

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРИУСТЬЕВОЙ
ЗОНЕ ДУНАЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯА. В. Медведева*¹, Т. В. Михайличенко¹, С. В. Станичный¹, и В. В. Булатов²¹Морской гидрофизический институт Российской академии наук, Севастополь, Россия²Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия* **Контакт:** Алеся Викторовна Медведева, suomi-npp@mail.ru

Для приустьевой зоны Дуная рассмотрены механизмы проявления внутренних волн в спутниковых данных оптического диапазона. Выделены 3 основных механизма проявления внутренних волн – ранее описанные динамический (за счет изменения шероховатости морской поверхности в конвергентных зонах, создаваемых движущейся внутренней волной), сликовый – когда в зонах конвергенции скапливаются поверхностно активные вещества, и новый – за счет изменения яркости морской поверхности при модуляции внутренней волной толщины рассеивающего слоя. Для анализа были использованы данные сканера OLI Landsat-8 за 2015–2019 годы. Показано, что в различных ситуациях внутренние волны могут проявляться либо за счет различных механизмов, либо только за счет какого-то одного. Построены суммарные карты проявлений внутренних волн в исследуемом районе. Дополнительно рассмотрены ситуации с квазисинхронными данными MSI Sentinel-2 и C-SAR Sentinel-1, на которых отображались пакеты внутренних волн. Подбор таких пар позволил оценить фазовые скорости внутренних волн, которые составили от 0,05 м/с (0,19 км/ч) до 0,95 м/с (3,43 км/ч) в различных гидрометеорологических ситуациях. Представлены примеры трансформации фронта внутренних волн на субмезомасштабных вихрях.

Ключевые слова: Черное море, Дунай, устье Дуная, спектральные характеристики, внутренние волны, оптические изображения, спутниковые данные, скорости внутренних волн, OLI Landsat-8.

Цитирование: Медведева, А. В., Т. В. Михайличенко, С. В. Станичный, и В. В. Булатов Особенности проявления внутренних волн в приустьевой зоне Дуная по спутниковым данным высокого разрешения // Russian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Т. 23. — ES6008. — DOI: 10.2205/2023es000869 — EDN: BYEYMH

Введение

В стратифицированном океане внутренние волны – достаточно типичное явление [Eckart, 1961]. Интерес к изучению внутренних волн определяется, в первую очередь, переносом энергии движения, а также возможным воздействием на окружающую среду за счет перемешивания и воздействия на компоненты морской экосистемы [Sabinin et al., 2004]. Одним из основных источников генерации внутренних волн в Мировом океане являются приливы [Bondur et al., 2015].

Черное море считается бесприливным бассейном, однако на основе контактных наблюдений внутренние волны уверенно регистрировались как у Крымского, так и у Кавказского побережий. [Иванов и Серебряный, 1985; Ivanov et al., 2019]. В бесприливных морях генерация внутренних волн может инициироваться геострофическими течениями, взаимодействиями суб- и мезомасштабных процессов, [Лаврова и др., 2008; Митягина и Лаврова, 2010; Khimchenko et al., 2022], речными плюмами [Nash and Mount, 2005], процессами, связанными с развитием апвеллинга [Митягина и Лаврова, 2010]. В работах [Серебряный и Иванов, 2013; Bondur et al., 2019] также указывается на инициирование внутренних волн интенсивным метеорологическим воздействием.

<https://elibrary.ru/byeymh>

Получено: 19 июня 2023 г.

Принято: 30 августа 2023 г.

Опубликовано: 30 декабря 2023 г.



© 2023. Коллектив авторов.

С появлением спутниковых данных высокого пространственного разрешения появилось достаточно много работ, анализирующих проявление внутренних волн по изменениям характеристик поверхностного слоя моря. [Митягина и Лаврова, 2010; Lavrova and Mityagina, 2017]. В большинстве этих работ анализировались радиолокационные данные. Основным механизмом воздействия внутренних волн на поверхность моря реализуется через создание волной системы конвергентно-дивергентных течений в верхнем слое и их воздействием на характеристики поверхности [Alpers, 1985]. Принято различать два типа воздействия внутренних волн на шероховатость поверхности [Robinson, 2004]:

- динамический, когда в конвергентных зонах изменяются характеристики мелко-масштабных волн (а, соответственно, отражение и рассеяние) или характеристики обрушений волн (доля поверхности, покрытой пеной);
- сликовый, когда в конвергентных зонах могут скапливаться поверхностно активные вещества (ПАВ).

Второй тип воздействия, как правило, реализуется при слабых ветрах.

В оптическом диапазоне излучение морской поверхности (как при активном [Bulatov and Ponomarev, 2023], так и при пассивном зондировании) формируется отраженной от поверхности и рассеянной в толще воды компонентами. И поэтому, кроме перечисленных выше механизмов воздействия, что изменяют отражательные свойства морской поверхности под воздействием внутренних волн [Lavrova et al., 2014], можно выделить еще механизм модуляции толщины рассеивающего слоя моря. В этом случае при повышенной мутности верхнего слоя во впадинах внутренних волн рассеяние увеличивается за счет увеличения рассеивающих частиц в столбе воды. Как правило, этот механизм проявления внутренних волн обнаруживается вблизи речных плумов и в зонах развития рассеивающего фитопланктона (кокколитофорид).

Районы вблизи речных эстуариев представляют собой отдельный интерес с точки зрения существования внутренних волн из-за формирования сложной вертикальной стратификации в связи с различием морских и пресных вод по температуре и солености. Так, в северо-западной части Черного моря мощный пресноводный вклад осуществляется рекой Дунай.

В настоящей работе на основе данных спутникового сканера OLI Landsat-8 проведен анализ различных механизмов проявления внутренних волн в приустьевой зоне Дуная, а также получен ряд характеристик внутренних волн с использованием дополнительных квазисинхронных данных MSI Sentinel-2 и C-SAR Sentinel-1.

Методы и материалы

Отобраны оптические спутниковые снимки высокого разрешения OLI Landsat-8 L1 (Источник загрузки USGS EarthExplorer – [USGS, 2022]) с 2015 по 2019 гг., на которых зафиксирована дельта Дуная. Сценами (маркированы номерами LC08_L1TP_180029 и LC08_L1TP_181029) охватываются две области, обусловленные полосами захвата сенсора OLI спутника Landsat-8: значительная часть дельты Дуная и прибрежная область южнее (по широте $44,85^\circ$ на 21,8 км от берега) и полностью захваченная сенсором спутника дельта Дуная и мористая часть – по широте $44,85^\circ$ на 143,5 км от берега (рис. 1а, 1б).

Предварительный отбор указанных данных выполнялся с помощью онлайн-сервиса Sentinelhub Playground [Sentinelhub Playground, 2022]) на основе таких критериев, как отсутствие или незначительный процент облачного покрова. Дополнительно к отобранным снимкам с помощью этого же сервиса проверялось наличие квазисинхронных изображений (с фиксацией района исследования в пределах одних суток) других спутниковых сенсоров – оптического MSI Sentinel-2 L1 и радиолокационного C-SAR Sentinel-1 с поляризацией VV (Источник загрузки Copernicus Open Access Hub – [Copernicus Open Access Hub, 2022]). Затем загруженные данные обрабатывались в среде Sentinel Application Platform (SNAP), – в частности, для выявления и оценки особенностей проявления внутренних волн составлялись как RGB-композиции в псевдонатуральных

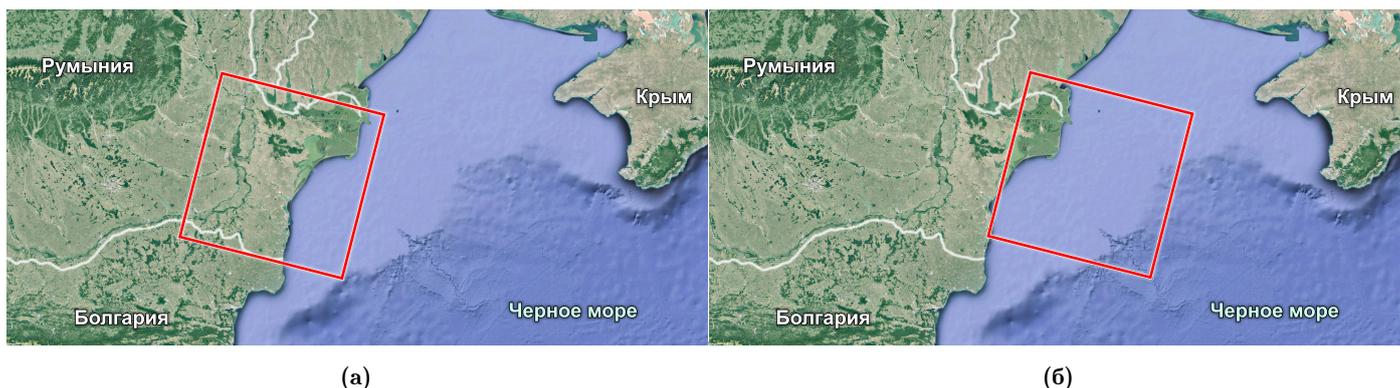


Рис. 1. Положение сцен OLI Landsat-8, определяющих границы района исследования.

цветах, которые представляют собой сочетание отраженного и рассеянного излучений, так и использовались каналы и комбинации каналов с устраненным отраженным или рассеянным излучением. Для оценки отражённой компоненты излучения использовались канал OLI Landsat-8 с разрешением 30 м B05 (865 нм) и канал MSI Sentinel-2 с разрешением 10 м B08 (842 нм). Минимизация отраженного излучения (и проявление рассеянного) осуществлялась путем комбинации каналов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов: для OLI Landsat-8 – разница каналов с разрешением 30 м Green (560 нм) и Near Infrared (865 нм), для MSI Sentinel-2 – разница каналов с разрешением 10 м B03 (560 нм) и B08 (842 нм).

Для последовательных (квазисинхронных) сцен OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2, C-SAR Sentinel-1 с проявлением пакетов внутренних волн в пределах одних суток, дополнительно применялась опция Reprojection с целью их преобразования в изображения с одинаковыми размерами и географической сеткой для последующих пространственных и динамических расчетов в геоинформационной системе Google Earth Pro. Фрагменты пар сцен с выделенными внутренними волнами, преобразованные в формат .kmz, загружались в указанную ГИС, где автоматически совмещались по данным географических координат. Сдвиг первой волны в пакете внутренних волн рассчитывался путем визуального выделения наиболее контрастных пикселей (группы пикселей) на квазисинхронных изображениях с последующим измерением расстояния между ними, для каждого пакета наносилось от 5 до 27 треков. Время зондирования района исследования извлекалось из метаданных OLI Landsat-8. Для MSI Sentinel-2, метаданные которых содержат время начала периода обращения (витка), информация о времени была получена с помощью плагинов Sentinel-2A(2B) – Orbit Track & Time, включенных в систему EOSDIS Worldview [EOSDIS, 2022]). Время C-SAR Sentinel-1 было получено аналогичным способом – через плагины Sentinel-1A(1B) Orbit Track & Time. В связи с указанными особенностями извлечения времени при вычислении разницы фиксации района сенсорами OLI Landsat-8, MSI Sentinel-2 и C-SAR Sentinel-1 могут иметься погрешности в единицы секунд.

Обсуждение результатов

Картирование и анализ проявления внутренних волн осуществлялись на основе сцен с наиболее интенсивным и многочисленным проявлением внутренних волн, преимущественно за весенне-летний период (единично – за другие сезоны). Так, для первого района исследования (рис. 1а) было использовано 8 сцен OLI Landsat-8 L1, для второго (рис. 1б) – 12 сцен. При комплексном анализе всех отобранных сцен OLI Landsat-8 было отмечено, что в приустьевой зоне Дуная проявления внутренних волн различаются по своим спектральным характеристикам в связи с интенсивностью содержания взвешенного вещества в водах. Преимущественно обнаруживались пакеты внутренних волн с проявлением исключительно в отраженном излучении и в меньшей степени – с проявлением исключительно в рассеянном излучении, одновременным пол-

ным проявлением в отраженном и рассеянном излучении, фрагментарным проявлением в одном виде излучения и полным или фрагментарным в другом.

При проявлении внутренних волн исключительно в отраженном сигнале (рис. 2а, 2б, 2в) предполагается, что сгенерированный пакет перемещается по той части акватории, где концентрация взвешенного вещества недостаточна для обнаружения спутниковыми сенсорами процессов его модулирования или взвешенное вещество практически не включается в орбитальные течения в приповерхностном слое вод. При анализе каждой сцены выявляется, что преимущественно такого рода внутренние волны генерируются в областях с относительно низким сигналом на каналах видимого диапазона (особенно в пределах 480–560 нм), то есть, в областях с невысокими концентрациями взвешенного вещества.

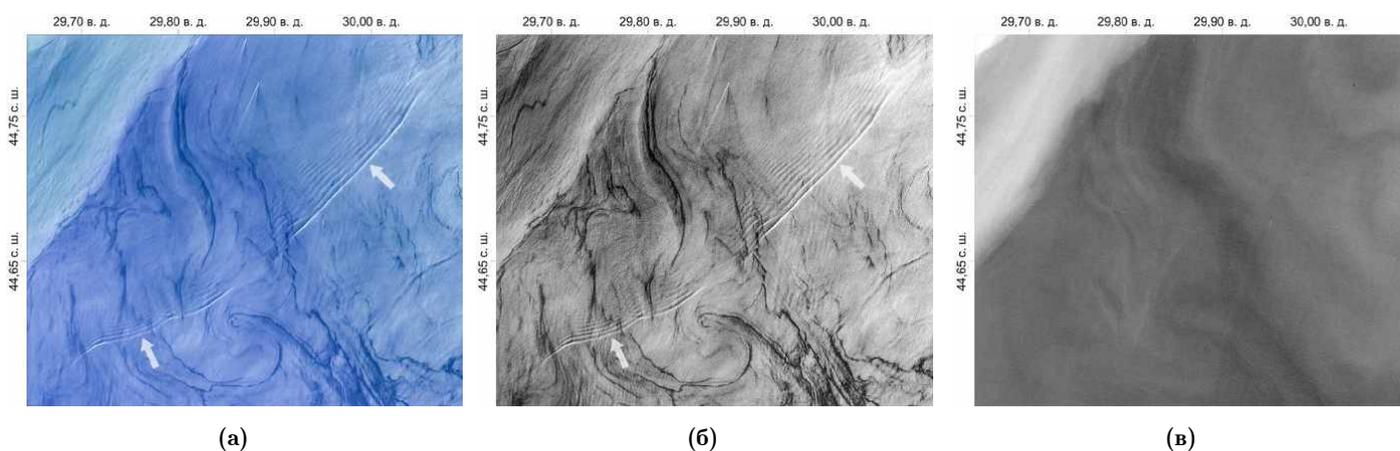


Рис. 2. Фрагменты сцены OLI Landsat-8 L1 от 17.05.2015 г. с разным сочетанием каналов: а – RGB-композит (внутренние волны проявляются), б – отраженное излучение (внутренние волны проявляются), в – рассеянное излучение (внутренние волны не проявляются).

Что касается внутренних волн, которые выявляются одновременно в отраженном и рассеянном излучении (рис. 3а, 3б, 3в), то их положение на момент фиксации спутниковым сенсором обычно совпадает с зонами, характеризующимися повышенными значениями сигналов видимого диапазона – то есть, с зонами с относительно средним или высоким содержанием взвешенного вещества. Зоны конвергенции фиксируются оптическими датчиками как на поверхности за счет изменений характеристик шероховатости, так и в приповерхностном слое за счет концентрирования в этих зонах взвешенного вещества.

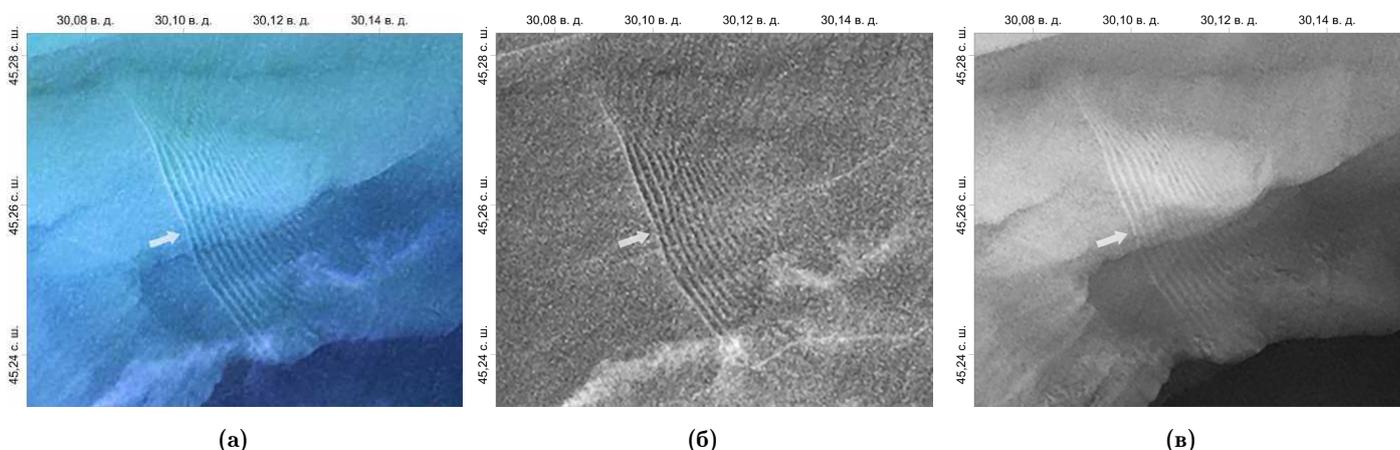


Рис. 3. Проявление пакета внутренних волн на фрагменте сцены OLI Landsat-8 L1 от 17.04.2016 г. при разном сочетании каналов: а – RGB-композит, б – отраженное излучение, в – рассеянное излучение.

Отдельный интерес представляют собой ситуации, при которых внутренние волны не проявляются в отраженном излучении, а регистрируются исключительно в рассеянном (рис. 4а, 4б, 4в). Предполагается, что чередование зон конвергенции и дивергенции столь слабо модулирует шероховатость, что не фиксируется оптическими сенсорами. Таким образом, источником сигнала служит изменение глубины мутного слоя.

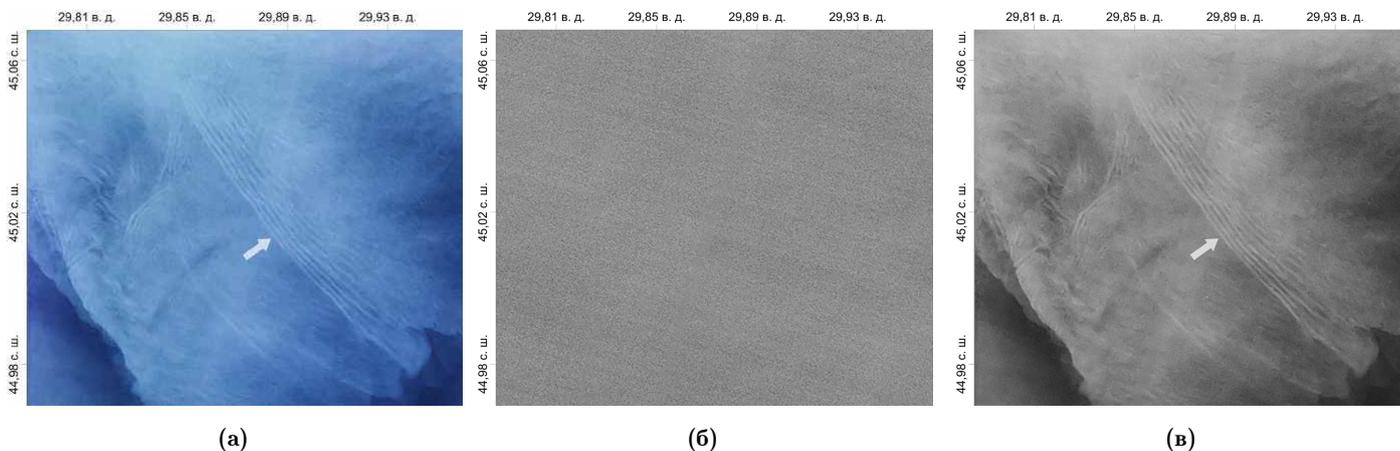


Рис. 4. Фрагменты сцены OLI Landsat-8 L1 от 27.12.2015 г. с разным сочетанием каналов: а – RGB-композит (внутренние волны проявляются), б – отраженное излучение (внутренние волны не проявляются), в – рассеянное излучение (внутренние волны проявляются).

Стоит отметить, что модулирование глубины мутного слоя может осуществляться не только в зонах с максимальной концентрацией взвешенного вещества. Подобная ситуация, когда пакет внутренних волн проявляется только в рассеянном излучении и не наблюдается в отраженном, продемонстрирована на изображениях ниже (рис. 5а, 5б, 5в).

Потенциально проявления за счет модуляции толщины верхнего слоя могут наблюдаться и в случае, когда нижний слой мутный, а верхний – более прозрачный.

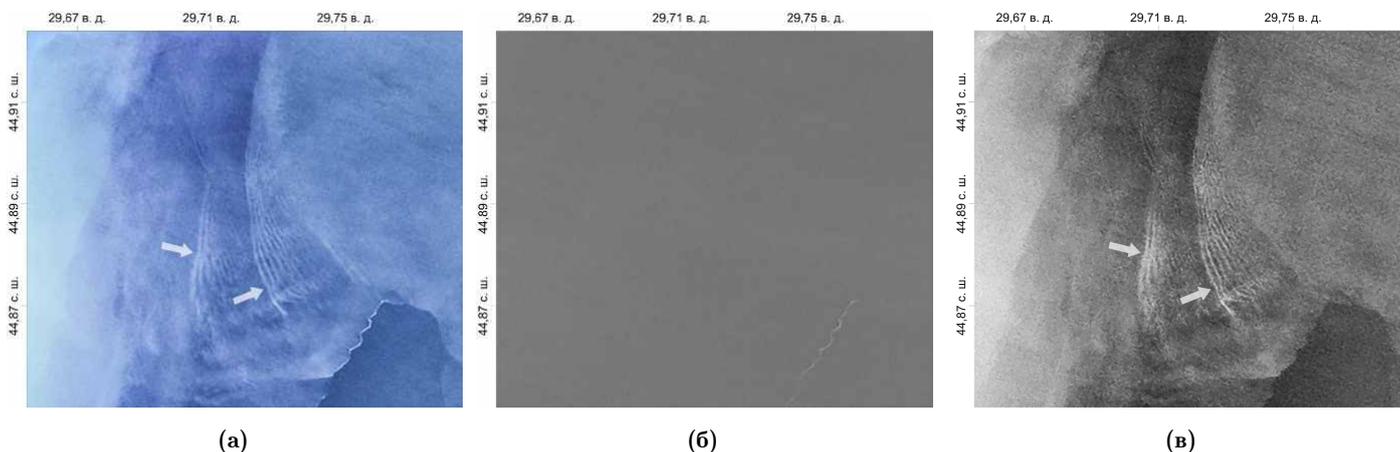


Рис. 5. Проявление пакетов внутренних волн за счет модулирования толщины мутного слоя, фрагмент сцены OLI Landsat-8 L1 от 27.12.2015 г. Проявление осуществляется в рассеянном излучении (а, в) и не осуществляется в отраженном излучении (б).

На оптических изображениях также обнаруживаются пакеты внутренних волн, для которых характерно фрагментарное проявление в том или ином виде излучения. В частности, периодически наблюдались пакеты внутренних волн, которые целиком проявлялись за счет изменения характеристик шероховатости поверхности и частично – за счет модуляции толщины взмученного слоя (рис. 6а, 6б, 6в). И сравнение их положения в момент регистрации спутниковым сенсором с распространением взвешен-

ного вещества продемонстрировало, что модулирование толщины оптического слоя выявлялось в зонах с относительно более высоким содержанием взвешенного вещества.

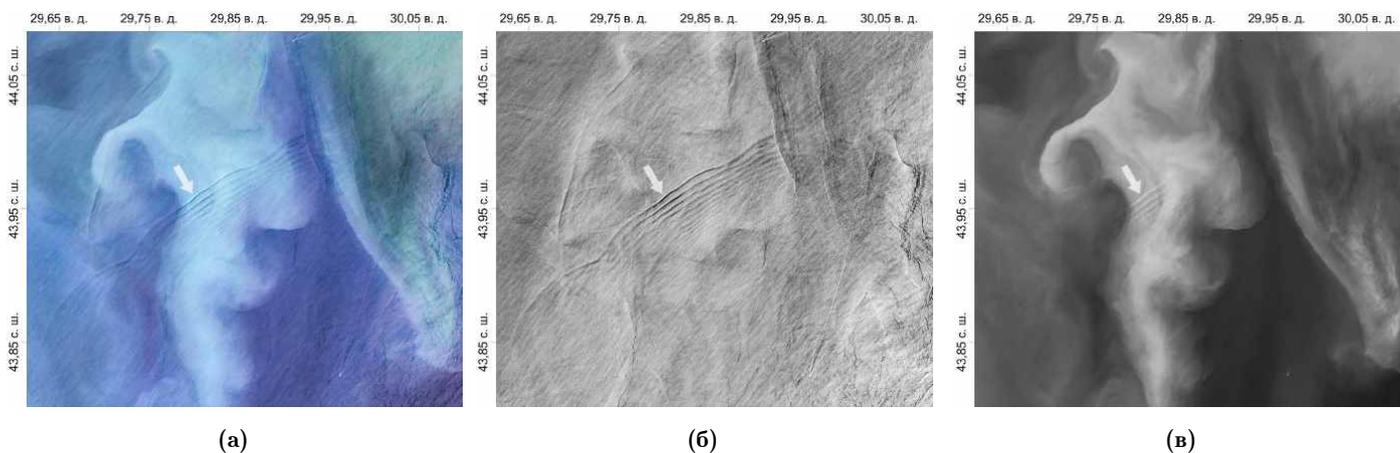


Рис. 6. Пример особенностей проявления пакета внутренних волн при разном сочетании оптических каналов OLI Landsat-8 L1 (фрагмент сцены от 07.06.2017 г.): а – на RGB-комPOSITE (полное проявление), б – в отраженном излучении (полное проявление), в – в рассеянном излучении (частичное проявление).

Фрагментарное проявление внутренних волн может иметь различные комбинации оптических характеристик: полное проявление в отраженном излучении, частичное – в рассеянном или одновременно в отраженном и рассеянном; полное проявление в рассеянном излучении, частичное – в отраженном или одновременно в отраженном и рассеянном; полное проявление в одновременно в отраженном и рассеянном излучении, частичное – в отраженном или рассеянном. По оптическим характеристикам ширина фронта может разбиваться обычно на 2–3 фрагмента.

Так, например, 4 августа 2018 г. наблюдался пакет внутренних волн вблизи речного выноса (рис. 7а, 7б, 7в). Он слабо, но полностью проявлен на RGB-комPOSITE, частично в отраженном излучении (преимущественно северная часть пакета) и полностью в рассеянном (более выражено – в южной части пакета). Частичное проявление пакета внутренних волн в отражённой компоненте может быть следствием увеличения амплитуды волны при выходе на мелководье (по данным батиметрических карт Navionics [Navionics, 2022]) и, соответственно, усилением модуляции шероховатости, определяющей контрасты на изображении.

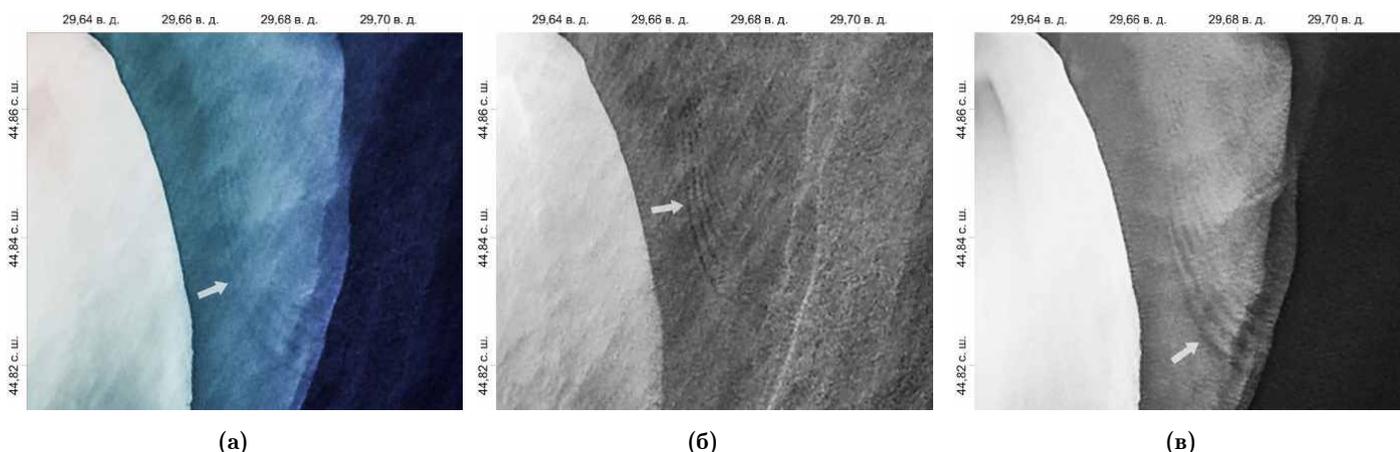


Рис. 7. Фрагменты сцены OLI Landsat-8 L1 от 04.08.2018 г. с разным сочетанием каналов: а – RGB-комPOSITE (внутренние волны проявляются полностью), б – отраженное излучение (внутренние волны проявляются частично), в – рассеянное излучение (внутренние волны проявляются полностью).

Стоит отметить, что хотя в данной работе рассматриваются только внутренние волны природного происхождения, различия в спектральных характеристиках

(проявление в отраженном и/или рассеянном излучении), вероятно, также присущи и для внутренних волн корабельного происхождения. Внутренние волны корабельного происхождения, как правило, представляют систему из двух пакетов волн, распространяющихся под небольшим углом в разные стороны от траектории движения судна, и обычно наблюдаются при неглубоком пикноклине.

По оптическим спутниковым данным выявлялись пакеты внутренних волн с шириной фронта на уровне лидирующей волны от первых километров до первых десятков километров, с количеством волн в пакете от 2–3 до 15–16 и более, пакеты имеют различные траектории движения. При комплексном анализе пространственного распределения пакетов внутренних волн наблюдается их генерация на расстояниях до 90–120 км от берега и больших. При сопоставлении с батиметрическими данными – на расстояниях, соответствующих глубинам до 80–90 м. Полученные результаты согласуются с ранее проведенным картированием пакетов внутренних волн вблизи дельты Дуная, опубликованным в работе [Lavrova et al., 2014]. Что касается пространственного распределения пакетов внутренних волн с учетом оптических характеристик (рис. 8а, 8б), то отмечается, что внутренние волны, в той или иной мере проявляющиеся в рассеянном излучении, обнаруживались преимущественно в пределах распространения взмученных вод Дуная (в районе дельты реки и прибрежной зоне города Констанца).

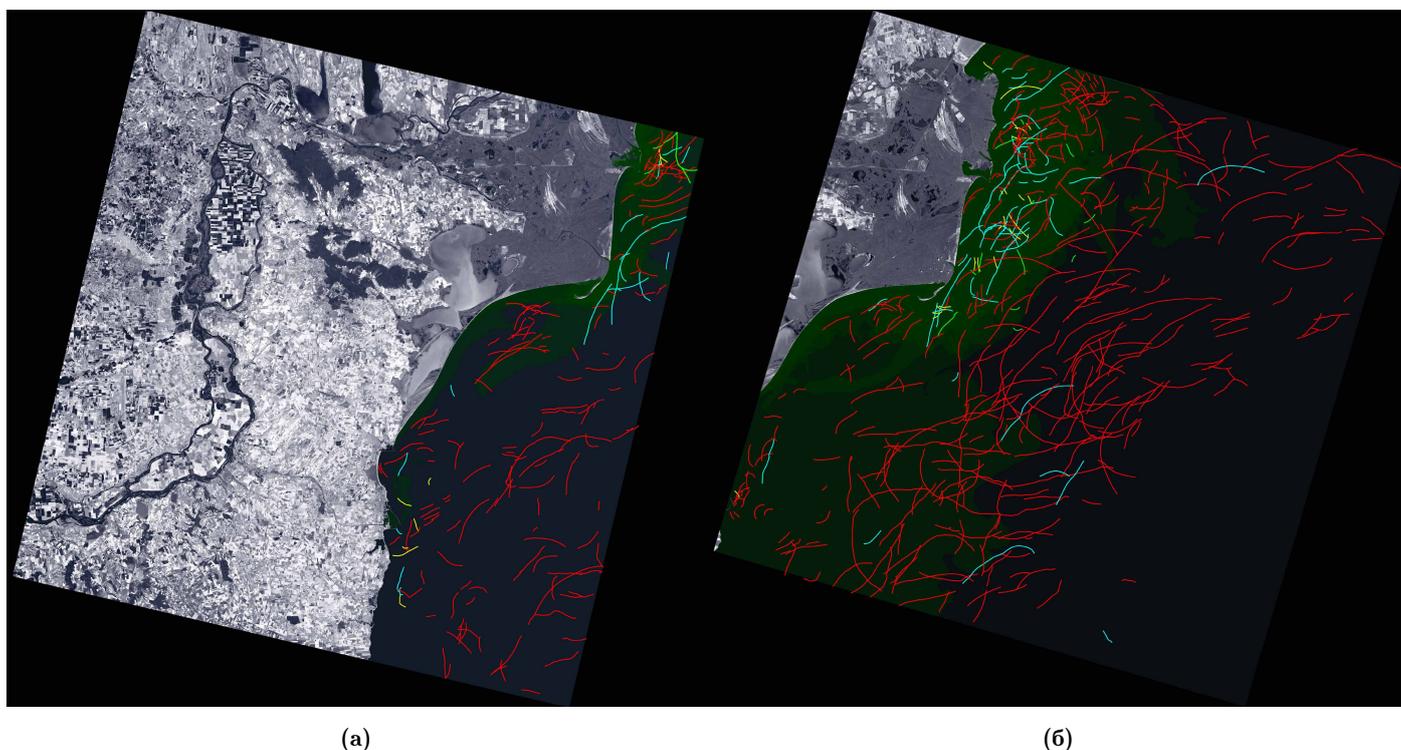


Рис. 8. Пространственное распределение пакетов внутренних волн в пределах комплектов сцен OLI Landsat-8 L1, указанных на рис. 1 (1а, 1б), с учетом их оптических характеристик: красным отмечены пакеты внутренних волн, проявленные в отраженном излучении, желтым – в рассеянном излучении, светло-зеленым – одновременно в отраженном и рассеянном излучении, голубым – с частичным проявлением в том или ином виде излучения. Зеленым выделены области распространения вод Дуная (по взвешенному веществу) – чем интенсивнее цвет, тем чаще наблюдалось распространение.

Анализ каждой сцены OLI Landsat-8 L1 показывает, что генерация пакетов внутренних волн в значительной степени зависит от взаимодействий водных масс различной плотности. Так, в периоды уменьшения площади распространения речных вод внутренние волны регистрируются в малом количестве и на небольших расстояниях от берега (до 30–40 км). Напротив, в периоды интенсивного стока численность пакетов внутренних волн существенно варьирует, внутренние волны регистрируются на больших расстояниях – до 90–100 и более километров от берега. Но при этом определенный вклад вносят динамические процессы, сформированные вне связи со стоком Дуная. Например,

интересное распределение пакетов внутренних волн отмечается 17 апреля 2016 г., когда внутренние волны генерировались преимущественно в зоне контакта распресненных вод и вод, вовлеченных в движение мезомасштабного антициклонического вихря со стороны открытого моря (рис. 9а, 9б). Динамические процессы меньших масштабов также в определенной мере оказывают влияние на внутренние волны – они могут как способствовать генерации пакетов, так и воздействовать на скорость их перемещения, что проявляется в виде деформации пакета (рис. 10а, 10б).

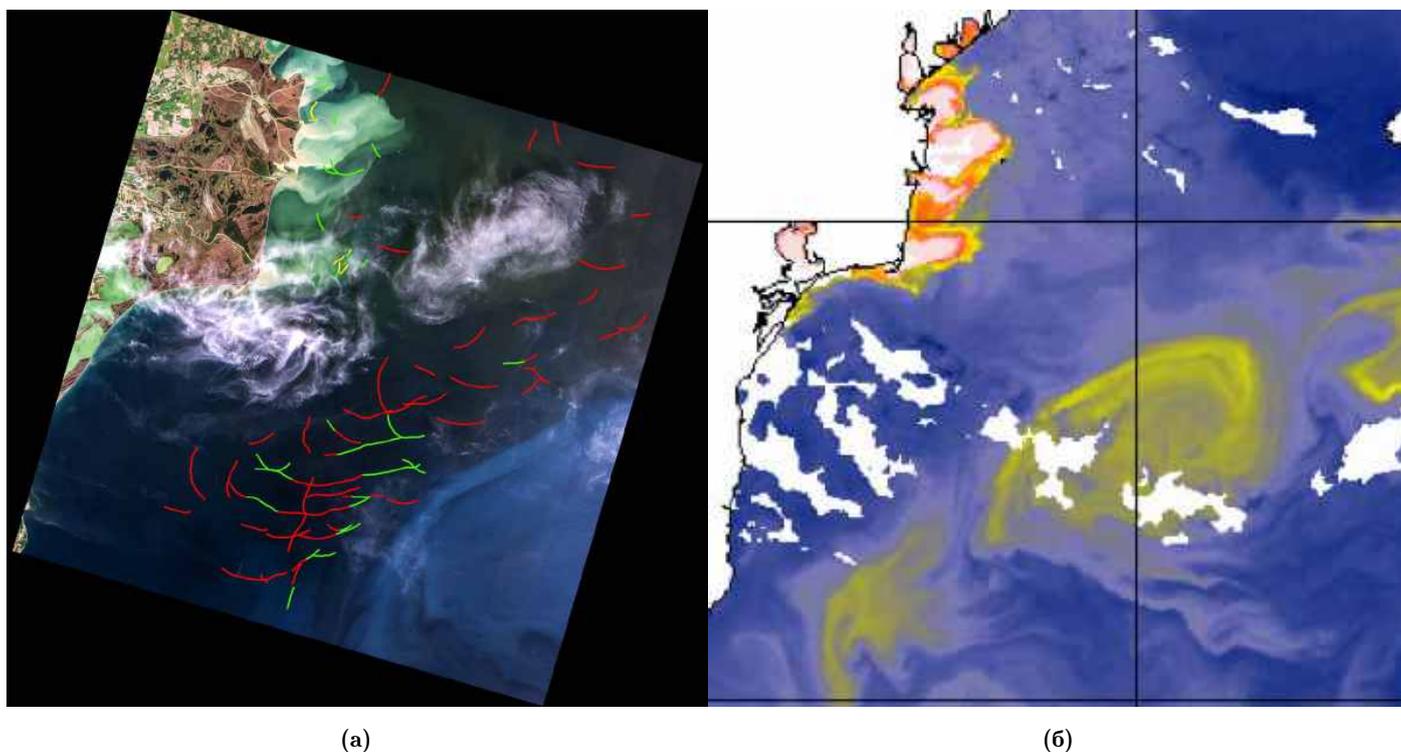


Рис. 9. Спутниковые изображения от 17.04.2016 г.: а – пакеты внутренних волн, отмеченные на сцене OLI Landsat-8 L1 и б – мезомасштабный вихрь на фрагменте сцены VIIRS Suomi-NPP (RRS – 551 нм).

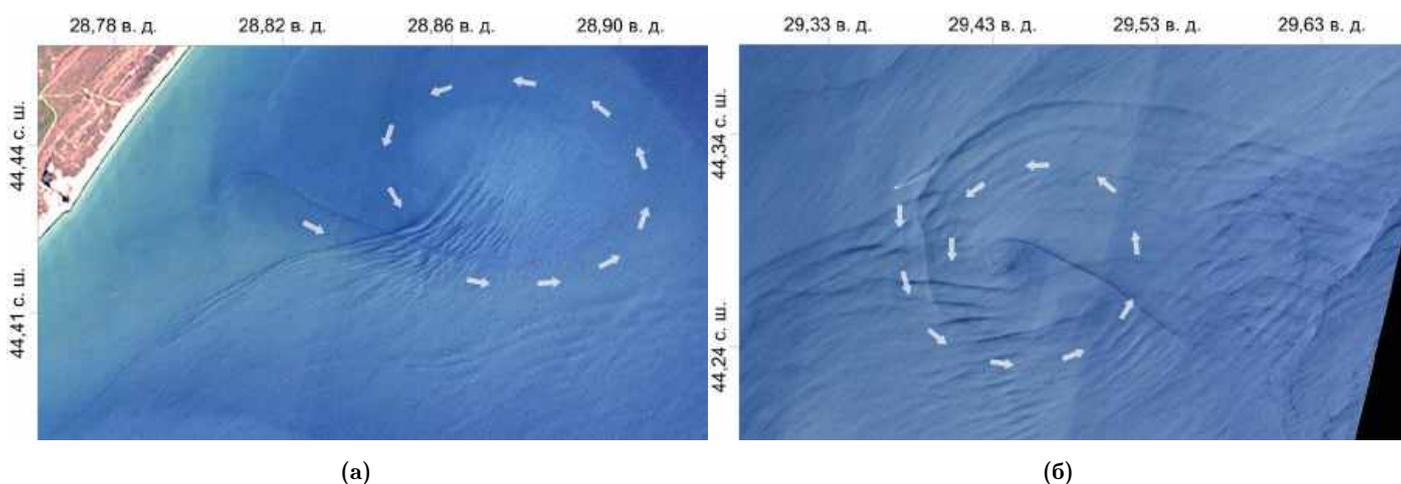


Рис. 10. Фрагменты спутниковых изображений OLI Landsat-8 L1, на которых различима деформация внутренних волн из-за циклонического движения вихрей (направление вращения вихрей отмечено стрелками): а – от 01.08.2017 г., б – от 22.07.2019 г.

Наличие разных источников спутниковых данных позволяет подбирать последовательные (квазисинхронные) изображения с высоким разрешением для получения динамических характеристик внутренних волн. На основе таких данных выделено в сумме 19 пакетов внутренних волн, проявленных в отраженном излучении, от 01.08.2017 г.,

23.04.2018 г., 03.05.2019 г. и 22.07.2019 г. в пределах районов исследования. На парах снимков OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2, разница которых по времени зондирования составляет от 17 мин. 15 сек. до 17 мин. 49 сек., смещение пакетов внутренних волн (расчет по первой волне) варьирует от 56 до 985 м. в зависимости от влияния динамических процессов и соответствующей деформации этих пакетов. На парах снимков C-SAR Sentinel-1 и OLI Landsat-8 (разница по времени зондирования – 4 ч. 12 мин. 11 сек.) смещение пакетов охватывает расстояния от 3897 до 7800 м. Скорости перемещения пакетов внутренних волн (в пределах нанесенных треков), с учетом, в том числе, данных C-SAR Sentinel-1, охватывают диапазон от 0,05 м/с (0,19 км/ч) до 0,95 м/с (3,43 км/ч). При оценке пакетов внутренних волн, которые были зафиксированы последовательно сенсорами C-SAR Sentinel-1, OLI Landsat-8 и затем MSI Sentinel-2, при вычислении скоростей по парам снимков наблюдается незначительное их затухание, которое, вероятнее всего, укладывается в погрешности измерений. Так, вариация скоростей (в пределах нанесенных треков) для трех пакетов внутренних волн, полученных от пар C-SAR Sentinel-1 и OLI Landsat-8, составляет от 0,33 до 0,39 м/с, от 0,28 до 0,36 м/с и от 0,26 до 0,52 м/с, тогда как расчеты по парам OLI Landsat-8 и MSI Sentinel-2 дают такие соответствующие результаты: от 0,32 до 0,37 м/с, от 0,24 до 0,35 м/с и от 0,12 до 0,49 м/с.

В общем выраженной связи между скоростью движения внутренних волн и местом их фиксации спутниковыми сенсорами не наблюдается, таковая больше обнаруживается при рассмотрении частных случаев. Так, например, 23 апреля 2018 г. (рис. 11а) наиболее высокие скорости движения внутренних волн преобладают восточнее дельты Дуная. В частности, высокая скорость перемещения отмечена для пакетов 1 (0,54–0,60 м/с), 2 (0,68–0,90 м/с), 3 (0,51–0,95 м/с) и 4 (0,64–0,82 м/с). Скорость остальных пакетов (5, 6, 7) варьирует от 26 до 42 м/с. Сопоставление выделенных внутренних волн с процессами, проявленными в рассеянном излучении, показывает, что движение пакета 3 совпадает с переносом в том же направлении в зоне влияния грибовидной структуры. Пакет 4 имеет траекторию перемещения от речного плюма, пересекает циклоническую часть вихревого диполя, которая, вероятно, на момент наблюдения не проявила тормозящего эффекта. Пакет 5 (с пониженной скоростью) зафиксирован после пересечения циклонической и центральной частей вихревого диполя, в момент движения через антициклоническую. В данном случае справедливо предположить, что грибовидная структура уже способствовала снижению скорости движения 5 пакета.

Распределение внутренних волн 3 мая 2019 г. (рис. 11б) представляет интерес тем, что скорости перемещения некоторых пакетов оценивались не только по оптическим данным, но и по радиолокационным. Хотя на сценах от сенсора C-SAR Sentinel-1 проявлено достаточное количество внутренних волн, при совмещении с оптическими данными удалось отметить только 3 пакета. Основная причина заключается в большом временном интервале (более 4 часов) между зондированием радиолокационным и оптическими сенсорами, за который большая часть внутренних волн подверглась или значительной трансформации, или диссипации. Также некоторая часть пакетов оказалась скрытой облачным покровом на оптических изображениях.

Вариация скоростей внутренних волн (по данным наложенных треков) в этой ситуации отличается меньшим диапазоном, нежели 23 апреля 2018 г., что в какой-то степени связано с районом картирования, который находится южнее дельты Дуная и отличается меньшей интенсивностью влияния динамических процессов. Так, границы скоростей для всех выделенных пакетов составляют от 0,12 до 0,52 м/с. Наибольшая разница скорости движения первой волны в пределах одного пакета отмечается для пакета 4 (от 0,18 до 0,49 м/с) из-за процессов деформации первой волны и для пакета 5 (от 0,12 до 0,49 м/с) также из-за его деформации и выраженного сдвига в северном направлении относительно геометрии и положения, зафиксированного радиолокационным сенсором. Для остальных внутренних волн разница скоростей в пределах пакета варьирует от 0,03 до 0,26 м/с.

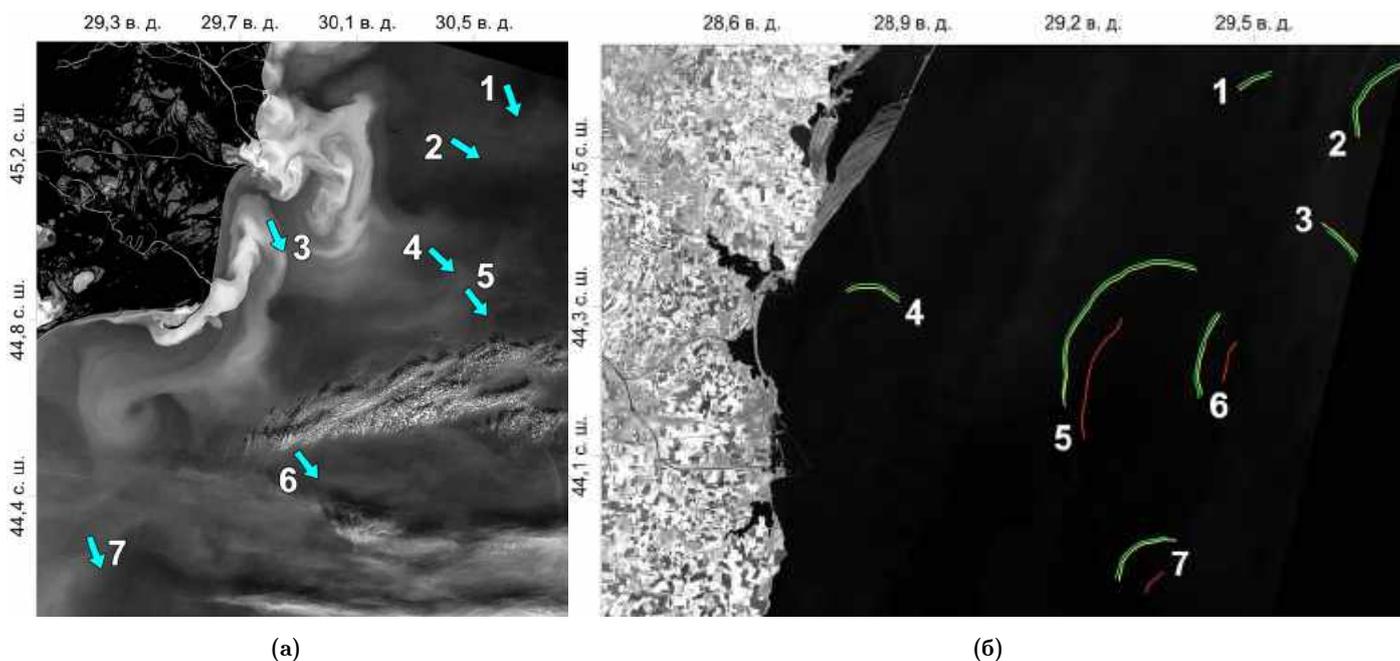


Рис. 11. Внутренние волны, отмеченные с помощью последовательных изображений: а – на фрагменте сцены OLI Landsat-8 с устраненным отраженным излучением от 23.04.2018 г., стрелками отмечены траектории движения пакетов; б – на фрагменте сцены OLI Landsat-8 от 03.05.2019 г., где красным цветом отмечено положение первой волны пакетов по данным C-SAR Sentinel-1, желтым – по данным OLI Landsat-8, зеленым – по данным MSI Sentinel-2.

Заключение

По оптическим спутниковым данным высокого разрешения и радиолокационным данным проанализировано проявление внутренних волн в динамически активном районе – приустьевой зоне Дуная. Отмечено, что на распространение и интенсивность проявления внутренних волн в значительной степени влияют различные динамические процессы, источником которых являются как пресные воды Дуная, так и движение водных масс (в частности, мезомасштабные вихри) со стороны центральной части Черного моря. Определенное влияние динамических процессов на генерацию и эволюцию внутренних волн дополнительно подтверждается анализом последовательных (квазисинхронных) спутниковых изображений, также по ним определены скорости перемещения пакетов внутренних волн, которые в динамически интенсивных зонах достигают 0,8–0,9 м/с, тогда как в иных не превышают 0,5 м/с.

Внутренние волны по-разному отображаются в различных спектральных интервалах. В зависимости от концентрации взвешенных веществ и интенсивности внутренних волн они в разной степени проявляются за счет изменения шероховатости поверхности (частично или полностью) и за счет модуляции толщины взмученного слоя (также частично или полностью).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №23-21-00194 «Аналитические методы математического моделирования волновой динамики неоднородных гидрофизических сред».

Список литературы

- Иванов В. А., Серебряный А. Н. Короткопериодные внутренние волны в прибрежной зоне бесприливного моря // Известия Академии наук СССР. Физика атмосферы и океана. — 1985. — Т. 21, № 6. — С. 648–656.
- Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Сабинин К. Д. Возможные механизмы генерации внутренних волн в северо-восточной части Черного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2008. — Т. 2, № 5. — С. 128–136.

- Митягина М. И., Лаврова О. Ю. Спутниковые наблюдения поверхностных проявлений внутренних волн в морях без приливов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2010. — Т. 7, № 1. — С. 260–272.
- Серебряный А. Н., Иванов В. А. Исследования внутренних волн в Черном море с океанографической платформы МГИ // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2013. — Т. 6, № 3. — С. 34–45.
- Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // Nature. — 1985. — Vol. 314, no. 6008. — P. 245–247. — DOI: [10.1038/314245a0](https://doi.org/10.1038/314245a0).
- Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Y. V. Generation of inertia-gravity waves on the island shelf // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2015. — Vol. 51, no. 2. — P. 208–213. — DOI: [10.1134/S0001433815020036](https://doi.org/10.1134/S0001433815020036).
- Bondur V. G., Serebryany A. N., Zamshin V. V., *et al.* Intensive Internal Waves with Anomalous Heights in the Black Sea Shelf Area // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 99–109. — DOI: [10.1134/S000143381901002X](https://doi.org/10.1134/S000143381901002X).
- Bulatov V. V., Ponomarev A. N. About the Possibility of Improving the Image Quality of Laser Location in the Process of Remote Sensing of the Water Surface // Processes in GeoMedia-Volume VI. — Springer International Publishing, 2023. — P. 277–282. — DOI: [10.1007/978-3-031-16575-7_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_26).
- Copernicus Open Access Hub. — URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/%5C#/home> (visited on 2022).
- Eckart C. Internal Waves in the Ocean // The Physics of Fluids. — 1961. — Vol. 4, no. 7. — P. 791–799. — DOI: [10.1063/1.1706408](https://doi.org/10.1063/1.1706408).
- EOSDIS. Worldview. — URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (visited on 2022).
- Ivanov V. A., Shul'ga T. Y., Bagaev A. V., *et al.* Internal Waves on the Black Sea Shelf near the Heracles Peninsula: Modeling and Observation // Physical Oceanography. — 2019. — Vol. 26, no. 4. — DOI: [10.22449/1573-160X-2019-4-288-304](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-4-288-304).
- Khimchenko E., Ostrovskii A., Klyuvitkin A., *et al.* Seasonal Variability of Near-Inertial Internal Waves in the Deep Central Part of the Black Sea // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10, no. 5. — P. 557. — DOI: [10.3390/jmse10050557](https://doi.org/10.3390/jmse10050557).
- Lavrova O., Mityagina M. Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // Remote Sensing. — 2017. — Vol. 9, no. 9. — P. 892. — DOI: [10.3390/rs9090892](https://doi.org/10.3390/rs9090892).
- Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Serebryany A. N., *et al.* Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2014. — SPIE, 2014. — DOI: [10.1117/12.2067047](https://doi.org/10.1117/12.2067047).
- Nash J. D., Moum J. N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // Nature. — 2005. — Vol. 437, no. 7057. — P. 400–403. — DOI: [10.1038/nature03936](https://doi.org/10.1038/nature03936).
- Navionics. — URL: <https://www.navionics.com/> (visited on 2022).
- Robinson I. S. Measuring the oceans from space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography. — Springer, 2004. — 716 p.
- Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Nazarov A. A. Intensive internal waves in the World Ocean // Oceanology. — 2004. — Vol. 44, no. 6. — P. 753–758.
- Sentinelhub Playground. — URL: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> (visited on 2022).
- USGS. EarthExplorer. — URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (visited on 2022).

SPECIFIC FEATURES OF INTERNAL WAVES MANIFESTATION IN THE NEAR MOUTH ZONE OF THE DANUBE BY HIGH-RESOLUTION SATELLITE DATA

A. Medvedeva^{*,1} , T. Mikhailichenko¹ , S. Stanichny¹ , and V. Bulatov² 

¹Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

****Correspondence to:** A. Medvedeva, suomi-npp@mail.ru

The mechanisms of manifestation of internal waves in satellite data of the optical range are considered for the mouth area of the Danube. Three main mechanisms for the manifestation of internal waves are identified – the previously described dynamic (due to a change in the roughness of the sea surface in convergent zones created by a moving internal wave), slick – when surfactants accumulate in convergence zones, and a new one – change in the brightness of the sea surface defined by scattering layer thickness modulation by internal waves. Data from the OLI Landsat-8 scanner for 2015–2019 were used for the analysis. It is shown that in different situations, internal waves can manifest themselves either due to various mechanisms or only due to one of them. Summary maps of manifestations of internal waves in the study area were constructed. Additionally, the situations with quasi-synchronous data of MSI Sentinel-2 and C-SAR Sentinel-1, which displayed the same packets of internal waves, are considered. The selection of such pairs made it possible to estimate the phase velocities of internal waves, which ranged from 0.05 m/s (0.19 km/h) to 0.95 m/s (3.43 km/h) in various hydrometeorological situations. Examples of internal wavefront transformation on submesoscale eddies are presented.

Keywords: Black Sea, Danube, Danube mouth, spectral characteristics, internal waves, optical images, satellite data, internal wave velocities, OLI Landsat-8.

Received: 19 June 2023

Accepted: 30 August 2023

Published: 30 December 2023

Citation: Medvedeva, A., T. Mikhailichenko, S. Stanichny, and V. Bulatov (2023), Specific Features of Internal Waves Manifestation in the Near Mouth Zone of the Danube by High-Resolution Satellite Data, *Russian Journal of Earth Sciences*, 23, ES6007, <https://doi.org/10.2205/2023ES000869> EDN: BYEYMH



© 2023. The Authors.

References

- Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves // *Nature*. — 1985. — Vol. 314, no. 6008. — P. 245–247. — DOI: [10.1038/314245a0](https://doi.org/10.1038/314245a0).
- Bondur V. G., Sabinin K. D., Grebenyuk Y. V. Generation of inertia-gravity waves on the island shelf // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2015. — Vol. 51, no. 2. — P. 208–213. — DOI: [10.1134/S0001433815020036](https://doi.org/10.1134/S0001433815020036).
- Bondur V. G., Serebryany A. N., Zamshin V. V., *et al.* Intensive Internal Waves with Anomalous Heights in the Black Sea Shelf Area // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. — 2019. — Vol. 55, no. 1. — P. 99–109. — DOI: [10.1134/S000143381901002X](https://doi.org/10.1134/S000143381901002X).
- Bulatov V. V., Ponomarev A. N. About the Possibility of Improving the Image Quality of Laser Location in the Process of Remote Sensing of the Water Surface // *Processes in GeoMedia-Volume VI*. — Springer International Publishing, 2023. — P. 277–282. — DOI: [10.1007/978-3-031-16575-7_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-16575-7_26).
- Copernicus Open Access Hub. — URL: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/%5C#/home> (visited on 2022).

- Eckart C. Internal Waves in the Ocean // *The Physics of Fluids*. — 1961. — Vol. 4, no. 7. — P. 791–799. — DOI: [10.1063/1.1706408](https://doi.org/10.1063/1.1706408).
- EOSDIS. Worldview. — URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (visited on 2022).
- Ivanov V. A., Serebryany A. N. Short-period internal waves in the coastal zone of a tidal sea // *Izvestiya USSR Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean*. — 1985. — Vol. 21, no. 6. — P. 648–656.
- Ivanov V. A., Shul'ga T. Y., Bagaev A. V., *et al.* Internal Waves on the Black Sea Shelf near the Heracles Peninsula: Modeling and Observation // *Physical Oceanography*. — 2019. — Vol. 26, no. 4. — DOI: [10.22449/1573-160X-2019-4-288-304](https://doi.org/10.22449/1573-160X-2019-4-288-304).
- Khimchenko E., Ostrovskii A., Klyuvitkin A., *et al.* Seasonal Variability of Near-Inertial Internal Waves in the Deep Central Part of the Black Sea // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10, no. 5. — P. 557. — DOI: [10.3390/jmse10050557](https://doi.org/10.3390/jmse10050557).
- Lavrova O., Mityagina M. Satellite Survey of Internal Waves in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. — 2017. — Vol. 9, no. 9. — P. 892. — DOI: [10.3390/rs9090892](https://doi.org/10.3390/rs9090892).
- Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Sabinin K. D. Possible mechanisms for generating internal waves in the northeastern part of the Black Sea // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2008. — Vol. 2, no. 5. — P. 128–136.
- Lavrova O. Y., Mityagina M. I., Serebryany A. N., *et al.* Internal waves in the Black Sea: satellite observations and in-situ measurements // *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2014*. — SPIE, 2014. — DOI: [10.1117/12.2067047](https://doi.org/10.1117/12.2067047).
- Mityagina M. I., Lavrova O. Y. Radar survey of internal waves surface manifestations in non-tidal seas // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. — 2010. — Vol. 7, no. 1. — P. 260–272.
- Nash J. D., Moum J. N. River plumes as a source of large-amplitude internal waves in the coastal ocean // *Nature*. — 2005. — Vol. 437, no. 7057. — P. 400–403. — DOI: [10.1038/nature03936](https://doi.org/10.1038/nature03936).
- Navionics. — URL: <https://www.navionics.com/> (visited on 2022).
- Robinson I. S. *Measuring the oceans from space: The Principles and Methods of Satellite Oceanography*. — Springer, 2004. — 716 p.
- Sabinin K. D., Serebryanyi A. N., Nazarov A. A. Intensive internal waves in the World Ocean // *Oceanology*. — 2004. — Vol. 44, no. 6. — P. 753–758.
- Sentinelhub Playground. — URL: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground/> (visited on 2022).
- Serebryany A. N., Ivanov V. A. Study of Internal Waves in the Black Sea from Oceanography Platform of Marine Hydrophysical Institute // *Fundamental and applied hydrophysics*. — 2013. — Vol. 6, no. 3. — P. 34–45.
- USGS. EarthExplorer. — URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (visited on 2022).