты в море, даже в условиях повышения его уровня. При понижении уровня выявляются дальнейшие изменения в зоне выдвигания дельты Терека, характеризующиеся образованием береговых баров, островков и лагун (Кравцова, Митькиных, 2013). В районе дельты р. Терек находится Аграханский заказник (биосферный заповедник), в котором обитают редкие виды птиц, в частности кудрявые пеликаны. Мониторинг приустьевой зоны р. Терек является важной экологической задачей.

Бассейн *реки 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 течение — в Прикаспийской низменности. При впадении в Каспийское море Сулак образует дельту площадью около 44 км². Объём водного стока — 4 км³/год.

Сулак зарегулирован двумя водохранилищами: Чирюртовым и более крупным Чиркейским, расположенным в 142 км от моря. На Чиркейском вдхр. вода сбрасывается ежедневно через турбину ГЭС, 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 1,6 млн т/год. (Лаврова и др., 2022).

Устье Сулака может быть отнесено к дельтово-эстуарному типу: устьевая область включает дельту и эстуарные водоёмы лагунного типа — бух. Сулак и продольные узкие лагуны, отделённые от моря береговыми барами. Водный режим р. Сулак, так же как и у р. Терек, относится к рекам тянь-шанского типа с осложнённым паводками летним половодьем. Питание реки смешанное: снеговое, подземное, дождевое и ледниковое. В пределах устья р. Сулак находится пос. Сулак, рыбохозяйственные и рыбоперерабатывающие предприятия малого типа.

Следует отметить, что многолетний спутниковый мониторинг выносов рек Терек и Сулак ранее никем не проводился. Отдельные спутниковые изображения этого района приведены в атласе космических снимков «Устья рек России» (Кравцова, Митькиных, 2013).

Синхронные подспутниковые измерения проводятся авторами статьи начиная с 2021 г. (район устья р. Сулак), а с 2022 г. измерения *in situ* стали также проводиться в приустьевой зоне р. Терек. Подобные измерения в данном районе нам неизвестны.

Результаты

Спутниковый мониторинг плюмов рек Терек и Сулак

Спутниковый мониторинг приустьевых зон рек Терек и Сулак базировался на данных оптических сенсоров MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) Sentinel-2A, -2B, OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 и OLI-2 Landsat-9 (с 2022 г.) за 2014–2022 гг. Обработка и анализ спутниковой информации проводились с использованием возможностей информационной системы See the Sea (STS) (Лаврова и др., 2019).

Всего было обработано и проанализировано 1210 изображений приустьевой зоны р. Сулак, из них 43 % (525 изображений) были получены в безоблачную или малооблачную погоду. На этих 525 оптических изображениях было выявлено 307 случаев проявлений плюма, что составляет 58 % от информативных изображений (*табл. 1*).

Таблица 1. Результаты спутникового мониторинга распространения плюма р. Сулак за весь период исследований с 2014 по 2022 г.

Год	Общее количество изображений	Количество безоблачных сцен	Доля безоблачных сцен от общего количества изображений, %	Количество сцен с проявлениями плюмов	Доля выявленных сцен с проявлениями плюмов от общего количества безоблачных сцен, %
2014	40	18	45	13	72
2015	55	20	36	17	85
2016	85	32	38	24	75
2017	119	54	45	32	59
2018	176	85	48	49	58
2019	178	79	44	49	62
2020	170	77	45	40	52
2021	180	71	39	45	63
2022	207	89	43	38	43
Всего	1210	525	43	307	58

Для р. Терек за период мониторинга было обработано и проанализировано 1163 изображения, из них также 43 % (499 изображений) были получены в безоблачную или малооблачную погоду. На этих 499 оптических изображениях было выявлено 390 случаев проявлений плюма, что составляет 78% от информативных изображений (табл. 2).

Таблица 2. Результаты спутникового мониторинга распространения плюма р. Терек за весь период исследований с 2014 по 2022 г.

Год	Общее количество изображений	Количество безоблачных сцен	Доля безоблачных сцен от общего количества изображений, %	Количество сцен с проявлениями плюмов	Доля выявленных сцен с проявлениями плюмов от общего количества безоблачных сцен, %
2014	41	19	46	15	79
2015	49	21	43	18	86
2016	82	32	39	28	88
2017	111	39	35	32	82
2018	159	64	40	59	78
2019	175	82	47	62	76
2020	174	76	44	54	71
2021	179	73	41	62	85
2022	193	93	48	69	74
Всего	1163	499	43	390	78

Для каждого выявленного случая проявления плюмов этих рек на спутниковых изображениях с помощью инструментария STS проводилось оконтуривание областей с большой мутностью, и полученные контуры заносились в тематическую базу данных системы STS. Полученные результаты позволили не только составить карту границ плюмов за весь период мониторинга, но и для каждого случая получить значения площади плюма. Полученные с помощью интегрированного в систему STS картографического интерфейса карты границ плюмов рек Терек и Сулак представлены на рис. 2.

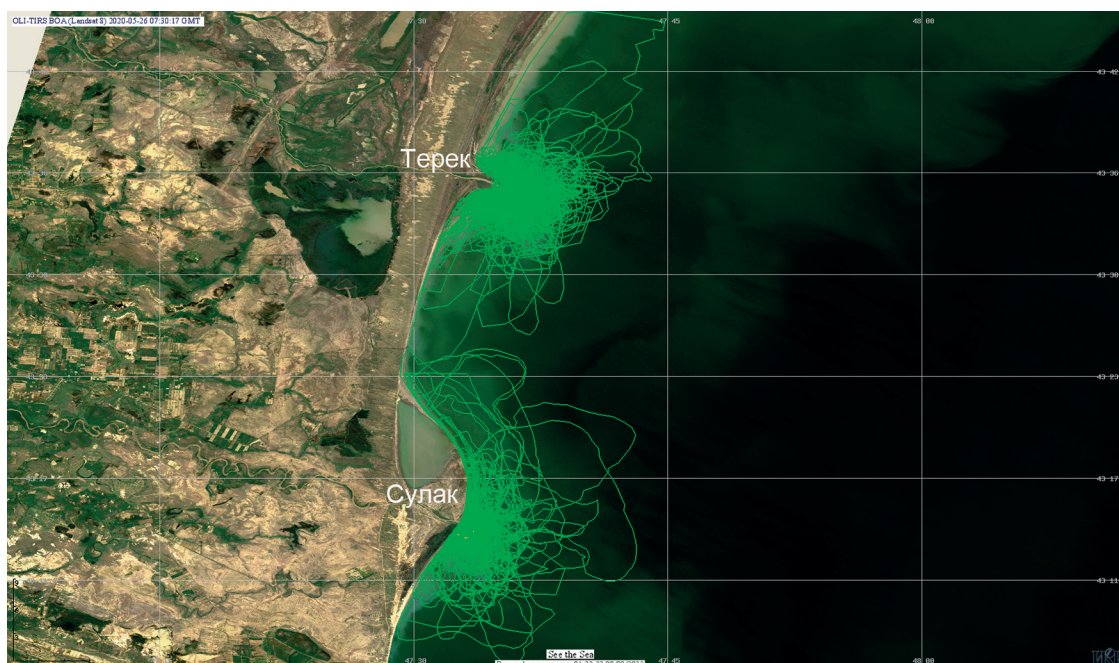


Рис. 2. Сводная карта границ плюмов рек Терек и Сулак, выявленных по спутниковым данным видимого диапазона за 2014–2022 гг.

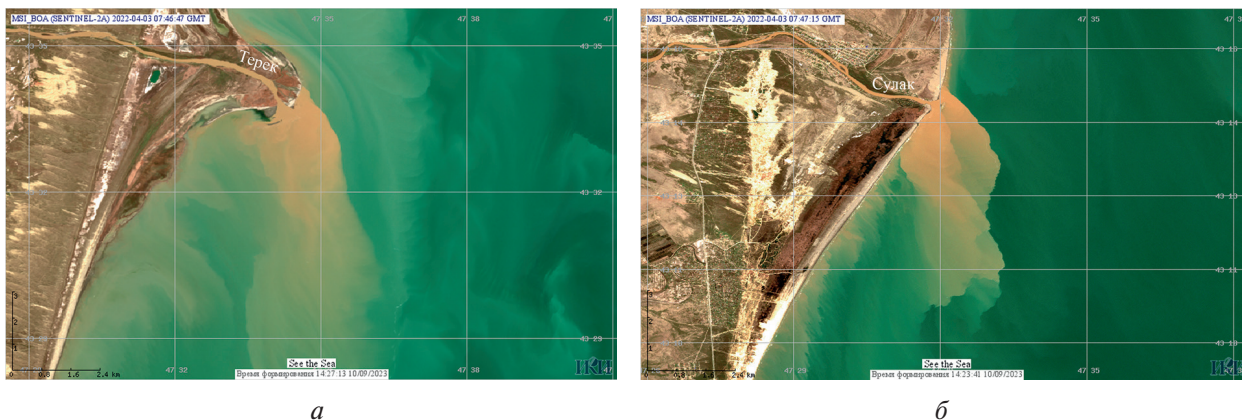


Рис. 3. Проявление плюмов рек Терек (а) и Сулак (б) на цветосинтезированном изображении (4-й, 3-й, 2-й спектральные каналы) сенсора MSI Sentinel-2A, полученном 3 апреля 2022 г.

На основе анализа полученной карты было определено, что 73 км береговой черты потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами рек Терек и Сулак. Максимальное удаление от берега границы плюма р. Терек (перпендикулярно берегу) составляет 12 км, для р. Сулак — 14 км.

Анализ индивидуальных площадей плюмов показал, что средняя площадь плюма р. Терек составляла 12 км², максимальная площадь была выявлена 20 июня 2022 г. — 155 км². Для р. Сулак средняя площадь плюма была 9 км², максимальная площадь выявлена 23 марта 2014 г., она составила 212 км².

Направление распространения плюма зависит от направления ветра и сформированного ветром вдольберегового течения. Их влияние, как правило, проявляется в течение полусуток. При восточном ветре, т. е. ветре, перпендикулярном берегу, плюм распространяется вдоль берега в северном направлении. Следует отметить, что при одном и том же направлении ветра направление распространения выносов этих рек может несколько различаться, хотя расстояние между устьями составляет всего 37 км. Это объясняется, прежде всего, разной формой устьев рек: у Терека устье ориентировано на юг, у Сулака — на восток, практически перпендикулярно берегу (рис. 3).

Анализ полученных спутниковых изображений показал, что наблюдается ярко выраженная пространственная асимметрия в направлении распространения выносов. Для обеих рек на большом временном интервале (2014–2022) существует доминирующее направление распространения, а именно юго-восточное. Для Терека на это направление приходится 27,7 % от общего количества всех направлений, а для Сулака — 36,8 %.

Если для р. Терек южное направление практически сравнимо с юго-восточным (26,7 %), то для р. Сулак восточное направление является вторым по значимости — 23,5 %. Этот факт наглядно отражает представленная на рис. 4 диаграмма направлений распространения выносов.

Анализ спутниковых данных позволил проследить сезонную изменчивость проявлений плюмов рек Терек и Сулак на изображениях видимого диапазона.

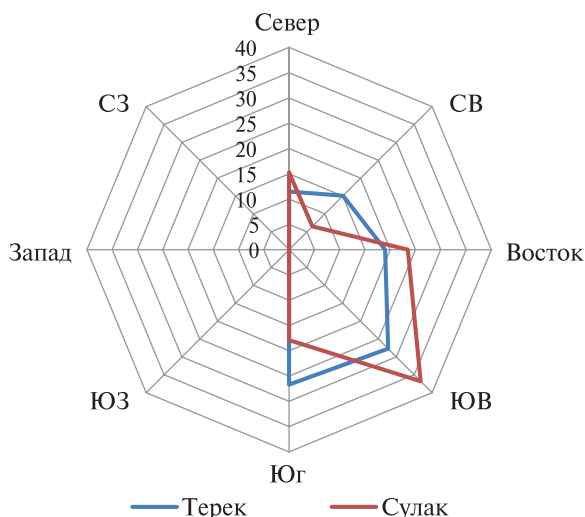


Рис. 4. Диаграмма распределения направления распространения выносов рек Терек и Сулак (в %), построенная по результатам анализа спутниковых изображений за 2014–2022 гг.

На рис. 5 показана доля (в %) проявлений плюмов для каждой реки, выявленных в каждый конкретный месяц на безоблачных и малооблачных спутниковых изображениях за 2014–2022 г., которые, в свою очередь, отнормированы на общее число изображений. Видно, что более 60 % проявлений плюмов, выявленных по спутниковым данным, приходится на май–август. Поскольку питание этих рек смешенное, большое значение имеет паводок, связанный с таянием снега в горах. Для Сулака, у которого расстояние от гор до устья меньше, чем у Терека, максимум половодья приходится на конец мая–начало июня. А для Терека этот период продлевается до июля.

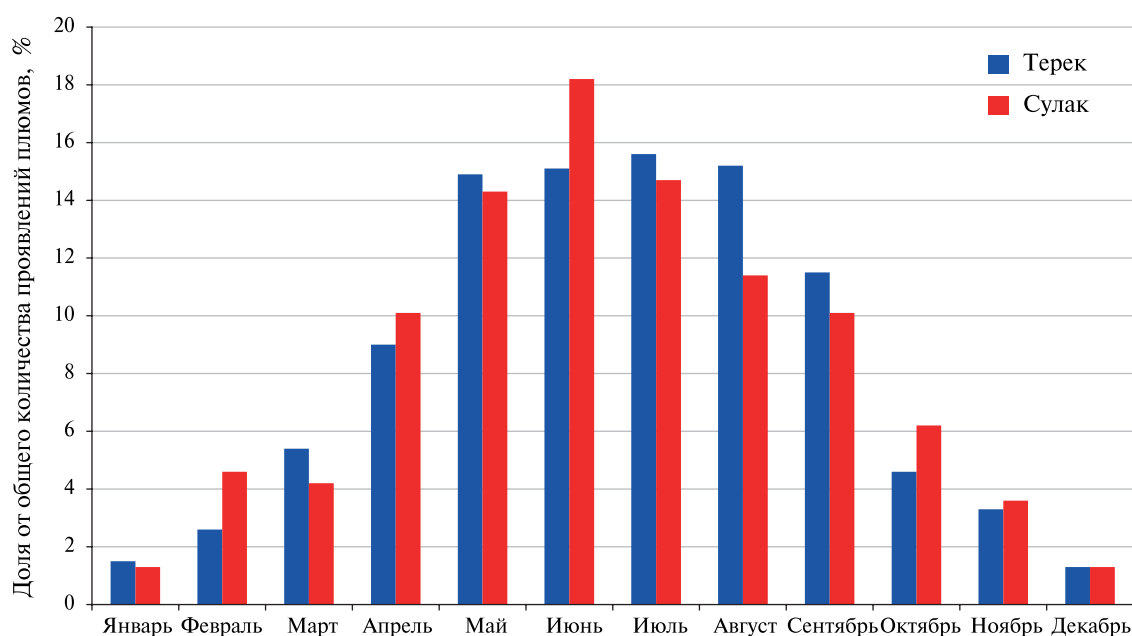


Рис. 5. Ежемесячное распределение количества проявлений плюмов (в %), выявленных на спутниковых изображениях за 2014–2022 гг.

Исходя из этих показателей было принято решение проводить подспутниковые измерения в приустьевых зонах рек Терек и Сулак в начале июня.

Результаты синхронных подспутниковых измерений в июне 2023 г.

Подспутниковые натурные измерения были проведены 2, 4, 5 и 7 июня 2023 г. в приустьевых зонах рек Терек и Сулак. При измерениях с маломерного судна использовался тот же набор приборов, что и в 2022 г.: STD-зонд (С — *англ.* conductivity (электропроводность), пересчёт в солёность, Т — *англ.* temperature (температура), D — *англ.* depth (глубина), измеряется давление), портативный турбидиметр, оборудование для анализа проб воды (Лаврова и др., 2022). Отличительной особенностью по сравнению с прошлым годом стало проведение измерений на разрезах вдоль берега и поперёк него. Такое положение измерительных станций позволяет получить пространственные характеристики измеряемых величин: температуры, солёности, мутности и хлорофилла *a*, а также определить границу плюмов и сравнить полученные результаты со спутниковой информацией.

На период синхронных подспутниковых измерений было получено пять оптических спутниковых изображений, одно из них, за 7 июня, оказалось неинформативным (92 % облачности). Измерения параметров плюмов четыре раза были проведены в приустьевой зоне р. Сулак и два раза — в приустьевой зоне р. Терек. Возможность работы у устья Терек осложняется логистическими трудностями. В общей сложности были выполнены измерения на 94 станциях (табл. 3).

Таблица 3. Информация о спутниковых данных и натурных измерениях в июне 2023 г.

Дата	Время (UTC)	Прибор, спутник	Район проведения измерений	Количество станций измерений	Время судовых измерений (UTC)
2 июня	07:47	MSI Sentinel-2B	Терек, Сулак	25	08:20–12:00
3 июня	07:36	OLI-2 Landsat-9	—	—	Измерения не проводились
4 июня	07:30	OLI Landsat-8	Сулак	28	07:11–09:54
5 июня	07:57	MSI Sentinel-2B	Терек, Сулак	27	07:07–10:32
7 июня	07:47	MSI Sentinel-2A (облачно)	Сулак	14	07:00–08:42

Примечание: UTC — *англ.* Coordinated Universal Time, всемирное координированное время.

Результаты исследования трёхмерной структуры плюма р. Терек

В районе выноса р. Терек 2 и 5 июня 2023 г. синхронно со спутниковой съёмкой прибора MSI Sentinel-2B было выполнено две серии продольных и поперечных разрезов (всего было выполнено четыре разреза), пересекающих исследуемый плюм. Фрагмент спутникового цветосинтезированного изображения в квазиестественных цветах True Color (каналы 4, 3, 2) Sentinel-2B (MSI) и расположение CTD-зондирований 2 июня 2023 г. представлены на *рис. 6*.

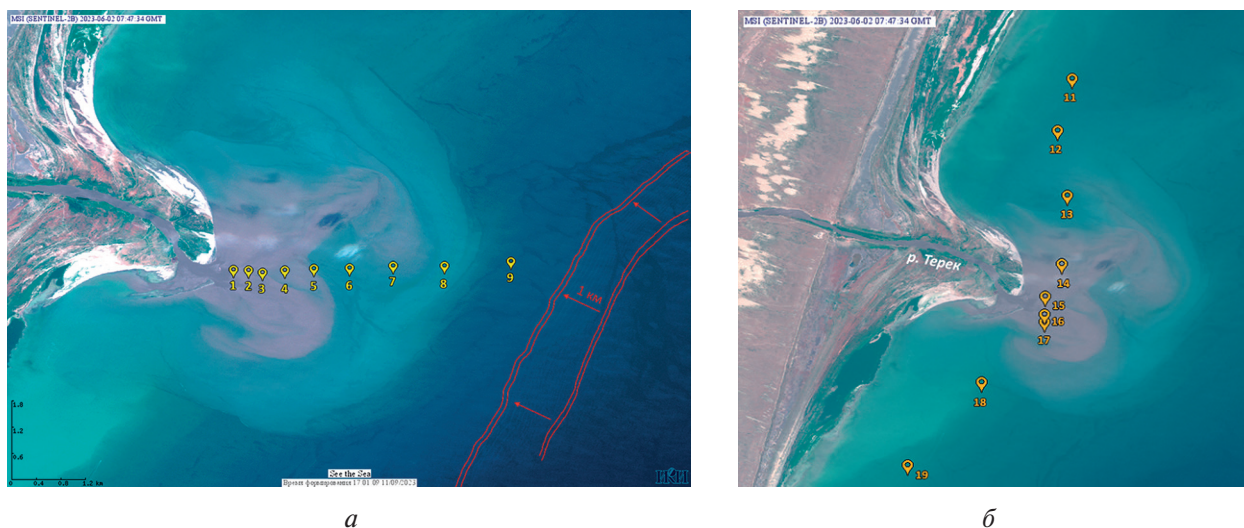


Рис. 6. Фрагмент цветосинтезированного изображения MSI Sentinel-2B за 2 июня 2023 г. Номера и положение CTD-измерений отмечены цветом: *а* — разрез № 1 (поперечный разрез; красным цветом схематично обозначен цуг внутренних волн, стрелки указывают направление распространения цуга); *б* — разрез № 2 (продольный разрез)

На спутниковом изображении от 2 июня 2023 г. видно, что в момент съёмки речной плюм Терека имел сложную форму, представляющую собой два грибовидных образования чуть севернее и южнее устья с общей куполовидной фронтальной зоной «плюм – море». Максимальная видимая протяжённость выноса из реки не превышает 4 км от береговой зоны. Общая площадь плюма составляет $S = 28 \text{ км}^2$. Вдоль разреза № 1 удалось провести съёмку, перпендикулярную берегу, и осуществить CTD-зондирование как в самых мутных областях (примыкающих к устью), так и за границей плюма в относительно чистых областях открытого моря (станция № 9 располагается в 5 км от береговой зоны). Восточнее границы плюма на изображении MSI Sentinel-2B детектируется пакет внутренних волн (см. *рис. 6а*), проявляющийся в равной степени в колебаниях изотерм нижней границы плюма (см. *рис. 7б*).

На рис. 7 представлены вертикальные графики распределения температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a* на перпендикулярном к береговой зоне разрезе № 1. Глубина интрузии речных вод в районе устья р. Терек составляет примерно 1,5–2 м. В поле мутности плюм характеризуется экстремальными градиентами измеренных значений. В районе станции № 1 мутность морской воды составляет около 1300 NTU (англ. nephelometric turbidity unit), тогда как на станции № 3, в чуть более 500 м от устья реки, в приповерхностном слое мутность не превышает 500 NTU. На расстоянии 1,5 км от береговой зоны (на станции № 5 и далее) мутность морской воды меньше 100 NTU и продолжает уменьшаться при удалении от створа реки. На дальней станции за границей плюма (ст. № 9) измеренная мутность морской воды в приповерхностном слое равняется 9 NTU.

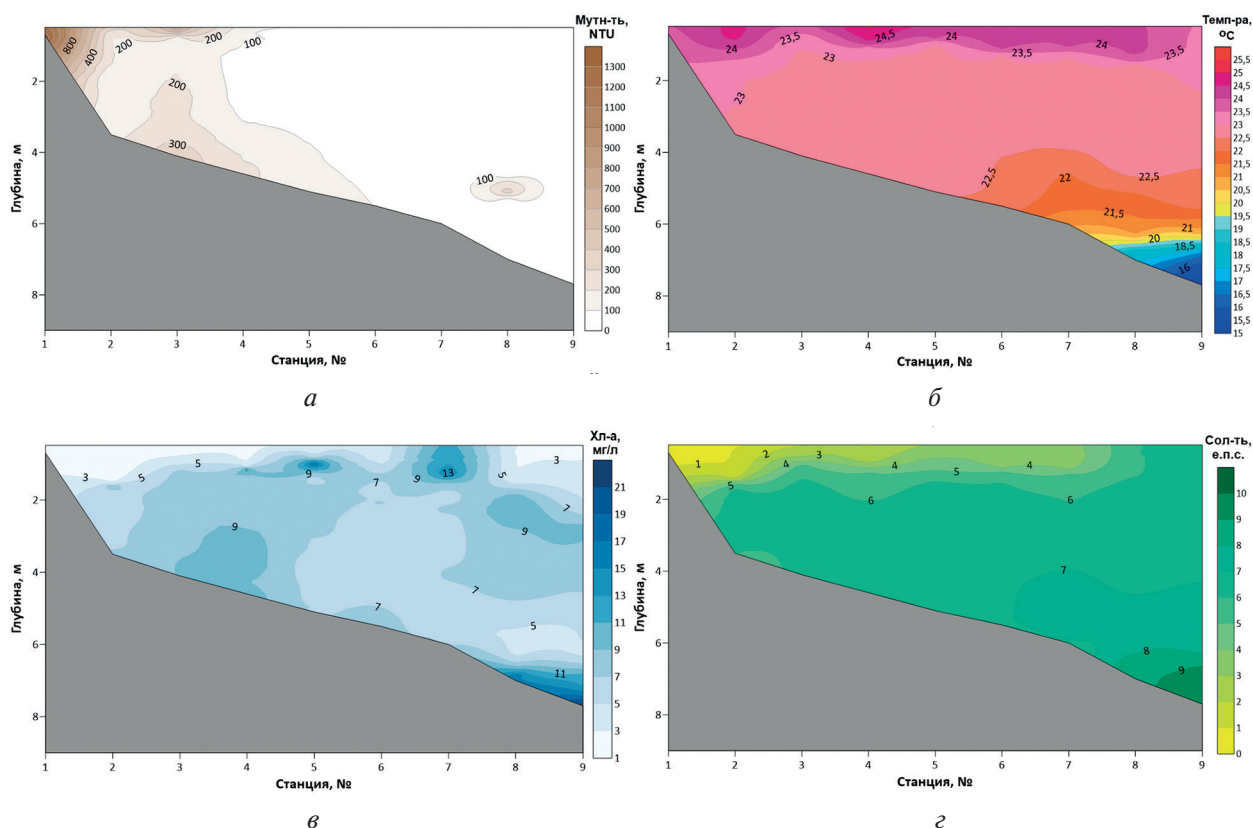


Рис. 7. Распределение мутности (а), температуры (б), концентрации хлорофилла *a* (в) и солёности (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 1 плюма р. Терек от 2 июня 2023 г.

В поле солёности более наглядно прослеживается область влияния речных вод на прибрежную гидрологическую структуру. Распреснённая линза речного плюма распространяется на 4 км от береговой зоны и совпадает с границей плюма, визуализирующегося на цветосинтезированном спутниковом изображении за этот же день в районе станции № 8 (см. рис. 6а). В приустьевой зоне (ст. № 1) солёность морской воды составляет ~0,5 епс (единицы практической солёности). В километре от береговой зоны в приповерхностном слое солёность достигает 2,5–3,0 епс. В процессе постепенного перемешивания с морской водой измеренные значения за границей плюма уже составляют 6,5–7,0 епс. Для нижней границы плюма характерна изогалина 4,5–5,0 епс.

Температура воды в прибрежной зоне в районе р. Терек 2 июня 2023 г. довольно однородна. На основе данных разреза № 1 было определено, что температура речной воды сопоставима с температурой прибрежных вод — 23–24 °С. До глубины 4–5 м толща прибрежных вод квазиоднородно перемешана. Глубоководная водная масса прибрежных каспийских вод располагается на 7–8 м от поверхности. Характерные значения температуры — 15–16 °С (значения солёности — 9–10 епс).

Концентрация хлорофилла *a* в приустьевой области минимальна и составляет 1–2 мг/л. В 1,5 км от берега и на кромке плюма под нижней границей распреднённого слоя на глубине 1,5–2,0 м наблюдаются локальные области повышенных значений — 9–13 мг/л. Максимальные значения концентрации хлорофилла *a* отмечаются в придонных слоях разреза и достигают 20 мг/л.

На *рис. 8* представлены графики пространственного распределения основных гидрологических параметров на продольном разрезе № 2 от 2 июня 2023 г. (расположение станций см. на *рис. б*). На данных графиках отчётливо прослеживается основная область, подверженная большому воздействию от поступления пресных вод, содержащих большое количество взвешенного вещества. Ей соответствует двухкилометровый участок, примыкающий к устью р. Терек (между станциями № 13–16 на *рис. бб*).

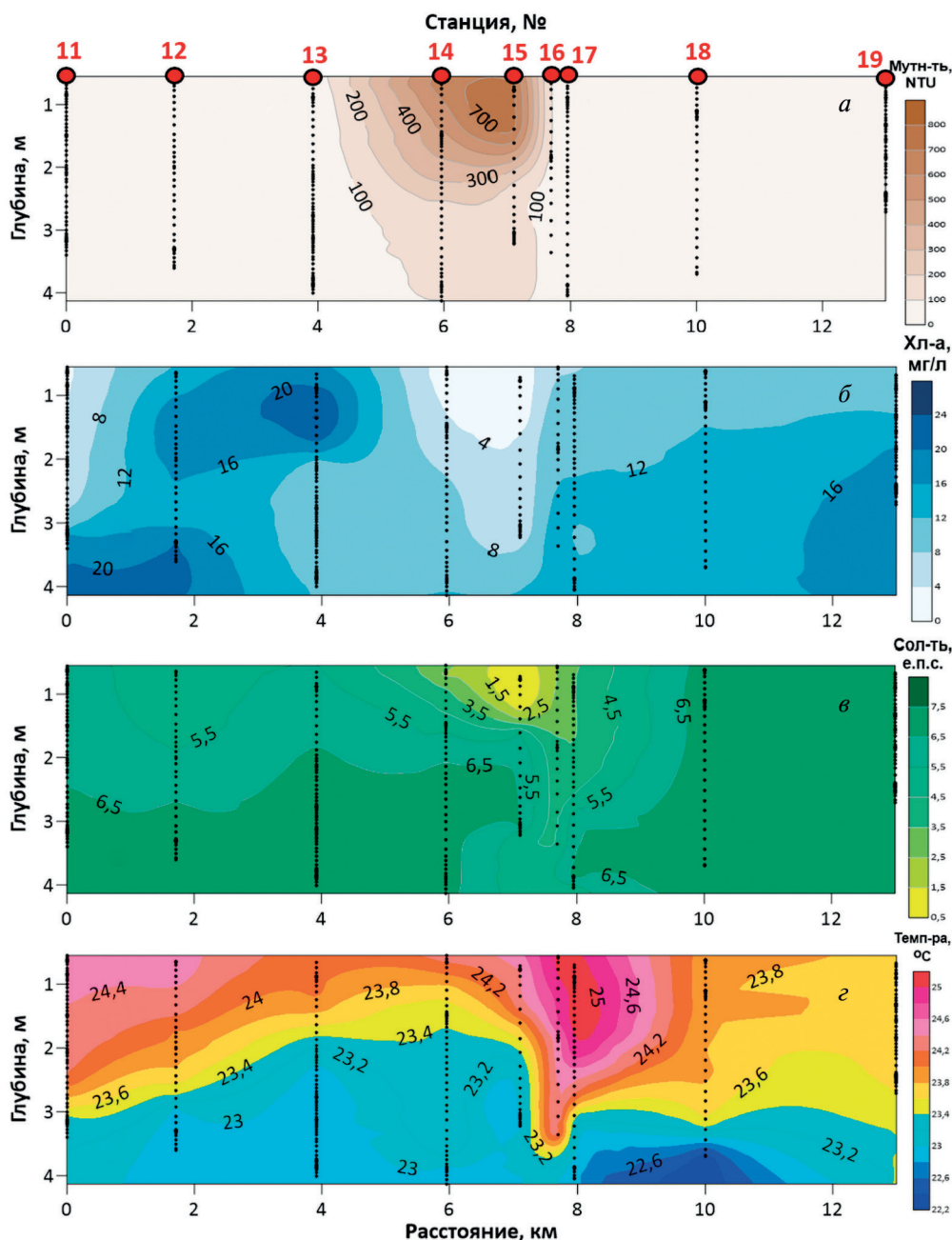


Рис. 8. Распределение мутности (*а*), концентрации хлорофилла *a* (*б*), солёности (*в*) и температуры (*г*) на станциях STD-зондирования продольного разреза № 2 плюма р. Терек от 2 июня 2023 г. Устье р. Терек находилось между станциями 14 и 15

Для этой области характерны повышенные значения мутности, минимальные значения солёности морской воды и, как правило, низкие значения концентрации хлорофилла *a*. Скорее всего, именно в данной области происходит основное осадконакопление выносимого взвешенного вещества с суши. Также стоит отметить асимметрию основной оси распространения речных вод. Относительно устья речной сток распространяется севернее. Скорее всего, на настоящий момент определяющим фактором этого является песчаная отмель (бар) южнее устья, которая блокирует распространение речных вод в южном направлении. Она хорошо видна на фрагменте спутникового изображения Sentinel-2B (MSI) от 5 июня 2023 г. (изображение не представлено).

В районе устья р. Терек 5 июня 2023 г. была выполнена повторная СТД-съёмка. Так же как и 2 июня 2023 г., были выполнены два разреза: параллельно и перпендикулярно устью р. Терек, синхронно со спутниковой съёмкой. На спутниковом изображении MSI Sentinel-2B от 5 июня 2023 г. (не приводится) видно, что форма и размер речного плума отличаются от рассмотренного ранее случая за 2 июня 2023 г. Факел выноса вытянут в юго-восточном направлении. В отличие от 2 июня максимальное удаление границы плума от береговой зоны составляет около 2,8 км, что примерно в 1,5 раз меньше, чем три дня назад. Площадь речного плума в момент спутниковой съёмки и подспутниковых измерений составляет 7,64 км².

Как показали измерения вдоль поперечного разреза (графики не приводятся), несмотря на меньшие размеры плума, глубина интрузии речных вод такая же, как и 2 июня 2023 г., — 1,5 м. На ближайшей станции к устью р. Терек измеренные значения мутности даже выше, чем 2 июня 2023 г., — чуть больше 1400 NTU. При этом область с максимальными значениями локализована в первых 500–600 м от береговой зоны.

В результатах измерений на продольном разрезе от 5 июня проявляется также асимметрия распространения речных вод к северу от устья, которая была отмечена ранее. Основная область влияния речных вод занимает не больше 1,5 км от створа реки. Таким образом, получено, что трёхмерная структура плума р. Терек сохранилась практически такой же в течение трёх дней, несмотря на увеличение мутности речной воды.

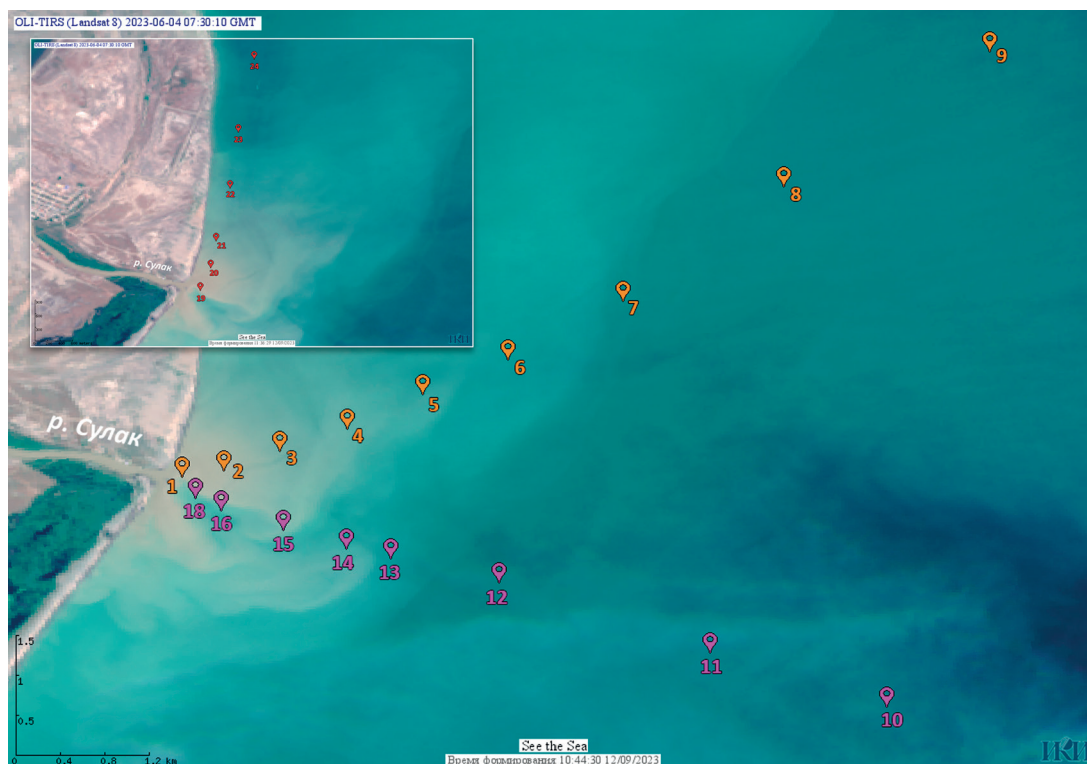


Рис. 9. Фрагмент цветосинтезированного изображения OLI Landsat-8 за 4 июня 2023 г. Номера и положение СТД-измерений отмечены цветом: оранжевые метки — разрез № 1; розовые — разрез № 2; красные — разрез № 3

Результаты исследования трёхмерной структуры плюма р. Сулак

В районе выноса р. Сулак подспутниковые натурные измерения проводились 2, 4, 5 и 7 июня 2023 г. 2 июня мутность в устье р. Сулак резко возросла, стала больше (1000 NTU), что было связано с попаданием в реку селевых потоков с гор. В последующие дни измеренные *in situ* значения мутности стали резко спадать, что подтверждалось и спутниковыми наблюдениями (Лаврова и др., 2023). На *рис. 9* (см. с. 295) представлен фрагмент спутникового изображения OLI Landsat-8 за 4 июня 2023 г., на котором отмечено положение СТД-станций за этот же день. 4 июня 2023 г. было выполнено три гидрологических разреза. В общей сложности СТД-зондирование и отбор морских проб были осуществлены на 24 станциях. Площадь речного выноса 4 июня 2023 г. не превышала 3 км². Максимальное удаление от берега наиболее мутной его части составляло около 1,5 км. Сам вынос разделялся на две части: севернее и южнее устья. Этому способствовала песчаная отмель, образовавшаяся напротив устья на границе раздела «река – море», как и у р. Терек.

На *рис. 10* представлены графики распределения основных гидрологических параметров на разрезе № 1 за 4 июня 2023 г. Разрез № 1 был выполнен по диагонали от устья р. Сулак. Общая протяжённость разреза составила 9 км.

Как видно из данных разреза № 1 (см. *рис. 10*), основная область плюма локализована в первых 500 м от устья р. Сулак (между ст. № 1 и 2). Максимальные значения мутности морской воды достигают 223 NTU (ст. № 1). Далее идёт резкое уменьшение измеренных величин. Станция № 5 соответствует границе речного плюма (см. *рис. 9*). Она располагается в 2,5 км от устья реки. Измеренная мутность морской воды на границе плюма равна 26 NTU. За границей плюма в районе станции № 9 мутность морской воды — 7,8 NTU. В поле температуры речной плюм Сулака характеризуется пониженными значениями — 19–20 °С, что на 3–4 °С холоднее прогретого поверхностного слоя моря (23–24 °С). Солёность в приустьевой зоне соответствует 0,2 епс.

На дальней станции солёность морской воды в приповерхностном слое достигает 8,1 епс. Глубина интрузии речных вод составляет 1,5 м. Гидрологические структуры на разрезах № 1 и 2 в целом идентичны. Вдольбереговой (продольный) разрез (№ 3) за 4 июня 2023 г. был выполнен от устья р. Сулак на север в сторону р. Терек (см. *рис. 9*). Графики распределения основных гидрологических параметров вдоль этого разреза представлены на *рис. 11* (см. с. 297).

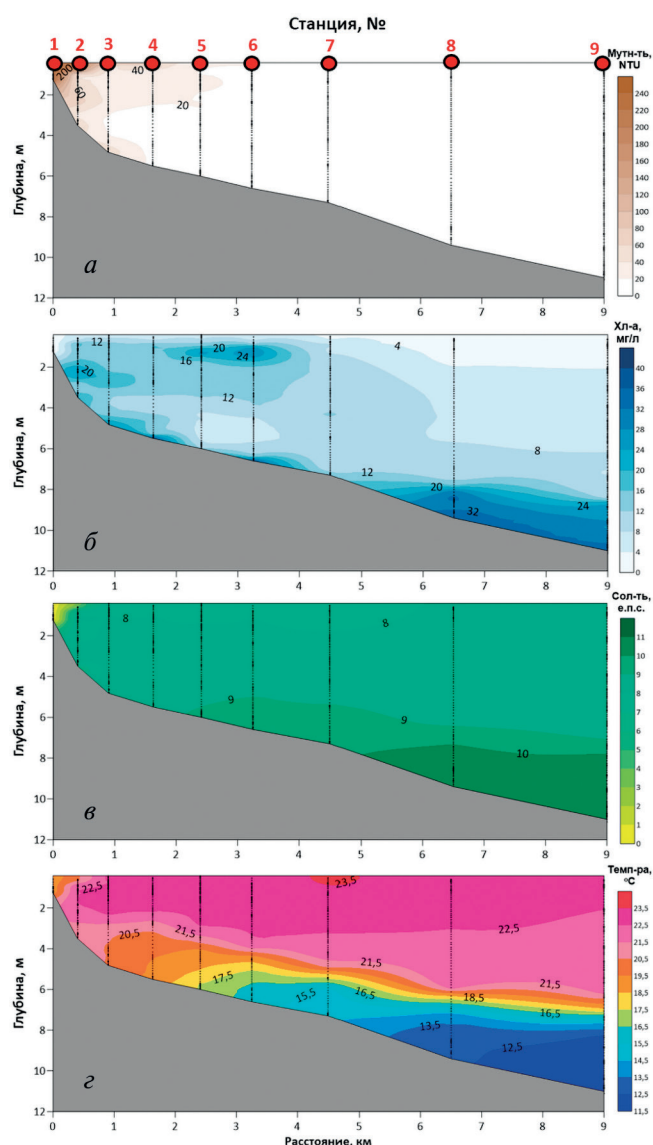


Рис. 10. Распределение мутности (а), концентрации хлорофилла а (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 1 плюма р. Сулак от 4 июня 2023 г.

Рис. 11. Распределение мутности (а), концентрации хлорофилла *a* (б), солёности (в) и температуры (г) по глубине на станциях зондирования разреза № 3 плюма р. Сулак от 4 июня 2023 г.

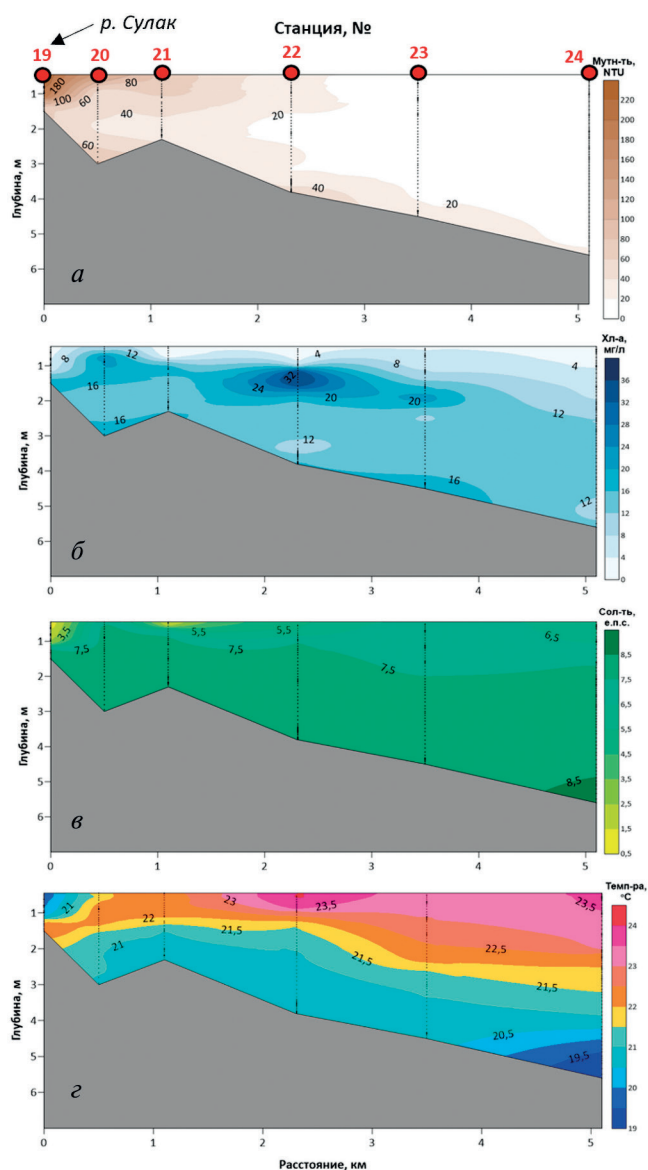
На графиках видно, что область максимальных значений мутности морской воды также не удалена от устья реки дальше 500 м. Вдольбереговая северная граница распространения речных вод находится в 2,5 км от устья (ст. № 22). Станции № 23 и 24 расположены за границей плюма в относительно чистых морских водах.

Повторное STD-зондирование в районе устья р. Сулак было выполнено 5 июня 2023 г. Речной плюм имел яркую подветренную северную границу. Площадь плюма составляла примерно 3 км². Факел выноса был направлен в юго-восточном направлении. Максимальные значения мутности морской воды вблизи устья р. Сулак 5 июня 2023 г. не превышали 106 NTU, что в несколько раз меньше, чем днём ранее. На кромке плюма мутность морской воды составляла 14 NTU. Область повышенных значений мутности, как и 4 июня 2023 г., находилась не дальше 500 м от устья. Глубина интрузии речных вод — 1,5 м.

Таким образом, на основе спутниковых данных и синхронных подспутниковых измерений *in situ* в июне 2023 г. была получена трёхмерная структура плюмов рек Терек и Сулак, определено пространственное распределение основных параметров: температуры, солёности, мутности и концентрации хлорофилла *a*.

Связь между значениями мутности воды, концентрацией взвешенного вещества и минеральным составом

Как и во время экспедиционных работ 2022 г. (Лаврова и др., 2022), на каждой станции зондирования проводились измерения мутности воды не только с помощью STD-зонда, но и с использованием портативного турбидиметра (мутномера) в нескольких сантиметрах от поверхности моря. Одновременно брались пробы воды с верхнего горизонта для дальнейшего определения концентрации взвеси и её минерального состава. По результатам измерений была определена зависимость между значениями мутности воды, измеренными портативным мутномером, и концентрацией взвешенного вещества в пробах. На рис. 12 (см. с. 298) представлены результаты сопоставления этих значений для плюма р. Терек (см. рис. 12а) и р. Сулак (см. рис. 12б) не только за все дни измерений в 2023 г., но и для сравнения приведены значения за 2022 г.



Если не учитывать экстремальные значения мутности у устья р. Сулак 2 июня 2023 г. (Лаврова и др., 2023), когда сказалось влияние селевых потоков и мутность превышала 1200 NTU (данные значения на график не нанесены), то, как видно из *рис. 12*, на ближайших к устьям станциях в плюме р. Терек измеренные значения мутности и, соответственно, концентрации взвеси в пробах воды значительно превышают те, что измерены в плюме р. Сулак. Данные за 2022 г. хорошо укладываются в общую картину за 2023 г., но для плюма р. Сулак прошлогодние значения незначительно ниже. Вероятно, даже в последующие после 2 июня дни влияние селевых потоков сказывается.

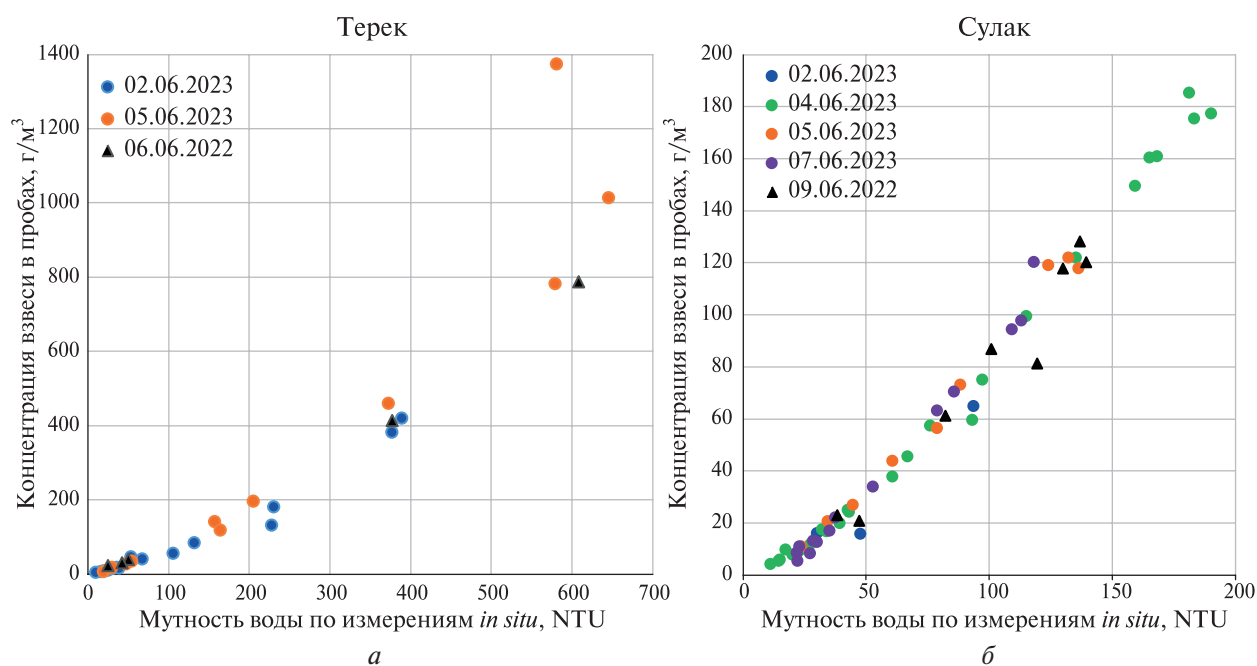


Рис. 12. Сопоставление значений мутности, определённых с помощью портативного турбидиметра, и концентрации взвешенного вещества в пробах воды: *a* — для р. Терек; *b* — для р. Сулак

Представленные на *рис. 12* данные можно аппроксимировать простой линейной функцией до значений мутности менее 150 NTU. При больших значениях, как у плюма р. Терек, достоверность увеличивается при аппроксимации квадратичной функцией (см. *рис. 12a*). Массовая концентрация взвеси в воде растёт несколько быстрее, чем её мутность. Характерной особенностью приведённых на *рис. 12a* данных является то, что при низких значениях мутности отклонение измеренных значений от линии аппроксимации небольшое, при увеличении мутности разброс значительно увеличивается. Это может быть вызвано как увеличением погрешности измерений в пробах большой мутности, так и разным гранулометрическим составом взвеси. Вклад каждой крупной частицы в увеличение мутности воды меньше, чем её вклад в увеличение массы взвеси. Отметим, что такая же ситуация наблюдалась и в 2022 г. (Лаврова и др., 2022).

Для проб воды, отобранных на ближайших к устьям станциях и на границе плюмов, был проведён рентгенофазовый анализ для определения минерального состава взвеси. Основной минеральный состав взвеси можно разделить на три группы. 1 — безводные алюмосиликатные минералы: кварц, плагиоклаз, щелочные полевые шпаты; 2 — глинистые минералы: смектит, каолинит, хлорит, гидрослюда и смешанослойный слюда-смектит; 3 — карбонатные минералы: кальцит, доломит. В меньшем количестве в ней содержатся хлорит, смешанослойные образования «слюда-смектит» и плагиоклаз. В небольшом количестве присутствуют смектит, каолинит, доломит и щелочной полевой шпат. Процентное содержание основных групп минералов в пробах, взятых на станциях вблизи устья и на границе плюма, представлены в *табл. 4*. Для сравнения даны значения как для 2023 г., так и для 2022 г.

Таблица 4. Содержание основных групп минералов в разных частях плюмов рек Терек и Сулак за 2022 и 2023 гг.

Река	Год	Безводные силикатные минералы, %		Глинистые минералы, %		Карбонатные минералы, %	
		Около устья	На границе плюма	Около устья	На границе плюма	Около устья	На границе плюма
Терек	2022	38	33	36	61	26	7
	2023	38	17	46	65	15	15
Сулак	2022	41	44	33	54	26	2
	2023	30	23	45	58	25	18

Анализ минерального состава взвеси подтвердил полученные ранее закономерности изменения количественно соотношения фаз в разных частях плюмов. От приустьевых зон с высокой мутностью к краю плюма в составе взвеси на фоне общего уменьшения количества частиц происходит относительное увеличение количества глинистых минералов и уменьшение безводных силикатных фаз (Лаврова и др., 2022). Такая гравитационная дифференциация вещества взвеси хорошо проявлена в плюме р. Терек. В приустьевой зоне в составе взвеси количество устойчивых к механическому разрушению безводных минеральных фаз (кварца и полевых шпатов) и количество глинистых минералов близки. На границе плюма глинистые минералы значительно преобладают. В плюме Сулака после схода селя в течение периода наблюдения 2–7 июня 2023 г. такая дифференциация состава минеральных фаз проявлена хуже (см. табл. 4). Даже у края плюма отмечается только незначительное уменьшение содержания кварца и полевых шпатов относительно глинистых минералов.

Заключение

В результате спутникового мониторинга приустьевых зон рек Терек и Сулак за период с 2014–2022 гг. было определено, что 73 км береговой черты каспийского побережья Дагестана севернее Махачкалы потенциально подвержены загрязнению, попадающему в море с водами этих рек. Анализ полученных спутниковых изображений показал, что наблюдается ярко выраженная пространственная асимметрия в направлении распространения выносов. Для обеих рек на большом временном интервале (2014–2022) существует доминирующее направление распространения, а именно юго-восточное. Для Терека на это направление приходится 27,7 % от общего количества всех направлений, а для Сулака — 36,8 %. На основе спутниковых данных видимого диапазона сенсоров MSI Sentinel-2 и OLI/OLI-2 Landsat-8, -9 была выявлена сезонная изменчивость проявления плюмов рек Терек и Сулак. Более 60 % проявлений плюмов приходится на май–август, что объясняется периодом паводка, связанного с таянием снега в горах. Для Сулака этот период приходится на конец мая – начало июня. Для Терека этот период продлевается до июля.

Результаты проведённых в июне 2023 г. подспутниковых синхронных измерений *in situ* основных параметров — температуры, солёности, мутности, концентрации хлорофилла *a* — позволили впервые определить трёхмерную структуру плюмов рек Терек и Сулак. Было установлено, что изогалина 4,5–5 епс является нижней границей плюма и, несмотря на количество взвешенного вещества, выносимого с речным стоком, и расхода реки, основная масса взвеси аккумулируется в одной и той же локализованной области, примерно в 500 м от берега, и сохраняется устойчивая стратификация прибрежных вод в зоне влияния речного плюма с примерно постоянной толщиной плюма 1,5–2 м.

На основе рентгенофазового анализа проб воды, отобранных на ближайших к устьям станциях и на границах плюмов, был определён минеральный состав взвеси и его изменение в различных областях плюмов.

Неоднократное совпадение границ области влияния речных вод, установленных по спутниковым данным и измеренных *in situ*, позволяет с уверенностью использовать методы дистанционного зондирования для мониторинга приустьевых районов без привлечения натуральных данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00124, <https://rscf.ru/project/23-27-00124>

Литература

1. Айбулатов Н. А., Завьялов П. О., Пелевин В. В. Особенности гидрофизического самоочищения российской прибрежной зоны Черного моря близ устьев рек // *Геоэкология*. 2008. № 4. С. 301–310.
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. и др. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 3. С. 293–308. DOI: 10.7868/S0030157414030150.
4. Иванов В. А., Ильин Ю. П. Атмосферные и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод в северо-западной части Черного моря // *Комплекс. эколог. исслед. Черного моря*. Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. С. 68–81.
5. Короткина О. А., Завьялов П. О., Осадчиев А. А. Субмезомасштабная изменчивость полей течения и ветра в прибрежной акватории Сочи // *Океанология*. 2011. Т. 51. № 5. С. 797–806.
6. Кравцова В. И., Митькиных Н. С. Устья рек России. Атлас космических снимков / под ред. В. Н. Михайлова. М.: Науч. мир, 2013. 124 с.
7. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А., Лунян 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.
8. Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О. и др. Сопоставление параметров плюмов рек Сулак и Терек на основе спутниковых данных и измерений *in situ* // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 5. С. 264–283. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
9. Лаврова О. Ю., Назирова К. Р., Алферьева Я. О. и др. Изменение параметров плюма реки Сулак после схода селевых потоков в горах Дагестана // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2023. Т. 20. № 3. С. 323–329. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
10. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Краюшкин Е. В. и др. 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.
11. Осадчиев А. А., Барымова А. А., Седиков Р. О. и др. Гидрофизическая структура и динамика течения плюма реки Кодор // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 1. С. 5–20. DOI: 10.31857/S0030157421010159.
12. Симонов А. И. Гидрология и гидрохимия устьевого взморья в морях без приливов. М.: Гидрометеоздат, 1969. 230 с.
13. Cai L., Tang D., Li X. et al. 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. Clark J. B., Mannino A. The Impacts of Freshwater Input and Surface Wind Velocity on the Strength and Extent of a Large High Latitude River Plume // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 8. Article 793217. DOI: 10.3389/fmars.2021.793217.
15. Devlin M. J., Petus C., da Silva E. et al. 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>.
16. Estourne C., Kondrachoff V., Marsaleix P., Vehil R. The plume of the Rhône: numerical simulation and remote sensing // *Continental Shelf Research*. 1997. V. 17(8). P. 899–924. DOI: 10.1016/S0278-4343(96)00064-7.
17. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G. Mixing and transport in coastal river plumes // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2015. V. 47. P. 569–594. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.

18. Lavrova O., Nazirova K., Soloviev D. Internal Waves on River Plumes // IGARSS 2018. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2018. P. 7937–7940. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517318.
19. Nash J., Moum J. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. 2005. V. 437. P. 400–403. <https://doi.org/10.1038/nature03936>.
20. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O. et al. 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. Article 143. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
21. O'Donnell J., Marmorino G. O., Trump C. L. Convergence and downwelling at a river plume front // J. Physical Oceanography. 1998. V. 28. P. 1481–1495.
22. 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. Article 96380H. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2192672>.
23. Park K. Columbia river plume identification by specific alkalinity // Limnology and Oceanography. 1966. V. 11. No. 1. P. 118–120. DOI: 10.4319/l0.1966.11.1.0118.

Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent *in situ* measurements

K. R. Nazirova¹, O. Yu. Lavrova¹, Ya. O. Alferyeva², N. A. Knyazev¹

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: knazirova@gmail.com, olavrova@cosmos.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: yanaalf@bk.ru

The article is devoted to the study of spatiotemporal variability of the plumes of the Terek and Sulak rivers flowing into the Caspian Sea and to the determination of the three-dimensional structure of the plumes based on a joint analysis of satellite data and concurrent *in situ* measurements. In the study, high spatial resolution visible data from Sentinel-2 MSI and Landsat-8, -9 OLI/OLI-2 satellite sensors were used. *In situ* measurements of the main plume parameters were made in June 2023 from a small vessel, concurrently with the satellite survey. As a result of satellite monitoring of the Terek and Sulak estuarine zones for the period 2014–2022, it was determined that the 73-km-long coastline of Dagestan north of the city of Makhachkala is potentially exposed to pollution entering the sea with waters of these rivers. An analysis of the satellite images showed that there is a pronounced spatial asymmetry in the direction of plume spreading. For both rivers, the dominant spreading direction over a large time interval is south-east. A seasonal variability of Terek and Sulak plumes signatures in satellite images was revealed. Based on satellite data and concurrent *in situ* measurements in June 2023, the three-dimensional structure of the Terek and Sulak plumes was obtained and the spatial distributions of the main parameters, such as temperature, salinity, turbidity and chlorophyll-a concentration, were determined. It was found that the depth of river water penetration does not exceed 1.5–2 m and, regardless of the amount of suspended matter carried with river runoff and river discharge, the bulk of the suspended matter is deposited in the same localized area, within a distance of about 500 m from the shore. On the basis of XRD analysis of water samples taken at the stations nearest to the river mouths and at plume boundaries, the mineral composition of suspended matter and its variation in different plume areas were determined. Repeated coincidence of the boundaries of the area affected by river water, established from satellite data and measured *in situ*, makes it possible to confidently use remote sensing methods for monitoring estuarine areas without involving *in situ* data.

Keywords: river plume, turbidity of sea water, total suspended matter, sediment mineral content, satellite ocean color data, *in situ* measurements, MSI Sentinel-2, OLI/OLI-2 Landsat-8, -9, Caspian Sea, Terek, Sulak

Accepted: 18.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303

References

1. Aibulatov N. A., Zavialov P. O., Pelevin V. V., Peculiarities of hydrophysical self-purification of Russian coastal zone of the Black Sea near the river estuaries, *Geoekologiya*, 2008, No. 4, pp. 301–310.
2. Zhurbas V. M., Zavialov P. O., Sviridov A. S. et al., On the transport of small river run off by an alongshore baroclinic sea current, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 3, pp. 415–423, DOI: 10.1134/S0001437011030234.
3. Zav'yalov P. O., Makkaveev P. N., Konovalov B. V. et al., 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.
4. Ivanov V. A., Il'in Yu. P., Atmospheric and hydrological conditions contributing to river water distribution in the north-western Black Sea, *Kompleksnye ekologicheskie issledovaniya Chernogo morya*, Sevastopol: MGI NANU, 1995, pp. 68–81 (in Russian).
5. Korotkina O. A., Zavialov P. O., Osadchiev A. A., Submesoscale variability of the current and wind fields in the coastal region of Sochi, *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 5, pp. 745–754, DOI: 10.1134/S0001437011050109.
6. Kravtsova V. I., Mit'kinykh N. S., *Ust'ya rek Rossii. Atlas kosmicheskikh snimkov* (Mouths of rivers in Russia. Atlas of space images), V. N. Mikhailova (ed.), Moscow: Nauchnyi mir, 2013, 124 p. (in Russian).
7. 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.
8. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O. et al., Comparison of plume parameters of the Sulak and Terek rivers based on satellite data and *in situ* measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 264–283 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-264-283.
9. Lavrova O. Yu., Nazirova K. R., Alferyeva Ya. O. et al., Changes in Sulak River plume parameters after mudflows in the mountains of Dagestan, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 323–329 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-323-329.
10. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V. et al., 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.
11. Osadchiev A. A., Barymova A. A., Sedakov R. O. et al., Hydrophysical structure and current dynamics of the Kodor River plume, *Oceanology*, 2021, Vol. 61, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1134/S000143702101015X>.
12. Simonov A. I., *Gidrologiya i gidrokimiya ust'evogo vzmor'ya v moryakh bez prilivov* (Hydrology and hydrochemistry of the estuary in non-tidal seas), Moscow: Gidrometeoizdat, 1969, 230 p. (in Russian)
13. Cai L., Tang D., Li X. et al., 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(8), pp. 597–603, <https://doi.org/10.1080/2150704X.2015.1062158>.
14. Clark J. B., Mannino A., The Impacts of Freshwater Input and Surface Wind Velocity on the Strength and Extent of a Large High Latitude River Plume, *Frontiers in Marine Science*, 2022, Vol. 8, Article 793217, DOI: 10.3389/fmars.2021.793217.
15. Devlin M. J., Petus C., da Silva E. et al., 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, pp. 12909–12941, <https://doi.org/10.3390/rs71012909>.
16. Estourne C., Kondrachoff V., Marsaleix P., Vehil R., The plume of the Rhône: numerical simulation and remote sensing, *Continental Shelf Research*, 1997, Vol. 17(8), pp. 899–924, DOI: 10.1016/S0278-4343(96)00064-7.
17. Horner-Devine A. R., Hetland R. D., MacDonald D. G., Mixing and transport in coastal river plumes, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2015, Vol. 47, pp. 569–594, <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141408>.
18. Lavrova O., Nazirova K., Soloviev D., Internal Waves on River Plumes, *IGARSS 2018. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2018, pp. 7937–7940, DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8517318.
19. Nash J., Moum J., River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean, *Nature*, 2005, Vol. 437, pp. 400–403, <https://doi.org/10.1038/nature03936>.
20. Nazirova K., Alferyeva Y., Lavrova O. et al., 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, Article 143, <https://doi.org/10.3390/rs13010143>.
21. O'Donnell J., Marmorino G. O., Trump C. L., Convergence and downwelling at a river plume front, *J. Physical Oceanography*, 1998, Vol. 28, pp. 1481–1495.

22. 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, Article 96380H, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2192672>.
23. Park K., Columbia river plume identification by specific alkalinity, *Limnology and Oceanography*, 1966, Vol. 11, No. 1, pp. 118–120, DOI: 10.4319/lo.1966.11.1.0118.