

Влияние гидродинамических процессов на распространение вод Вислы в Гданьском заливе по данным дистанционного зондирования

М. И. Митягина, О. Ю. Лаврова, П. Д. Жаданова

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

Представлены результаты исследования, направленного на уточнение и дополнение существующих на настоящий момент представлений о характере распространения богатых взвешенным веществом и органикой вод р. Вислы в Гданьском заливе. Экспериментальной основой для выявления, восстановления и дальнейшего анализа пространственно-временных характеристик распространения вод Вислы при её впадении в Гданьский залив послужили данные видимого диапазона высокого пространственного разрешения сенсоров MSI (*англ.* Multispectral Instrument) ИСЗ Sentinel-2A, -2B и OLI/OLI-2 (*англ.* Operational Land Imager) ИСЗ Landsat-8, -9, полученные за двухлетний период наблюдений — с 1 мая 2022 г. по 30 апреля 2024 г. Для восстановления более полной картины развития гидродинамических процессов в заливе к исследованию привлекались данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) C-SAR ИСЗ Sentinel-1A, -1B, полученные за тот же период. Рассмотрены различные сценарии распространения вод р. Вислы в Гданьском заливе, выявленные нами на спутниковых изображениях. Установлена роль мезомасштабных и мелкомасштабных вихревых структур с характерным горизонтальным масштабом 5–20 км как одного из основных факторов, контролирующего формирование ареалов распространения речных вод и переноса взвешенного вещества наряду с приводным ветром и вдольбереговыми течениями. Обоснована необходимость учёта вклада гидродинамических процессов в заливе, в первую очередь мезо- и субмезомасштабных вихрей, которые способны транспортировать воду и содержащиеся в ней примеси различной природы на большие расстояния, для достоверной оценки площади распространения речных вод. Показано, что основной вклад в перенос взвеси, попавшей в залив с речными водами, вносят вихревые диполи. Подчёркивается важность дистанционного зондирования как инструмента получения детальных сведений о фактическом пространственно-временном распределении вихревых структур в районах интереса.

Ключевые слова: спутниковое дистанционное зондирование, эвтрофикация, речные плюмы, Висла, Балтийское море, вихревые процессы в море, вихревой диполь, взвешенное вещество

Одобрена к печати: 05.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250

Введение

Одной из главных угроз экосистеме Балтийского моря является его эвтрофикация, обычно определяемая как чрезмерное увеличение содержания биогенных элементов в поверхностных водах. Основной причиной эвтрофикации Балтийского моря считается поступление азота и фосфора, усиливающееся примерно с 1950-х гг. (Gustafsson et al., 2012). Результаты проведённых *in situ* измерений (Ostrowska et al., 2022) отчётливо показывают, что одной из наиболее эвтрофицированных зон Балтийского моря является западная часть Гданьского залива — одного из крупнейших заливов в юго-восточной части Балтийского моря, что обусловлено, в основном, поступлением в залив биогенных веществ природного и антропогенного происхождения с суши.

Гданьский залив питает р. Висла, характеризующаяся высоким расходом, значительной длиной и большой площадью водосбора. Её длина от истока до места впадения в Балтийское море составляет 1047 км. Водосбор Вислы составляет около 200 тыс. км². Среднегодовой расход Вислы в Гданьский залив составляет 1081 м³/с (HELCOM..., 2004). Роль, которую играет Висла в изменчивости физико-химических и биологических параметров Гданьского залива и факторы, способствующие существенному повышению его эвтрофности по сравнению как

с Балтийским морем в целом, так и с другими его бассейнами, описаны во многих статьях, например (Wojanowski, 1981; Cyberska, Trzosinska, 1984; Krezel, Cyberski, 1993; Majewski, 1972).

Устье Вислы уникально — река впадает в Гданьский залив через прямой искусственный канал шириной около 500 м (рис. 1), прорытый в 1889–1995 гг. Основной сток Вислы кратчайшим путём был направлен к морю через этот канал, другие же крупные рукава дельты реки были перекрыты шлюзами, в результате чего потеряли большую часть своего стока. Искусственное русло Вислы оказалось на 9 км короче естественного, что в свою очередь увеличило уклон реки при её впадении в Балтийское море. Участок искусственного русла р. Вислы вблизи устья отмечен на рис. 1а красным прямоугольником и представлен на рис. 1б в увеличенном виде.

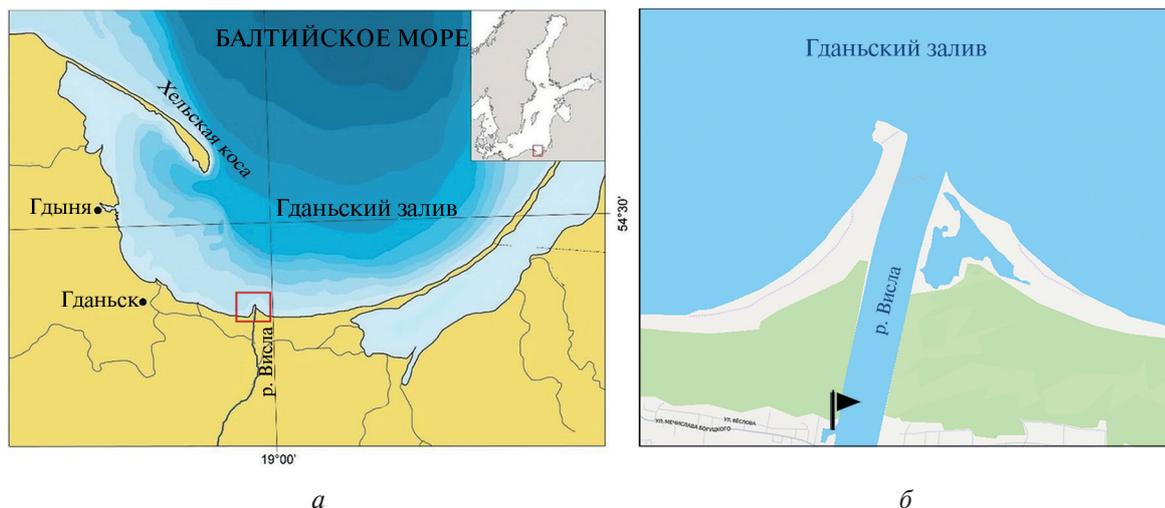


Рис. 1. Район интереса (а); увеличенный участок искусственного русла р. Вислы вблизи устья (б). Флажком отмечено положение уровнемерного поста Свибно

Процессы, происходящие в зонах смешения пресных речных и солёных морских вод, и их разнообразие всегда привлекали к себе внимание исследователей. Методы спутникового дистанционного зондирования позволяют проводить регулярные наблюдения на больших территориях с высоким пространственным разрешением и предоставляют прекрасные возможности для изучения и картирования распространения речных выносов в шельфовых зонах как внутренних морей, так и Мирового океана (Лаврова и др., 2022; Назирова и др., 2019, 2023; Осадчиев, 2021; Ayad et al., 2020; Constantin et al., 2016; Devlin et al., 2015; Doxaran et al., 2009; Kostianoy et al., 2019; Lavrova et al., 2016a, b; Osadchiev, Sedakov, 2019).

При попадании материковых вод в море образуются мезомасштабные или субмезомасштабные структуры, которые выделяются пониженной солёностью и отличной от морской воды температурой, а также, как правило, повышенной мутностью, высоким содержанием взвеси и растворённой органики. Такие структуры часто называют плюмами (англ. plume) (Завьялов и др., 2014). Зона смешивания вод Вислы и морских вод Гданьского залива отличается существенными особенностями, заключающимися в малом перепаде солёности и практическом отсутствии приливных движений. Существует множество публикаций, содержащих результаты исследований распространения вислинских вод в Гданьском заливе *in situ* и описания построенных на их основе моделей (Cyberska, Krzyminski, 1988; Grelowski, Wojewodzki, 1996; Kowalik, 1990; Kowalik, Wroblewski, 1971; Matciak, Nowacki, 1995) Согласно опубликованным результатам натуральных наблюдений, плюмы Вислы могли распространяться по горизонтали на расстояние вплоть до 27 км от устья и по вертикали на глубину от 0,5 до 12 м. Согласно приведённой в работе (The Gulf..., 1990) статистике, в 50 % случаев наблюдалось распространение речных вод на восток и на северо-восток, в 25 % — на север и в 16 % наблюдалось распространение речного плюма в обе стороны от устья.

К сожалению, возможности традиционных контактных методов исследования речных выносов достаточно ограничены. Контактные измерения обладают высокой точностью, но в силу своей трудоёмкости и высокой стоимости судовых измерений могут вносить определённую фрагментарность в представление о процессах, связанных с распространением речных вод в море. Процессы, происходящие в морских акваториях, подверженных влиянию речного стока, отличаются высокой изменчивостью и зачастую непредсказуемостью, что существенно усложняет их численное моделирование. Всё это делает спутниковые методы практически безальтернативным инструментом исследования. К сожалению, публикации, базирующиеся на спутниковых наблюдениях за распространением вод Вислы в Гданьском заливе, немногочисленны. Можно отметить статьи, посвящённые мониторингу распространения выноса Вислы после аномального паводка и разрушительного наводнения 2010 г. (Lavrova et al., 2015; Zajaczkowski et al., 2010) и работу, описывающую наблюдения за цветением фитопланктона в Гданьском заливе на основе спутниковой информации (Ostrowska et al., 2015). Особо следует отметить работу (Копелевич и др., 2016), в которой с использованием данных спутниковых сканеров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua и OLI (*англ.* Operational Land Imager) Landsat-8 анализируется пространственная и временная изменчивость концентрации взвеси в поверхностном слое Юго-Восточной Балтики, включая и Гданьский залив.

Район Юго-Восточной Балтики известен вихревой активностью. Хорошо изучены и описаны субмезомасштабные вихри, регулярно появляющиеся вблизи Самбийского п-ова (Гинзбург и др., 2015, 2017; Краюшкин др., 2018; Gurova, Chubarenko, 2012; Lavrova et al., 2018).

Вихревым процессам в западной части Гданьского залива уделяется несколько меньше внимания. Проведённое нами исследование направлено на восполнение некоторых пробелов в существующих ныне представлениях о характере общей картины распространения богатых взвешенным веществом и органикой вод Вислы в Гданьском заливе за счёт учёта вклада гидродинамических процессов, в первую очередь мезо- и субмезомасштабных вихрей, которые способны транспортировать воду и содержащиеся в ней примеси различной природы на большие расстояния. В настоящей статье мы сосредоточимся на использовании данных мультиспектральных сенсоров оптического диапазона спутникового базирования для выявления и дальнейшего анализа пространственно-временных характеристик распространения вод Вислы при её впадении в Гданьский залив.

Данные и методы

Экспериментальной основой исследования послужил массив спутниковых данных, полученных для района Гданьского залива за двухлетний период с 1 мая 2022 г. по 30 апреля 2024 г. при помощи многоспектральных сенсоров оптического диапазона — MSI (*англ.* Multispectral Instrument) ИСЗ Sentinel-2A, -2B и сканирующего радиометра OLI ИСЗ Landsat-8, -9 (Лаврова и др., 2016) при облачном покрытии, не превосходящем 30 %. Кроме того, для восстановления более полной картины развития гидродинамических процессов в Гданьском заливе использовались данные, полученные за тот же период времени при помощи радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА, *англ.* Synthetic Aperture Radar — SAR) C-SAR ИСЗ Sentinel-1A, -1B. Всего было проанализировано 106 спутниковых изображений поверхности Балтийского моря, полученных в оптическом диапазоне электромагнитного спектра с пространственным разрешением 10–30 м и 165 радиолокационных изображений с пространственным разрешением 10 м.

Для анализа спутниковых данных применялся инструментальный и картографический интерфейс спутникового информационного сервиса See the Sea (STS), разработанного в Институте космических исследований РАН (Лаврова и др., 2019).

Для выявления ареалов распространения вод Вислы в Гданьском заливе, т.е. участков акватории залива, обладающих отличными от вод залива оптическими свойствами, которые определяются, прежде всего, концентрацией содержащихся в них взвешенного вещества и хлорофилла *a*, нами использовались изображения видимого диапазона, цветосинтезированные

в естественных цветах. При помощи инструментария сервиса STS проводился синтез по комбинации оптических каналов 640–670, 530–590, 450–510 нм (RGB, *англ.* Red, Green, Blue) для сенсоров OLI ИСЗ Landsat-8 -9 и по комбинации каналов 650–680, 542–577, 456–523 нм (RGB) для сенсоров MSI ИСЗ Sentinel-2A, -2B.

Расчёт концентрации взвеси по спутниковым данным оптического диапазона проводился с помощью алгоритма Nechad 2016 (Nechad et al., 2015, 2016), который входит в программный комплекс ACOLITE.

С помощью интегрированного в систему STS картографического интерфейса строились карты распространения вод Вислы после их попадания в Гданьский залив, а с использованием подсистемы создания и ведения описаний явлений спутникового сервиса STS формировался массив описаний, содержащий их количественные характеристики.

Для получения метеорологической информации использовались как архивные данные о фактической погоде в районе интереса (<https://weatherspark.com/>), так и данные реанализа NCEP/NOAA (*англ.* National Center for Environmental Prediction/National Oceanic and Atmospheric Administration) из интегрированной в систему STS базы метеорологических данных (Уваров и др., 2013). Для получения информации об уровне воды в Висле на момент проведения спутниковых съёмок использовались данные уровнемерного поста Свибно (*польск.* Świbno), находящегося на расстоянии 3 км от устья Вислы (<https://gdansk.wody.gov.pl/images>). Можно говорить о том, что в периоды, когда река свободна от льда, режимы уровня и расхода воды совпадают, и обычно наиболее высокие уровни связаны с наибольшим расходом в периоды паводков и половодий (Расчеты..., 1989). Таким образом, для приведённых в статье примеров колебания уровня Вислы могут служить опосредованным индикатором колебаний её расхода.

Результаты спутниковых наблюдений

Большинство сценариев распространения вод Вислы в Гданьском заливе, выявленных нами на спутниковых изображениях, в основных чертах соответствовали ситуациям, ранее описанным в научных публикациях, основанных на натурных измерениях и модельных расчётах. В качестве примера на *рис. 2* приведены характерные примеры спутниковых изображений, отражающих структуру распространения вод Вислы в Гданьском заливе. На каждом из трёх приведённых спутниковых изображений плум вод Вислы отчётливо выделяется как мезомасштабная структура, отличающаяся повышенным содержанием взвеси с фиксированной исходной точкой — устьем реки. На всех изображениях ареал распространения речных вод в море выделяется за счёт цветового контраста между водами Вислы, как правило желтовато-коричневыми за счёт повышенного содержания взвешенного вещества, и водами залива в большинстве случаев имеющим сине-голубой оттенок.

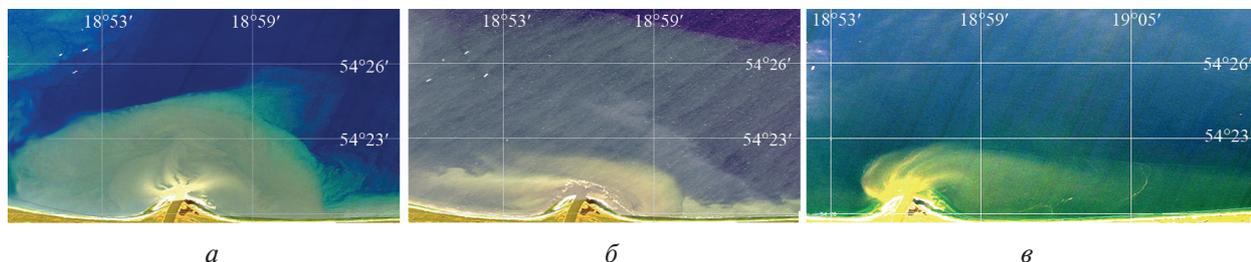


Рис. 2. Проявление выноса вод Вислы в Гданьский залив на спутниковых изображениях, цветосинтезированных по данным сенсора: *а* — OLI Landsat-9 от 02.05.2022, 09:43 UTC (*англ.* Coordinated Universal Time); *б* — OLI Landsat-9 от 05.05.2023, 09:43 UTC; *в* — OLI Landsat-8 от 03.11.2022, 09:37 UTC

На примере, представленном на *рис. 2а*, воды Вислы после попадания в Гданьский залив распространяются относительно симметрично по всем направлениям, формируя в непосред-

ственной близости к устью компактную округло-симметричную область с площадью около 94 км^2 , внешняя граница которой находится на расстоянии 7 км от устья. На момент проведения спутниковой съёмки и в предшествующее ей время в районе интереса наблюдался слабый северо-западный ветер со скоростью 2–3 м/с, высота уровня Вислы в районе Свибно составляла 510 см.

На изображении, представленном на *рис. 2б*, область смешения речных и морских вод, отличающаяся повышенной мутностью, имеющая площадь около 33 км^2 , распространяется в западном направлении на расстояние до 10 км от устья, удаляясь от него в мористую часть на расстояние до 4 км. Во время проведения спутниковой съёмки и накануне в данном районе наблюдался умеренный северо-восточный ветер, имеющий скорость 7–8 м/с, уровень Вислы в районе Свибно составлял 535 см.

На изображении, представленном на *рис. 2в*, плюм речных вод с повышенной мутностью, сформированный под воздействием западного ветра и имеющий площадь около 58 км^2 , распространяется в восточном направлении на расстояние порядка 18 км от устья с максимальным отклонением к северу около 3,5 км. Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составляла 519 см. В прибрежной зоне моря к востоку от устья реки выделяется зона вдольберегового шлейфа. Перенос взвешенного вещества на восток обусловлен присутствием вдольберегового течения, распространяющегося в том же направлении.

Приведённые выше примеры наглядно подтверждают, что на структуру распространения вод Вислы в Гданьском заливе существенным образом влияют ветер и вдольбереговые течения (Lavrova et al., 2016a). Как правило, характер течений в Гданьском заливе определяется в первую очередь ветровым полем и может изменяться во времени и в пространстве очень быстро (Лаврова и др., 2016; Gurova, Chubarenko, 2012; Kowalik, 1990).

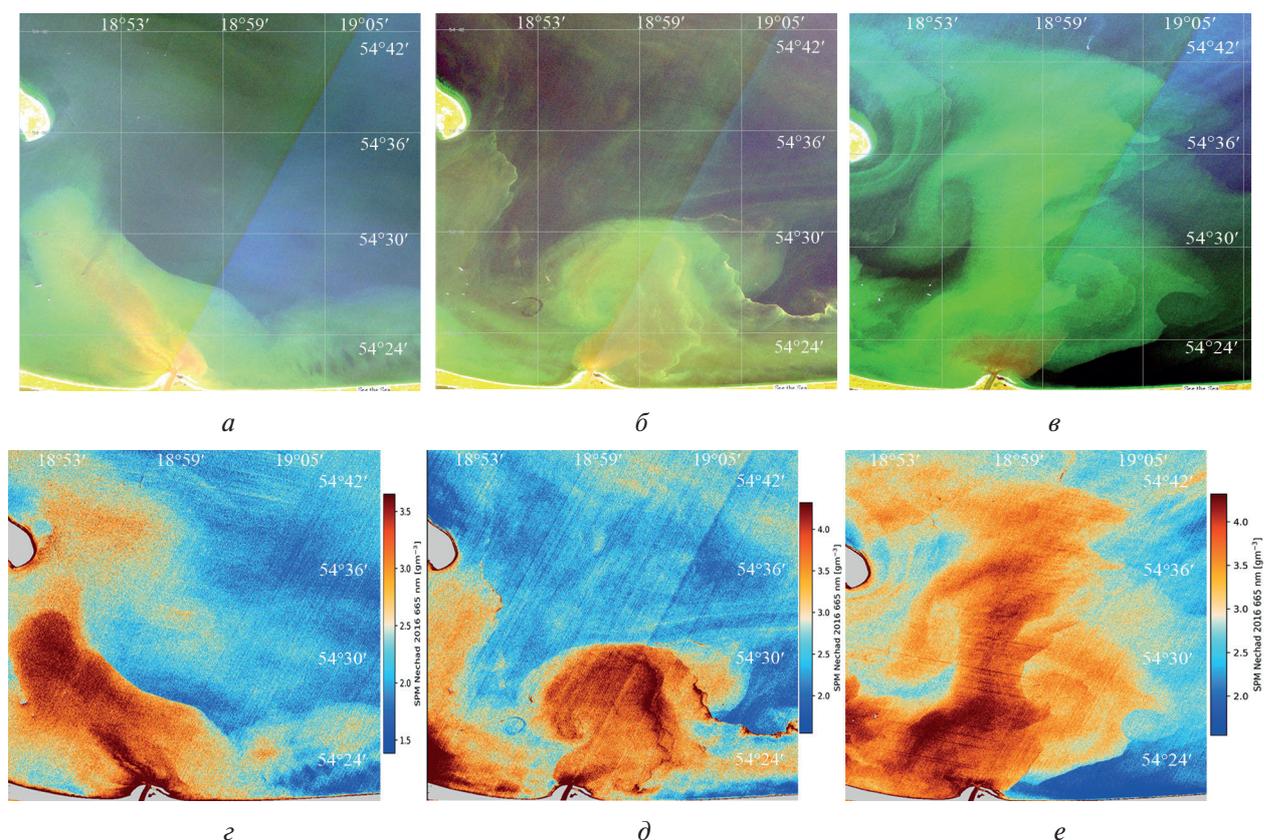


Рис. 3. Проявление эволюции и распространения выноса вод Вислы на спутниковых изображениях, цветосинтезированных по данным сенсоров: MSI Sentinel-2A от 07.09.2023, 10:05 UTC (*а*); MSI Sentinel-2B от 12.09.2023, 10:05 UTC (*б*); MSI Sentinel-2A от 17.09.2023, 10:05 UTC (*в*). Карты концентрации взвеси на те же моменты времени, построенные с использованием алгоритма Nechad 2016 (*г–е*)

Далее мы рассмотрим выявленные нами на основе спутниковой информации сценарии распространения вод Вислы в Гданьском заливе, отличные от описанных выше «стандартных» ситуаций.

Рассмотрим, например, как развивалась ситуация в сентябре 2023 г. На *рис. 3* (см. с. 241) приведены цветосинтезированные изображения, а также карты концентрации взвеси, построенные по данным спутникового сенсора MSI IC3 Sentinel-2A, -2B.

Изображение, представленное на *рис. 3а*, отражает момент начала эволюции плюма вод Вислы под влиянием ветра, меняющего своё направление. Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составила 531 см. Плюм сформировался под влиянием юго-восточного ветра, который превалировал в районе интереса в предыдущие сутки, а на момент получения спутникового изображения 7 сентября 2023 г. изменил своё направление на западное-северо-западное. Площадь выноса речных вод по спутниковому изображению составляла около 240 км² (см. *рис. 3г*).

В последующие пять суток в данном районе наблюдался слабый ветер переменного направления. В прибрежной зоне Гданьского залива вблизи устья р. Вислы начали формироваться вихревые структуры, что отчётливо видно на *рис. 3б, д*, содержащих данные за 12 сентября 2023 г. Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составляла 522 см.

На изображении, полученном 17 сентября 2023 г. и представленном на *рис. 3в*, видно, что воды Вислы, отличающиеся повышенным содержанием взвеси, оказались захвачены развивающимся вихрем, и, будучи вовлечены в связанные с вихрем поверхностные течения, распространились на площадь, превышающую 500 км². При этом содержащаяся в речных водах взвесь обнаруживается даже к северу от Хельской косы (см. *рис. 3е*). Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составляла 521 см.

Явным подтверждением развития в этот период времени вихревой активности в Гданьском заливе служит представленное на *рис. 4* спутниковое радиолокационное изображение.

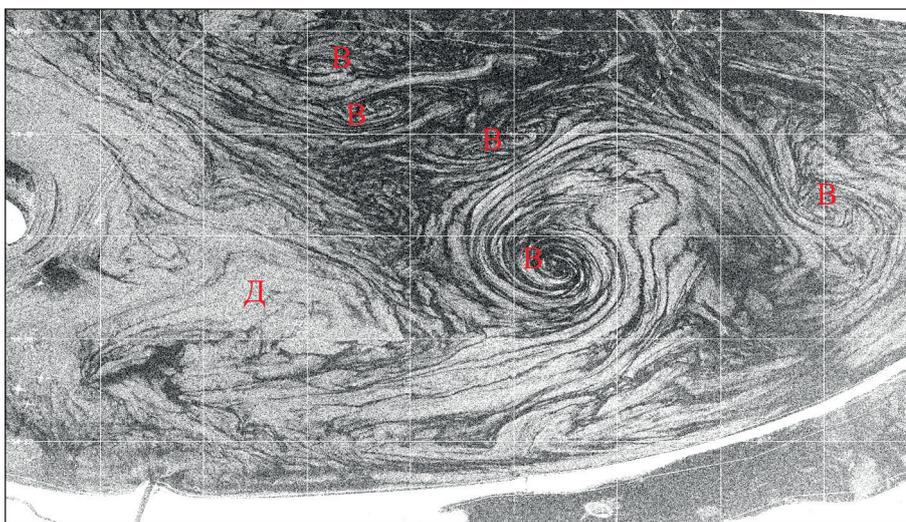


Рис. 4. Фрагмент изображения PCA C-SAR IC3 Sentinel-1A от 09.09.2023 г., 05:01 UTC, отображающий картину развития вихревых структур в Гданьском заливе

На данном радиолокационном изображении отчётливо выявляются спиральные вихри (обозначены буквой В на *рис. 4*) с индивидуальными размерами 3–15 км, имеющие тенденцию объединяться в совокупность вихрей — вихревые кластеры. Они визуализируются благодаря сликовым полосам, образованным плёнками поверхностно-активных веществ естественного происхождения, постоянно присутствующим на морской поверхности, особенно в тёплое время года. Кроме того, представленное на *рис. 4* РСА-изображение выявляет начальную стадию формирования вихревого диполя (буква Д на *рис. 4*) — квазисимметричной пространственной структуры, являющейся комбинацией узкой струи с парой вихрей проти-

воположного знака на конце, способной вызывать не только горизонтальное, но и вертикальное перемешивание вод путём переноса между более глубокими водами и прибрежной зоной (Краюшкин и др., 2022). Именно влияние вихревого диполя привело к развитию ситуации, представленной на рис. 3*в*, *е*, и переносу взвеси, содержащейся в речных водах, на расстояние до 40 км от устья в сторону моря и распространению её на большой площади.

Второй наглядный пример относится к концу мая – началу июня 2023 г. Спутниковые изображения и соответствующие им карты концентрации взвеси, полученные с использованием алгоритма Nechad 2016, приведены на рис. 5.

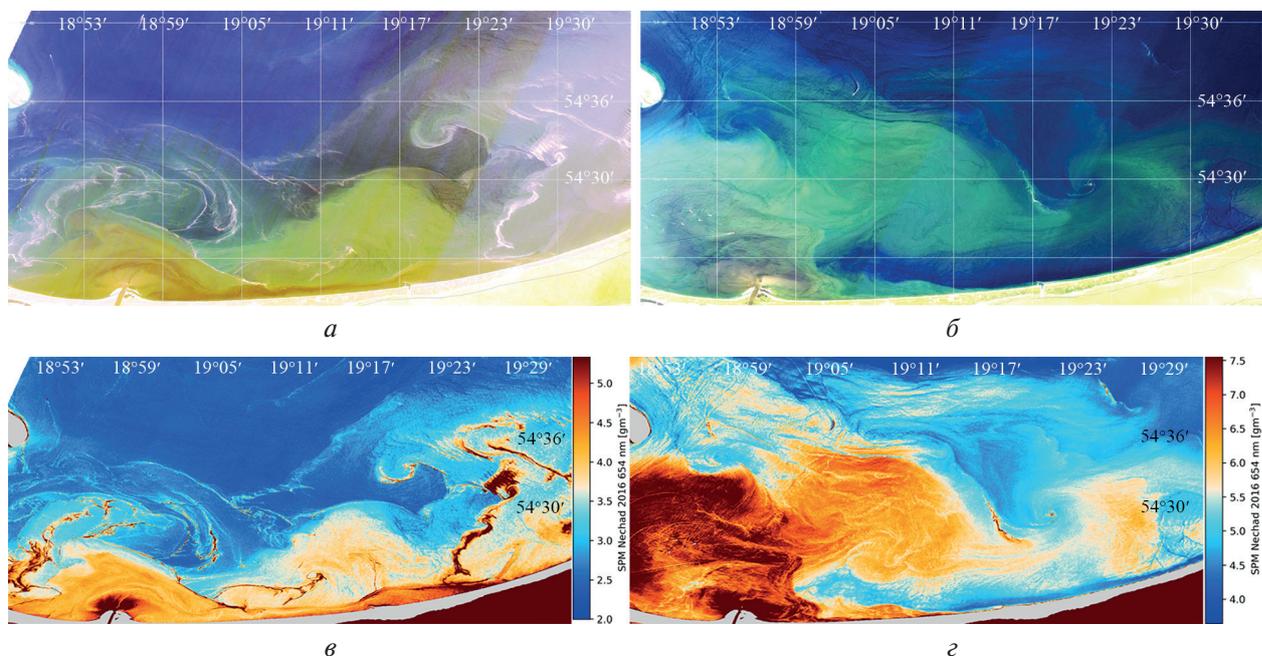


Рис. 5. Проявление эволюции и распространения выноса вод Вислы в Гданьский залив на спутниковых изображениях, цветосинтезированных по данным сенсоров: OLI Landsat-9 от 30.05.2023, 09:36 UTC (*а*); OLI Landsat-9 от 06.06.2023, 09:43 UTC (*б*). Карты концентрации взвеси на те же моменты времени, построенные с использованием алгоритма Nechad 2016 (*в*, *г*)

На изображении, полученном 30 мая 2023 г. (см. рис. 5*а*), явно проявляется картина развития вихревых процессов в Гданьском заливе. Наблюдаются как субмезомасштабные спиральные вихри, так и развивающиеся грибовидные диполи, постепенно вовлекающие в свои движения речные воды. Благодаря повышенной концентрации взвешенного вещества отчётливо виден плюм Вислы (см. также рис. 5*в*), имеющий площадь около 180 км², на границе которого выделяется гидрологический фронт, расположенный на расстоянии около 9 км от устья. Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составляла 522 см.

На изображении, полученном 6 июня 2023 г. (рис. 5*б*), можно видеть, что дальнейшее развитие вихревого диполя, вовлекающего в своё движение воды Вислы, попавшие в Гданьский залив, привело к существенному увеличению — в четыре раза — ареала распространения речных вод. Теперь его площадь достигает 830 км², при этом взвесь распространяется от устья Вислы на расстояние до 24 км в северо-западном направлении и до 27 км в северо-восточном (см. рис. 5*г*). Высота уровня Вислы в районе Свибно на момент наблюдений составляла 517 см.

Обсуждение результатов и выводы

Нами были проанализированы гидрометеорологические условия в районе интереса за май – сентябрь 2023 г. По результатам проведённого анализа можно утверждать, что во время

формирования ареалов распространения вод Вислы в Гданьский залив в мае – июне и сентябре 2023 г., выявленных по дистанционным данным и описанных выше, гидрометеорологические условия не выходили за рамки обычных. Приводной ветер изменялся от слабого до умеренного, при этом отсутствовали длительные периоды господства ветров постоянно-го направления, штормов не наблюдалось. Не наблюдалось также значительного превышения расхода воды в Висле вблизи устья над средним значением. На рис. 6 приведены графики ежедневного изменения уровня Вислы за май – июнь и сентябрь 2023 г. по измерениям на уровнемерном посту Свибно, расположенном в трёх километрах выше по течению от места впадения реки в море. Заметим, что уровень реки в эти периоды был примерно на полтора метра ниже критического уровня, значение которого в этой точке равно 680 см. В данном случае критический уровень – это уровень, с превышением которого начинается затопление и нанесение материального ущерба. И это становится ещё одним подтверждением отсутствия в период наблюдений экстремальных ситуаций, в частности паводков и наводнений, подобных описанным в работах (Lavrova et al., 2015; Zajaczkowski et al., 2010).

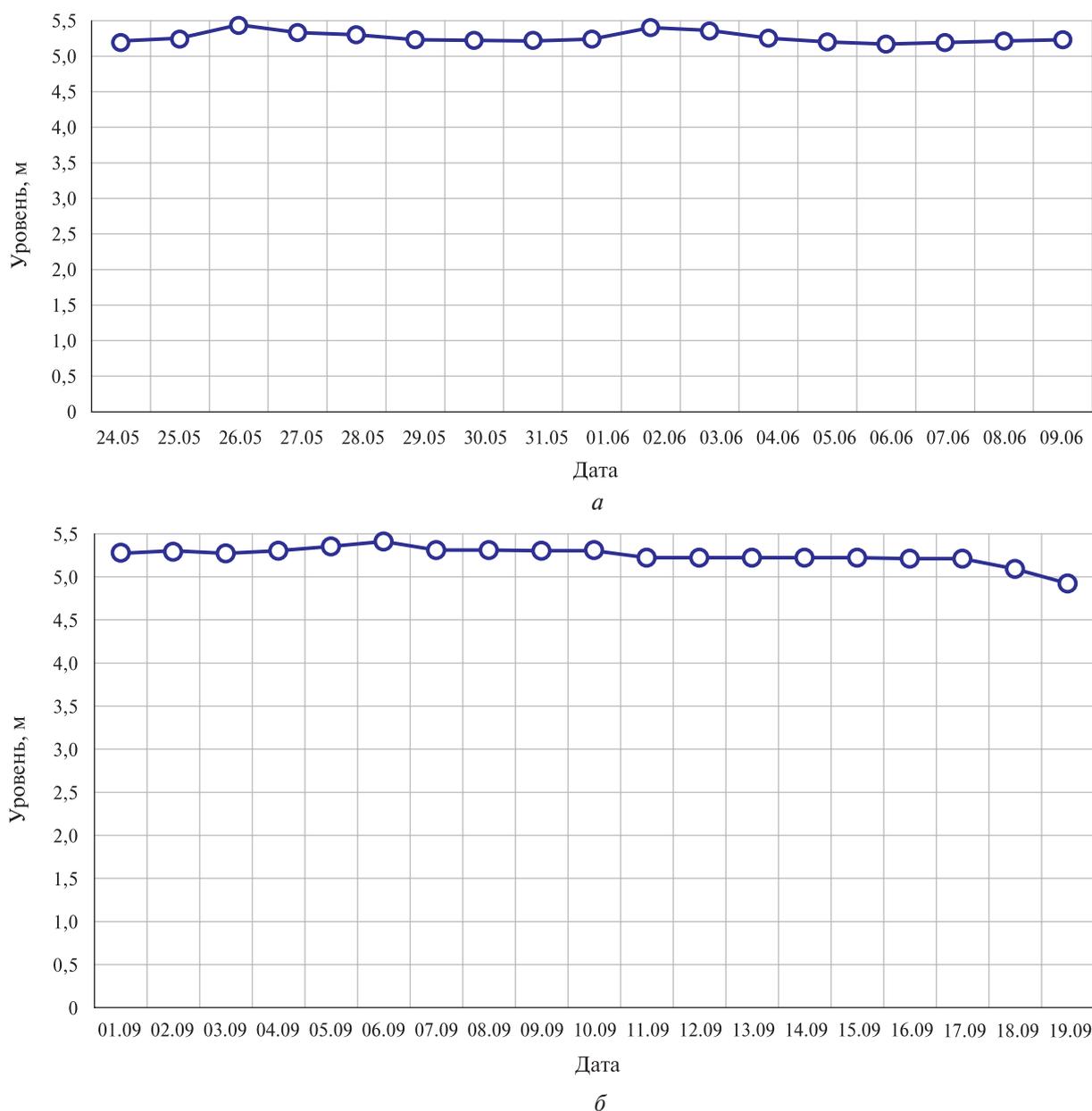


Рис. 6. Уровень Вислы по измерениям на уровнемерном посту в 2023 г.:
 а – май – июнь; б – сентябрь

На приведённых графиках видны небольшие колебания уровня реки. Подобные колебания в пределах 20 см в каждую сторону регулярно наблюдались на протяжении тёплого периода 2023 г. Сопоставление данных о колебаниях уровня Вислы и структуры выносов Вислы, выявляемых на спутниковых изображениях, позволяет утверждать, что в отсутствие развитой вихревой активности в заливе небольшое усиление расхода, соответствующее повышению уровня реки, приводило к увеличению площади выноса речных вод и повышению содержания взвеси. Именно такая ситуация наблюдалась 7 сентября 2023 г. (см. рис. 3а, з). На протяжении предыдущих двух суток отмечалось повышение уровня Вислы на 11 см, и под влиянием юго-восточного ветра сформировался факел выноса с площадью более 200 км², передний фронт которого на 22 км отстоял от устья реки.

Увеличение же ареала распространения вод Вислы в Гданьском заливе до значительных площадей, зачастую превышающих 500 км², имелось лишь в ситуации развития активных вихревых движений в заливе и вне зависимости от колебаний уровня реки. Такие ситуации наблюдались не менее чем в 20 % случаев выявления выносов вод Вислы в залив на спутниковых изображениях, полученных в тёплый сезон (с мая по сентябрь).

Проведённое исследование показало, что мезомасштабные и мелкомасштабные вихревые структуры с характерными горизонтальными масштабами 5–20 км, развивающиеся в Гданьском заливе, могут оказывать существенное влияние на распространение вод Вислы после их попадания в залив и должны учитываться как один из основных факторов, контролирующего формирование ареала распространения речных вод и переноса взвешенного вещества, наряду с приводным ветром и вдольбереговыми течениями. Причём основной вклад в перенос взвеси, попавшей в залив с речными водами, вносят развивающиеся в заливе вихревые диполи.

Работа выполнена в рамках госзадания Института космических исследований РАН, тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8. Обработка и анализ спутниковых данных проводились с использованием возможностей Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» с помощью инструментария информационной системы See the Sea.

Литература

1. Гинзбург А. И., Булычева Е. В., Костяной А. Г. и др. Вихревая динамика в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковой радиолокации // *Океанология*. 2015. Т. 55. № 6. С. 893–902. DOI: 10.7868/S0030157415060064.
2. Гинзбург А. И., Крек Е. В., Костяной А. Г. и др. Эволюция мезомасштабного антициклонического вихря и вихревых диполей/мультиполей на его основе в юго-восточной Балтике (спутниковая информация: май–июль 2015 г.) // *Океанолог. исслед.* 2017. Т. 45. № 1. С. 10–22. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).
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. Копелевич О. В., Вазюля С. В., Шеберстов С. В. и др. Взвешенное вещество в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным // *Океанология*. 2016. Т. 56(1). С. 51–59. DOI: 10.7868/S0030157416010068.
5. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р. и др. Формирование и распространение вихревого диполя за мысом Таран в Юго-Восточной Балтике // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 4. С. 214–221. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
6. Краюшкин Е. В., Лаврова О. Ю., Назирова К. Р. и др. Трёхмерная структура и динамика вод в прибрежных вихревых диполях в юго-восточной части Балтийского моря: результаты спутниковых наблюдений и подспутниковых измерений летом 2021 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19. № 6. С. 265–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
7. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с.
8. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Уваров И. А. и др. 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.
9. 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.
 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. Назирова К. Р., Лаврова О. Ю., Алферьева Я. О. и др. Пространственно-временная изменчивость плюмов рек Терек и Сулак по спутниковым данным и синхронным натурным измерениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 285–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
 12. Осадчиев А. А. Речные плюмы. М.: Науч. мир. 2021. 285 с.
 13. Расчеты и прогнозы гидрологических характеристик: Междуведомств. сб. науч. тр. Л.: ЛГМИ, 1989. Т. 103. 175 с.
 14. Уваров И. А., Халикова О. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Лупян Е. А., Матвеев А. А., Платонов А. Е., Прошин А. А., Толпин В. А., Крашенинникова Ю. С. Организация работы с метеорологической информацией в информационных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 30–45.
 15. Ayad M., Li J., Holt B. et al. Analysis and classification of stormwater and wastewater runoff from the Tijuana River using remote sensing imagery // *Frontiers in Environmental Science*. 2020. V. 8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599030>.
 16. Bojanowski R. Trace elements and the Vistula — the impact on their distribution in the Gulf of Gdansk // *Studia i Materiały Oceanologiczne*. 1981. V. 34. P. 53–92 (in Polish).
 17. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S. Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data // *Continental Shelf Research*. 2016. V. 112. P. 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009>.
 18. Cyberska B., Krzyminski W. Extension of the Vistula river waters in the Gulf of Gdansk // *Proc. 16th Conf. Baltic Oceanographers*. 1988. P. 290–305.
 19. Cyberska B., Trzosinska A. Environmental conditions in the Gulf of Gdansk during the last decade, 1974–1983 // *Proc. 14th Conf. Baltic Oceanographers*. 1984. P. 490–509.
 20. 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. P. 12909–12941. <https://doi.org/10.3390/rs71012909>.
 21. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. et al. Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2009. V. 81. P. 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>.
 22. Grelowski A., Wojewodzki T. The impact of the Vistula river on the hydrological conditions in the Gulf of Gdansk in 1994 // *Bull. Sea Fisheries Institute*. 1996. V. 137. No. 1. P. 23–33.
 23. Gurova E., Chubarenko B. Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic // *Oceanologia*. 2012. V. 54. No. 4. P. 631–654. <https://doi.org/10.5697/oc.54-4.631>.
 24. Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006 // *AMBIO: J. Human Environment*. 2012. V. 41. P. 534–548. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x>.
 25. HELCOM (2004). The fourth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-4) // *Baltic Sea Environment Proc.* 2004. No. 93. 188 p.
 26. Kostianoy A. G., Lebedev A., Solovyov D. M. et al. On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 25. P. 63–78. DOI: 10.37828/em.2019.25.7.
 27. Kowalik Z. Currents // *The Gulf of Gdańsk*. Wrocław: Wyd. Geol., 1990. P. 140–153.
 28. Kowalik Z., Wroblewski A. Steady wind-driven currents in the Gulf of Gdansk // *Acta Geophysica Polonica*. 1971. V. 19. No. 2. P. 111–125 (in Polish).
 29. Krezel A., Cyberski J. Influence of the Vistula river on suspended matter content in the Gulf of Gdansk waters // *Studia i Materiały Oceanologiczne*. 1993. V. 64. P. 27–39.
 30. Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Mityagina M. I. et al. Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data // *Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*. 2015. V. 9638. DOI: 10.1117/12.2193905.
 31. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. et al. (2016a), Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of Vistula lagoon waters into the Baltic Sea: Results of a combined experiment // *IEEE J.*

- Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 11. P. 5193–5201. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
32. Lavrova O. Y., Soloviev D. M., Strochkov M. A. et al. (2016b), River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data // Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2016. Vol. 9999. Article 99990G. <https://doi.org/10.1117/12.2241312>.
 33. Lavrova O. Yu., Krayushkin E. V., Nazirova K. R. et al. Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements // Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2018. V. 10784. Article 1078404. DOI: 10.1117/12.2325463.
 34. Majewski A. Hydrological characteristics of the Polish coast estuarine waters // Prace Państw. Instytut. Hydrol.-Meteorol. 1972. V. 105. P. 3–40 (in Polish).
 35. Matciak M, Nowacki J. The Vistula River discharge front—surface observations // Oceanologia. 1995. V. 37. No. 1. P. 75–88.
 36. Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al. CoastColour Round Robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters // Earth System Science Data. 2015. V. 7. No. 7. P. 319–348. <https://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>.
 37. Nechad B., Dogliotti A., Ruddick K. G. et al. Particulate backscattering retrieval from remotely-sensed turbidity in various coastal and riverine turbid waters // Proc. ESA Living Planet Symp. 2016. V. 740. Article 419.
 38. Osadchiv A. A., Sedakov R. O. Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2 // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 221. P. 522–533. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
 39. Ostrowska M., Darecki M., Krezel A. et al. Practical applicability and preliminary results of the Baltic environmental satellite remote sensing system (SatBaltyk) // Polish Maritime Research. 2015. V. 22. No. 3. P. 43–49. <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0055>.
 40. Ostrowska M., Ficek D., Stoltmann D. et al. Ten years of remote sensing and analyses of the Baltic Sea primary production (2010–2019) // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. V. 26. Article 100715. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100715>.
 41. The Gulf of Gdansk / ed. Majewski A. Wrocław: Wyd. Geol., 1990. 502 p. (in Polish).
 42. Zajaczkowski M., Darecki M., Szczucinski W. Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdansk during the May 2010 flood // Oceanologia. 2010. V. 52. No. 2. P. 311–317.

The influence of hydrodynamic processes on the distribution of Vistula River waters in the Gulf of Gdansk as seen in remote sensing data

M. I. Mityagina, O. Yu. Lavrova, P. D. Zhadanova

Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia
E-mail: mityag@iki.rssi.ru

The article presents the results of a study aimed at clarifying and supplementing currently existing ideas about the nature of the distribution of the Vistula waters rich in suspended and organic matter in the Gulf of Gdansk. The experimental basis for identifying, reconstructing, and further analyzing the spatiotemporal characteristics of the distribution of the Vistula waters at its confluence with the Gulf of Gdansk was high spatial resolution data in the visible range from the MSI (Multispectral Instrument) of Sentinel-2 and OLI/OLI-2 (Operational Land Imager) of Landsat-8, -9 satellites obtained over a two-year observation period from May 1, 2022 to April 30, 2024. To restore a complete picture of the development of hydrodynamic processes in the bay, we used data from satellite synthetic aperture radars C-SAR of satellites Sentinel-1A, -1B obtained over the same period. We considered various scenarios for the distribution of Vistula River waters in the Gulf of Gdansk, which we identified on satellite images. The role of mesoscale and small-scale vortex structures with a characteristic horizontal scale of 5–20 km, developing in the Gulf of Gdansk, has been established as one of the main factors controlling the formation of areas of distribution of river waters and the transport of suspended matter, along with the near-shore wind and along-shore currents. The necessity of taking into account the contribution of hydrodynamic processes in the bay, primarily meso- and submesoscale eddies, which

are capable of transporting water and impurities of various nature contained in it over long distances, is substantiated for a reliable assessment of the area of distribution of river waters. The main contribution to transporting suspended matter entering the Gulf of Gdansk with river waters is from vortex dipoles developing in the bay. Further, we emphasized remote sensing as a tool for obtaining detailed information about the spatiotemporal distribution of vortex structures in areas of interest.

Keywords: satellite remote sensing, eutrophication, river plumes, Vistula River, Baltic Sea, vortical processes in the sea, eddy dipole, suspended matter

Accepted: 05.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-237-250

References

1. Ginzburg A. I., Bulycheva E. V., Kostianoy A. G. et al., Vortex dynamics in the southeastern Baltic Sea from satellite radar data, *Oceanology*, 2015, Vol. 55, pp. 805–813, <https://doi.org/10.1134/S0001437015060065>.
2. Ginzburg A. I., Krek E. V., Kostianoy A. G. et al., Evolution of mesoscale anticyclonic vortex and vortex dipoles/multipoles on its base in the South-Eastern Baltic (satellite information: May–July 2015), *J. Oceanological Research*, 2017, Vol. 45, No. 1, pp. 10–22 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2017.45(1).
3. Zavalov 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, pp. 265–280, <https://doi.org/10.1134/S0001437014030151>.
4. Kopelevich O., Vazyulya S., Sheberstov S. et al., Suspended matter in the surface layer of the Southeastern Baltic from satellite data, *Oceanology*, 2016, Vol. 56(1), pp. 46–54, DOI: 10.1134/S0001437016010069.
5. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., K. R. Nazirova et al., formation and propagation of an eddy dipole at Cape Taran in the southeast Baltic Sea, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 214–221 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-214-221.
6. Krayushkin E. V., Lavrova O. Yu., Nazirova K. R. et al., Three-dimensional structure and dynamics of waters in coastal eddy dipoles in the southeastern Baltic Sea: Results of concurrent satellite and field measurements in summer 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 265–279 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-265-279.
7. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Kostianoy A. G., *Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk*, Moscow: IKI RAS, 2016, 334 p. (in Russian).
8. Lavrova O. Yu., Mityagina M. I., Uvarov I. A. et al., 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.
9. 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.
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. Nazirova K. R., Lavrova O. Yu., Alferyeva Ya. O. et al., Spatiotemporal plume variability of Terek and Sulak rivers from satellite data and concurrent in situ measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 285–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-285-303.
12. Osadchiv A. A., *Rechnye plyumy* (River plumes), Moscow: Nauchnyi mir, 2021, 285 p. (in Russian).
13. *Raschety i prognozy gidrologicheskikh harakteristik: Mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnykh trudov* (Calculations and forecasts of hydrological characteristics: Interdepartmental collection of scientific papers), Leningrad: LGMI, 1989, Vol. 103, 175 p.
14. Uvarov I. A., Khalikova O. A., Balashov I. V., Burtsev M. A., Loupian E. A., Matveev A. M., Platonov A. E., Proshin A. A., Tolpin V. A., Krashennnikova Yu. S., Meteorological data management in framework of the satellite monitoring information systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 30–45 (in Russian).
15. Ayad M., Li J., Holt B. et al., Analysis and classification of stormwater and wastewater runoff from the Tijuana River using remote sensing imagery, *Frontiers in Environmental Science*, 2020, Vol. 8, <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.599030>.

16. Bojanowski R., Trace elements and the Vistula — the impact on their distribution in the Gulf of Gdansk, *Studia i Materialy Oceanologiczne*, 1981, Vol. 34, pp. 53–92 (in Polish).
17. Constantin S., Doxaran D., Constantinescu S., Estimation of water turbidity and analysis of its spatio-temporal variability in the Danube River plume (Black Sea) using MODIS satellite data, *Continental Shelf Research*, 2016, Vol. 112, pp. 14–30, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.009>.
18. Cyberska B., Krzyminski W., Extension of the Vistula River waters in the Gulf of Gdansk, *Proc. 16th Conf. Baltic Oceanographers*, 1988, pp. 290–305.
19. Cyberska B., Trzosinska A., Environmental conditions in the Gulf of Gdansk during the last decade, 1974–1983, *Proc. 14th Conf. Baltic Oceanographers*, 1984, pp. 490–509.
20. 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>.
21. Doxaran D., Froidefond J.-M., Castaing P. et al., Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, Vol. 81, pp. 321–332, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>.
22. Grelowski A., Wojewodzki T., The impact of the Vistula river on the hydrological conditions in the Gulf of Gdansk in 1994, *Bull. Sea Fisheries Institute*, 1996, Vol. 137, No. 1, pp. 23–33.
23. Gurova E., Chubarenko B., Remote-sensing observations of coastal sub-mesoscale eddies in the south-eastern Baltic, *Oceanologia*, 2012, Vol. 54, No. 4, pp. 631–654, <https://doi.org/10.5697/oc.54-4.631>.
24. Gustafsson B.G., Schenk F., Blenckner T., Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006, *AMBIO: J. Human Environment*, 2012, Vol. 41, pp. 534–548, <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0318-x>.
25. HELCOM (2004), The fourth Baltic Sea pollution load compilation (PLC-4), *Baltic Sea Environment Proc.*, 2004, No. 93, 188 p.
26. Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Solovyov D.M. et al., On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea, *Ecologica Montenegrina*, 2019, Vol. 25, pp. 63–78, DOI: 10.37828/em.2019.25.7.
27. Kowalik Z., Currents, *The Gulf of Gdansk*, Wroclaw: Wyd. Geol., 1990, pp. 140–153.
28. Kowalik Z., Wroblewski A., Steady wind-driven currents in the Gulf of Gdansk, *Acta Geophysica Polonica*, 1971, Vol. 19, No. 2, pp. 111–125 (in Polish).
29. Krezel A., Cyberski J., Influence of the Vistula River on suspended matter content in the Gulf of Gdansk waters, *Studia i Materialy Oceanologiczne*, 1993, Vol. 64, pp. 27–39.
30. Lavrova O.Yu., Soloviev D.M., Mityagina M.I. et al., Revealing the influence of various factors on concentration and spatial distribution of suspended matter based on remote sensing data, *Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2015, Vol. 9638, DOI: 10.1117/12.2193905.
31. Lavrova O., Krayushkin E., Golenko M. et al. (2016a), Effect of wind and hydrographic conditions on the transport of vistula lagoon waters into the Baltic Sea: Results of a combined experiment, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, Vol. 9, Issue 11, pp. 5193–5201, DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2580602.
32. Lavrova O.Y., Soloviev D.M., Stochkov M.A. et al. (2016b), River plumes investigation using Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data, *Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2016, Vol. 9999, Article 99990G, <https://doi.org/10.1117/12.2241312>.
33. Lavrova O.Yu., Krayushkin E.V., Nazirova K.R. et al., Vortex structures in the Southeastern Baltic Sea: satellite observations and concurrent measurements, *Proc. SPIE: Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions*, 2018, Vol. 10784, Article 1078404, DOI: 10.1117/12.2325463.
34. Majewski A., Hydrological characteristics of the Polish coast estuarine waters, *Prace Państw. Instyt. Hydrol.-Meteorol.*, 1972, Vol. 105, pp. 3–40 (in Polish).
35. Matciak M., Nowacki J., The Vistula River discharge front—surface observations, *Oceanologia*, 1995, Vol. 37, No. 1, pp. 75–88.
36. Nechad B., Ruddick K., Schroeder T. et al., CoastColour Round Robin datasets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters, *Earth System Science Data*, 2015, Vol. 7, No. 7, pp. 319–348, <https://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>.
37. Nechad B., Dogliotti A., Ruddick K.G. et al., Particulate backscattering retrieval from remotely-sensed turbidity in various coastal and riverine turbid waters, *Proc. ESA Living Planet Symp.*, 2016, Vol. 740, Article 419.
38. Osadchiv A.A., Sedakov R.O., Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat-8 and Sentinel-2, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 221, pp. 522–533, DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.043.
39. Ostrowska M., Darecki M., Krezel A. et al., Practical applicability and preliminary results of the Baltic environmental satellite remote sensing system (SatBałtyk), *Polish Maritime Research*, 2015, Vol. 22, No. 3, pp. 43–49, <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0055>.

40. Ostrowska M., Ficek D., Stoltmann D. et al., Ten years of remote sensing and analyses of the Baltic Sea primary production (2010–2019), *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, Vol. 26, Article 100715, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100715>.
41. *The Gulf of Gdansk*, Majewski A. (ed.), Wroclaw: Wyd. Geol., 1990, 502 p. (in Polish).
42. Zajaczkowski M., Darecki M., Szczucinski W., Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdansk during the May 2010 flood, *Oceanologia*, 2010, Vol. 52, No. 2, pp. 311–317.