


Научная статья


УДК 551.464 + 551.46.08

EDN: VMXENS

Пространственные особенности и сезонная изменчивость распределения взвешенного вещества в акватории Азовского моря по спутниковым измерениям

Н. В. Василенко , А. А. Алескерова, Л. В. Харитоновна,
А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

 *Nadinkot.nk@gmail.com*

Поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 27.08.2025;
принята к публикации 28.01.2026.

Аннотация

Цель. Исследована пространственная и сезонная изменчивость концентрации общего взвешенного вещества в Азовском море за многолетний период по оптическим спутниковым данным и оценена ее связь с интенсивностью и продолжительностью ветрового воздействия.

Методы и результаты. Проанализирован массив из более 3000 спутниковых изображений MODIS, Landsat-8 и Sentinel-2 за 2003–2024 гг. и данные реанализа полей ветра NCEP. Проведено картирование средних концентраций взвешенного вещества, полученные поля сопоставлены с типами донных осадков, рельефом дна и гидрометеорологическими условиями. Установлено, что при ветро-волновом взмучивании в поле ВВ фиксируются существенные оптические неоднородности, обусловленные, вероятно, разным гранулометрическим составом донных осадков, а также особенностями рельефа дна. Показано, что максимальные среднесезонные концентрации взвешенного вещества (до 10 мг/л) отмечаются в районах с мелкодисперсными донными осадками и сложным рельефом дна: в прибрежной зоне Ейского п-ова, у косы Долгой и банки Долгой, Елениной банки. В прибрежной зоне Арабатской стрелки и косы Бирючий остров, кос Обиточной и Бердянской его концентрация достигает 5–6 мг/л. Выявлено, что под воздействием ветра со скоростью более 10 м/с продолжительностью от 1–2 сут мутность вод увеличивается практически по всему региону исследования. Наиболее высокие значения концентрации взвешенного вещества (более 10 мг/л) зафиксированы при ветре скоростью более 14 м/с и продолжительностью свыше 5 сут. В сезонной динамике выявлен максимум в зимний период (7–9 мг/л в январе), минимум – с июня по сентябрь (0–1 мг/л).

Выводы. Пространственное распределение взвешенного вещества в Азовском море определяется литодинамическими факторами (тип донных отложений и рельеф дна) и гидрометеорологическим режимом. Наиболее интенсивное ветровое взмучивание наблюдается в холодный период года, с октября по апрель.

Ключевые слова: Азовское море, концентрация взвешенного вещества, MODIS, взмучивание, спутниковые данные, спутниковые изображения, спутниковые снимки, донные отложения, ветровое перемешивание, Landsat, Sentinel-2

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 25-27-00234 «Исследование формирования и перераспределения взвешенного вещества в Азовском море и на западном побережье Крыма».

© Василенко Н. В., Алескерова А. А., Харитоновна Л. В., Кубряков А. А., Станичный С. В., 2026

Для цитирования: Пространственные особенности и сезонная изменчивость распределения взвешенного вещества в акватории Азовского моря по спутниковым измерениям / Н. В. Василенко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 2. С. 167–184. EDN VMXEHS.

Original article

Spatial Features and Seasonal Variability of Suspended Matter Distribution in the Sea of Azov Based on Satellite Measurements

N. V. Vasilenko [✉], A. A. Aleskerova, L. V. Kharitonova,
A. A. Kubryakov, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia
[✉] Nadinkot.nk@gmail.com

Abstract

Purpose. The purpose of the work is to study the spatial and seasonal variability of total suspended matter concentration in the Sea of Azov over a long-term period using optical satellite data, and to assess its relationship with the intensity and duration of wind impact.

Methods and Results. The array of more than 3000 MODIS, Landsat-8 and Sentinel-2 satellite images for 2003–2024 was analyzed. The average suspended matter concentrations were mapped and the obtained fields were compared with the types of bottom sediments, bottom relief and hydrometeorological conditions. It was established that during a wind-wave roiling, significant optical inhomogeneities were recorded in the suspended matter field conditioned, probably, by different granulometric composition of bottom sediments, as well as by the features of bottom relief. It was shown that the maximum average long-term concentrations of suspended matter (up to 10 mg/l) were observed in the areas with fine-grained bottom sediments and complex bottom relief, namely in the coastal zone of Yeisk Peninsula, by Dolgaya Spit and Bank, and Elena Bank. In the coastal areas of Arabat Spit and Biryuchy Island Spit, and the Obitochnaya and Berdyansk Spits, its concentrations reached 5–6 mg/l. The analysis of hydrometeorological conditions showed that the impact of wind with speed exceeding 10 m/s for 1–2 days and more resulted in increase of water turbidity practically throughout the whole region under study. The highest values of suspended matter concentration (more than 10 mg/l) were recorded at wind speed exceeding 14 m/s and its duration surpassing 5 days. As for seasonal dynamics, the maximum values were revealed in the winter period (7–9 mg/l in January), and the minimum ones – from June to September (0–1 mg/l).

Conclusions. The spatial distribution of suspended matter in the Sea of Azov is conditioned by the lithodynamic factors (bottom sediment type and bottom topography) and the hydrometeorological conditions. The most intense wind-driven roiling takes places during the cold season – from October to April.

Keywords: Sea of Azov, suspended matter concentration, MODIS, roiling, satellite data, satellite images, satellite photographs, bottom sediments, wind mixing, Landsat, Sentinel-2

Acknowledgments: The study was supported by the RSF grant 25-27-00234 “Study of the formation and redistribution of suspended matter in the Sea of Azov and on the western coast of Crimea”.

For citation: Vasilenko, N.V., Aleskerova, A.A., Kharitonova, L.V., Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V., 2026. Spatial Features and Seasonal Variability of Suspended Matter Distribution in the Sea of Azov Based on Satellite Measurements. *Physical Oceanography*, 33(2), pp. 217-233.

Введение

Азовское море является самым мелководным морским бассейном в мире: глубины на 54 % площади моря не превышают 9 м [1]. По своим физико-географическим характеристикам водоем является внутренним морем и отно-

сится к эстуарному типу [2]. Берега Азовского моря преимущественно сложены четвертичными суглинками и глинами, что способствует интенсивному развитию абразионных и абразионно-оползневых процессов, аккумулятивные формы состоят из ракушечного детрита и кварцевого песка [3]. Донные отложения на трех четвертях акватории представлены глинисто-илистыми осадками и сосредоточены в основном на аккумулятивной равнине Панова. Остальные типы донных отложений включают в себя алевриты, смешанные осадки и пески [4].

Для Азовского моря характерна низкая прозрачность вод и высокие значения концентрации общего взвешенного вещества (ВВ), представленного преимущественно тонкозернистыми минеральными и органогенными частицами [4, 5]. Исследование взмучивания донных отложений и пространственной изменчивости концентрации ВВ в Азовском море является важной задачей в силу значительного влияния этого процесса на морскую экосистему, в частности на фитобентос, который существенно зависит от прозрачности вод [6]. Кроме того, поступление ВВ в воды приводит к значительным изменениям оптических характеристик вод, что необходимо учитывать при исследовании других процессов в морской среде, особенно при использовании спутниковых измерений в оптическом диапазоне.

Активному поступлению большого количества ВВ в толщу воды способствует интенсивное ветро-волновое перемешивание до дна [5], приводящее к взмучиванию донных отложений. Еще одним важнейшим фактором роста концентрации ВВ является абразия. В работах [7–11] показано, что значительная часть побережья Азовского моря подвержена интенсивному размыву, в результате которого происходит вынос взвеси в акваторию.

Помимо вышеописанных факторов, на рост концентрации ВВ и оптические свойства вод Азовского моря влияет речной сток, приносящий большое количество терригенного материала [12, 13] и биогенных элементов, которые способствуют «цветению» фитопланктона, в частности цианобактерий, особенно в теплое время года [14, 15], что увеличивает концентрацию органического ВВ [16]. Значительное влияние на мутность вод речной сток оказывает в Таганрогском заливе. Заливы Таганрогский и Сиваш являются наиболее мелководными районами Азовского моря, воды в них регулярно перемешиваются до дна, что вызывает интенсивное взмучивание донных осадков. Напротив, поступление черноморских вод через Керченский пролив способствует снижению концентрации ВВ в южной части Азовского моря [17].

Использование спутниковых данных оптического диапазона позволяет эффективно исследовать характеристики водной среды в поверхностном слое Мирового океана, в частности концентрацию ВВ. В работах [18–24] показано, что по данным оптических сканеров возможно оценивать источники поступления, пространственную изменчивость и количественные показатели ВВ различного происхождения в приповерхностном слое.

Исследованию полей концентрации и механизмов распространения ВВ, а также определению его минеральной и органической составляющих в Азовском море посвящен ряд работ, основанных на контактных, модельных и спутниковых измерениях [25–31]. Однако предыдущие исследования ограничивались изучением отдельных районов акватории либо охватывали ограниченный

период наблюдений. В настоящей работе проанализирован весь доступный массив спутниковых снимков *MODIS*, *Landsat-8* и *Sentinel-2*, что позволило изучить особенности пространственного и сезонного распределения концентрации общего ВВ за многолетний период по оптическим спутниковым данным и выявить их связь с интенсивностью и продолжительностью ветрового воздействия.

Данные

Для исследования распространения ВВ в водах Азовского моря из архива портала *Ocean Color* (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>) был выделен массив ежесуточных спутниковых данных оптического диапазона *MODIS* (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) *Aqua* и *MODIS Terra* за период с 2003 по 2024 г. из более чем 3000 изображений. Пространственное разрешение снимков составляет 1 км. Ежегодное количество обработанных снимков варьировало от 161 до 356.

Для построения карты средней концентрации ВВ и анализа ее сезонной изменчивости была выбрана область, охватывающая акваторию Азовского моря без кутовой части Таганрогского залива (синий прямоугольник на рис. 1). Статистические характеристики полученного ряда данных концентраций ВВ за весь период наблюдений: максимум составляет 163,66; среднее – 5,15; медиана – 2,12; среднеквадратическое отклонение – 8,85.



Р и с. 1. Район исследования. Синим прямоугольником обозначена область, по которой производились статистические расчеты средней и сезонной изменчивости концентрации ВВ, красным прямоугольником – область для анализа зависимости изменения концентрации ВВ от штормовых событий

Fig. 1. Study area. Blue rectangle is the area for which statistical calculations of average and seasonal SM concentration variability were done. Red rectangle is the area for analyzing dependence of SM concentration change on storm events

Анализ зависимости концентрации ВВ от штормовых событий (при скорости ветра 8 м/с и более) проводился только для центральной части акватории (красный прямоугольник на рис. 1). Выбор этой области обусловлен необходимостью уменьшить влияние мелководья на статистические расчеты, так как в береговой зоне постоянно наблюдаются высокие концентрации ВВ даже при слабом ветре, что создает шум в статистических оценках.

Концентрация ВВ рассчитывалась с использованием регионального алгоритма, основанного на сопоставлении данных обратного рассеяния взвеси, полученных по яркости восходящего излучения со сканера *MODIS*, с контактными измерениями концентрации ВВ [32]. При этом на яркость восходящего излучения влияет не только количество, но и качественный состав ВВ. Абсолютные значения концентрации ВВ в существенной степени зависят от гранулометрического состава и типа донных отложений. Данный алгоритм [32] применялся для получения количественных параметров, которые использовались для анализа сезонной и пространственной изменчивости ВВ в Азовском море. При этом верификация получаемых значений по натурным данным в настоящей работе не проводилась по следующим причинам. Во-первых, спутниковые данные о концентрации ВВ осреднены попиксельно с разрешением по площади в 1 км², что не позволяет проводить корректное сопоставление с данными точечных контактных измерений. Сравнение абсолютных значений концентрации проводилось только в рамках настоящего исследования. Во-вторых, измерения *in situ* проводились в отдельных точках эпизодически, в основном при штилевых либо маловетренных условиях, и не охватывают ситуации сильного волнения, при которых формируются максимальные концентрации ВВ. Дополнительно при анализе ситуаций выборочно привлекались композитные *RGB*-изображения (*R – red, G – green, B – blue*) *MODIS* в псевдонатуральных цветах.

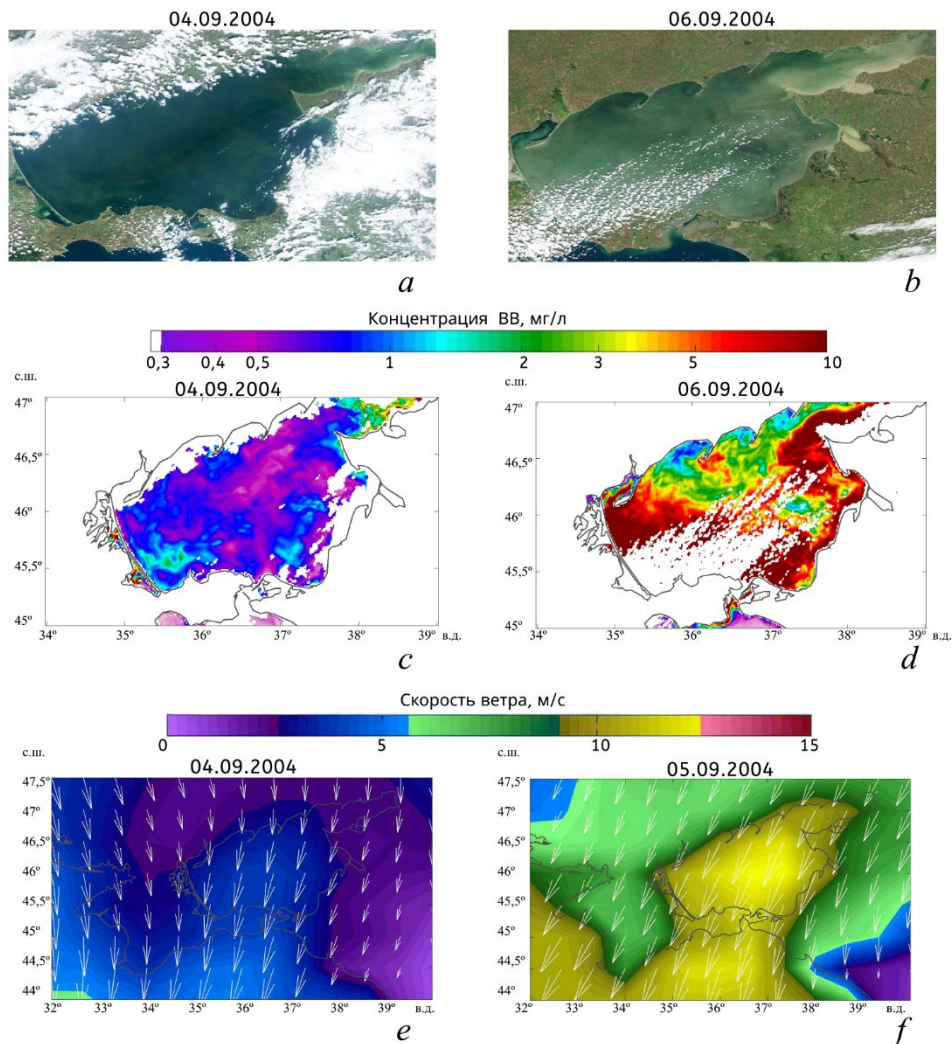
Анализ пространственных особенностей распространения ВВ с более высоким разрешением выполнен по данным *OLI (Operational Land Imager) Landsat-8, -9* (разрешение 30 м) и *MSI (Multispectral Instrument) Sentinel-2* (разрешение 10 м) за 2016–2022 г., полученным на порталах *USGS* (URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/>) и *Copernicus Data Space Ecosystem* (URL: <https://dataspace.copernicus.eu>) соответственно. Отбирались изображения с облачным покрытием не более 30 % площади исследуемого района.

Анализ влияния ветровых условий на взмучивание вод проведен с использованием данных реанализа полей ветра *NCEP (National Centers for Environmental Prediction) High Resolution Global Forecast System* с пространственным разрешением 1 × 1° и временной дискретностью 6 ч. Данные предоставлены отделом дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института РАН (URL: <http://dvs.net.ru/>).

Результаты и обсуждение

Азовское море регулярно подвергается интенсивному ветро-волновому воздействию, под влиянием которого воды характеризуются повышенной мутностью, в ряде случаев проявляющейся по всей акватории моря [5]. Такие ситуации можно наблюдать на оптических спутниковых снимках в псевдонатуральных цветах (*RGB*-композит) (рис. 2, *a, b*).

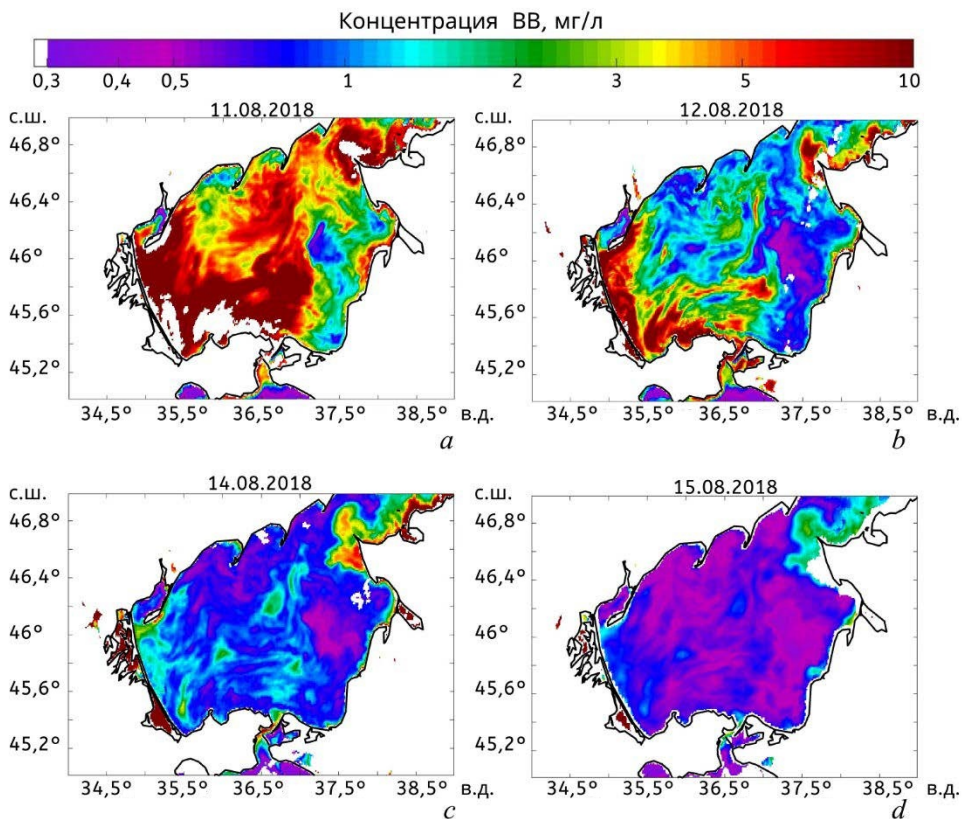
Из массива ежесуточных спутниковых изображений *MODIS* за 2003–2024 гг. были отобраны случаи с повышенной мутностью вод. Сопоставление выбранных изображений с метеорологическими условиями показало, что под воздействием ветра любого направления со скоростью более 10 м/с, даже относительно непродолжительного (1–2 сут), мутность вод увеличивается почти во всем регионе исследования. На рис. 2 представлен характерный пример такого воздействия: с 4 по 6 сентября 2004 г. усиление действующего над морем ветра с 5 м/с и менее до 10–12 м/с (рис. 2, *e, f*) вызвало резкий рост концентрации ВВ почти во всех районах моря с 0,5–1 до 3–10 мг/л (рис. 2, *c, d*).



Р и с. 2. Повышение мутности в акватории Азовского моря с 4 по 6 сентября 2004 г.: *a, b* – RGB-композиционные изображения *MODIS Aqua* в псевдонатуральных цветах; *c, d* – данные *MODIS Aqua* о концентрации ВВ. Поля ветра, по данным реанализа ветра *NCEP*, 4 и 5 сентября 2004 г. (*e, f*)

Fig. 2. Turbidity increase in the Sea of Azov water area from September 4 to September 6, 2004: *a, b* are the RGB composite images from *MODIS Aqua* in pseudo-natural colors; *c, d* are the *MODIS Aqua* data on SM concentration. Wind fields from the *NCEP* wind reanalysis data on September 4 and 5, 2004 (*e, f*)

При снижении скорости ветра до 5 м/с и менее наблюдалось уменьшение мутности вод. В большинстве проанализированных случаев процесс осветления центральной части акватории при слабых устойчивых ветрах длился в среднем 3–4 сут. Примером служит ситуация 11–15 августа 2018 г., когда скорость ветра над регионом снизилась с 10–12 до 2–5 м/с (рис. 3). На снимке от 11 августа концентрация ВВ в водах почти всей акватории достигала 5–10 мг/л (рис. 3, *a*), в последующие дни она постепенно снижалась в восточной части моря, а 15 августа почти во всей акватории она не превышала 1,5 мг/л (рис. 3, *b – d*).



Р и с. 3. Снижение концентрации ВВ в акватории Азовского моря, по данным *MODIS Aqua* о концентрации ВВ: *a* – 11.08.2018; *b* – 12.08.2018; *c* – 14.08.2018; *d* – 15.08.2018

F i g. 3. Decrease in SM concentration in the Sea of Azov area based on the *MODIS Aqua* data on SM concentration: *a* – 11.08.2018; *b* – 12.08.2018; *c* – 14.08.2018; *d* – 15.08.2018

Рассмотрим в качестве типичного примера взмучивание ВВ и последующее его осаждение с 23 июля по 8 августа 2014 г. (рис. 4, 5). При действии северо-восточного ветра со скоростью, не превышающей 5 м/с, 23 июля 2014 г. воды большей части акватории содержали малое количество ВВ (до 1,5 мг/л) (рис. 4, *a*; 5), исключая Таганрогский залив, где в летний период характерно активное «цветение» фитопланктона [15, 33]. На снимках от 26 июля 2014 г. (рис. 4, *b*) выделяются зоны мутных вод в северной и северо-западной частях Азовского моря, что обусловлено усилением ветра до 7 м/с (рис. 5). Далее 27–28 июля 2014 г. при дальнейшем усилении ветра до 12 м/с лишь в узкой полосе моря вдоль восточного берега отмечались низкие концентрации ВВ (рис. 4, *c*). С 28 по 30 июля ветер характеризовался плавным снижением скорости, что привело к уменьшению концентрации ВВ на большей части акватории моря (рис. 4, *d*). Усиление ветра с 1 по 3 августа до 13 м/с привело к росту концентрации ВВ до 10 мг/л и более в отдельных районах (рис. 4, *e, f*). Последующее постепенное ослабление ветра 4–10 августа до штилевых условий привело к осаждению ВВ в акватории Азовского моря (рис. 4, *g* – *i*; 5).

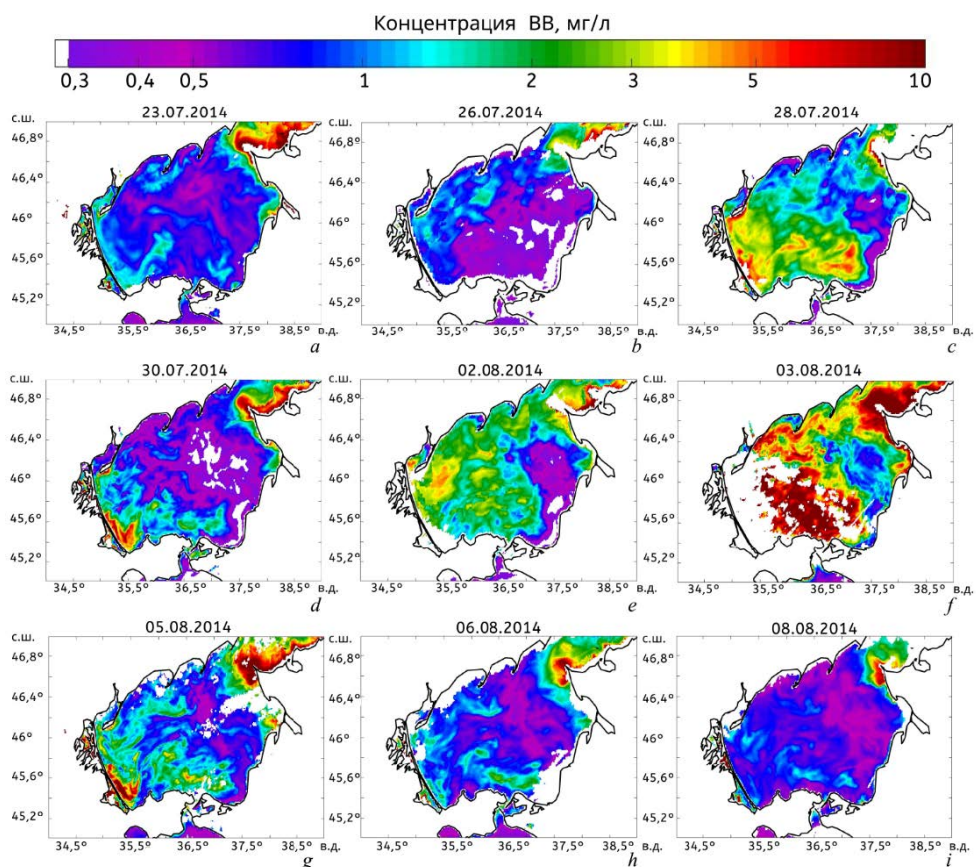


Рис. 4. Концентрация ВВ в акватории Азовского моря, по данным *MODIS Aqua*: *a* – 23.07.2014; *b* – 26.07.2014; *c* – 28.07.2014; *d* – 30.07.2014; *e* – 02.08.2014; *f* – 03.08.2014; *g* – 05.08.2014; *h* – 06.08.2014; *i* – 08.08.2014

Fig. 4. SM concentration in the Sea of Azov area based on the *MODIS Aqua* data: *a* – 23.07.2014, *b* – 26.07.2014, *c* – 28.07.2014, *d* – 30.07.2014, *e* – 02.08.2014, *f* – 03.08.2014, *g* – 05.08.2014, *h* – 06.08.2014 and *i* – 08.08.2014

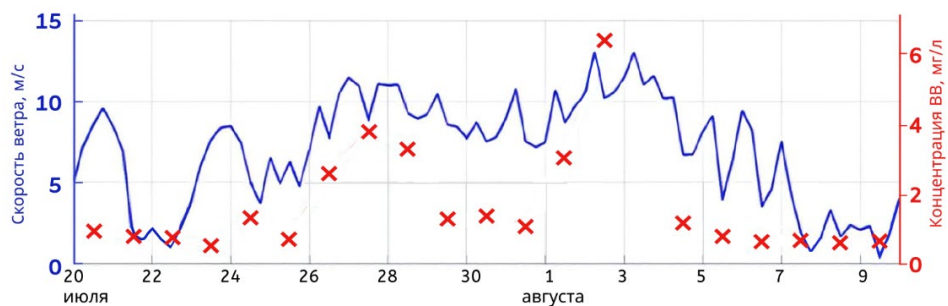
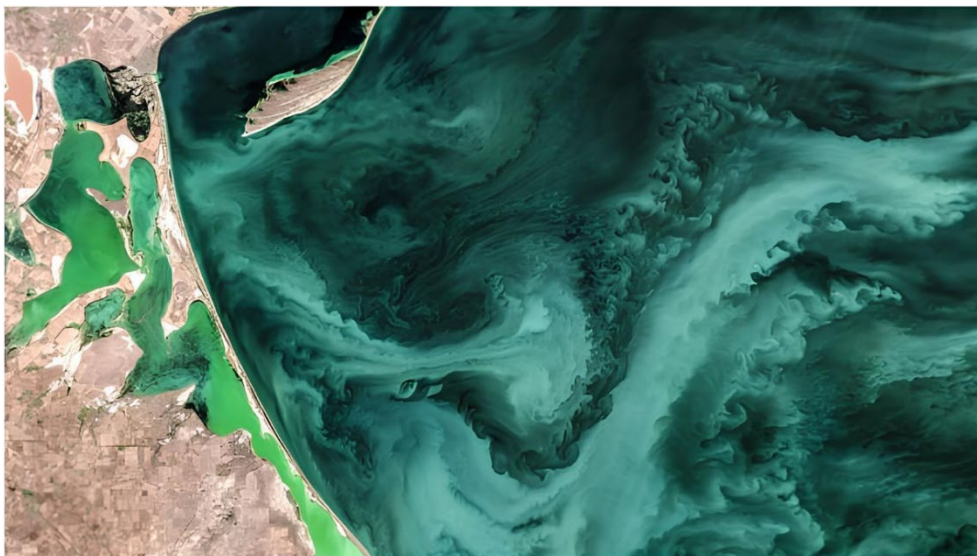


Рис. 5. Скорость ветра, по данным реанализа полей ветра *NCEP*, и концентрация ВВ, по данным *MODIS Aqua*, в Азовском море (исключая куттовую часть Таганрогского залива) за 20 июля – 10 августа 2014 г.

Fig. 5. Wind speed in the Sea of Azov (excluding the apex of Taganrog Bay) based on the *NCEP* wind field reanalysis data, and SM concentration based on the *MODIS Aqua* data for July 20 – August 10, 2014

На снимках высокого разрешения *Sentinel-2* при определенных метеорологических условиях в поле взвеси фиксируются существенные оптические неоднородности. На рис. 6 представлено образование вихревого диполя диаметром до 15 км в береговой зоне близ Арабатской стрелки, на периферии наблюдаются более мелкие неоднородности взвеси в виде малых вихрей.



Р и с. 6. Вихревые структуры в западной части акватории Азовского моря вдоль Арабатской стрелки на спутниковом изображении *Sentinel-2* (RGB-композит в псевдонатуральных цветах) от 14.09.2021

F i g. 6. Eddy structures in the western Azov Sea along Arabat Spit in the *Sentinel-2* satellite image (RGB composite in pseudo-natural colors) dated 14.09.2021

Изменение яркости восходящего излучения на спутниковых снимках высокого разрешения служит хорошим трассером динамических процессов. Однако концентрация ВВ на мелководье в значительной степени может определяться типом донных отложений. Анализ снимков *MODIS Aqua* показал, что при ветро-волновом воздействии в одних и тех же районах Азовского моря регулярно возникают более прозрачные участки, окруженные более мутной водой (рис. 7). В частности, такая ситуация наблюдается в восточной части акватории в районе Ачужевской, Железинской, Елениной банок; к юго-востоку от Обиточной косы, расположенной на северном берегу моря. Рельеф дна этих районов характеризуется неоднородностью с глубинами над банками до 10 м. Сопоставление с картой донных отложений Азовского моря [4] выявило, что большая часть дна Азовского моря покрыта глинистыми алевроито-пелитовыми илами (фракция менее 0,1 мм), тогда как пески (фракция 1–0,1 мм) распространены вдоль береговой линии и только на вышеуказанных участках выходят мористее. Вероятно, различия в гранулометрическом составе донных осадков приводят к неодинаковому их взмучиванию и осаждению, что и фиксируется на спутниковых изображениях (рис. 7).



a



b

Р и с. 7. Спутниковые изображения (*RGB*-композит в псевдонатуральных цветах): *a* – *MODIS Aqua* 11.09.2019; *b* – *Sentinel-2* 08.05.2022. Красной пунктирной линией обозначены границы распространения песка (фракция 1–01 мм) по [4]

Fig. 7. Satellite images (*RGB* composite in pseudo-natural colors): *a* – *MODIS Aqua* on 11.09.2019; *b* – *Sentinel-2* on 08.05.2022. Red dotted line denotes the boundaries of sand distribution (1–01 mm fraction) according to [4]

На следующем этапе работы по массиву ежесуточных данных *MODIS Aqua* за 2003–2024 гг. (более 3000 спутниковых изображений) построена карта средней концентрации ВВ в Азовском море (рис. 8).

Для центральной части акватории Азовского моря с глубинами более 9–10 м характерны значения концентрации ВВ до 3 мг/л. Минимальные концентрации ВВ отмечаются в прилегающем к Керченскому проливу районе, что связано с регулярными затоками более прозрачных черноморских вод с существенно меньшей, по сравнению с водами Азовского моря, концентрацией ВВ и хлорофилла *a*. Пространственно-временная изменчивость и особенности проявления черноморских затоков по спутниковым данным описаны в работе [17], где показано, что области наиболее частого их распространения соответствуют районам с минимальными концентрациями ВВ.

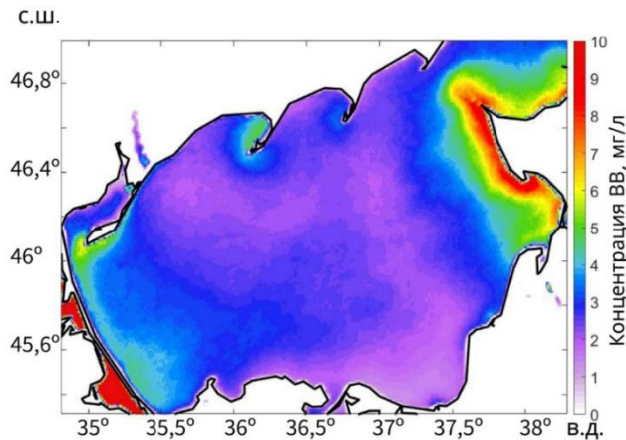


Рис. 8. Карта средней концентрации ВВ в Азовском море, по данным массива *MODIS Aqua* за 2003–2024 гг.

Fig. 8. Map of SM average concentration in the Sea of Azov based on the *MODIS Aqua* data array for 2003–2024

Наибольшие концентрации ВВ отмечаются в заливе Сиваш, на мелководьях с глубинами до 6–8 м (рис. 8), а в прибрежной зоне Ейского п-ова, косы и банки Долгой, Елениной банки значения достигают 10 мг/л (рис. 8, 9). Аккумулятивные формы, сложенные преимущественно ракушечным детритом и кварцевым песком [2], далеко вдаются в море и наиболее подвержены активному ветро-волновому воздействию (волны и нагоны). Разрушение берега и подводного берегового склона района в результате абразии приводит к большому поступлению терригенного ВВ в прилегающую акваторию.

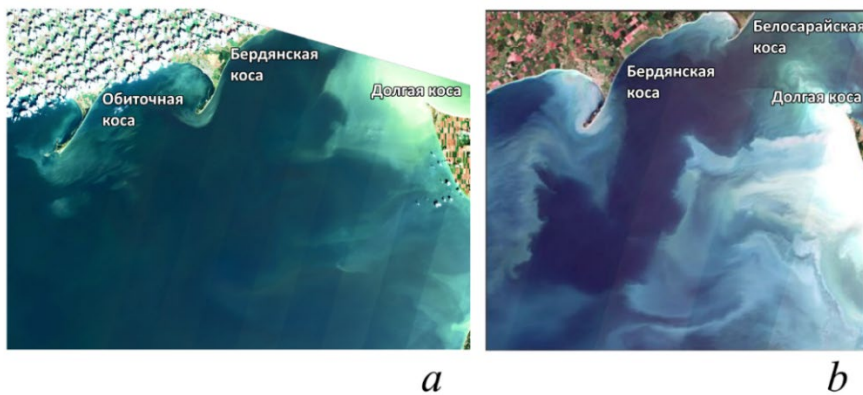


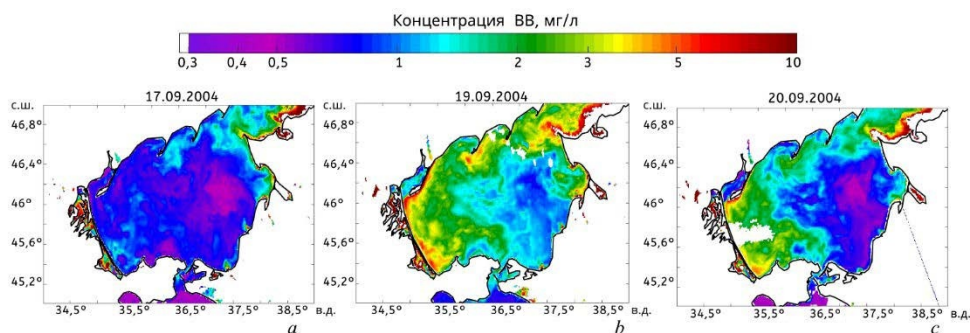
Рис. 9. Фрагменты спутниковых изображений: *a* – *Landsat-8* от 24.06.2016; *b* – *Sentinel-2* от 27.04.2018

Fig. 9. Fragments of satellite images: *a* – *Landsat-8* dated 24.06.2016; *b* – *Sentinel-2* dated 27.04.2018

Повышенные концентрации ВВ (5–6 мг/л) отмечаются и в районах прибрежной зоны Арабатской стрелки и косы Бирючий остров, Обиточной и Бердянской кос, что также связано в основном с поступлением ВВ в результате

абразии. Сопоставление спутниковых изображений *MSI Sentinel-2* и *OLI Landsat-8*, -9 с данными о полях ветра показало, что увеличение мутности в этих районах происходит при скорости ветра более 5–8 м/с. При этом окружающие воды более глубоководных районов могут оставаться относительно чистыми (рис. 9).

На рис. 10 представлен характерный пример, когда при восточном и северо-восточном ветре со скоростью до 7 м/с на снимках *MODIS Aqua* за 17.09.2004 г. области с повышенными значениями ВВ локализовались в районе кос Обиточной, Бердянской, Белосарайской и Долгой. Усиление ветра до 8–10 м/с 19–20 сентября 2004 г. привело к расширению на снимках зон более мутных вод вдоль северного и западного побережий Азовского моря. В то же время в центральной и восточной частях моря концентрация ВВ оставалась низкой.

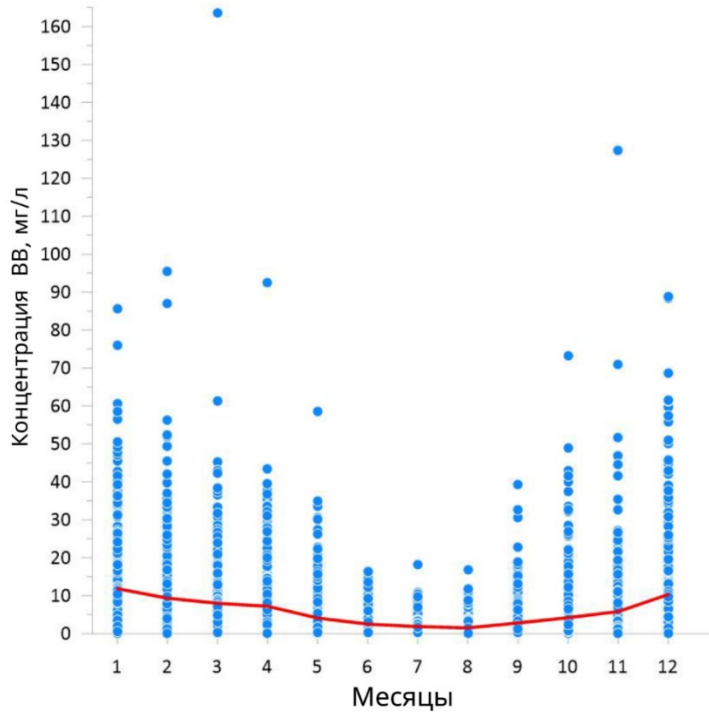


Р и с. 10. Концентрация ВВ в акватории Азовского моря, по данным *MODIS Aqua*: *a* – 17.09.2004; *b* – 19.09.2004; *c* – 20.09.2004

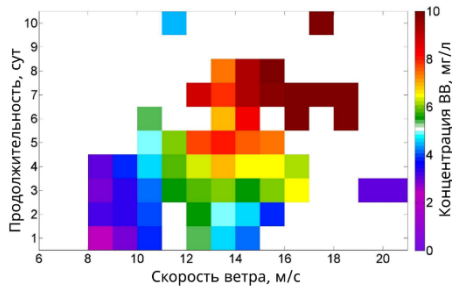
F i g. 10. SM concentration in the Sea of Azov area based on the *MODIS Aqua* data: *a* – 17.09.2004; *b* – 19.09.2004; *c* – 20.09.2004

Сезонная изменчивость концентрации ВВ в Азовском море, полученная осреднением всех снимков *MODIS Aqua* по всей исследуемой акватории за 2003–2024 г., представлена на рис. 11. Наибольшие значения концентрации ВВ характерны для зимнего периода (7–9 мг/л) с максимумом в январе; наиболее прозрачны воды с июня по сентябрь (0–1 мг/л).

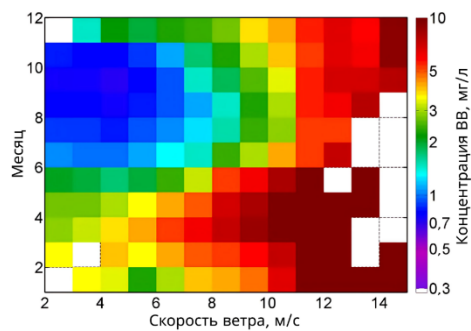
На интенсивность ветрового взмучивания влияет не только скорость ветра, но и другие параметры – продолжительность шторма, определяющая длительность воздействия турбулентной энергии на донные осадки, а также стратификация, которая гасит турбулентность в верхнем слое. Для количественной оценки зависимости концентрации ВВ от ветровых характеристик были выделены штормовые события со среднесуточной скоростью ветра более 8 м/с. Для каждого события определялись среднее и максимальное значения скорости ветра, продолжительность шторма, а также средняя и максимальная концентрации ВВ в период шторма. Выявлено, что интенсивное образование ВВ происходит при ветрах скоростью более 10 м/с (рис. 12). При одинаковой скорости ветра концентрация ВВ может сильно различаться в зависимости от продолжительности шторма: наибольшие значения (более 10 мг/л) фиксировались при интенсивных штормах со скоростью более 14 м/с и продолжительностью свыше 5 сут, тогда как при кратковременном (1–2 сут) воздействии ветра той же интенсивности концентрация ВВ не превышала 5 мг/л.



Р и с. 11. Сезонный ход (красная линия) и значения (голубые точки) концентрации ВВ в акватории Азовского моря за 2003–2024 гг., по данным снимков *MODIS Aqua*
F i g. 11. Seasonal variation (red line) and values (blue dots) of SM concentration in the Sea of Azov area for 2003–2024 based on the *MODIS Aqua* photographs



Р и с. 12. Концентрация ВВ, по спутниковым снимкам *MODIS Aqua*, в зависимости от среднесуточной скорости ветра более 8 м/с (по данным реанализа *NCEP*) за 2003–2017 гг. для центральной части Азовского моря
F i g. 12. SM concentration (based on the *MODIS Aqua* satellite photographs) in the central Azov Sea depending on the average daily wind speed exceeding 8 m/s (*NCEP* reanalysis data) for 2003–2017



Р и с. 13. Концентрация ВВ, по спутниковым снимкам *MODIS Aqua*, в зависимости от скорости ветра (по данным реанализа *NCEP*) и месяца года за 2003–2017 гг. для центральной части Азовского моря
F i g. 13. SM concentration (based on the *MODIS Aqua* satellite photographs) in the central Azov Sea depending on wind speed (*NCEP* reanalysis data) and month of the year for 2003–2017

Описанная зависимость имеет также выраженный сезонный ход (рис. 13). В зимний и весенний периоды рост концентрации ВВ до 4 мг/л наблюдается уже при ветре скоростью 5 м/с, тогда как в летнее время и ранней осенью рост фиксируется только при скорости ветра более 9 м/с. Одной из причин такого распределения концентрации ВВ в теплое время года может быть значительный прогрев вод и формирование термоклина ближе ко дну. В результате для того, чтобы течения достигли дна, необходимо более интенсивное ветровое воздействие, которое разрушит термическую стратификацию в период прогрева. Диссипация турбулентной энергии вследствие высокой стратификации водной колонны приводит к ослаблению процесса взмучивания донных осадков.

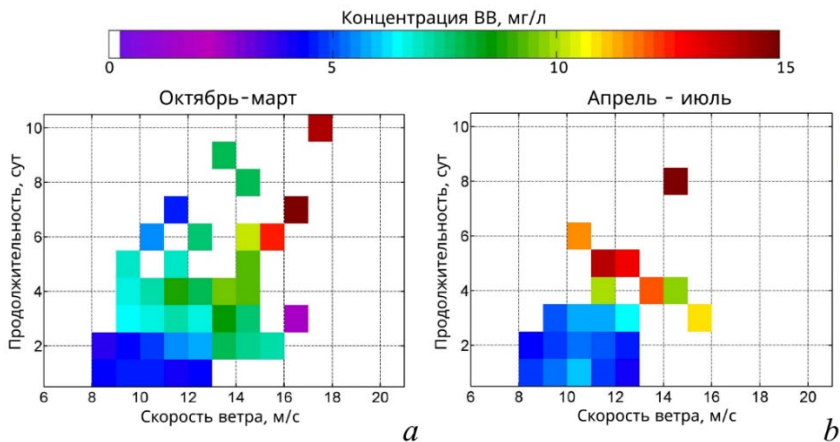


Рис. 14. Концентрация ВВ, по спутниковым снимкам *MODIS Aqua*, в зависимости от среднесуточной скорости штормовых событий более 8 м/с (по данным реанализа *NCEP*) за 2003–2017 гг. для центральной части Азовского моря: *a* – с октября по март; *b* – с апреля по июль

Fig. 14. SM concentration (based on the *MODIS Aqua* satellite photographs) in the central Azov Sea depending on the average daily speed of storm events exceeding 8 m/s (*NCEP* reanalysis data) for 2003–2017: *a* – from October to March, and *b* – from April to July

Помимо этого, большие концентрации ВВ в зимний период могут наблюдаться в результате более продолжительного воздействия штормов. На рис. 14, *a* показано, что в холодное время года (с октября по март) штормовые события со средней скоростью ветра более 8 м/с и продолжительностью более 6 сут фиксируются значительно чаще, чем в теплое, с апреля по июль (рис. 14, *b*). При этом концентрация ВВ более 5 мг/л в центральной части акватории наблюдается при ветре со скоростью 9 м/с и продолжительностью 3 сут. В теплое время года концентрация ВВ намного реже превышает 5 мг/л при штормах длительностью менее 3 сут. Отметим, что в летний период и ранней осенью в Азовском море происходит интенсивное «цветение» фитопланктона [15, 16], поэтому рост концентрации ВВ в этот период может быть связан с биологическими процессами. В связи с этим из анализа (рис. 14) были исключены август и сентябрь.

Заключение

На основе массива спутниковых данных *MODIS*, *Landsat-8* и *Sentinel-2* выполнен анализ особенностей пространственного и сезонного распределения концентрации общего ВВ в акватории Азовского моря (исключая кутовую часть Таганрогского залива) за 2003–2024 гг.

Анализ снимков *MODIS Aqua* показал, что при ветро-волновом воздействии в поле концентрации ВВ фиксируются оптические неоднородности, которые часто проявляются в виде зон с низким содержанием ВВ: в восточной части акватории в районе Ачужевской, Железинской, Елениной банок, к юго-востоку от Обиточной косы на северном берегу моря. Донные осадки этих районов преимущественно сложены песками (фракция 1–0,1 мм), тогда как для остальной части моря характерны алеврито-пелитовые осадки (фракция менее 0,1 мм). В силу существенных различий в гранулометрическом составе донных осадков их взмучивание и осаждение происходит неодинаково, что фиксируется на спутниковых изображениях.

Для центральной части акватории Азовского моря с глубинами более 9–10 м характерны низкие значения концентрации ВВ. Повышенные значения концентрации ВВ отмечаются на мелководьях с глубинами до 6–8 м, что связано с поступлением взвеси в результате абразии. Максимальные концентрации ВВ фиксируются в прибрежной зоне Ейского п-ова, косы Долгой и банки Долгой, Елениной банки (до 10 мг/л), Арабатской стрелки и косы Бирючий остров, кос Обиточной и Бердянской (5–6 мг/л).

Анализ влияния штормовых ситуаций показал, что резкое увеличение концентрации ВВ в акватории Азовского моря происходит при увеличении скорости ветра более 10 м/с, при этом через 1–2 сут после начала действия ветра мутность вод увеличивается почти по всему району исследования. Наиболее высокие значения концентрации ВВ (более 10 мг/л) зафиксированы при ветре скоростью более 14 м/с и продолжительностью свыше 5 сут. При снижении скорости ветра до значений 5 м/с и менее очищение центральной части акватории длилось в среднем 3–4 сут.

В сезонном ходе средней концентрации ВВ наибольшие значения (7–9 мг/л) отмечаются в зимний период с максимумом в январе, минимальные (0–1 мг/л) – с июня по сентябрь. Исследование сезонного распределения концентрации ВВ при штормовых ситуациях показало, что в зимний и весенний периоды рост концентрации ВВ до 4 мг/л наблюдается даже при ветре скоростью 5 м/с. В летние месяцы увеличение концентрации ВВ более 2 мг/л происходит только при ветре скоростью свыше 9 м/с. Ослабление взмучивания донных осадков в летний период связано как с ослаблением ветровой активности в целом, так и с усилением стратификации водной колонны, затрудняющим проникновение энергии ветро-волнового воздействия до дна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г. Г. Геоморфологические особенности шельфа Азовского моря // Вестник Южного научного центра РАН. 2006. Т. 2, № 1. С. 44–48. EDN KVVYSSX.
2. Матишов Г. Г., Ковалева Г. В., Польшин В. В. Новые данные о скорости седиментации в Азовском море в позднем голоцене // Доклады академии наук. 2009. Т. 428, № 6. С. 820–823. EDN KWIZRR.

3. Использование динамического подхода при районировании берегов Азовского моря / А. Е. Цыганкова [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Т. 1, № 5. С. 207–213. EDN OCQLZA. <https://doi.org/10.23885/2500-395X-2020-1-5-207-213>
4. Матишов Г. Г. Сейсмопрофилирование и картирование новейших отложений дна Азовского моря // Вестник Южного научного центра. 2007. Т. 3, № 3. С. 32–40. EDN KWMJON.
5. Сорокина В. В., Кулыгин В. В. Долговременная изменчивость относительной прозрачности вод Азовского моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 3. С. 324–331. EDN QBRGLN. <https://doi.org/10.7868/S003015741303012X>
6. Громов В. В. Водная и прибрежно-водная растительность северного и западного побережья Азовского моря // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2012. Т. 5, № 2. С. 121–137. EDN PEXK CZ.
7. Косьян Р. Д., Крыленко М. В. Комплексная характеристика современного состояния берегов Азовского моря // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей и их побережий. Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2007. Т. 9. С. 50–67.
8. Кушнир В. М. Оценка характеристик взвешенных наносов по данным оптических сканеров // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2008. Вып. 16. С. 224–235. EDN YUNNRH.
9. Азовское море: современные абразионные процессы и проблемы берегозащиты / Г. Г. Матишов [и др.] // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471, № 4. С. 483–486. EDN XGWGOX. <https://doi.org/10.7868/S086956521634020X>
10. Мониторинг опасных экзогенных процессов в береговой зоне Азовского моря с применением данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий / Г. И. Скрипка [и др.] // Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения : сборник научных трудов: посвящается Году экологии в России и 50-летию Института водных проблем РАН, г. Сочи, 02–07 октября 2017 г. Новочеркасск : ООО «Лик», 2017. С. 531–536. EDN ZRZJ JT.
11. Абразионные берега Азовского и Черного морей / А. А. Ермолов [и др.] // Экология. Экономика. Информатика. Серия: геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2019. № 4. С. 142–146. EDN QRIEYW. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2019-2-4-142-146>
12. Сорокина В. В., Бердников С. В. Математическое моделирование терригенного осадконакопления в Азовском море // Океанология. 2008. Т. 48, № 3. С. 456–466. EDN ILAIQB.
13. Василенко Н. В., Кубряков А. А., Станичный С. В. Характеристики плюма реки Кубань по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2024. № 5. С. 3–18. EDN RSKHWN. <https://doi.org/10.31857/S0205961424050012>
14. Лужняк О. Л. Развитие фитопланктона Таганрогского залива в весенне-летний период после исключительно теплой зимы 2006/2007 гг. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2011. № 1. С. 67–71. EDN NDWJ JD.
15. Особенности цветения цианобактерий в центральной части Азовского моря по спутниковым данным / Н. В. Василенко [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 5. С. 166–180. EDN PTHWYW. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-166-180>
16. Пространственное распределение и сезонная динамика концентрации хлорофилла “а” в Азовском море по данным спутниковых снимков спектрометра MERIS / В. В. Сапрыгин [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 5. С. 751–762. EDN XWVHXF. <https://doi.org/10.1134/S0030157418050131>
17. Распространение черноморских вод в акватории Азовского моря по спутниковым данным и модели NEMO / Н. В. Василенко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 4. С. 528–552. EDN IOEERJ.
18. Miller R. L., McKee B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 93, iss. 1–2. P. 259–266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.07.012>

19. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery / M. Zhang [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2010. Vol. 114, iss. 2. P. 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.09.016>
20. *Burenkov V. I., Goldin Y. A., Kravchishina M. D.* The distribution of the suspended matter concentration in the Kara Sea in September 2007 based on ship and satellite data // *Oceanology*. 2010. Vol. 50. P. 798–805. EDN OHOJIR. <https://doi.org/10.1134/S0001437010050164>
21. Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade / H. Loisel [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 150. P. 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.006>
22. CoastColour Round Robin data sets: a database to evaluate the performance of algorithms for the retrieval of water quality parameters in coastal waters / B. Nechad [et al.] // *Earth System Science Data*. 2015. Vol. 7, iss. 2. P. 319–348. <https://doi.org/10.5194/essd-7-319-2015>
23. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в Юго-Восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета / О. В. Копелевич [и др.] // *Океанология*. 2016. Т. 56, № 1. С. 51–59. EDN VIOSET. <https://doi.org/10.7868/S0030157416010068>
24. Распределение и состав взвешенного осадочного вещества на меридиональных разрезах в Атлантическом океане: прямые определения и спутниковые данные / А. П. Лисицын [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2016. Т. 466, № 2. С. 221–224. EDN VHVKYV. <https://doi.org/10.7868/S0869565216020201>
25. *Кушнир В. М.* Характеристики приповерхностного слоя Азовского моря по данным оптических сканеров системы MODIS // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 3. С. 35–46. EDN KMLRQN.
26. *Кушнир В. М., Бердников С. В.* Взвешенное вещество и хлорофилл-*a* в Азовском море по данным контактных измерений и космических съемок // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2010. Вып. 22. С. 103–115. EDN WTBHVJ.
27. *Кушнир В. М., Поважный В. В., Бердников С. В.* Минеральная и органическая компоненты взвеси по данным космических съемок и непосредственных измерений в Азовском море и Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал*. 2014. № 2. С. 22–31. EDN TEYQZL.
28. Исследование распространения взвешенных веществ в Азовском море по данным Aqua MODIS и результатам моделирования / Т. Я. Шульга [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 481, № 3. С. 324–328. EDN YMRXQT. <https://doi.org/10.31857/S086956520001388-9>
29. *Кочергин В. С., Кочергин С. В., Станичный С. В.* Вариационная ассимиляция спутниковых данных поверхностной концентрации взвешенного вещества в Азовском море // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 2. С. 40–48. EDN GADTAK. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-2-40-48>
30. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море / Т. Я. Чурилова [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. EDN FBORWC. <https://doi.org/10.59887/fpg/ex1p-9vtp-phu8>
31. *Шульга Т. Я., Суслин В. В.* Исследование эволюции пассивной примеси в поверхностном слое Азовского моря на основе усвоения данных сканера MODIS-Aqua в гидродинамическую модель // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 73–80. EDN YAMPAT. <https://doi.org/10.7868/S2073667318030097>
32. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника MODIS / Д. А. Кременчуцкий [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. Вып. 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.

33. Пространственно-временная изменчивость цветений цианобактерий на основе их автоматической идентификации по данным MODIS / П. Н. Лишаев [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2022. № 1. С. 38–52. EDN BASIFE. <https://doi.org/10.31857/S020596142201002X>

Об авторах:

Василенко Надежда Вадимовна, младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 4710-2532**, **Web of Science ResearcherID: JZT-8108-2024**, **Scopus Author ID: 57358387000**, nadinkot.nk@gmail.com

Алескерова Анна Адиловна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5796-2254**, **ORCID: 0000-0003-1451-3440**, **Web of Science ResearcherID: F-2966-2017**, **Scopus Author ID: 57021552600**, annete08@mail.ru

Харитоновна Людмила Викторовна, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7274-6248**, **ResearcherID: Y-17802018**, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, l.kharitonova@mhi-ras.ru

Кубряков Арсений Александрович, заместитель директора по научной работе, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 4371-8879**, **Scopus Author ID: 37072750100**, **WoS ResearcherID: F-8921-2014**, **ORCID ID: 0000-0003-3561-5913**, arskubr@yandex.ru

Станичный Сергей Владимирович, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 8146-9454**, **ORCID: 0000-0002-1033-5678**, **WoS ResearcherID: F-8915-2014**, **Scopus Author ID: 6602344280**, sstanichny@mail.ru