

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЮМА РЕКИ КУБАНЬ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2024 г. Н. В. Василенко¹ *, А. А. Кубряков¹, С. В. Станичный¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: nadinkot.nk@gmail.com

Поступила в редакцию 14.06.2024 г.

На основе спутниковых данных Landsat 8, 9 и Sentinel-1,2 за период 2017–2024 гг. исследована пространственно-временная изменчивость распространения плюма реки Кубань. Исследованы особенности проявления плюма на радиолокационных изображениях, а также в видимом и инфракрасном диапазоне. Показано, что плюм Кубани формируется из двух основных струй, а также вод Курчанского лимана вблизи устья реки. На основе анализа многолетних оптических данных выделено 4 типа распространения плюма: “западный”, “восточный”, “северный” и “вдольбереговой”. Наиболее обширное распространение происходит при “северном” типе, когда плюм распространялся на расстояние до 15,5 км от береговой линии. Основной причиной изменения распространения плюма является изменчивость ветровых условий. Исследована сезонная и межгодовая изменчивость распространения вод Кубани. За период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плюмы “западного” направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плюмы распространялись на восток (в 37% случаев) под действием аномальных ветровых условий.

Ключевые слова: Кубань, спутниковые данные, Азовское море, Темрюкский залив, речной плюм, Sentinel-2, Landsat, температура поверхности моря

DOI: 10.31857/S0205961424050012, **EDN:** RSKHWN

ВВЕДЕНИЕ

Кубань является одной из крупнейших рек, впадающих в акваторию Азовского моря, значительно влияющих на оптические характеристики вод и его экосистему в целом. Речной сток осуществляется через два основных дельтовых рукава (рук. Кубань и рук. Протока), их среднее значение годового стока за 2008–2018 гг. составляло 5,3 км³/год и 5,2 км³/год соответственно (Решетняк, Комаров, 2023). Пресноводный сток реки Кубань является важной составляющей водного баланса акватории, а также существенно влияет на термохалинную структуру вод (Симов и др., 2010; Гетманенко и др., 2010; Спиридонова, Панов, 2021). Со стоком Кубани в воду поступает большое количество биогенных элементов и органического вещества, которые во многом определяют биопродуктивность морской среды (Ломакин и др., 2016; Сорокина, Бердников, 2018). Твердый сток Кубани является важной компонентой осадконакопления в Азовском море (Сорокина, Бердников, 2008).

Исследованиям поступающих в море речных вод и плюмов на основе спутниковой информации посвящено множество работ отечественных и зарубежных авторов (Shi, Wang, 2009; Brando et al., 2015;

Lavrova et al., 2016; Кубряков и др., 2013; Иванов и др., 2018; Назирова и др., 2019; Kubryakov et al., 2018; Осадчиев, 2017). Было показано, что речные плюмы наблюдаются по полю яркости в видимом диапазоне из-за содержания большого количества взвешенных и биогенных веществ, а также по данным о температуре поверхностного слоя моря (ТПМ), данным о полях солёности, уровню моря.

Несмотря на то, что Кубань является второй рекой по величине объема стока в Азовское море и имеет высокую значимость для всей экосистемы акватории, в особенности в условиях маловодности реки Дон (Косенко и др., 2018) и роста средней солёности (Бердников и др., 2019; Спиридонова, Панов, 2021), на настоящий момент известны единичные исследования, посвященные распространению вод Кубани под действием различных гидрометеорологических факторов (Щеголихина, Лаврова, 2018; Лаврова и др., 2020). Цель настоящей работы – изучение пространственно-временной изменчивости проявления плюмов Кубани на спутниковых изображениях.

В разделе 1 рассматриваются особенности проявления плюмов поступающих из основного рукава Кубань по оптическим, инфракрасным и ради-

олокационным спутниковым данным. В разделе 2 дана классификация плумов по направлению распространения в акватории Азовского моря и гидрометеорологические факторы их определяющие. В 3 разделе представлена межгодовая и межсезонная изменчивость распространения плумов Кубани за 2019–2023 гг.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе использовались оптические спутниковые высокого разрешения MSI (Multispectral Instrument) Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м. Данные были получены на портале Copernicus Data Space Ecosystem (URL: <https://dataspace.copernicus.eu>). Также использовались данные OLI (Operational Land Imager) Landsat 8, 9 с пространственным разрешением 30 м. Данные были получены на портале USGS (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Рассматривались изображения за период 2015–2023 гг. в псевдонатуральных цветах RGB-композиции (Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий), а также поле яркости в 4 канале MSI Sentinel-2 (band 4 – 664,6 нм). Используемые спутниковые изображения были получены в рамках госзадания FNNN-2024-0012.

Для исследования влияния речного стока на термические условия вод Азовского моря применялся двухканальный метод восстановления температуры поверхностного слоя моря по данным TIRS (Thermal InfraRed Sensor) Landsat 8, 9 предложенный (Алескерова и др., 2016).

Дополнительно проявление поступающих вод Кубани и их влияние на шероховатость поверхности моря рассматривалось на радиолокационных спутниковых изображениях C-SAR (C-Band

Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1 с VV-поляризацией. Данные были получены на портале Copernicus Data Space Ecosystem (URL: <https://dataspace.copernicus.eu>).

Для исследования влияния ветровых условий на распространение плумов в акватории привлекались данные глобального реанализа ERA5 от Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) с пространственным разрешением $0,25^\circ$ и дискретностью 1 ч, а также данные реанализа MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) с пространственно-временным разрешением $0,5^\circ \times 0,66^\circ$, 6 ч.

Использованы данные о количестве осадков в районе бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ и дискретностью 1 ч.

Информация об уровне воды на гидропосту в г. Темрюк были получены на портале <https://allrivers.info/> по данным Центра регистра и кадастра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проявление плума р. Кубань по спутниковым данным в видимом диапазоне

Плюм Кубани содержит в своих водах большое количество взвешенного вещества, и, чаще всего отличается повышенной мутностью относительно окружающих вод моря.

На спутниковых изображениях в естественных цветах (RGB-композиция) плум имеет более высокие значения коэффициента яркости и может выделяться как зона коричневых, зеленоватых, желтоватых цветах (рис. 1, а). Как правило, плум

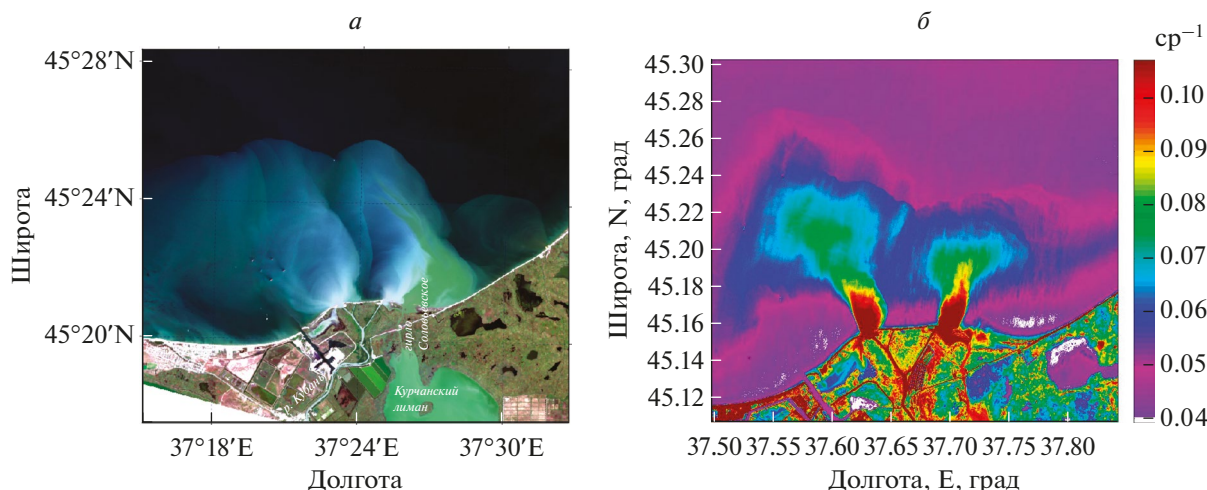


Рис. 1. Проявление плума реки Кубань по спутниковым данным: а – OLI Landsat-8 от 05.09.2016 г. в естественных цветах (RGB-композиция); б – MSI Sentinel-2 (band 4) от 04.03.2020 г.

основного рукава Кубани формируется в виде двух основных струй. Кроме того, вблизи устья Кубани в отдельных случаях формируется выраженный плюм вод мелководного Курчанского лимана (глубина до 1,5 м), питание которого также происходит за счет Кубанских вод (Гарькуша и др., 2022).

Из-за большого количества взвеси конфигурация и направление плюма хорошо идентифицируется на спутниковых изображениях по полю яркости в красном канале (664,6 нм для MSI Sentinel-2 (рис. 1, б)).

Попадая в Темрюкский залив, на границе пресных речных вод формируются зоны конвергенции, которые фиксируются на спутниковых изображениях и выглядят как тонкие полосы на поверхности моря с более высокими значениями сигнала. Такая ситуация показана на примере спутникового снимка OLI Landsat 8 от 16.05.2019 г. (рис. 2), где предполагаемая зона конвергенции находится на некотором отдалении от устья и непосредственно плюма (выделена красными стрелками).

При некоторых гидрометеорологических условиях идентифицировать плюм Кубани по оптическим спутниковым данным невозможно или затруднительно. В первую очередь это может быть связано с обширным облачным покровом над районом исследования. Во-вторых, при интенсивном ветровом воздействии происходит перемешивание вод до дна, что приводит к взмучиванию донных осадков и росту мутности вод. В результате, речной плюм будет либо также подвержен интенсивному перемешиванию с окружающими водами,

либо не будет выделяться относительно взмученных вод акватории. Примеры такого интенсивного ветрового взмучивания показаны на спутниковых изображениях Landsat 8 от 13.10.2018 г. и Sentinel-2 от 13.02.2020 г. (рис. 3 а, б). В случае от 13.10.2018 г. (рис. 3 а) над исследуемым районом наблюдался интенсивный северо-восточный ветер со скоростью более 10 м/с (рис. 3, в) длительностью около суток, что привело к сильному взмучиванию вод Темрюкского залива. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае от 13.02.2020 г. (рис. 3, б), когда на спутниковом снимке плюм речных вод также не идентифицируется при сильном перемешивании вод из-за длительного (более 2 суток) воздействия ветра со скоростью более 8 м/с (рис. 3, г).

Несмотря на то, что период половодья реки Кубань приходится на весенне-летний период (Бандурин и др., 2022), обширные плюмы ежегодно наблюдаются и в другие месяцы. В первую очередь это связано с кратковременными паводками внутри года, возникающими в результате обильных осадков в районе бассейна реки. Помимо естественных причин, влияющих на количество поступающего стока в акваторию и его внутригодовое распределение, важную роль играет антропогенный фактор, а именно забор и перераспределение вод реки в водохозяйственных нуждах (Михайлов, Магрицкий, 2008). В Верхнем течении Кубани речной сток регулируется системой Большого Ставропольского канала и Невинномысским каналом, которые обеспечивают орошение сельскохозяйственных земель, организацию промышленного и питьевого водоснабжения близлежащих областей (Папенко

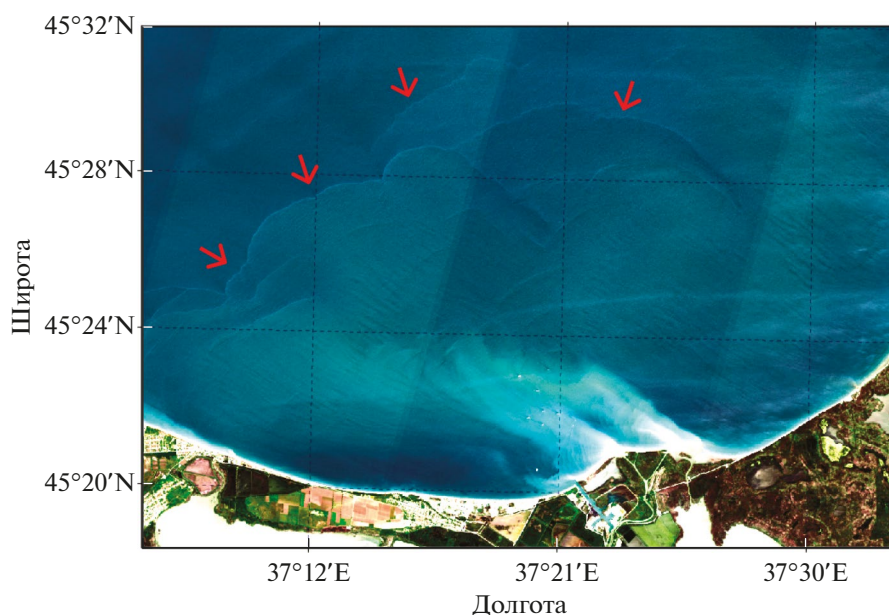


Рис. 2. Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 16.05.2019 г.

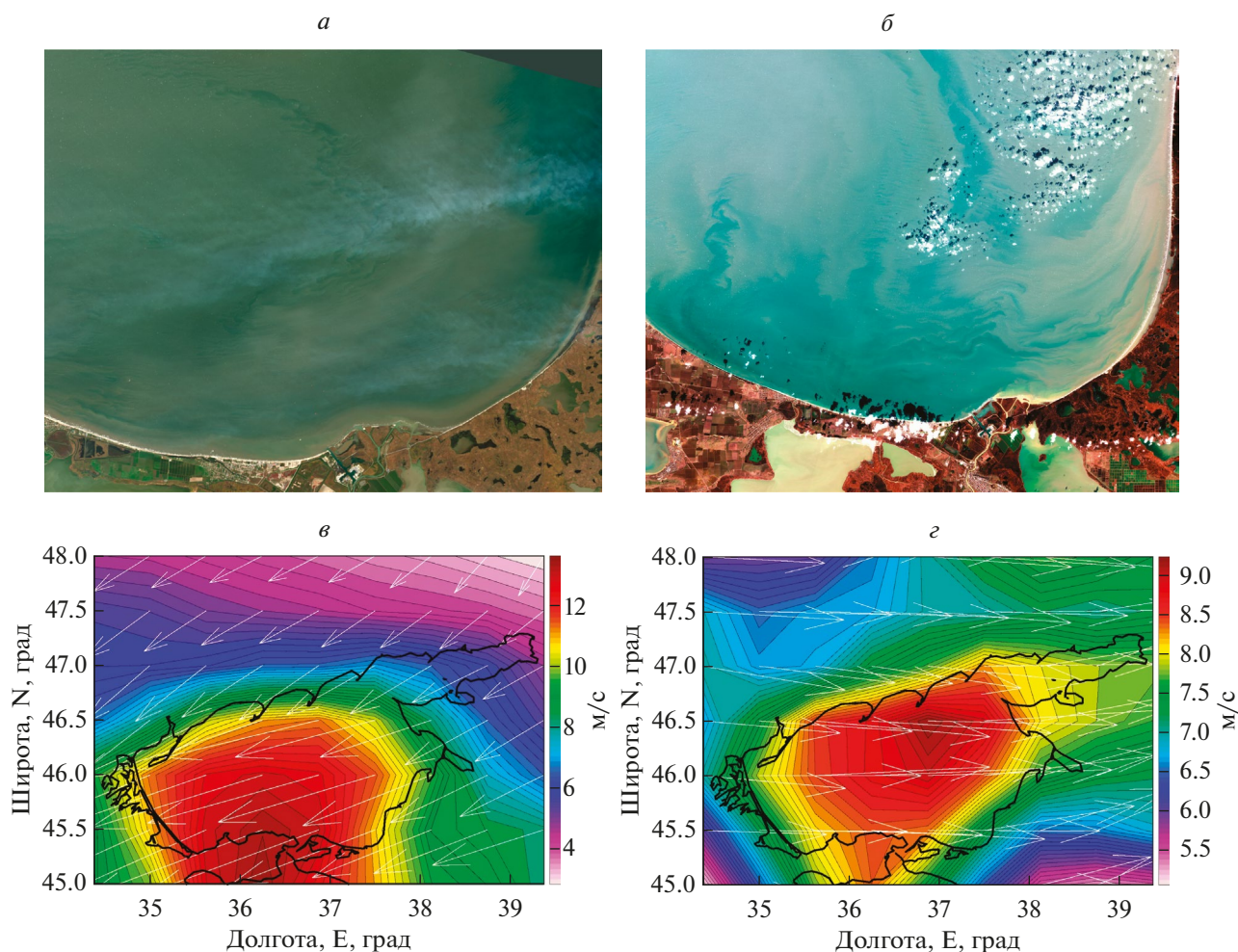


Рис. 3. *а* – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 13.10.2018 г.; *б* – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 13.02.2020 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 13.10.2018 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 13.02.2020 г.

и др., 2008; Косолапова, 2016). Далее в зоне средней Кубани сток значительно регулируется Краснодарским водохранилищем, которое обеспечивает мелиоративные мероприятия для 211,1 тыс. га посевных площадей, в большей части используемых для рисовых культур (Малышева, Якуба, 2017). После Краснодарского водохранилища в нижнем течении Кубани на гидроузле Тиховском происходит искусственное распределение стока воды на рук. Кубань, рук. Протока и магистральный канал Петровско-Анастасиевской оросительной системы (Михайлов, Магрицкий, 2008).

В связи с этим, гидрометеорологические условия рассматривались только для зоны нижнего течения реки Кубань (после Краснодарского водохранилища). Так, на рис. 4, *а* показан пример интенсивного плюма Кубани, наблюдаемый на спутниковом изображении OLI Landsat 8 от 10.02.2022 г. после увеличения осадков над исследуемым регионом. Интенсивный поток мутных речных вод,

резко отличающихся по оптическим характеристикам от окружающих морских вод, направлен на восток от устья и распространяется вдоль береговой линии Темрюкского залива. На графике изменчивости количества осадков по данным MERRA-2 Model (рис. 4, *б*) видно, что предварительно 08-09.02.2022 г. наблюдается резкое увеличение осадков до 0,3 мм/час. При этом 07.02 отмечается резкое повышение температуры воздуха до 9°C 08.02 (рис. 4, *в*), что в совокупности с дождевыми осадками привело к резкому сокращению снежного покрова в районе нижнего течения р. Кубань. В результате в этот период на гидропосту в г. Темрюк (рис. 4, *г*) регистрируется увеличение уровня воды в реке с 120 см (на 08.02) до 138 см (09.02).

Проявление плюма р. Кубань в инфракрасном диапазоне

В силу разницы термических характеристик, попадая в акваторию речные воды часто проявляются

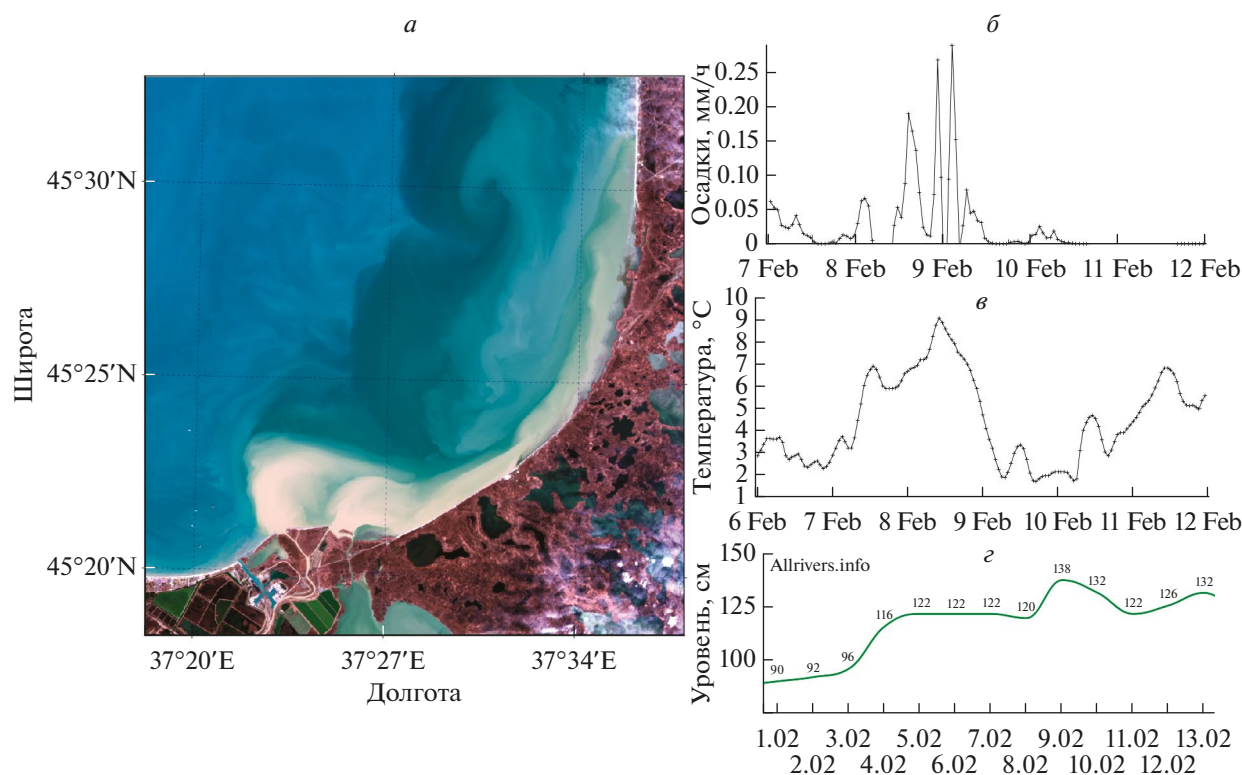


Рис. 4. *a* — Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 10.02.2022 г.; *б* — количества осадков в районе бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model за период 07.02.2022–12.02.2022 гг.; *в* — Изменчивость температуры воздуха над районом нижнего водосборного бассейна реки Кубань по данным MERRA-2 Model за период 06.02.2022–12.02.2022 гг.; *з* — График уровня воды в реке Кубань по гидропосту в г. Темрюк за период 01.02.2022–13.02.2022 гг. Данные получены на портале <https://allrivers.info/>.

по полю температуры поверхности моря (ТПМ). Причем в большинстве рассмотренных случаев зона плюма Кубани была теплее азовоморских вод, что связано с тем, что нижнее и среднее течение реки проходит по равнинной местности и воды имеют более быстрый прогрев относительно морских вод, в отличие от других рек Кавказа. На рис. 5 показан характерный пример такого проявления плюма реки Кубань от 28.02.2017 г. в естественных цветах (рис. 5, *а*) и по ТПМ (рис. 5, *б*), восстановленной по данным Landsat 8 (Алескерова и др., 2016). Плом распространяется в виде двух основных струй мутных речных вод на расстояние около 11 км севернее от устья реки. Такая же конфигурация плюма наблюдается и по данным о ТПМ, где видно, что зона непосредственно плюма в виде двух струй теплее окружающих вод на 2–3 градуса.

При этом воды, поступающие из Курчанского лимана через гирло Соловьевское, в отдельных ситуациях могут быть значительно холоднее или теплее, чем азовоморские и основной плум Кубани. Такой случай наблюдался 19.10.2023 г. (рис. 5, *в*, *з*), когда распространявшийся плум из гирла Соловьевского был холоднее на 3°C. В тоже время плум

Кубани в приустьевой зоне не имеет существенной разницы в значениях температуры относительно окружающих морских вод. Это вероятно связано с тем, что из-за мелководья Курчанского лимана (глубина до 1,5 м), его воды охлаждаются и прогреваются быстрее, чем поступающие воды Кубани.

Проявление плюма р. Кубань на радиолокационных спутниковых изображениях

На радиолокационных изображениях в приустьевом районе часто могут наблюдаться зоны со сглаженной шероховатостью поверхности моря, визуально представляющие собой более темные пятна относительно окружающей морской поверхности (рис. 6, *а*). Вероятно, такое изменение шероховатости поверхности связано с поступлением вместе с речными водами поверхностно-активных веществ. При этом такие зоны не всегда совпадают с конфигурацией плюма на оптических спутниковых изображениях, полученных с некоторым временным интервалом (рис. 6, *б*), что может говорить также о влиянии других факторов, например, формированию зоны ветровой тени вблизи данного участка побережья или объяснять-

ся разностью по времени между снимками, за которую конфигурация могла измениться. Типичные скорости движения фронта плюма 0,25–0,35 м/с

(оцениваемые по последовательным снимкам) не противоречат наблюдаемым на представленных снимках смещениям.

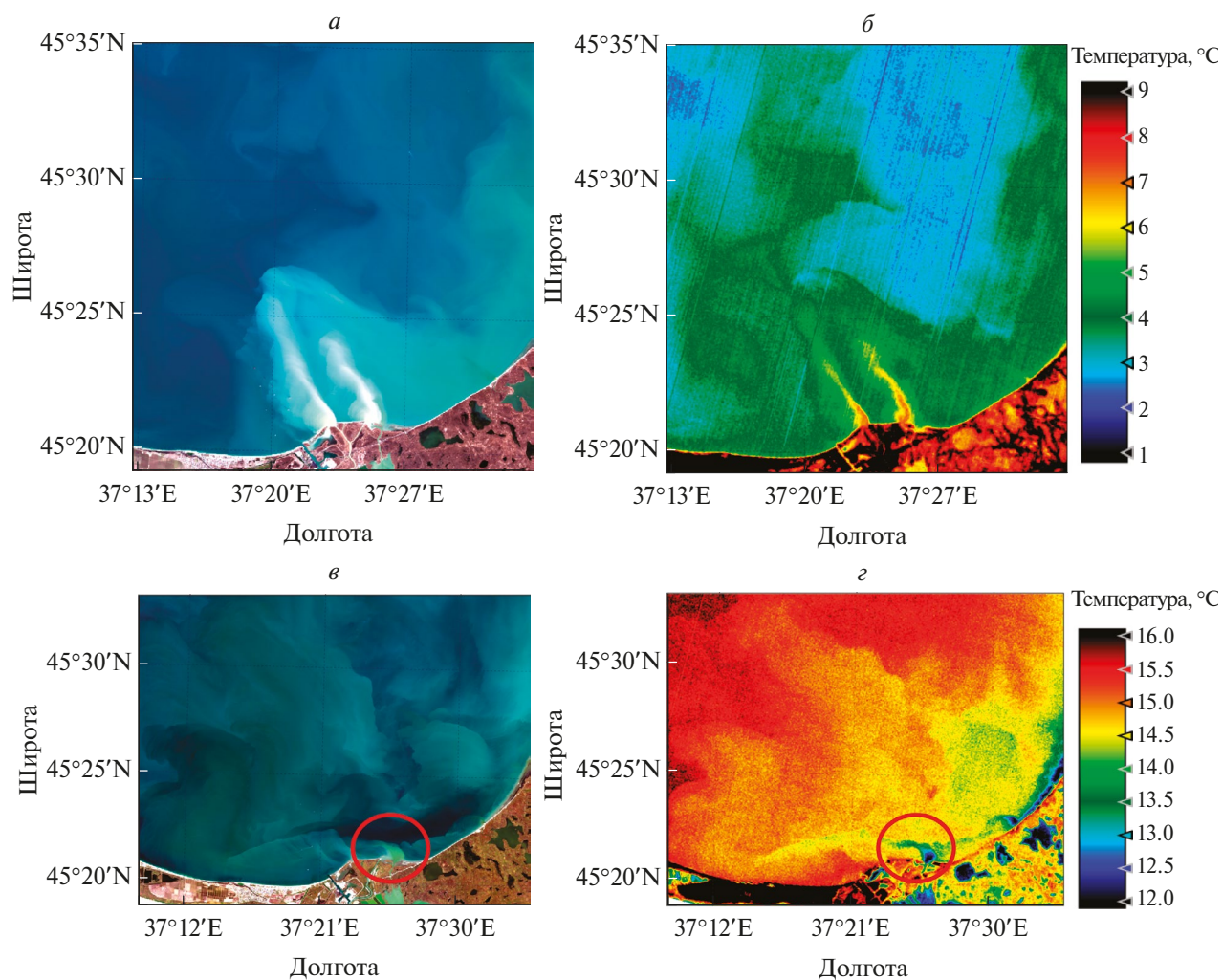


Рис. 5. Проявление плюма Кубани по данным Landsat 8. *a* – RGB-композит в натуральных цветах от 28.02.2017 г.; *б* – поле температуры поверхностного слоя моря от 28.02.2017 г.; *в* – RGB-композит в натуральных цветах от 19.10.2023 г.; *г* – поле температуры поверхностного слоя моря от 19.10.2023 г.

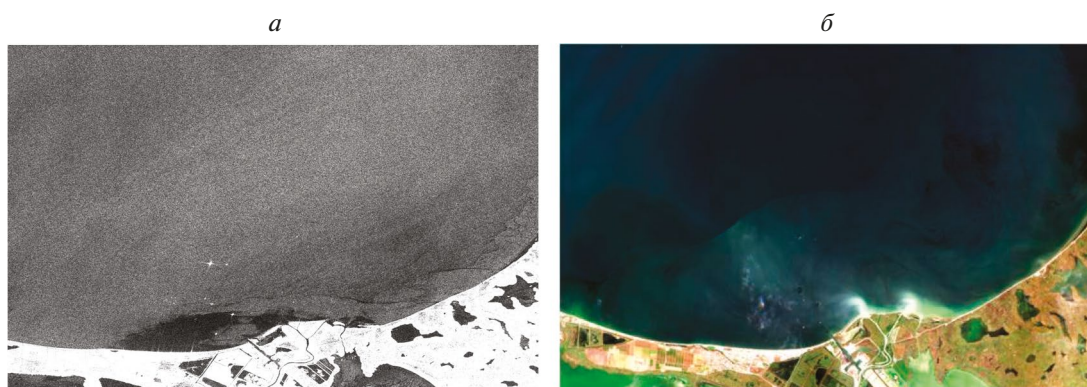


Рис. 6. Спутниковые изображения от 31.08.2022 г. *a* – SAR-C Sentinel-1 (03:40 UTC); *б* – MSI Sentinel-2 (08:37 UTC).

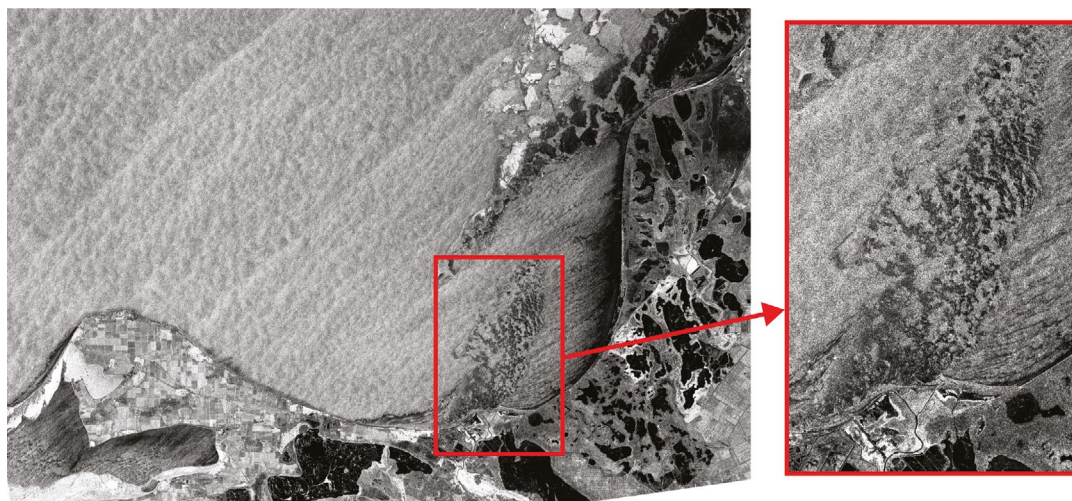


Рис. 7. Спутниковое изображение SAR-C Sentinel-1 от 30.01.2017 г.

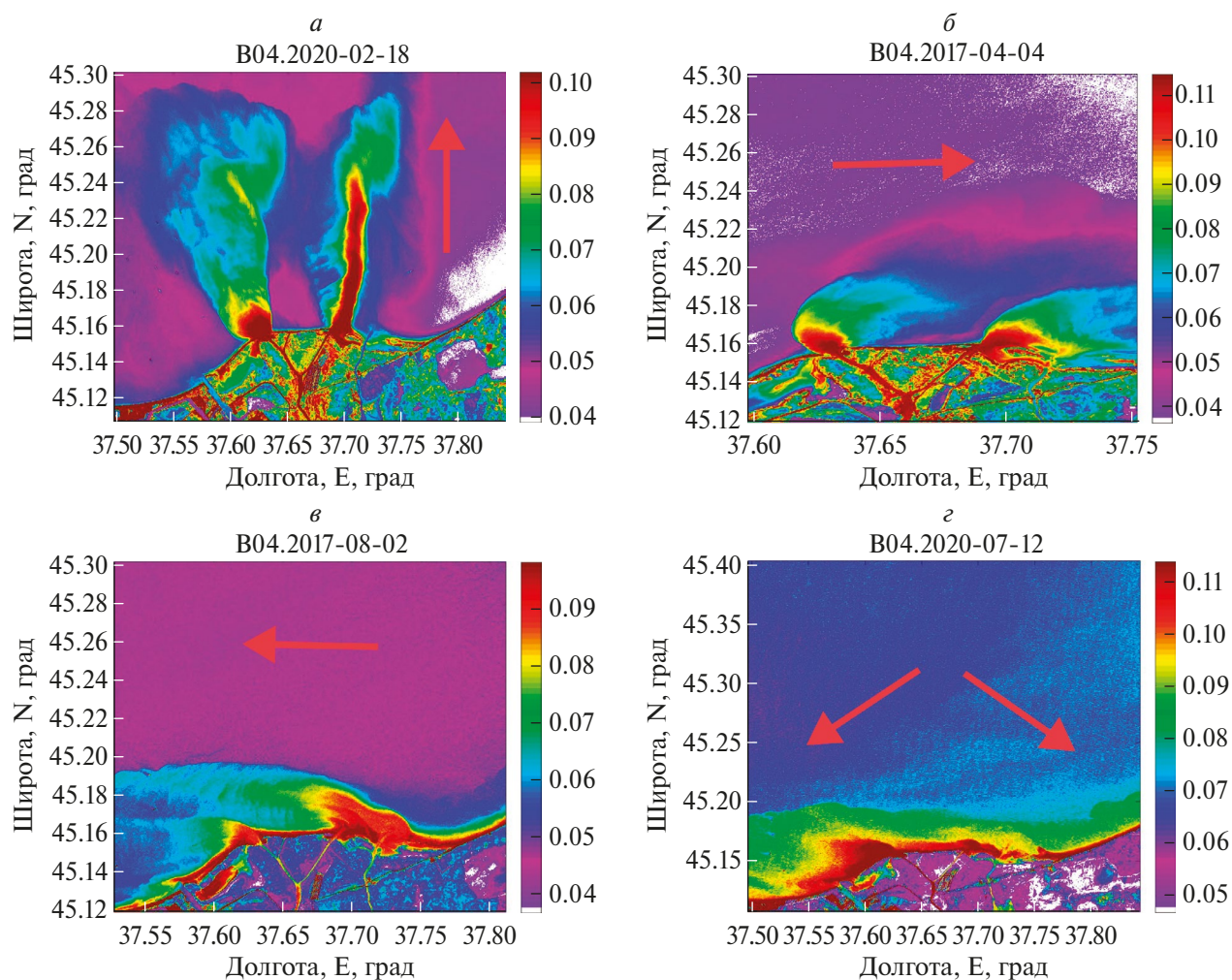


Рис. 8. Примеры распространения плумов по данным Sentinel-2 (band 4). *а* – 18.02.2020 г. (“северный” тип распространения); *б* – 04.04.2017 г. (“восточный” тип распространения); *в* – 02.08.2017 г. (“западный” тип распространения); *з* – 12.07.2020 г. (“вдольбереговой” тип распространения).

При рассмотрении приустьевых районов на радиолокационных изображениях был обнаружен интересный случай проявления стока реки Кубань в Азовское море в зимний период (рис. 7). Попадая в Азовское море пресные воды Кубани распространяются в поверхностном слое. В силу различий в значениях температуры замерзания, зона распространения пресных речных вод покрывается льдом раньше, чем соленые воды акватории. На изображении за 30.01.2017 г. (рис. 7) хорошо видно первоначальное формирование ледовых областей, которое вытянуто от устья на северо-восток, уже затем 31.01.2017 г. ледовое покрытие наблюдается во всем Темрюкском заливе.

Типы распространения вод Кубани по спутниковым данным

Многолетний анализ спутниковых данных высокого разрешения Landsat 8, 9 и Sentinel-2 позволил выделить четыре условных типа распространения вод Кубани: “северный” (рис. 8, а), “восточный” (рис. 8, б), “западный” (рис. 8, в), “вдольбереговой” (рис. 8, г). Наиболее эффективно конфигурация и направление плумов идентифицировались

на оптических спутниковых изображениях в видимом диапазоне. Анализ гидрометеорологических характеристик показал, что направление распространения плума зависит в первую очередь от ветровых условий.

Северный тип распространения

К “северному” типу распространения относятся плумы, которые продвигались на север от устья реки, затем, на некотором расстоянии под влиянием текущей циркуляции вод акватории, поток мутных речных вод мог отклоняться западнее или восточнее. Наиболее интенсивное и обширное проявление плума до центральной части Азовского моря наблюдается именно при северном типе, т.к. взвешенное вещество преимущественно распространяется в водной среде, в отличие от западного, восточного и вдольберегового направления, когда взвешенное вещество будет частично попадать обратно на берег. В некоторых случаях плум продвигался на расстояние до 15,5 км от береговой линии. Чаще всего “северный” тип плумов наблюдается при южном и юго-восточном ветре. Реже такой тип встречается при восточном и юго-западном ветре,

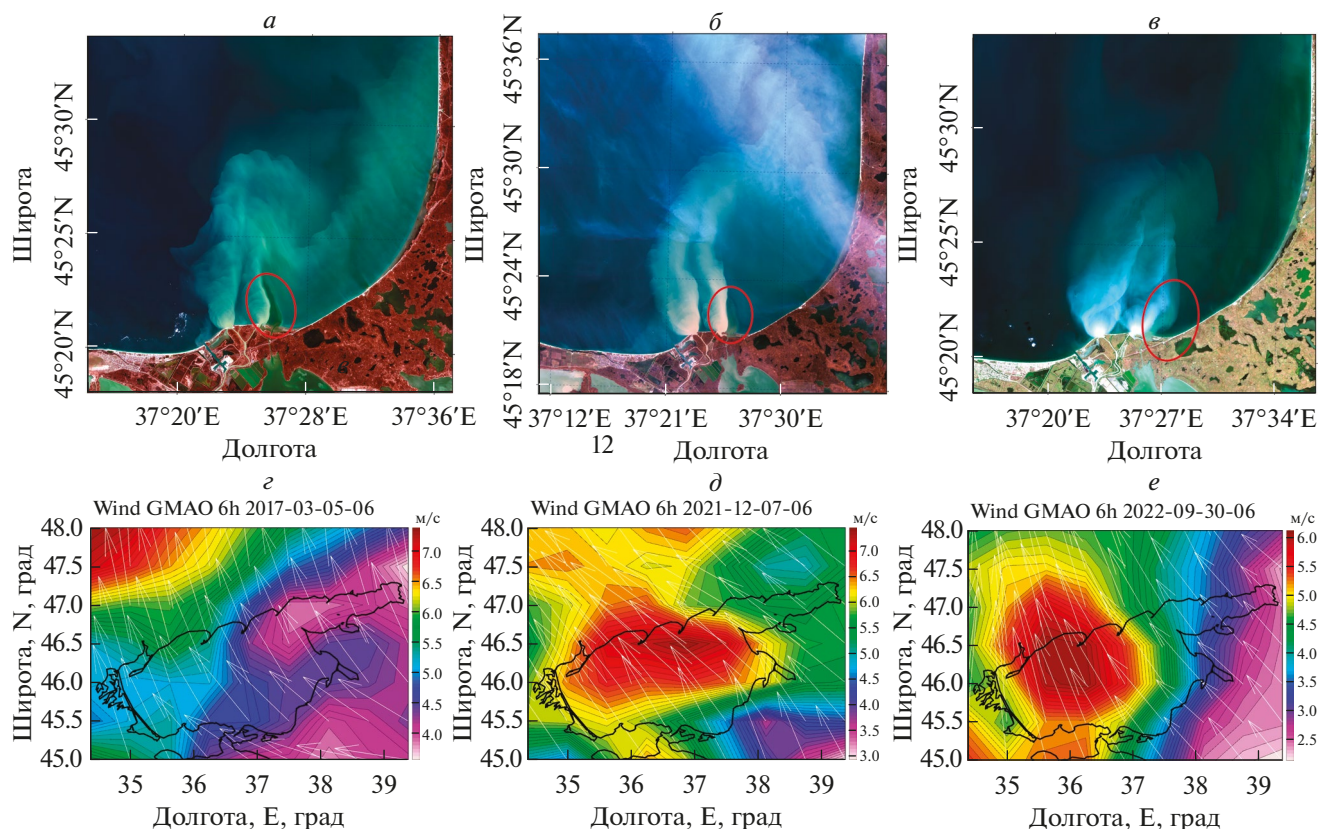


Рис. 9. а – Спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 05.03.2017 г.; б – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 07.12.2021 г.; в – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 30.09.2022 г.; г – данные о полях ветра MERRA-2 от 05.03.2017 г.; д – данные о полях ветра MERRA-2 от 07.12.2021 г.; е – данные о полях ветра MERRA-2 от 30.09.2022 г.

что вероятно связано с отклонением потока вправо под влиянием силы Кориолиса. Как правило, наиболее обширное распространение плюма отмечается в условиях низкой ветровой активности (скорость до 5 м/с), что вероятно связано с отсутствием интенсивного перемешивания с окружающими водами. На рис. 9 показаны примеры проявления таких интенсивных плюмов в различные сезоны на спутниковых изображениях Sentinel-2 от 05.03.2017 г. (рис. 9, *а*), Landsat 8 от 07.12.2021 г. (рис. 9, *б*), Sentinel-2 от 30.09.2022 г. (рис. 9, *в*). Во всех представленных примерах на рис. 9 (*а, б, в*) плюм мутных речных вод распространялся на север и достигал $45^{\circ}29'$ с.ш. при воздействии юго-восточного ветра со скоростью до 5,5 м/с (рис. 9, *г, д, е*). При этом также фиксируется выход мутных вод из Курчанского лимана через гирло Соловьевское (отмечено красным на рис. 9, *а, б, в*).

Западный тип распространения

Наиболее часто по спутниковым данным наблюдается смещение плюма Кубани на запад — “за-

падный” тип (35% за 2019–2023 гг.). Пример таких плюмов продемонстрирован на спутниковых изображениях MSI Sentinel-2 от 03.07.2017 г. (рис. 10, *а*) и OLI Landsat 8 от 02.09.2018 г. (рис. 10, *б*). В случае от 03.07.2017 г. мутные речные воды продвигаются в западном направлении, в то время как над акваторией наблюдался северо-западный ветер со скоростью до 5–6 м/с (рис. 10, *в*). Аналогично распространялся плюм зафиксированный 02.09.2018 г. при воздействии западного ветра до 8 м/с (рис. 10, *г*).

Восточный тип распространения

На рис. 11, *а, б* представлен пример распространения плюма Кубани на восток. В первую очередь, “восточный” тип распространения плюма спутниковых данных фиксируется при ветре западных румбов. В случае, продемонстрированном на спутниковом изображении Landsat 8 от 11.05.2020 г. (рис. 11, *а*) поток речных вод направлен на восток под действием продолжительного и интенсивного юго-западного ветра со скоростью до 8 м/с (рис. 11, *в*).

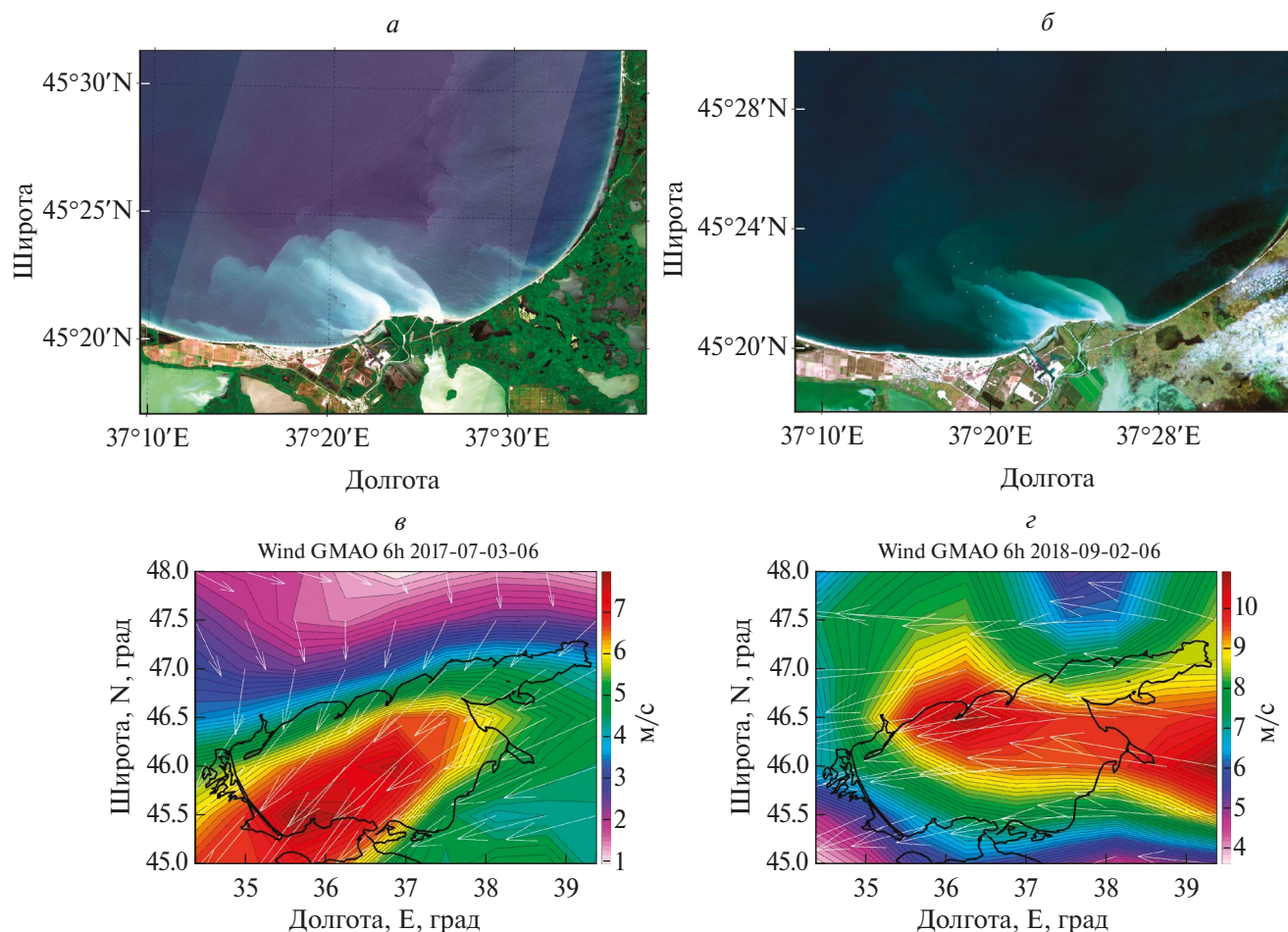


Рис. 10. *а* — Спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 03.07.2017 г.; *б* — спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 02.09.2018 г.; *в* — данные о полях ветра MERRA-2 от 03.07.2017 г.; *г* — данные о полях ветра MERRA-2 от 02.09.2018 г.

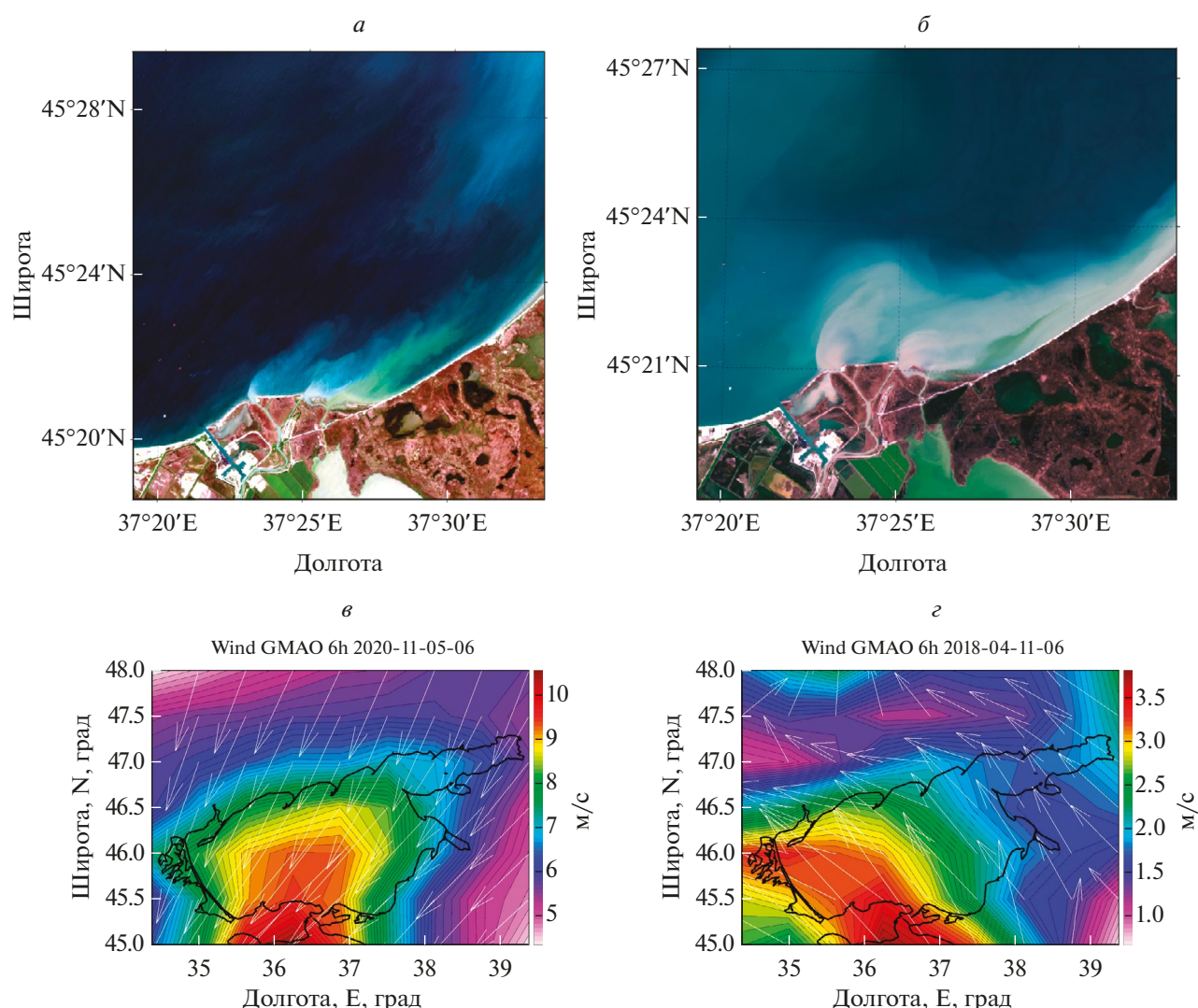


Рис. 11. *а* – Спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 11.05.2020 г.; *б* – спутниковое изображение OLI Landsat 8 от 11.04.2018 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 11.05.2020 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 11.04.2018 г.

Однако достаточно часто поток мутных речных вод попадая в акваторию отклоняется на восток при условиях низкой скорости ветра независимо от направления, как в случаях 11.04.2018 г. (рис. 11, *б*) когда скорость ветра над акваторией не превышала 2–3 м/с (рис. 11, *г*). Причиной такого отклонения является, по-видимому, сила Кориолиса, которая вызывает перенос легких пресных вод вправо от устья в Северном полушарии.

Вдольбереговой тип распространения

В случае если мутные речные воды прижаты к берегу, такие плумы идентифицировались как “вдольбереговые”, как показано на примере от 04.05.2017 г. и 16.09.2017 г. (рис. 12, *а, б*). Как правило, этот тип распространения возникает при ветрах северных румбов (рис. 12, *в, г*). При этом поток мутных вод может распространяться вдоль

берега в большей мере в западном или восточном направлении. Однако достаточно часто под влиянием ветра плум прижимает воды в разные стороны от устья и определить преимущественное направление плума затруднительно.

Межгодовая и межсезонная изменчивость распространения плумов Кубани по спутниковым данным

На основе многолетнего анализа спутниковых данных Landsat-8,9 и Sentinel-2 за 2019–2023 гг. была проанализирована частота наблюдения различных типов распространения плумов (рис. 13, 14). Всего было проанализировано 266 снимков, на которых отсутствовало интенсивное взмучивание вод и обширный облачный покров над Темрюкским заливом.

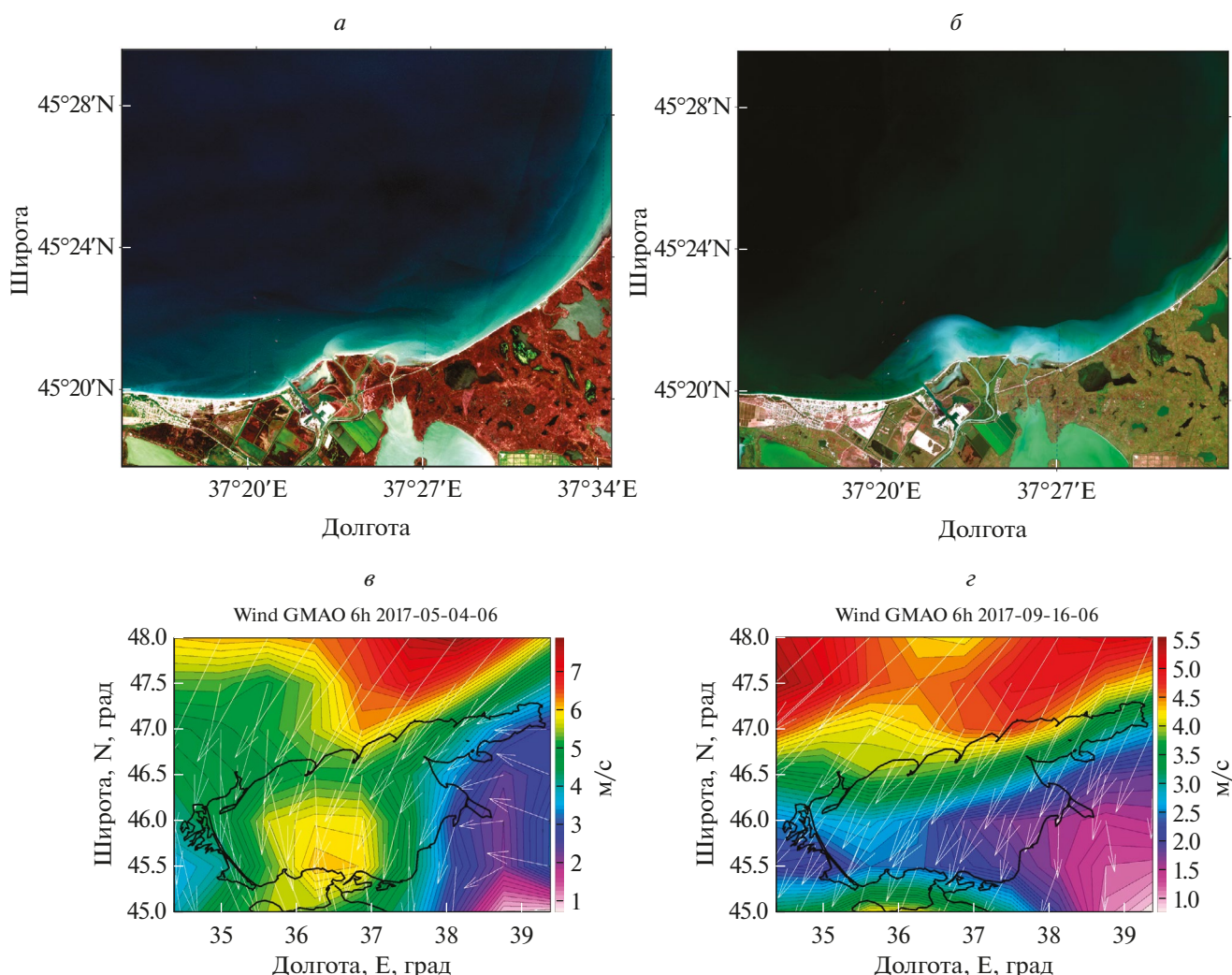


Рис. 12. *a* – Спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 04.05.2017 г.; *б* – спутниковое изображение MSI Sentinel-2 от 16.09.2017 г.; *в* – данные о полях ветра MERRA-2 от 04.05.2017 г.; *г* – данные о полях ветра MERRA-2 от 16.09.2017 г.

Результаты анализа сезонной изменчивости (рис. 13, *a*) показали, что в летне-осенние месяцы мутные речные воды чаще продвигались на запад (42% и 60% соответственно), что соответствует преимущественному восточному и северо-восточному направлению ветра в эти сезоны, как показано на примере розы ветров для июля и октября (рис. 13, *г, д*). Весной большинство наблюдаемых плюмов относилось к “восточному” типу распространения (37%) и несколько реже к “западному” (32%) при воздействии преобладающих юго-западных и немного реже северо-восточных ветров (рис. 13, *в*). В зимний период 42% зафиксированных плюмов были направлены на север. Следует отметить, что в силу регулярного и обширного облачного покрова над районом исследования, для зим доступно наименьшее количество подходящих оптических спутниковых изображений.

За исследуемый период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плюмы западного направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2021 – 31%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плюмы распространялись на восток, как показано на рис. 14. Всего за исследовательский период “западный” тип распространения наблюдался в 35% случаев, “восточный” тип в 25%, “северный” тип – 21%, “вдольбереговой” – 19% (рис. 14, *е*).

Полученные результаты по годам также сопоставлялись с данными о направлении ветра. Было установлено, что преимущественное западное направление распространения плюма совпадало с преобладающим северо-восточным направлением ветра над акваторией (Дьяков и др., 2010; Наумова и др., 2010). Исключением являлся 2021 год. По розе ветров за 2021 год (рис. 14, *г*) видно, что на-

а

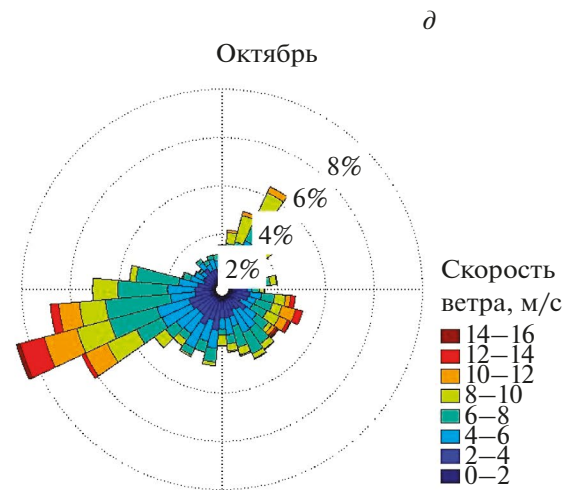
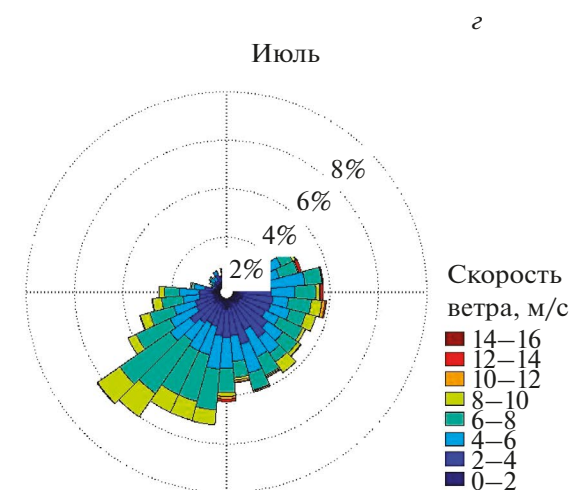
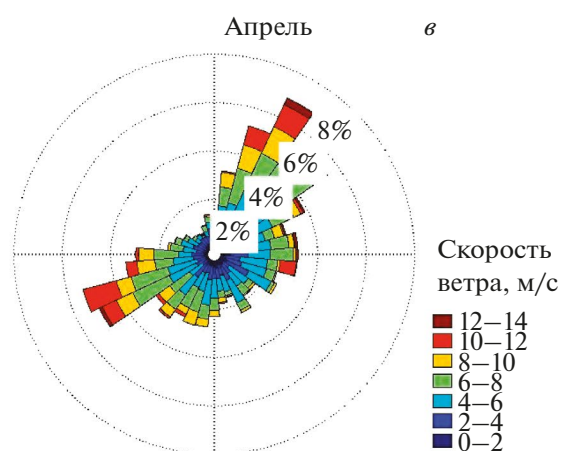
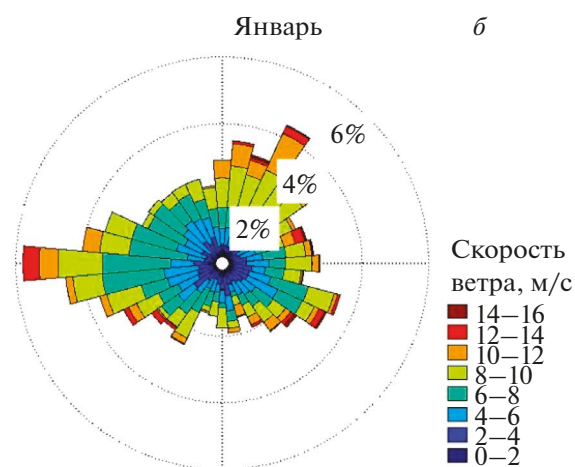
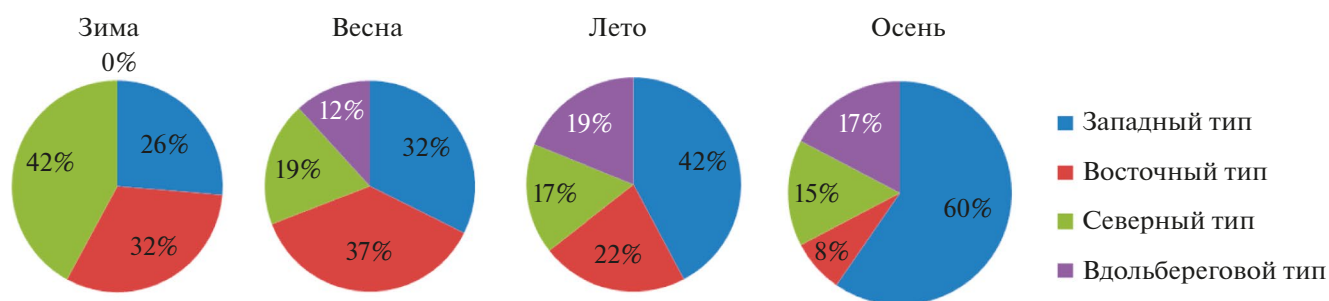


Рис. 13. а – Направление распространения плумов за 2019–2023 гг. по безоблачным спутниковым данным MSI Sentinel-2 и OLI Landsat 8-9 по сезонам; роза ветров за 2019–2013 гг. по данным реанализа ERA5: б – январь; в – апрель; г – июль; д – октябрь.

ряду с доминирующим северо-восточным ветром наблюдается усиление юго-западного ветра, что, вероятно и поспособствовало более частому продвижению плумов на восток Темрюкского залива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кубань является одной из важнейших рек, впадающих в Азовское море, в значительной мере влияющих на экологическое состояние акватории.

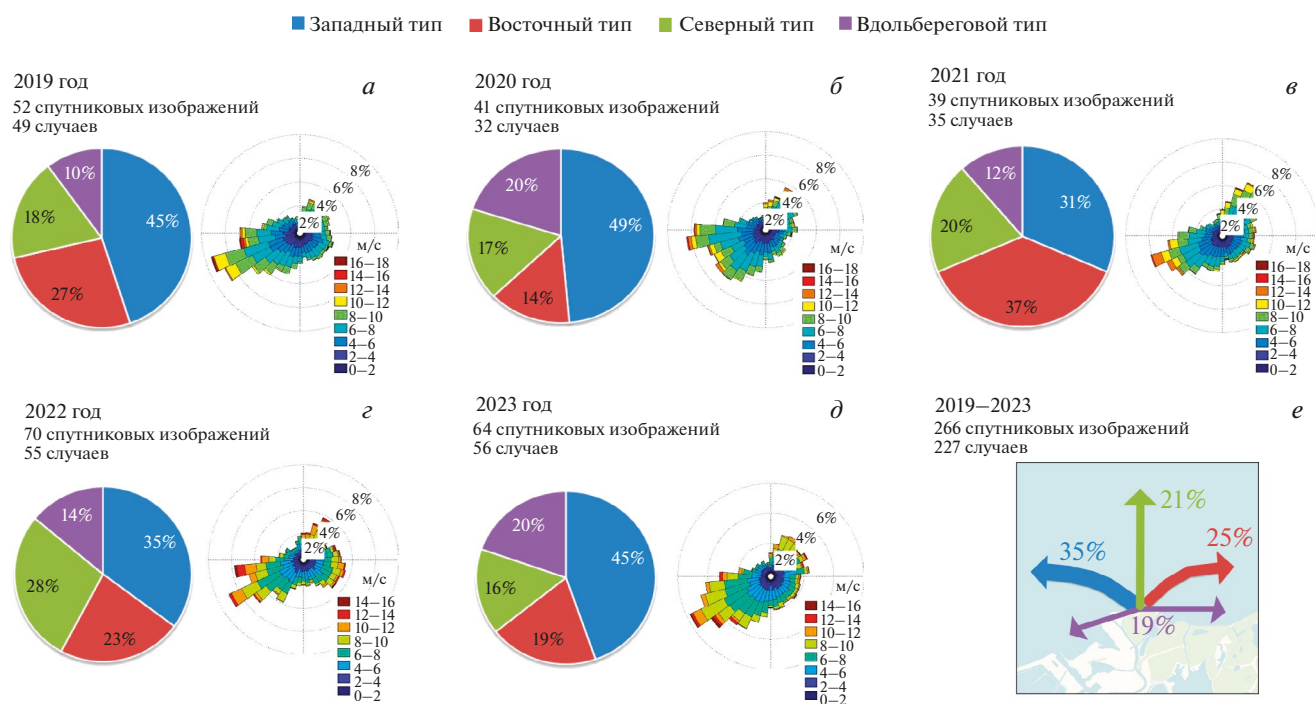


Рис. 14. Направление распространения плумов по спутниковым данным и роза ветров за: *a* – 2019 г.; *б* – 2020 г.; *в* – 2021 г.; *г* – 2022 г.; *д* – 2023 г.; *е* – направление распространения плумов по спутниковым данным за исследовательский период 2019–2023 гг.

С речными водами в Темрюкский залив попадает большое количество взвешенных и биогенных веществ. На основе спутниковых данных исследованы особенности проявления плумов реки Кубань.

На спутниковых изображениях в естественных цветах плумы Кубани представляют собой мезомасштабную структуру в приустьевой зоне в виде двух основных струй вод с повышенной мутностью. При высоких скоростях ветра воды Азовского моря подвергаются интенсивному взмучиванию, в результате чего плум Кубани может не идентифицироваться.

В силу температурных отличий поток речных вод также может выделяться по полю ТПМ. В большинстве наблюдаемых случаев плумы основного устья реки Кубань были либо теплее окружающих, либо были близки к температуре морских вод.

На основе анализа многолетнего архива оптических спутниковых данных было выделено 4 типа распространения вод Кубани: “северный”, “восточный”, “западный”, “вдольбереговой”. За период 2019–2023 гг. в большинстве случаев фиксировались плумы западного направления (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% и 2023 – 45% случаев), кроме 2021 года, когда чаще плумы распространялись на восток (в 37% случаев), что связано с усилением в этот год юго-западного ветра. Всего за исследовательский период “западный” тип распространения

наблюдался в 35% случаев, “восточный” тип в 25%, “северный тип” – 21%, “вдольбереговой” – 19%.

Направление распространения плума реки Кубань в основном определяется ветровыми условиями. Обширные плумы могут наблюдаться течении всего года независимо от времени года. Связаны с кратковременными паводками в результате обильных осадков. Как правило, наиболее обширные плумы проявляются на спутниковых изображениях при “северном” типе распространения.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование было выполнено при поддержке гранта РНФ 23-27-00421 “Развитие методов спутникового мониторинга аномальных процессов в морских экосистемах на основе многоспектрального подхода”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алескерова А.А., Кубряков А.А., Станичный С.В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исследование Земли из космоса. 2016. № 4. С. 57–64. doi: 10.7868/S0205961416040023
- Бандурин М.А., Волосухин В.А., Приходько И.А., Романова А.С. Совершенствование мероприятий улучшения ги-

- дрологического режима Кубанского водного бассейна на примере реки Пишиш // *Аграрный научный журнал*. 2022. №. 11. С. 9–14. doi: 10.28983/asj.y2022i11pp9-14
- Бердников С.В., Дашкевич Л.В., Кулыгин В.В.* Климатические условия и гидрологический режим Азовского моря в XX–начале XXI вв // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2019. Т. 2. №. 2. С. 7–19.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Трубник Р.Г., Доценко Н.В.* Метан и сероводород в донных отложениях лиманов Азово-Черноморского бассейна // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2022. Т. 8. № 1. С. 6–20. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-6-20>
- Гетманенко В.А., Губанов Е.П., Изергин Л.В.* Оценка влияния зарегулирования рек на сохранение и воспроизводство биоресурсов Азовского моря // *Труды Южного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии*. 2010. Т. 48. С. 52–58.
- Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Мартынов Е.С., Гармашов А.В.* Ветро-волновой режим Азовского моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. №. 22. С. 228–239.
- Завьялов П.О., Маккавеев П.Н., Коновалов Б.В., Осадчиев А.А., Хлебоняшев 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. 293–293. doi: 10.7868/S0030157414030150
- Иванов А.Ю., Хлебников Д.Б., Коновалов Б.Б., Евтушенко Н.Б., Терлеева Н.Б.* Особенности отображения выносов рек в Черном море в данных дистанционного зондирования // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. №. 5. С. 191–202. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202
- Косенко Ю.В., Баскакова Т.Е., Картамышева Т.Б.* Роль стока реки Дон в формировании продуктивности Таганрогского залива // *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2018. Т. 1. №. 3–4. С. 32–39.
- Косолапова Н.А.* Водно-ресурсный потенциал развития регионов в бассейнах рек Дон и Кубань // *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. 2016. №. 7 (89). С. 18.
- Кубряков А.А., Станичный С.В., Зацепин А.Г., Кременецкий В.В.* Распространение речных вод в Черном и Карском морях по спутниковым измерениям уровня, солёности и хлорофилла А // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. №. 27. С. 394–398.
- Лаврова О.Ю., Назирова К.Р., Алферьева Я.О., Князев Н.А.* Вынос р. Кубань в Темрюкский залив: спутниковые наблюдения и измерения in-situ // *Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”*. 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 218. doi: 10.21046/18DZZconf-2020a
- Ломакин П.Д., Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Поле концентрации растворенного органического вещества в Азовском море и Керченском проливе на базе оптических наблюдений // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 5 (191). С. 76–88.
- Малышева Н.Н., Якуба С.Н.* Развитие мелиорации на Кубани и рациональное водопользование при орошении риса // *Рисоводство*. 2017. №. 4. С. 47–56.
- Михайлов В.Н., Магрицкий Д.В.* Современный водный баланс дельты Кубани и расчет притока кубанских вод в Азовское море // *Труды Государственного океанографического института*. 2008. №. 211. С. 222–248.
- 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
- Наумова В.А., Евстигнеев М.П., Евстигнеев В.П., Любарев Е.П.* Ветроволновые условия Азово-Черноморского побережья Украины // *Сборник научных трудов УкрНИГМИ*. 2010. Вып. 259. С. 263–283.
- Осадчиев А.А.* Распространение плюма реки Амур в Амурском лимане, Сахалинском заливе и Татарском проливе // *Океанология*. 2017. Т. 57. №. 3. С. 417–424. doi: 10.7868/S0030157417020150
- Папенко И.Н., Епатко А.Ф., Тхагансо Ф.А.* Регулирование стока в бассейне реки Кубань // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2008. №. 37. С. 27–48.
- Решетняк О.С., Комаров Р.С.* Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2023. №. 1. С. 95–105. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8
- Симов В.Г., Дьяков Н.Н., Шевела Л.А.* Приток речных вод в Азовское море // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. №. 23. С. 145–152.
- Сорокина В.В., Бердников С.В.* Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // *Океанология*. 2008. Т. 48. №. 3. С. 456–466.
- Сорокина В.В., Бердников С.В.* Биогенная нагрузка Дона и Кубани на экосистему Азовского моря // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. №. 6. С. 670–684. doi: 10.1134/S0321059618060147
- Спиридонова Е.О., Панов Б.Н.* Изменения структурных показателей и среднего значения поля солёности вод Азовского моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. Т. 37. № 3 (219). С. 305–317. doi: 10.22449/0233-7584-2021-3-305-317
- Шеголихина М.С., Лаврова О.Ю.* Мониторинг выносов речных и лагунных вод в Азовское и Балтийское моря на основе спутниковых данных видимого диапазона // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2018. №. 3. С. 180–191. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191>
- Brando V.E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellaftore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F.M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S.* High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. No. 6. P. 909–920. doi: 10.5194/os-11-909-2015
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
- Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Storchkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A

MSI and Landsat-8 OLI data // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016. SPIE. 2016. Vol. 9999. P. 125–136.

Shi W., Wang M. Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008 // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. №. 7. doi:10.1029/2009GL037210

Characteristics of the Kuban River Plume According to Satellite Data

N. V. Vasilenko¹, A. A. Kubryakov¹, S. V. Stanichny¹

¹*Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Sevastopol, Russia*

According to satellite data from Landsat 8, 9 and Sentinel-1,2 for the period 2017–2024, the spatiotemporal variability of the Kuban River plume distribution was studied. The features of plume manifestation on radar images, as well as in the visible and infrared range, were studied. It is shown that the Kuban plume is formed from two main jets, as well as the waters of the Kurchansky estuary near the river mouth. Based on the analysis of long-term optical data, 4 types of plume propagation were identified: “western,” “eastern,” “northern,” and “alongshore.” The most extensive spread of the plume occurs during the “northern” type, when the plume spread to a distance of up to 15.5 km from the coastline. The main reason for changes in plume distribution is variability in wind conditions. The seasonal and interannual variability of the distribution of Kuban waters has been studied. For the period 2019–2023 in most cases, plumes of a “western” direction were recorded (2019 – 45%, 2020 – 49%, 2022 – 35% and 2023 – 45% of cases), except for 2021, when more often plumes spread to the east (in 37% of cases) under the influence abnormal wind conditions.

Keywords: Kuban, satellite data, Sea of Azov, Temryuk Bay, river plume, Sentinel-2, Landsat, sea surface temperature

REFERENCES

Aleskerova A.A., Kubryakov A.A., Stanichny S.V. A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52. No. 9. P. 1155–1161. doi: 10.1134/S0001433816090048

Bandurin M.A., Volosukhin V.A., Prikhodko I.A., Romanova A.S. Features of growing irrigated soybeans with complex mineral nutrition // *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2022. No. 11. P. 9–14. (In Russian) <http://10.28983/asj.y2022i11pp9-14>

Berdnikov S.V., Dashkevich L.V., Kulygin V.V. Climatic conditions and hydrological regime of the Sea of Azov in the XX – early XXI centuries // *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya*. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 7–19. (in Russian)

Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Trubnik, R., Dotsenko, N. Methane and hydrogen sulfide in the bottom sediments of the estuaries of the Azov-Black sea basin // *Anthropogenic Transformation of Nature*, 2022. 8(1). pp. 6–20. (in Russian) <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-6-20>

Getmanenko V.A., Gubanov E.P., Izergin L.V. Impact assessment of the regulation of rivers on preservation and reproduction of the Azov sea biological resources // *Trudy Yuzhnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta rybnogo hozyajstva i okeanografii*. 2010. Vol. 48. P. 52–58. (in Russian)

Dyakov N.N., Fomin V.V., Martynov E.S., Garmashov A.V. Wind and wave regime of the sea of Azov // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2010. No. 22. P. 228–239. (in Russian)

Zavialov P.O., Makkaveev P.N., Konovalov B.V., Osadchiev A.A., Khlebopashev P.V., Pelevin V.V., Grabovskiy A.B., Izhiitskiy A.S., Goncharenko I.V., Polukhin A.A., Soloviev D.M. 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. P. 265–280. doi: 10.1134/S0001437014030151. Vol. 1. No. 3–4. P. 32–39. (in Russian)

Ivanov A.Yu., Khlebnikov D.V., Konovalov B.V., Evtushenko N.V., Terleeva N.V. Manifestations of river outflows in the Black Sea in remote sensing data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15. No. 5. P. 191–202. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-191-202 (in Russian)

Kosenko Yu.V., Baskakova T.E., Kartamysheva T.B. Role of the Don river flow in productivity formation of the Taganrog bay // *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya*. 2018.

Kosolapova N.A. Water resource development potential regions in the basins of the rivers Don and Kuban // *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyy nauchnyy zhurnal*. 2016. No. 7 (89). P. 18. (in Russian)

Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V. Distribution of river waters in the Black and Kara seas according to satellite measurements of level, salinity and chlorophyll A // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2013. No. 27. P. 394–398. (in Russian)

Lavrova O.Yu., Nazirova K.R., Alferyeva Ya.O., Knyazev N.A. Removal of the river Kuban to Temryuk Bay: satellite observations and in-situ measurements // *Materialy 18 Vserossiyskoj Otkrytoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*

Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 16–18 Nov. 2020. Space Research Institute, 2020. P. 218. doi: 10.21046/18DZZconf-2020a (in Russian)

Lomakin, P.D., Chepyzhenko A.I., Chepyzhenko A.A. Field of the Colored Dissolved Organic Matter Concentration in the Sea of Azov and the Kerch Strait Waters Based on Optical Observations // *Physical Oceanography*. 2016. No. 5. P. 71–83. doi: 10.22449/1573-160X-2016-5-71-83

- Malysheva N.N., Yakuba S.N.* Development of Melioration in Kuban and Rational Water Use in Irrigation of Rice // *Risovodstvo*. 2017. No. 4. P. 47–56. (in Russian)
- Mikhailov V.N., Magritskij D.V.* Water balance of Kuban river delta and evaluation of Kuban water inflow into the Azov Sea. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*, 2008, No. 211, P. 222–248 (in Russian)
- Nazirova K.R., Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Soloviev D.M., Zhuk E.V., Alferyeva 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. P. 227–242. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-227-243 (in Russian)
- Naumova V.A., Evstigneev M.P., Evstigneev V.P., Lyubarec E.P.* Wind-wave conditions of the Azov-Black Sea coast of Ukraine // *Sbornik nauchnyh trudov UkrNIGMI*. 2010. 259. P. 263–283. (in Russian)
- Osadchiv A.A.* Spreading of the Amur River plume in the Amur Liman, Sakhalin Gulf, and the Strait of Tartary // *Oceanology*. 2017. Vol. 57. No. 3. P. 376–382. doi: 10.1134/S0001437017020151
- Papenko I.N., Epatko A.F., Tkhangapso F.A.* Regulation of Water in the Kuban River Basin // *Politematicheskij setevoy e'lektronny'j nauchny'j zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2008. No. 37. P. 27–48. (in Russian)
- Reshetnyak O.S., Komarov R.S.* Interannual and seasonal variability of chemical runoff along the main delta branches of the Kuban river // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2023. No. 1. P. 95–105. doi: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.8 (in Russian)
- Simov V.G., Dyakov N.N., Shevela L.A.* Inflow of river water into the Sea of Azov // *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources*. 2010. No. 23. P. 145–152. (in Russian)
- Sorokina V.V., Berdnikov S.V.* Mathematical modeling of the terrigenous sedimentation in the Sea of Azov // *Oceanology*. 2008. Vol. 48. No. 3. P. 418–427. doi: 10.1134/S0001437008030144.
- Sorokina V.V., Berdnikov S.V.* Nutrient Loading of the Don and Kuban on the Ecosystem of the Sea of Azov // *Water Resources*. 2018. Vol. 45, No. 6. P. 920–934. doi: 10.1134/S0097807818060143
- Spiridonova E.O., Panov B.N.* Changes of the Structure Indicators and the Salinity Field Average Value in the Sea of Azov // *Physical Oceanography*. 2021. Vol. 28. No. 3. P. 282–293. doi: 10.22449/1573-160X-2021-3-282-293
- Shchegolikhina M.S., Lavrova O.Yu.* Monitoring of river and bay discharges with the help of satellite images of visible range // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya "Geografiya i Geoekologiya"*, 2018, No. 3, pp. 180–191. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-180-191> (in Russian)
- Brando V.E., Braga F., Zaggia L., Giardino C., Bresciani M., Matta E., Bellafore D., Ferrarin C., Maicu F., Benetazzo A., Bonaldo D., Falcieri F.M., Coluccelli A., Russo A., Carniel S.* High-resolution satellite turbidity and sea surface temperature observations of river plume interactions during a significant flood event // *Ocean Science*. 2015. Vol. 11. No. 6. P. 909–920. doi:10.5194/os-11-909-2015
- Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G.* Interannual variability of Danube waters propagation in summer period of 1992–2015 and its influence on the Black Sea ecosystem // *Journal of Marine Systems*. 2018. Vol. 179. P. 10–30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.11.001>
- Lavrova O.Yu., Soloviev D.M., Storchkov M.A., Bocharova T.Y., Kashnitsky A.V.* River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016*. SPIE. 2016. Vol. 9999. P. 125–136.
- Shi W., Wang M.* Satellite observations of flood-driven Mississippi River plume in the spring of 2008 // *Geophysical Research Letters*. 2009. Vol. 36. №. 7. doi: 10.1029/2009GL037210