

Научная статья

УДК 551.468.2  
EDN: VXMAGI

## Распределение взвешенного вещества в Каркинитском заливе по спутниковым данным

А. А. Алескерова <sup>✉</sup>, Л. В. Харитонова, Н. В. Василенко,  
А. А. Кубряков, С. В. Станичный

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия  
<sup>✉</sup> [Annete08@mail.ru](mailto:Annete08@mail.ru)

Поступила в редакцию 29.07.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025;  
принята к публикации 16.03.2026.

### Аннотация

**Цель.** Исследовано пространственно-временное распределение взвешенного вещества в акватории Каркинитского залива по спутниковым данным высокого и среднего разрешения.

**Методы и результаты.** Использованы спутниковые данные *MODIS/Aqua*, *OLI Landsat-8*, *-9* и *MSI Sentinel-2* о яркости восходящего излучения и концентрации взвешенного вещества за 2003–2024 гг. Для анализа ветро-волнового режима проведены статистический анализ ретроспективных расчетов ветра и волнения по данным реанализов *ERA-Interim*, *ERA5* и *SWAN-ERA* за тот же период и математическое моделирование типовых полей волнения для наиболее волноопасных направлений. Построены карты распределения концентрации взвешенного вещества: среднемноголетняя, для каждого месяца, для преобладающих штормовых ветров и различных ветро-волновых ситуаций. Наиболее низкие значения (до 0,75 мг/л) наблюдаются в западной глубоководной части акватории, восточная часть залива характеризуется более сложной структурой распределения и повышенными (в 2–4 раза) концентрациями взвешенного вещества. В сезонном ходе выделены: теплый период (май – октябрь) с относительно прозрачными водами (0,6–0,9 мг/л); холодный сезон (декабрь – март) с максимальными концентрациями взвешенного вещества (5,4–6 мг/л), а также весенний и осенний периоды. Доминирующим фактором сезонной изменчивости является штормовое ветро-волновое воздействие. В межгодовой изменчивости прямая связь среднегодовых значений концентрации взвешенного вещества и суммарного индекса мощности шторма не выявлена из-за ограничения спутниковых данных в условиях облачности. Впервые обнаружено, что значимым фактором, влияющим на распределение взвешенного вещества в восточной части залива, служит Малое филофорное поле (пониженные значения яркости над ним фиксируются на большинстве снимков).

**Выводы.** Акватория Каркинитского залива характеризуется высокой динамикой и пространственной неоднородностью распределения взвешенного вещества. Ветро-волновой режим определяет сезонный ход концентрации взвеси.

**Ключевые слова:** взвешенное вещество, спутниковые данные, *MODIS-Aqua*, *Landsat*, Каркинитский залив, Черное море, ветро-волновой режим, ретроспективные расчеты, Малое филофорное поле

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

**Для цитирования:** Распределение взвешенного вещества в Каркинитском заливе по спутниковым данным / А. А. Алескерова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 3. С. 447–466. EDN VXMAGI.

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

## Distribution of Suspended Matter in Karkinitsky Bay Based on Satellite Data

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
 [Annete08@mail.ru](mailto:Annete08@mail.ru)

### Abstract

**Purpose.** The purpose of the work is to study the spatial-temporal distribution of total suspended matter in the Karkinitsky Bay water area using high- and medium-resolution satellite data.

**Methods and Results.** The data of *MODIS/Aqua*, *OLI Landsat-8*, *-9* and *MSI Sentinel-2* satellites on the brightness of upwelling radiation and the total suspended matter concentration for 2003–2024 were applied in the study. To analyze the wind and wave regime, the retrospective calculations of wind and wave conditions were statistically analyzed based on the *ERA-Interim*, *ERA5* and *SWAN-ERA* reanalysis data for the same period, and the typical wave fields were mathematically modeled for the most wave-hazardous regions. The following maps of total suspended matter distribution were compiled: long-term average one, those for each month, for prevailing storm winds and for various wind-wave situations. It was revealed that the lowest values (up to 0.75 mg/l) were typical of the western deep part, its eastern part was characterized by a more complex structure of distribution and a higher (by 2–4 times) total suspended matter concentrations. Within the seasonal variation, the following periods are distinguished: warm period (May – October) with relatively transparent waters (0.6–0.9 mg/l), cold season (December – March) with maximum total suspended matter concentrations (5.4–6 mg/l), and the periods of spring and autumn off-seasons. The dominant factor in seasonal variability is the storm wind-wave impact. As for the interannual variability, no direct relationship between the annual average values of suspended matter concentration and total storm power index was identified due to the limit of satellite data in cloudy conditions. It is found for the first time that the Small Phyllophora Field constitutes a significant factor influencing the distribution of suspended matter in the eastern part of the bay (lower brightness values above it are recorded in most images).

**Conclusions.** The waters of Karkinitsky Bay are characterized by high dynamics and spatial heterogeneity of suspended matter distribution. The seasonal variation of total suspended matter concentration is conditioned by the wind-wave regime.

**Keywords:** suspended matter, satellite data, *MODIS-Aqua*, *Landsat*, Karkinitsky Bay, Black Sea, wind-wave regime, retrospective calculations, Small Phyllophora Field

**Acknowledgments:** The study was carried out with support of 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:** Aleskerova, A.A., Kharitonova, L.V., Vasilenko, N.V., Kubryakov, A.A. and Stanichny, S.V., 2026. Distribution of Suspended Matter in Karkinitsky Bay Based on Satellite Data. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 482-500.

### Введение

Расположенный на северо-западном шельфе Черного моря Каркинитский залив имеет важное экологическое и хозяйственное значение. Около половины его площади и часть прилегающей береговой зоны относятся к пяти особо охраняемым природным территориям (ООПТ) разной категории и статуса [1, 2]. В его акватории находятся Голицынское и Архангельское газовые месторождения, Каланчакское песчаное месторождение, на берегах размещены промышленные и сельскохозяйственные предприятия. В условиях растущего антропогенного влияния и климатических изменений важность мониторинга экосистем залива неоспорима.

Залив имеет сложную конфигурацию береговой линии и рельеф подводной части (рис. 1). Побережье различается по происхождению и структуре. Бакальская коса и ее подводное продолжение разделяют залив на западную (глубиной до 36 м) и мелководную восточную (с глубинами до 10–11 м) части.

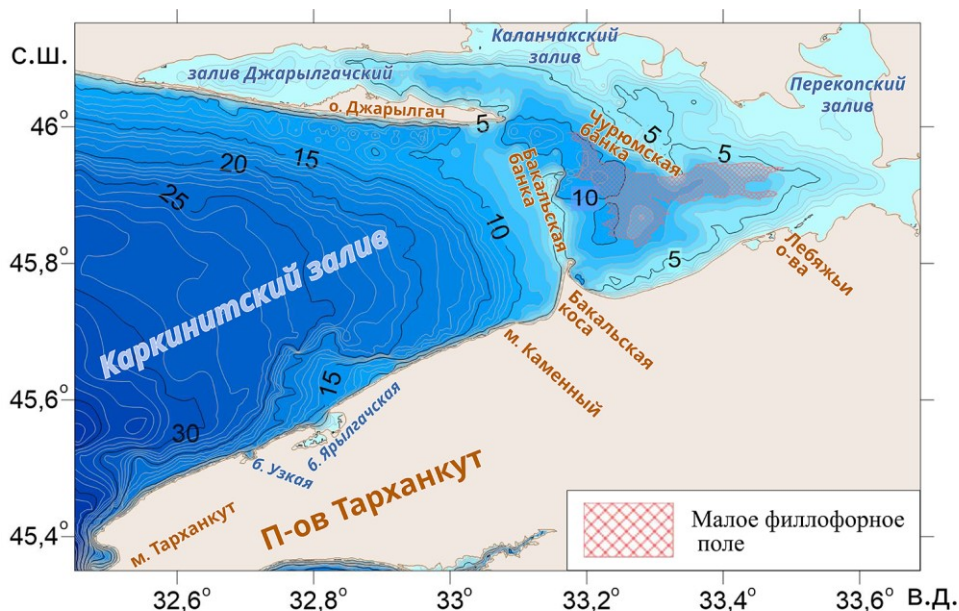


Рис. 1. Батиметрическая карта Каркинитского залива  
Fig. 1. Bathymetric map of Karkinitzky Bay

Для Тарханкутского п-ова характерны абразионные и абразионно-оползневые берега в известняках с приглубым глыбовым бенчем. Пересыпи бухт Ярылгачской и Узкой сложены песками. Восточнее с. Владимировка клиф становится глинистым. У корня западной ветви Бакальской косы клиф (высотой 8–10 м) и подводный склон сложены легкоразмываемыми лессовидными суглинками<sup>1</sup> [3]. Бакальская коса и одноименная банка являются аккумулятивными формами, сложенными кварцевым песком с примесью известнякового песка, гравия, гальки и оолитовых зерен [3, 4]. Прилегающий шельф представляет собой пологую равнину с уклоном на запад. Глубины над Бакальской банкой составляют 2,5–5 м [5].

Южные берега восточной части исследуемой акватории до Каланчакского залива представлены аккумулятивными формами, сложенными в основном ракушечным материалом и выбросами zostеры. На северных берегах, кроме ракушечного детрита, присутствует кварцевый песок. Дно мелководий выровнено покровом илистых отложений и представлено фитocenозами морских трав и филлофоры [6], вследствие чего действие волн на берег ослаблено<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Зенкович В. П. Берега Черного и Азовского морей. Москва : Гос. изд-во географ. лит-ры, 1958. 374 с.

<sup>2</sup> Правоторов И. А. Геоморфологическая характеристика береговой зоны // Биология северо-западной части Черного моря. Киев : Наукова думка, 1967. Глава 1. С. 6–13.

Северное побережье западной части Каркинитского залива представлено песчаными аккумулятивными формами – косой-островом Джарылгач и Тендровской косой. Между ними существует абразионный берег длиной 18 км [7].

Пространственное распределение прозрачности вод в заливе зависит от количества поступающего общего взвешенного вещества (ВВ) и динамики вод. Состав и концентрация ВВ в исследуемой акватории обусловлены ветро-волновым взмучиванием донных наносов, абразией берегов и бенча, золовыми процессами, продуцированием и отмиранием фитопланктона, проникновением в залив вод северо-западного шельфа и трансформированных речных вод, антропогенными факторами (стоки береговые и из оросительных систем Северного Крыма) [8, 9].

Основным фактором, влияющим на концентрацию и пространственное распределение ВВ, является ветро-волновое воздействие. Интенсивное поступление минеральных частиц происходит при разрушении берегов и взмучивании донных наносов в результате штормов. Согласно [10, 11], скорость ветра и штормовое волнение имеют хорошо выраженный годовой ход с максимумом в холодный период. Преобладает волнение от северных румбов, однако наибольшие высоты волн создают ветры западного и юго-западного направлений. Особо разрушительными являются глубокие циклоны, случающиеся примерно раз в 7–10 лет.

Динамика ВВ в Каркинитском заливе остается малоизученной проблемой, что связано с ограниченным количеством натуральных данных. Постоянные экспедиционные исследования района проводились до 1990-х гг., позже количество данных измерений значительно снизилось [12]. Контактные измерения возможны только в относительно спокойных условиях моря. С 2022 г. по настоящее время доступ в район исследования закрыт, поэтому дистанционное зондирование остается единственным доступным методом исследования.

Спутниковые методы позволяют отслеживать пространственно-временное распределение ВВ, выявлять источники его поступления и оценивать антропогенное влияние. Преимуществом спутникового мониторинга является возможность исследования динамики ВВ на выбранных временных и пространственных масштабах при различных гидрометеорологических условиях. Ограничением служит только наличие облачности над исследуемой акваторией.

По данным оптических сканеров можно оценивать источники поступления, пространственную изменчивость и количественные показатели ВВ различного происхождения в приповерхностном слое [13–19]. Для района Западного Крыма авторами были проведены исследования распределения ВВ при сильных ветрах и влияния субмезомасштабных вихрей на перемещение ВВ [9, 20, 21].

В Каркинитском заливе изменчивость показателя ослабления направленного света и прозрачности вод по архивным данным наблюдений глубины видимости белого диска изучалась в работах [8, 22]. Численное моделирование процессов взмучивания донных осадков, их переноса и осаждения под действием шторма выполнено в работах [23, 24]. Комплексный подход к исследованию придонной динамики вблизи Бакальской косы применен в работе [25], где на основе результатов натуральных измерений комплексом «Донная станция» [26, 27], данных *MODIS* и численного моделирования поверхност-

ных волн и течений получены характеристики взмученных прибрежных и глубоководных вод с относительно высокой прозрачностью.

Целью настоящей работы является исследование пространственно-временного распределения ВВ в акватории Каркинитского залива по спутниковым данным высокого и среднего разрешения.

### Материалы и методы

Исследование распределения ВВ в Каркинитском заливе проводилось на основе спутниковых снимков *MODIS/Aqua* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) с пространственным разрешением 1 км и временным разрешением 1 сут (*Level-2*) за 2003–2024 гг. Использовались данные о яркости восходящего излучения (*RRS* на длине волны 551 нм) и концентрации взвешенного вещества (*total concentration of suspended matter, TSM*). Для определения концентрации ВВ применялся региональный алгоритм, основанный на комбинации спектральной яркости на различных длинах волн по данным *MODIS/Aqua* [28]. Алгоритм калиброван на основе измерений в водах открытого моря и в прибрежных водах с высокими концентрациями взвеси [29, 30].

Детальное исследование отдельных случаев распространения ВВ в исследуемой акватории проводилось по данным высокого разрешения *OLI* (*Operational Land Imager*) *Landsat-8*, -9 (разрешение 30 м) и *MSI* (*Multispectral Instrument*) *Sentinel-2* (разрешение 10 м), временное разрешение составляет 16 и 10 сут соответственно. Выбирались изображения с облачным покрытием, не превышающим 30% площади исследуемого района. Всего проанализировано 4826 снимков *MODIS* за 2003–2024 гг., 258 снимков *Landsat-8*, -9 за 2013–2025 гг. Сцены *Sentinel-2* использовались для рассмотрения единичных случаев, в частности для изучения положения Малого филофорного поля в Каркинитском заливе. Данные получены в отделе дистанционных методов исследования Морского гидрофизического института (<http://dvs.net.ru>) и из архива *NASA* (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>).

Оценки статистических характеристик ветра и волнения в исследуемой акватории выполнены на основе данных ретроспективных расчетов ветровых волн за 2003–2024 гг. с дискретностью по времени 1 ч. Поля ветра выбирались из глобальных атмосферных реанализов *ERA-Interim* и *ERA5* (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts>). Массив данных ветрового волнения (далее – массив *SWAN-ERA*) получен с помощью численной спектрально-дискретной модели *SWAN* (*Simulating Waves Nearshore*)<sup>3</sup> [31] на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне Крыма. Из массива *SWAN-ERA* были выбраны два узла расчетной сетки, расположенные на входе в залив (на глубине 30 м) и в восточной части залива (на изобате 5 м). Для этих точек сформированы многолетние ряды параметров, включающие скорость и направление ветра на высоте 10 м; высоту значительных волн ( $h_s$ ); средний период волн ( $\bar{\tau}$ ); среднее направление волнения ( $\theta$ ); пиковый период волн ( $\tau_p$ ).

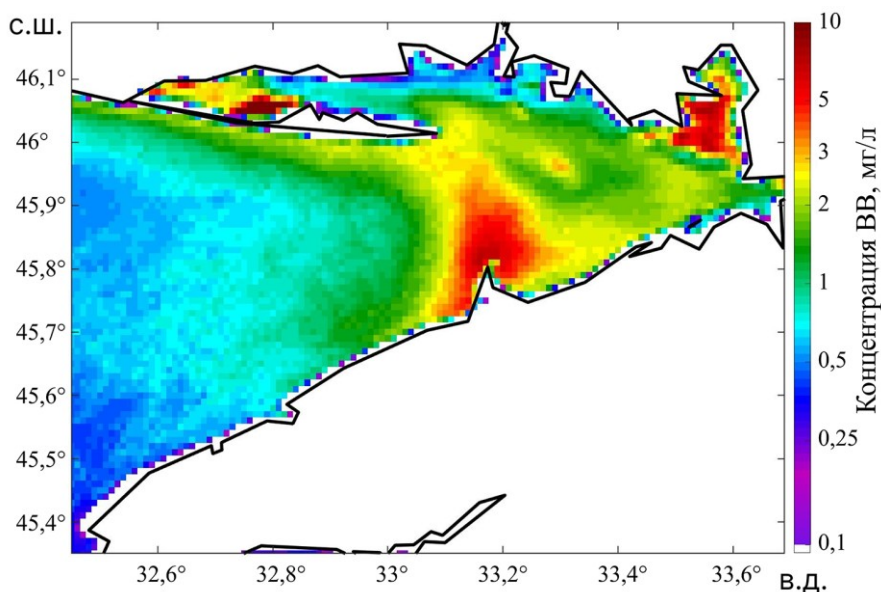
---

<sup>3</sup> SWAN Cycle III version 41.20 / The SWAN team. Delft, Netherlands : Delft University of Technology, 2018. 121 p. (SWAN User Manual).

Для анализа влияния штормов на основе спектральной волновой модели *SWAN* рассчитаны стационарные поля волнения (типичные поля волнения), сформированные однородным по пространству и постоянным по времени ветром скоростью 10 м/с для шести наиболее волноопасных направлений. Повышение точности расчетов достигнуто с применением трехшагового метода вложенных сеток; пространственное разрешение составило ~ 200 м. Более подробно технология моделирования описана в работе [11]. Математические расчеты выполнены на вычислительном кластере Морского гидрофизического института в отделе вычислительных технологий и математического моделирования.

### Результаты и обсуждение

На основе анализа спутниковых снимков *MODIS* за 2003–2024 гг. построена карта среднемноголетнего распределения концентрации ВВ в Каркинитском заливе (рис. 2). Выявлена неоднородность распределения ВВ в исследуемой акватории. В настоящей работе для анализа поля ВВ залив разделен по условной линии от м. Джарлгачского до м. Каменного.



**Р и с. 2.** Средняя концентрация ВВ в акватории Каркинитского залива, по данным *MODIS/Aqua* за 2003–2024 гг.

**F i g. 2.** Average TSM concentration in the Karkinitsky Bay waters based on the *MODIS/Aqua* data for 2003–2024

Наиболее низкие значения концентрации ВВ (до 0,75 мг/л) отмечены для западной части акватории, которая характеризуется глубинами более 25 м и интенсивным водообменом с морем. В береговой зоне наиболее прозрачные воды располагаются на участке известнякового берега от б. Ярылгачской до м. Тарханкут. С уменьшением глубин концентрация ВВ возрастает, вблизи северного побережья залива (вдоль Джарылгачской и Тендровской кос) она достигает 2,5 мг/л.

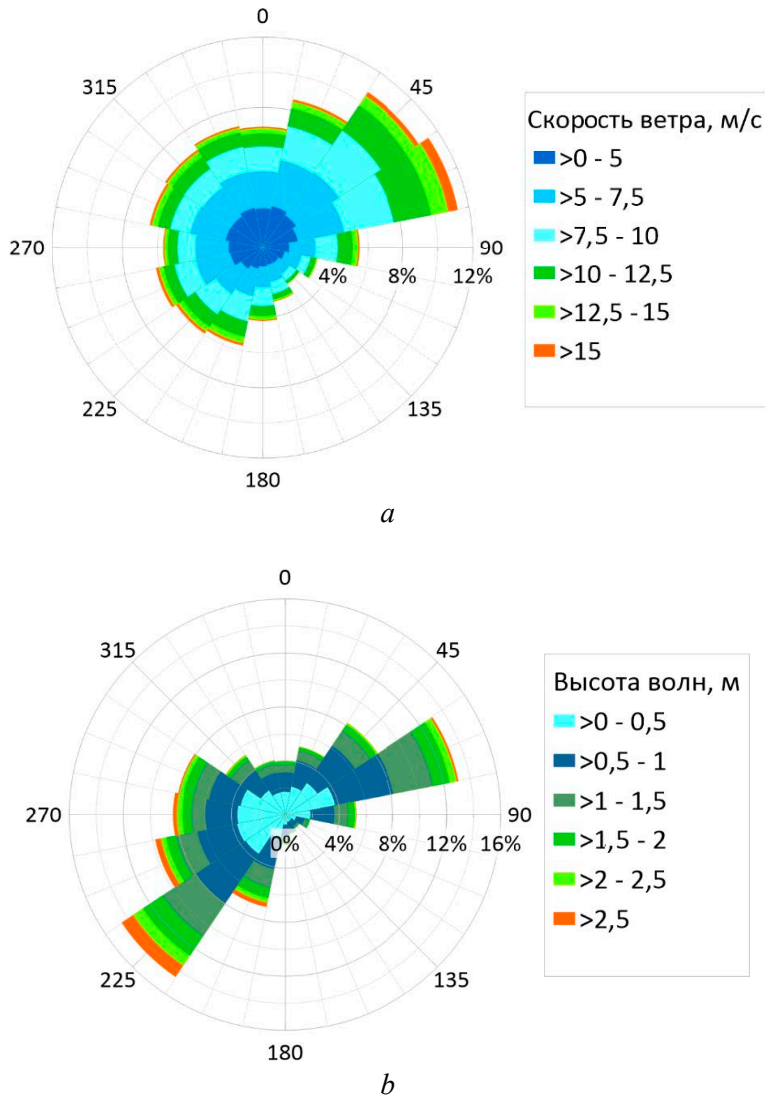
Восточная часть Каркинитского залива имеет более сложную структуру распределения ВВ. Почти для всего района концентрации ВВ повышены, только вдоль северного берега Джарылгачского залива отмечаются небольшие значения (менее 1 мг/л). Концентрации ВВ достигают максимума (4–10 мг/л) в мелководных районах Бакальской косы и одноименной банки, Перекопского залива и кутовой части Джарылгачского залива.

*Ветро-волновое влияние на распределение ВВ.* Распределение ВВ в значительной степени зависит от влияния штормов, приводящих к взмучиванию донных наносов. Анализ ветро-волнового режима региона показал, что наибольшую повторяемость (~36–38 %) имеют ветры со стороны суши (сектор  $0^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) (рис. 3, *a*). Максимальная повторяемость сильных ветров (скорость более 15 м/с) соответствует востоко-северо-восточному направлению. Со стороны моря наиболее волноопасным является сектор юго-запад – северо-запад ( $225^{\circ}$ – $315^{\circ}$ ), повторяемость ветра из этого сектора составляет (~24–26 %). Наибольшую повторяемость (~40 %) на входе в залив имеют волны, приходящие из открытого моря от сектора юго-запад – северо-запад ( $240^{\circ}$ – $285^{\circ}$ ), чаще всего – с юго-запада (14 %). Волны северо-восточного направления (из бухты) имеет повторяемость 23 % (рис. 3, *b*). Волны с периодами 7 с и более подходят в Каркинитский залив из сектора  $190^{\circ}$ – $270^{\circ}$ . В восточной части залива преобладают волны с периодами 2–5 с, входящие в эту часть акватории через пролив между Бакальской косой и о. Джарылгач.

Определяющими факторами режима волнения в исследуемом районе являются скорость ветра, распределение глубин и эффективные разгоны [10]. Вследствие мелководности Каркинитского залива, сложной конфигурации берега и рельефа дна волны претерпевают значительную трансформацию. По данным численного моделирования (рис. 4), наиболее интенсивные волны, приходящие из сектора юго-запад – северо-запад, на входе в бухту имеют высоты до 1,7 м (рис. 4, *a – c*). При взаимодействии с неровностями дна высота волн уменьшается и их направление изменяется: над Бакальской банкой высоты составляют ~0,9 м, восточнее – не превышают 0,8 м. В этом районе изолинии высот волн в значительной мере повторяют изобаты, образуя минимумы над Бакальской и Чумрюкской банками. В Джарылгачский залив проникают рефрагированные волны с высотами не более 0,6 м. При штормовых ветрах северо-восточного направления из-за малого разгона (не более 30 км) в восточной части залива высоты волн не превышают 0,8 м, в западной части, где разгон больше, они достигают 1,2 м (рис. 4, *d – f*).

Для построения карт распределения ВВ в Каркинитском заливе при преобладающих штормовых ветрах (рис. 5) по данным *ERA-Interim* были выбраны все случаи, когда скорость ветра в точке с координатами  $\varphi = 45,9$  с. ш.,  $\lambda = 3,1$  в. д. превышала 8 м/с. Концентрация ВВ за выбранные даты и последующие семь дней усреднялась, после чего рассчитывались средние значения для каждого направления.

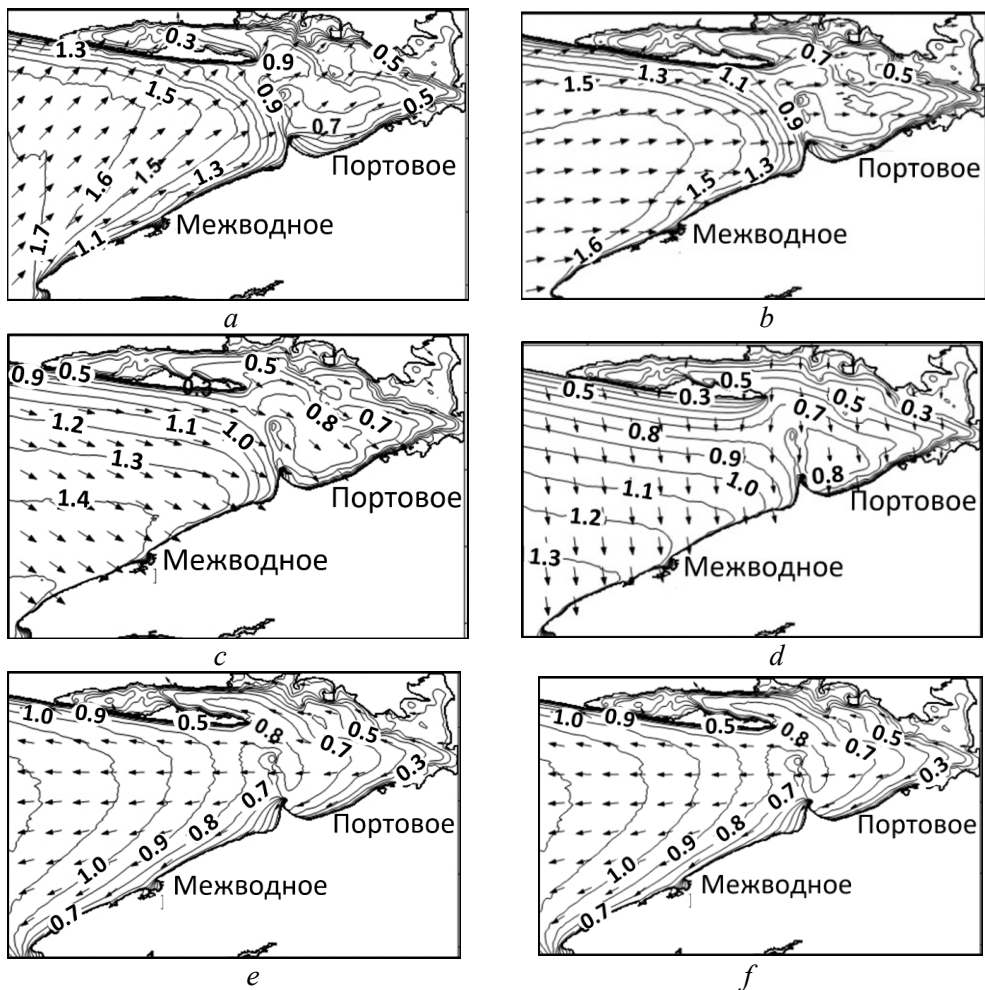
Как и следовало ожидать, при действии ветров волноопасных направлений (из сектора юго-запад – северо-запад) концентрация ВВ на большей части акватории залива превышает 7 мг/л (рис. 5, *a – c*). Наиболее частые юго-западные штормы приводят к распространению ВВ почти по всей исследуемой акватории (рис. 5, *a*). Только в зоне волновой тени о. Джарылгач воды более прозрачные.



**Р и с. 3.** Розы ветров, по данным *ERA-Interim* и *ERA5* (a), и волнения, по данным *SWAN-ERA* (b), в Каркинитском заливе за 2003–2024 гг.

**F i g. 3.** Roses of wind based on the *ERA-Interim* and *ERA5* data (a) and waves based on the *SWAN-ERA* data (b) in Karkinitzky Bay for 2003–2024

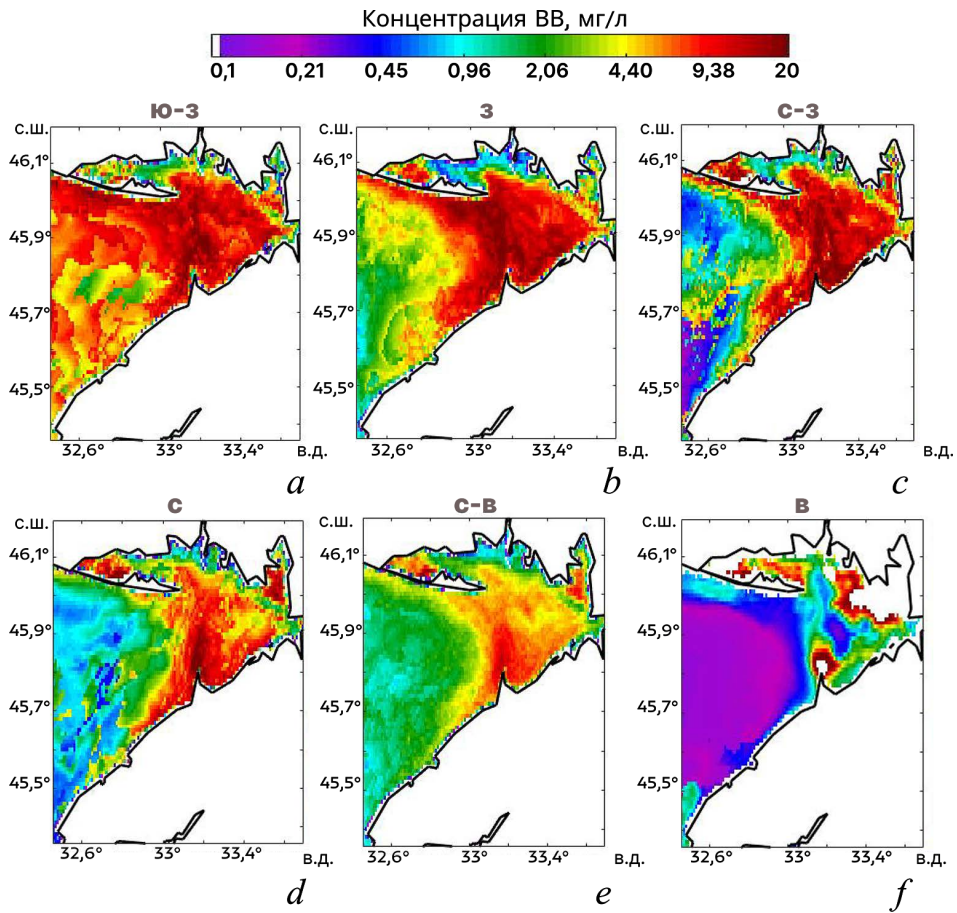
При ветрах северного и северо-восточного направлений (рис. 5, d, e) пространственное распределение концентрации ВВ оказывается достаточно близким к среднемноголетнему распределению (см. рис. 2). Хотя ветры этих румбов не способны развить сильное волнение в исследуемой акватории, они имеют наибольшую повторяемость. При штормовых ветрах от востока на большей части акватории концентрации ВВ небольшие, зоны повышенной концентрации локализованы в районе оконечности Бакальской косы, в Джарылгачском заливе и кутовой части Каркинитского залива (рис. 5, f).



**Р и с. 4.** Высота значительных волн (м) и среднее направление волнения в Каркинитском заливе при юго-западном (а), западном (b), северо-западном (c), северном (d), северо-восточном (e) и восточном (f) ветрах скоростью 10 м/с

**Fig. 4.** Height of significant waves (m) and average direction of waves in Karkinitsky Bay at the southwest (a), west (b), northwest (c), north (d), northeast (e) and east (f) winds of speed 10 m/s

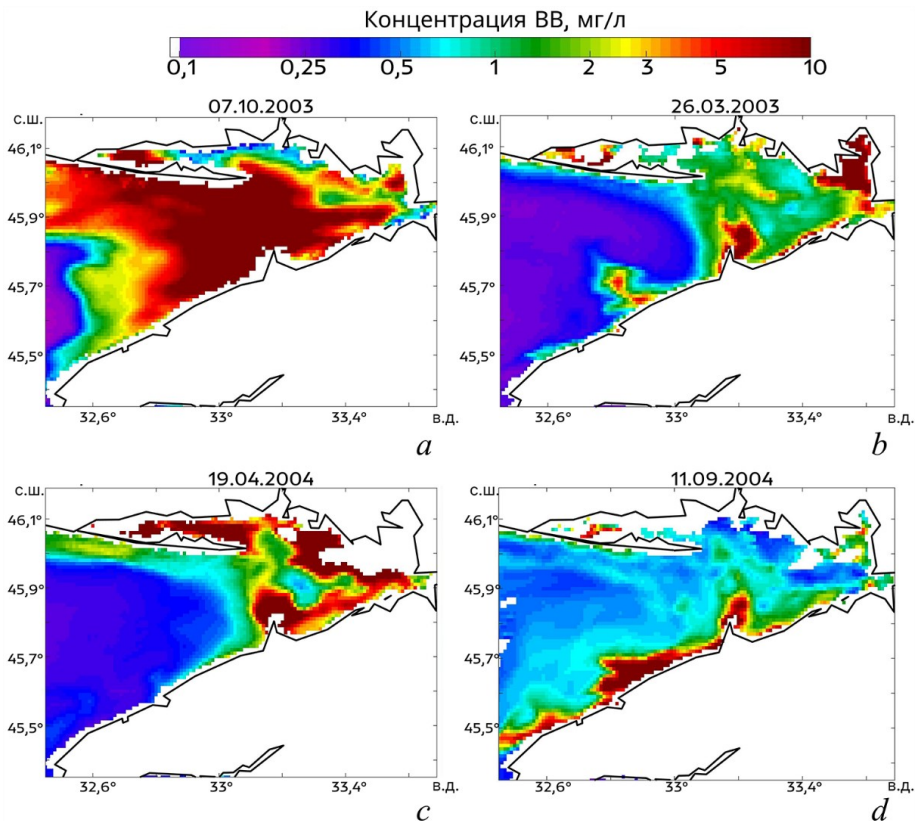
При всех рассмотренных ситуациях в районе Бакальской косы и ее банки существуют области высоких концентраций ВВ (рис. 5). Эти морфологические структуры далеко вдаются в акваторию залива и служат барьером для волн, как проникающих из открытого моря, так и формируемых ветрами северных и восточных румбов, вследствие чего песчано-ракушечные наносы этой части акватории подвергаются волновому взмучиванию при действии ветров различных направлений. Это хорошо прослеживается при анализе спутниковых снимков.



**Р и с. 5.** Средние концентрации ВВ в акватории Каркинитского залива (2003–2024 гг.), по данным *MODIS/Aqua*, в период действия штормовых юго-западных (a), западных (b), северо-западных (c), северных (d), северо-восточных (e) и восточных (f) ветров скоростью 10 м/с  
**F i g. 5.** Average values of TSM concentration in the Karkinitzky Bay waters (2003–2024) based on the *MODIS/Aqua* data during the period of storm southwest (a), west (b), northwest (c), north (d), northeast (e) and east (f) winds of speed 10 m/s

На рис. 6 представлены карты пространственной изменчивости концентрации ВВ при различных ветро-волновых ситуациях.

Снимок *MODIS/Aqua* от 07.10.2003 (рис. 6, a) сделан после действия юго-западного шторма (04.10.2003–07.10.2003); в момент снимка скорость ветра составляла 5 м/с. На большей части залива наблюдались высокие концентрации ВВ. На снимке от 26.03.2003 (рис. 6, b) зафиксирована ситуация на следующие сутки после юго-западного шторма (с 0 до 14 ч 25.03.2003 скорость ветра составляла 8–9 м/с, в момент снимка действовал северо-западный ветер 2–3 м/с). Видно, что большая часть взмученного материала успела осесть. Повышенные концентрации ВВ отмечены вдоль Бакальской косы, юго-восточного побережья залива и в Перекопском заливе. В западной части залива у берегов Крыма повышенные концентрации, по всей видимости, сформированы выносом ВВ течениями.



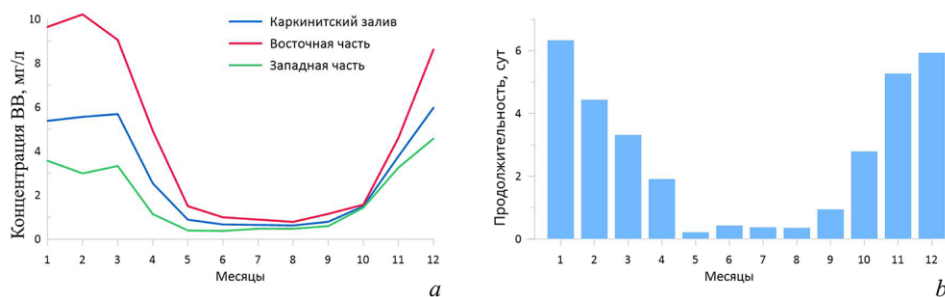
**Р и с. 6.** Примеры распределения ВВ в акватории Каркинитского залива, по данным *MODIS/Aqua*: 07.10.2003 (a); 26.03.2003 (b); 19.04.2004 (c); 11.09.2004 (d)

**F i g. 6.** Examples of TSM distribution in the Karkinitzky Bay waters based on the *MODIS/Aqua* data: 07.10.2003 (a); 26.03.2003 (b); 19.04.2004 (c); 11.09.2004 (d)

Снимок от 19.04.2004 (рис. 6, c) характеризует ситуацию при действии шторма, образованного действовавшим более суток восточным ветром скоростью 8–11 м/с. Взмучиванию подверглись прибрежные районы восточной части залива. На снимке от 11.09.2004 (рис. 6, d) представлена ситуация, когда при действии в течение 2 сут северного штормового ветра со скоростью до 13 м/с вдоль побережья Крыма сформировались области повышенной концентрации ВВ (рис. 6, d).

*Сезонная изменчивость.* Среднемесячные значения концентрации ВВ рассчитывались как для всей исследуемой акватории, так и отдельно для восточной и западной частей (рис. 7, a). Для каждого месяца построены карты распределения средней концентрации ВВ и преобладающие направления штормового ветра (скорость 8 м/с и выше) (рис. 8). Видно, что на протяжении всего года сохраняются основные черты пространственного распределения ВВ в акватории залива, описанные выше. Концентрации ВВ в разных частях залива различаются в 2–4 раза. Наибольшие значения отмечены в холодный период (с декабря по март): для всего залива они составляют 5,4–6 мг/л; для восточной части – 9–10 мг/л; для западной части – 3–4,6 мг/л. В теплый

период (с мая по октябрь) воды залива относительно прозрачны: для всего залива средние значения концентрации ВВ равны 0,6–0,9 мг/л; для восточной части – 0,8–1,5 мг/л; для западной части – 0,4–0,6 мг/л.



**Р и с. 7.** Сезонный ход концентрации ВВ, по данным снимков *MODIS/Aqua* (a), и распределение по месяцам средней продолжительности штормов, по данным *SWAN-ERA* (b), в акватории Каркинитского залива за 2003–2024 гг.

**F i g. 7.** Seasonal variation of TSM concentration based on the *MODIS/Aqua* images (a), and distribution by months of average storm duration based on the *SWAN-ERA* data (b) in the Karkinitzky Bay waters for 2003–2024

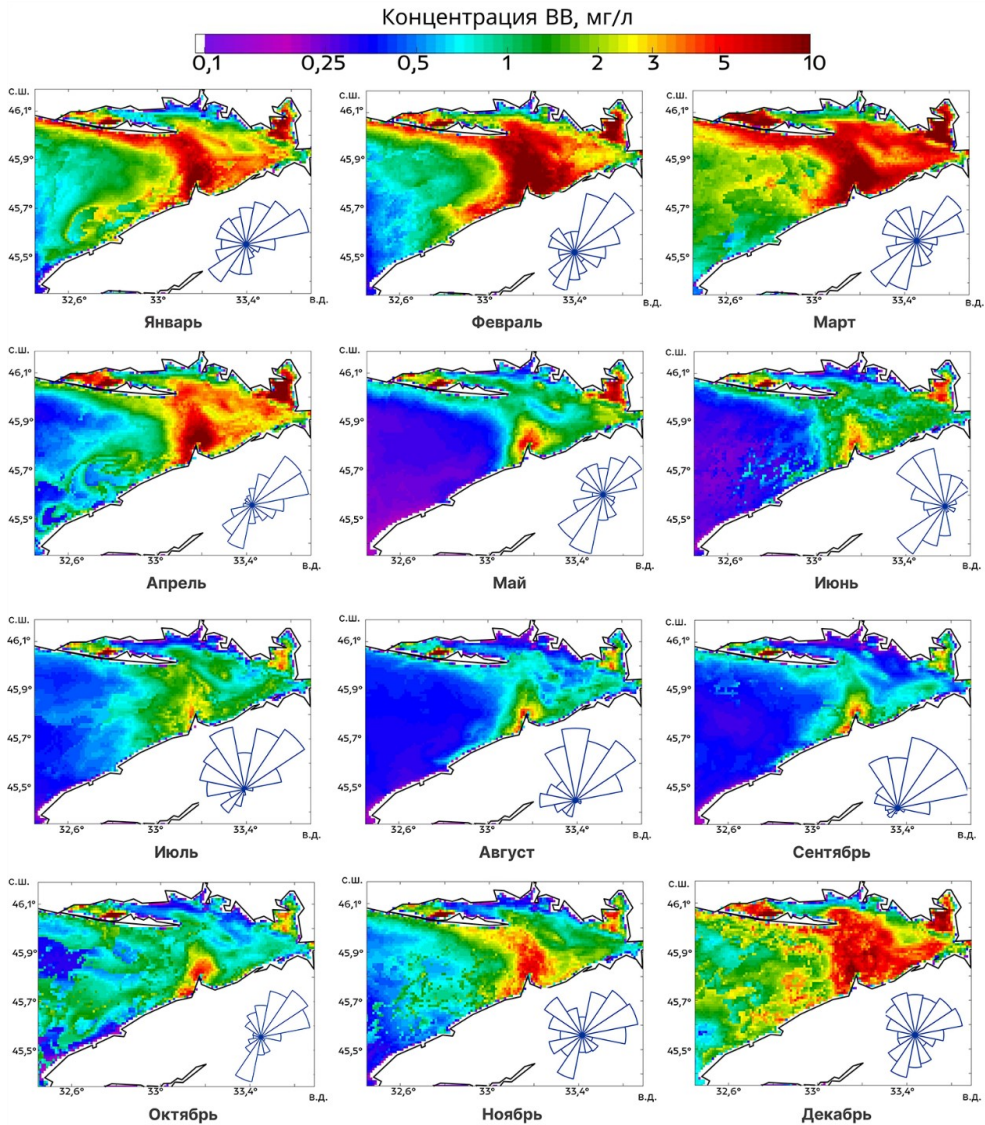
Сезонный ход концентрации ВВ хорошо согласуется с распределением по месяцам средней продолжительности штормов (рис. 7, b). Таким образом, доминирующим фактором сезонного распределения ВВ в акватории Каркинитского залива является ветро-волновой режим.

Усиление штормовой активности в холодный период приводит к активному перемешиванию вод, взмучиванию донных наносов на мелководье, абразии берегов и переносу ВВ вглубь залива течениями. На картах средней концентрации ВВ с декабря по март отмечается наибольшее пространственное распространение высоких значений в исследуемой акватории (рис. 8).

Следует учитывать, что зимние месяцы характеризуются высокой долей облачных снимков, что снижает репрезентативность усредненных данных для этого периода. Так, на построенной нами карте для января (рис. 8) прослеживается, вероятно, мнимое снижение значений концентрации ВВ.

В апреле, октябре и ноябре концентрации ВВ по всей акватории несколько ниже, высокие значения сохраняются для района Бакальской банки, Перекопского залива и б. Джарылгачской (рис. 8). Такое пространственное распределение ВВ характерно для весеннего и осеннего сезонов. При сравнимых ветро-волновых условиях в октябре и ноябре взмучивание донных осадков происходит менее активно, чем в апреле, что может быть связано с высокой стратификацией водной колонны в этот период года.

В летний сезон (май – сентябрь) ослабление взмучивания донных осадков связано со снижением ветровой активности и усилением стратификации водной колонны, затрудняющей проникновение энергии ветро-волнового воздействия до дна. Области повышенной концентрации ВВ остаются только на мелководьях: около Бакальской косы, в Перекопском и Джарылгачском заливах (рис. 8).

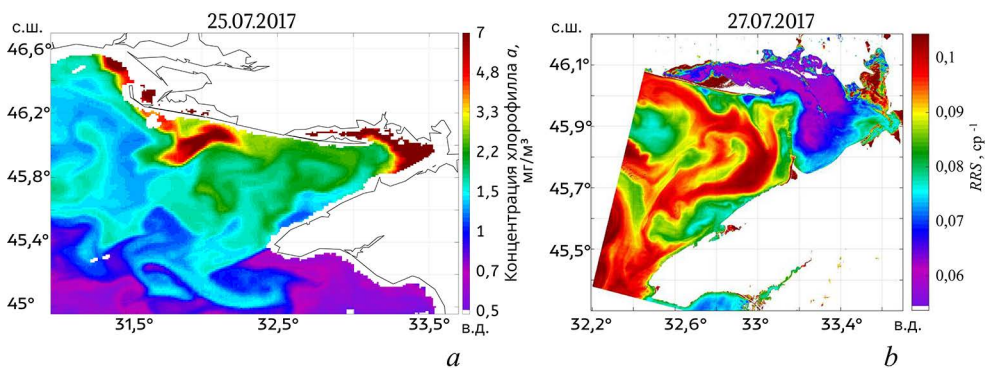


**Р и с. 8.** Карты средней концентрации ВВ в акватории Каркинитского залива по данным *MODIS/Aqua* и розы ветра (скорость ветра более 8 м/с) по месяцам за 2003–2024 гг.

**F i g. 8.** Maps of average TSM concentration in the Karkinitzky Bay waters based on the *MODIS/Aqua* data and wind rose (wind speed exceeding 8 m/s) by months for 2003–2024

На осредненной карте июля (рис. 8) отмечаются повышенные концентрации ВВ в западной части залива, что может быть связано с затоками вод северо-западного шельфа Черного моря, характеризующимися интенсивным «цветением» водорослей. Пример такой ситуации приведен на рис. 9. На снимках *MODIS/Aqua* и *Landsat* за 25 и 27 июля 2017 г. видно, что в западной части залива значения концентрации хлорофилла (рис. 9, *a*) и яркости в первом канале (*RRS 560*) повышены (рис. 9, *b*). Такое соотношение значений не указывает на наличие механической взвеси или продуктов «цветения»

кокколитофорид в западной части залива. Согласно работам <sup>4</sup> [32], при «цветении» кокколитофорид наблюдались бы высокие значения яркости в канале RRS 555 и низкие значения концентрации хлорофилла. На рис. 9, *b* затоки таких вод распространяются до Бакальской банки и не проникают далее. Цветению могут быть подвержены также воды самой мелководной части залива (район Лебяжьих о-вов, Перекопский залив и б. Джарылгачская).



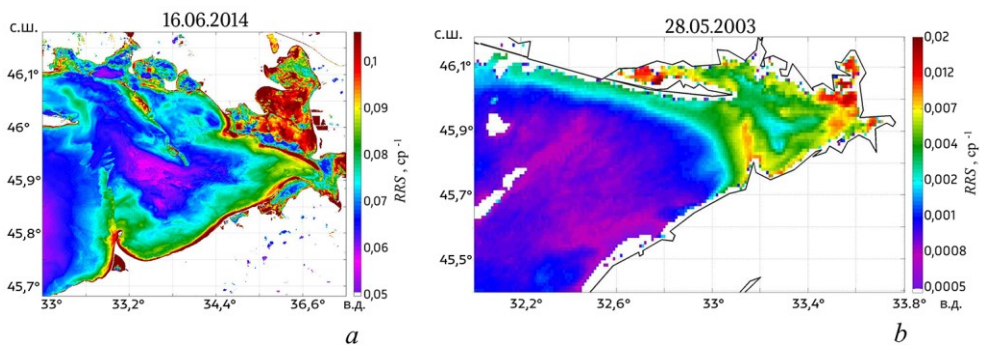
**Р и с. 9.** Пример затока вод с северо-западного шельфа в Каркинитский залив на спутниковых изображениях *MODIS/Aqua* от 25.07.2017 г. по концентрации хлорофилла (*a*) и *Landsat* от 27.07.2017 г. по каналу RRS 560 (*b*)

**Fig. 9.** An example of water inflow into Karkinitzky Bay from the northwestern shelf on the satellite images of *MODIS/Aqua* on July 25, 2017 (based on chlorophyll concentration) (*a*) and *Landsat* on July 27, 2017 (based on RRS 560 channel) (*b*)

*Влияние Малого филофорного поля.* На картах средних концентраций ВВ за весь исследуемый период (см. рис. 2), для летнего сезона (см. рис. 8) и при штормовых ветрах из северо-восточного сектора (см. рис. 5, *d – f*; 6, *b, c*) в восточной части залива четко выделяется контур более прозрачных вод. Согласно литературным данным <sup>5</sup> [1], в этом районе находится Малое филофорное поле. Оно хорошо выделяется на спутниковых снимках и характеризуется пониженными значениями яркости. Для выделения его границ были построены карты яркости разности ближнего инфракрасного (0,845–0,885 мкм) и зеленого (0,525–0,600 мкм) каналов. Такая комбинация позволяет получить более точные показатели излучения, исходящего из-под поверхности воды. На снимках высокого и среднего разрешения *Landsat* и *MODIS/Aqua* (рис. 10) над Малым филофорным полем четко выделяется область пониженных значений яркости.

<sup>4</sup> Gordon H. R., Balch W. M. MODIS Detached Coccolith Concentration Algorithm Theoretical Basis Document Version 4 / University of Miami. Coral Gables, FL., 1999. 27 p.

<sup>5</sup> Спецификация местообитания малое филофорное поле в Каркинитском заливе Черного моря / Б. Г. Александров [и др.] ; Environmental collaboration for the Black Sea: Georgia, Moldova, Russia and Ukraine ; EuropeAid/120117/C/SV/Multi ; Contract № 111779. 2010. 34 с.



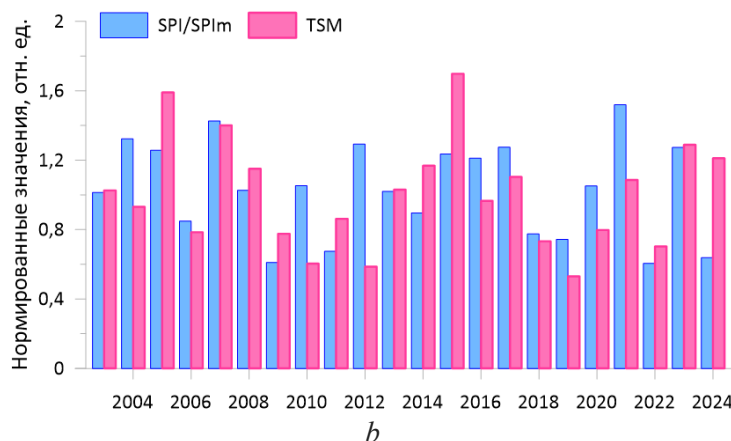
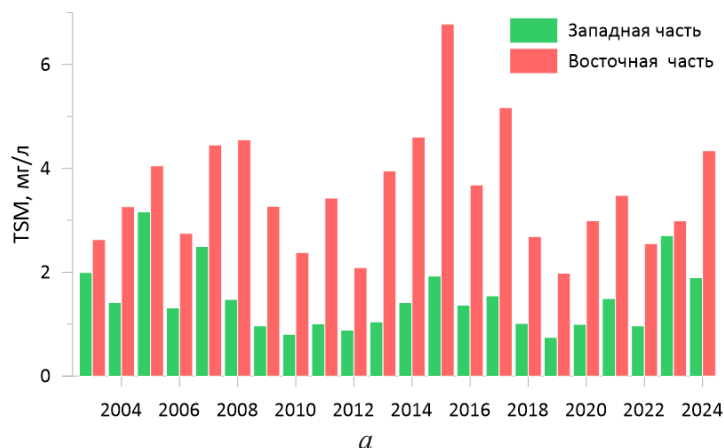
**Р и с. 10.** Пример выделения Малого филофорного поля в восточной части Каркинитского залива на снимках: *a* – *Landsat* от 16.05.2014 г. (разность каналов зеленого и ближнего ИК-диапазона); *b* – *MODIS/Aqua* от 28.05.2003 г. (значение *RRS* на длине волны 555 нм)  
**F i g. 10.** An example of highlighting the Small Phyllophora Field in the eastern part of Karkinitzky Bay in the images: *a* – *Landsat* on 16.05.2014 (difference between the green and near IR channels); *b* – *MODIS/Aqua* on 28.05.2003 (*RRS* value at a wavelength 555 nm)

*Межгодовая изменчивость.* Среднегодовые значения концентрации ВВ с 2003 по 2024 г. рассчитаны для всей исследуемой акватории и отдельно для западной и восточной частей (рис. 11, *a*). Наибольший вклад в средние по заливу значения вносит восточная часть. Среднемноголетняя концентрация ВВ для западной части составляет 1,5 мг/л, для восточной – 3,5 мг/л.

Для анализа влияния штормов на межгодовую изменчивость концентрации ВВ рассчитан суммарный индекс мощности штормов для каждого года. Значения концентрации ВВ и интенсивности штормов по годам нормированы на среднемноголетние величины за весь период исследований (рис. 11, *b*). Наибольшие концентрации ВВ (более 3 мг/л для всего залива) получены для 2015, 2005 и 2007 гг. Этим годам соответствовали не максимальные, но высокие значения мощности штормов. Минимальные концентрации ВВ (менее 1,5 мг/л для всего залива) отмечаются в 2010, 2012 и 2019 гг. При этом в 2012 г. суммарный индекс штормовой активности был высоким. Данное несоответствие частично объясняется методическим ограничением: в периоды максимальной штормовой активности, особенно в зимний период, как правило, наблюдается значительная облачность, что исключает возможность получения спутниковых данных и восстановления значений концентрации ВВ. Наиболее интенсивные штормовые события могут быть не полностью учтены в спутниковых данных, что приводит к смещению оценок концентрации ВВ.

Как было показано ранее, наибольшее влияние на концентрацию ВВ оказывают штормы юго-западного и северо-западного направлений (сектор 225°–315°), поскольку они формируют наибольшее волновое воздействие на мелководные районы залива и способствуют взмучиванию донных осадков. Штормы восточного направления, несмотря на высокие значения индекса мощности, в меньшей степени влияют на рост *TSM* ввиду малого разгона волны.

Таким образом, для корректной интерпретации межгодовой изменчивости концентрации ВВ необходимо учитывать не только суммарную мощность штормов, но и их направление, а также ограничения спутниковых данных в условиях сплошной облачности.



**Р и с. 11.** Межгодовая изменчивость концентрации ВВ для западной и восточной частей Каркинитского залива, по данным *MODIS/Aqua* (a), и межгодовая изменчивость интенсивности штормов (*SPI*) и концентрации ВВ по всему заливу, нормированные на среднееголетние значения (2003–2024 гг.) (b)

**F i g. 11.** Interannual variability of TSM concentration for the western and eastern parts of Karkinitzky Bay based on the *MODIS/Aqua* data (a), and interannual variability of storm intensity (*SPI*) and TSM concentration over the entire bay normalized to long-term average values (2003–2024) (b)

### Заклучение

Выполнено исследование пространственно-временного распределения ВВ в Каркинитском заливе на основе массива спутниковых данных *MODIS*, *Landsat-8* и *Sentinel-2*. Выявлено, что акватория залива характеризуется высокой динамикой и пространственной неоднородностью распределения ВВ. Существенную роль в пространственном распределении ВВ играют штормовое ветро-волновое воздействие, сложный рельеф дна и конфигурация берегов.

Построена карта среднееголетнего распределения концентрации ВВ в Каркинитском заливе за 2003–2024 гг. по снимкам *MODIS/Aqua*. Наиболее низкие значения (до 0,75 мг/л) характерны для западной глубоководной части акватории, с уменьшением глубин концентрация возрастает, достигая макси-

мума (4–10 мг/л) в мелководных районах. Восточная часть залива характеризуется более сложной структурой распределения, по сравнению с западной, и повышенными в 2–4 раза значениями концентрации ВВ.

Статистический анализ ретроспективных расчетов ветра и волнения по данным реанализов *ERA-Interim*, *ERA5* и *SWAN-ERA* за 2003–2024 гг. и математическое моделирование типовых полей волнения для наиболее волноопасных направлений показали, что при наибольшей повторяемости ветров северо-восточного сектора (~ 38–36 %) больше всего волн в залив приходит от юго-западного направления (14 %). Наибольшие высоты волн формируются при ветрах из сектора юго-запад – северо-запад, наименьшие – из сектора север – восток. При взаимодействии с неровностями дна волны трансформируются: в восточной части залива изолинии высот волн повторяют изобаты с минимумами над Бакальской и Чумрюкской банками; в Джарылгачский залив проникают волны с высотами не более 0,6 м.

Анализ зависимости пространственного распределения концентрации ВВ от преобладающих штормовых ветров показал: при ветрах волноопасных направлений (из сектора юго-запад – северо-запад) концентрация ВВ превышает 7 мг/л; ветры северных и северо-восточных направлений формируют поля концентрации ВВ, близкие к среднемноголетнему распределению; при восточных штормовых ветрах зоны повышенной концентрации локализованы в районе оконечности Бакальской косы, в Джарылгачском заливе и кутовой части Каркинитского залива.

Выявлено, что ветро-волновой режим является доминирующим фактором сезонного хода распределения ВВ в Каркинитском заливе. В теплый период (с мая по октябрь) воды залива относительно прозрачны (концентрация ВВ в диапазоне 0,6–0,9 мг/л) с локальными повышениями на мелководьях. В весенний и осенний сезоны (апрель, октябрь и ноябрь) концентрации ВВ по всей акватории несколько выше, при этом из-за стратификации водной колонны при сравнимых ветро-волновых условиях в октябре и ноябре взмучивание донных осадков менее интенсивно, чем в апреле. При усилении штормовой активности в холодный период (с декабря по март) в результате активного взмучивания донных наносов, абразии берегов и переноса ВВ течениями концентрации ВВ максимальны (5,4–6 мг/л).

Впервые установлено, что значимым фактором, влияющим на пространственное распределение концентрации ВВ в восточной части залива, является Малое филофорное поле: на большинстве проанализированных снимков в этой области фиксировались пониженные значения яркости.

Межгодовая изменчивость концентрации ВВ не обнаруживает прямой связи с суммарным индексом мощности штормов в явном виде. Это частично объясняется методическим ограничением: в периоды максимальной штормовой активности, особенно в зимний период, высокая облачность исключает возможность получения спутниковых данных и восстановления значений концентрации ВВ. Для корректной интерпретации данных следует учитывать не только мощность штормов, но и их направление.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мильчакова Н. А., Александров В. В. Морские охраняемые акватории и проблемы природопользования в Каркинитском заливе (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 50–58. EDN VPUNVK. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-50-58>
2. Распределение донной растительности в мелководной зоне Каркинитского залива Крымского полуострова / Т. В. Панкеева [и др.] // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17, № 2. С. 62–75. EDN SDEUVT. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-2-62-75>
3. Современное состояние береговой зоны Крыма / под ред. Ю. Н. Горячкина. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2015. 252 с.
4. Руднев В. И. Особенности рельефа дна прибрежной зоны Бакальской косы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 15–21. EDN YSAXTN. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-15-21>
5. Крыленко В. В., Крыленко М. В., Алейников А. А. Исследование подводного рельефа Бакальской банки по данным космических снимков Sentinel-2 // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 30–39. EDN VYVTKL. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2019-2-30-39>
6. Морские охраняемые акватории Крыма. Научный справочник / под ред. Н. А. Мильчаковой. Симферополь : Н. Оріанда, 2015. 312 с.
7. Особливості еволюції вздовжберегової літодинамічної системи «Тендра-Джарилгач» в умовах антропогенного перетворення / О. В. Давидов [и др.] // Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки. 2018. № 9. С. 105–114.
8. Кукушкин А. С. Изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 2. С. 67–79. EDN VJFPQX.
9. Распределение взвешенного вещества у западного побережья Крыма при воздействии сильных ветров различных направлений / А. А. Алескерова [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2019. № 2. С. 74–88. EDN ZIPMWT. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019274-88>
10. Горячкин Ю. Н., Репетин Л. Н. Штормовой ветро-волновой режим у черноморского побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2009. № 19. С. 56–69. EDN YKTSVR.
11. Харитонова Л. В., Фомин В. В. Численное моделирование ветрового волнения у западного побережья Крыма // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, т. 1. С. 26–37. EDN WAPUED.
12. Годин Е. А., Ингеров А. В., Галковская Л. К. Информационная поддержка прибрежных исследований: Каркинитский залив и Бакальская коса // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. № 4. С. 92–100. EDN ELBQTC. <https://doi.org/10.22449/2413-5577-2018-4-92-100>
13. 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>
14. 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>
15. 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, iss. 5. P. 798–805. EDN ОНОJIR. <https://doi.org/10.1134/S0001437010050164>
16. 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>

17. 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>
18. 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>
19. 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>
20. *Алескерова А. А., Кубряков А. А., Станичный С. В.* Распространение взвешенного вещества под влиянием штормовых ветров у западного побережья Крыма по оптическим данным высокого разрешения // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12, № 1. С. 63–71. EDN TQPZJP.
21. Accumulation and cross-shelf transport of coastal waters by submesoscale cyclones in the Black Sea / A. Kubryakov [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 18. 4386. EDN RNRNAH. <https://doi.org/10.3390/rs15184386>
22. *Кукушкин А. С.* Сезонная изменчивость распределения прозрачности вод Каркинитского залива // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 2. С. 181–189. EDN OOEZVV.
23. Исследование полей концентрации взвеси на северо-западном шельфе Черного моря при взмучивании донных осадков движущимся циклоном / Д. В. Алексеев [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 1. С. 3–20. EDN YOTXED.
24. Эрозия и седиментация донных осадков в Каркинитском заливе во время шторма 10–11 ноября 2007 г. / Д. В. Алексеев [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2009. № 19. С. 93–105. EDN YKTSXF.
25. *Кушнир В. М.* Параметры придонной динамики прибрежной зоны по данным космических съемок оптическими сканерами // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 3. С. 13–21. EDN QAXMET. <https://doi.org/10.7868/S0205961413030020>
26. *Современные методы и средства контроля морской среды / под ред. В. А. Иванова.* Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 112 с.
27. *Дыкман В. З., Иванов В. А., Кушнир В. М.* Нелинейные волны и турбулентность в прибрежной зоне о. Коса Тузла // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 4. С. 3–21. EDN TMJXFB.
28. 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. № 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
29. Гидрофизические и гидрохимические характеристики морских акваторий у устьев малых рек российского побережья Черного моря / П. О. Завьялов [и др.] // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 3. С. 293–308. EDN SEEDFF. <https://doi.org/10.7868/S0030157414030150>
30. *Динамические процессы береговой зоны моря / под ред. Р. Д. Косьяна, И. С. Подымова, Н. В. Пыхова.* Москва : Научный мир, 2003. 326 с.
31. *Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H.* A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C4. P. 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>
32. Optical modeling and measurements of a coccolithophore bloom / T. J. Smyth [et al.] // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, iss. 36. P. 7679–7688. <https://doi.org/10.1364/AO.41.007679>

*Об авторах:*

**Алескерова Анна Адилловна**, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 57962254**, **ORCID ID: 0000-0003-1451-3440**, **Web of Science ResearcherID: F-2966-2017**, **Scopus Author ID: 57021552600**, [annete08@mail.ru](mailto:annete08@mail.ru)

**Харитоновна Людмила Викторовна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 7274-6248**, **ResearcherID: Y-1780-2018**, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, [l.kharitonova@mhi-ras.ru](mailto:l.kharitonova@mhi-ras.ru)

**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](mailto:nadinkot.nk@gmail.com)

**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](mailto: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 ID: 0000-0002-1033-5678**, **WoS ResearcherID: F-8915-2014**, **Scopus Author ID: 6602344280**, [sstanichny@mail.ru](mailto:sstanichny@mail.ru)