

УДК 551.468

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО БИОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МРАМОРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. Академик РАН В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, В. В. Замшин<sup>1,\*</sup>, О. И. Четверкова<sup>1,\*</sup>

Поступило 28.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принято к публикации 04.08.2022 г.

С использованием длительных временных рядов спутниковых данных исследованы особенности и оценены негативные последствия аномального цветения водорослей, произошедшего в Мраморном море в весенне-летний период 2021 г. Установлено, что площадь обширных скоплений желеобразных агрегатов органических веществ (морской слизи) составила 973 км<sup>2</sup>. Наиболее интенсивные биогенные загрязнения были обнаружены в прибрежных акваториях у провинций Çanakkale, Bursa, Yalova/Kocaeli (Турция). Проанализирован комплекс факторов, которые могли способствовать формированию условий для такого аномально интенсивного биогенного загрязнения. Показано, что наиболее вероятными причинами его развития являются повышение температуры морской среды (среднемесячные значения на 17% превышали климатическую норму), а также уровня фотосинтетически активной радиации (превышение климатической нормы на 27%), сопровождаемые нетипичной для исследуемой акватории изменчивостью полей приповерхностного ветра.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, спутниковые данные, морские акватории, цветение водорослей, морская слизь, Мраморное море

**DOI:** 10.31857/S2686739722601508

### ВВЕДЕНИЕ

Начиная с ноября 2020 г. на поверхности и в водной толще Мраморного моря регистрировались случаи скопления желеобразных агрегатов органических веществ (морской слизи), образовавшихся в результате интенсивного цветения водорослей. Первые случаи регистрации интенсивного образования и распространения морской слизи в Мраморном море, произошедшие в 2020 г., были изложены в работах [1, 2] на основании судовых исследований. При отборе проб выявлялись виды водорослей (*Coscinodiscus perforatus*, *Cylindrotheca closterium*, *costatum* *Skeletonema*, *Gonyaulax fragilis*, *Gymnodinium* sp., *Gyrodinium* sp. и *Dictyocha speculum*), способных к продуцированию морской слизи [3].

Процессы возникновения подобного биогенного загрязнения Мраморного моря наблюдались и ранее. Известны случаи регистрации этого явления в осенне-зимние сезоны 1997–1998, 1999–2000, 2007–2008 гг. [4]. Однако исследуемое в настоящей работе загрязнение этого моря слизью,

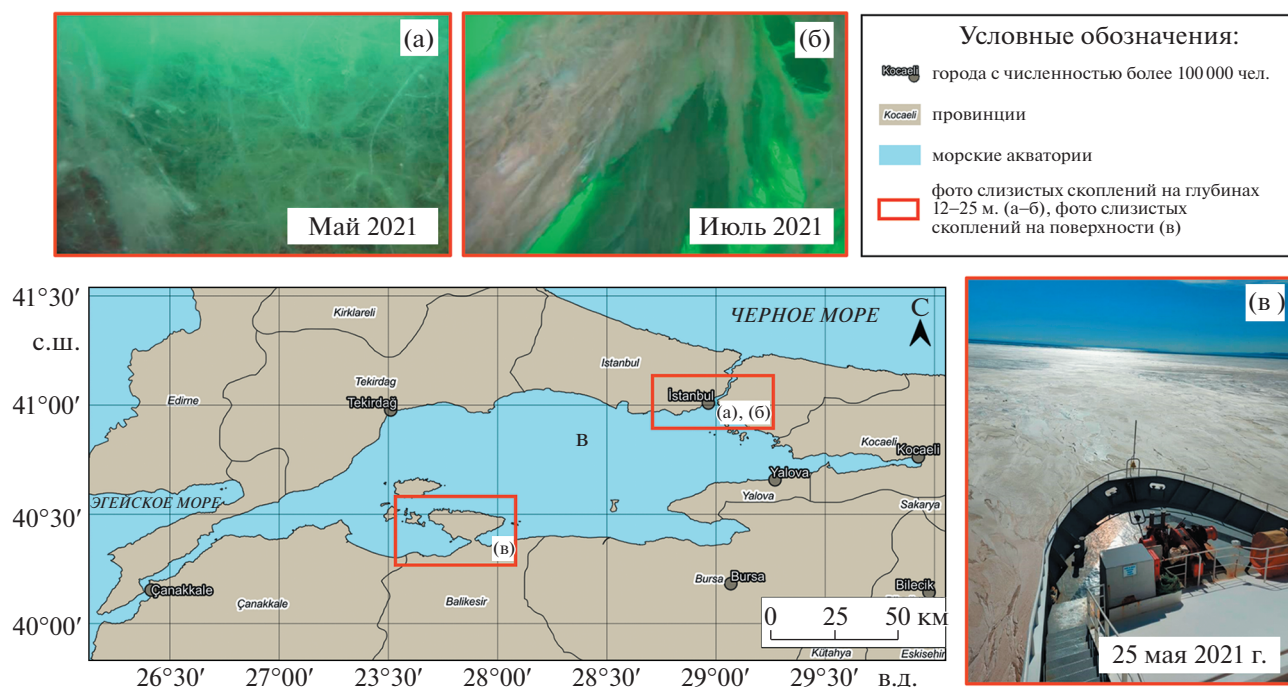
начавшееся осенью 2020 г. и достигшее пика весной 2021 г., можно охарактеризовать как аномально сильное [5]). Скопления морской слизи оказывают существенное негативное влияние на морские экосистемы, ограничивают деятельность по использованию водных ресурсов и снижают рекреационный потенциал акваторий и побережья [1, 5]. Поэтому мониторинг подобного биогенного загрязнения морской среды является актуальным.

Наиболее эффективным инструментом для мониторинга загрязнений обширных морских акваторий являются методы дистанционного зондирования [6–12]. Применение спутниковых методов и технологий перспективно для исследования как антропогенных [6], так и естественных воздействий на морские акватории, в том числе связанных с интенсивными цветениями водорослей и их последствиями [9–12]. Одним из перспективных методов выявления загрязнений морских акваторий является обработка многоспектральных спутниковых изображений [7, 8].

Спутниковые данные позволяют выявлять антропогенные и природные факторы, влияющие на формирование и развитие биогенных загрязнений, а также анализировать пространственное распределение ареалов их распространения [9, 10].

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва, Россия

\*E-mail: office@aerocosmos.info



**Рис. 1.** Примеры скоплений морской слизи (а, б), обнаруженных с борта кораблей (в) и карта исследуемой акватории [1, 2].

В настоящей работе с использованием специально разработанной методики и многоспектральных спутниковых изображений выполнены исследования пространственно-временного распределения интенсивных биогенных загрязнений Мраморного моря, пик которых наблюдался весной 2021 г. На основании результатов этих исследований выяснились причины такого аномального явления.

### РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследуемый район иллюстрируется на рис. 1, на котором приведены карта Мраморного моря и примеры скоплений морской слизи (а, б), выявленных по наблюдениям с борта кораблей (в) [1, 2].

В настоящей работе исследование пространственных распределений морской слизи во всей акватории Мраморного моря проводилось с использованием многоспектральных оптических изображений, полученных со спутников SENTINEL-2A/B (278 сцен) в весенне-летний период 2021 г. (<https://scihub.copernicus.eu/>). Кроме того, на основании длительных временных рядов разнородных актуальных и архивных спутниковых, а также модельных информационных продуктов, анализировались гидрометеорологические характеристики. Для этого использовались:

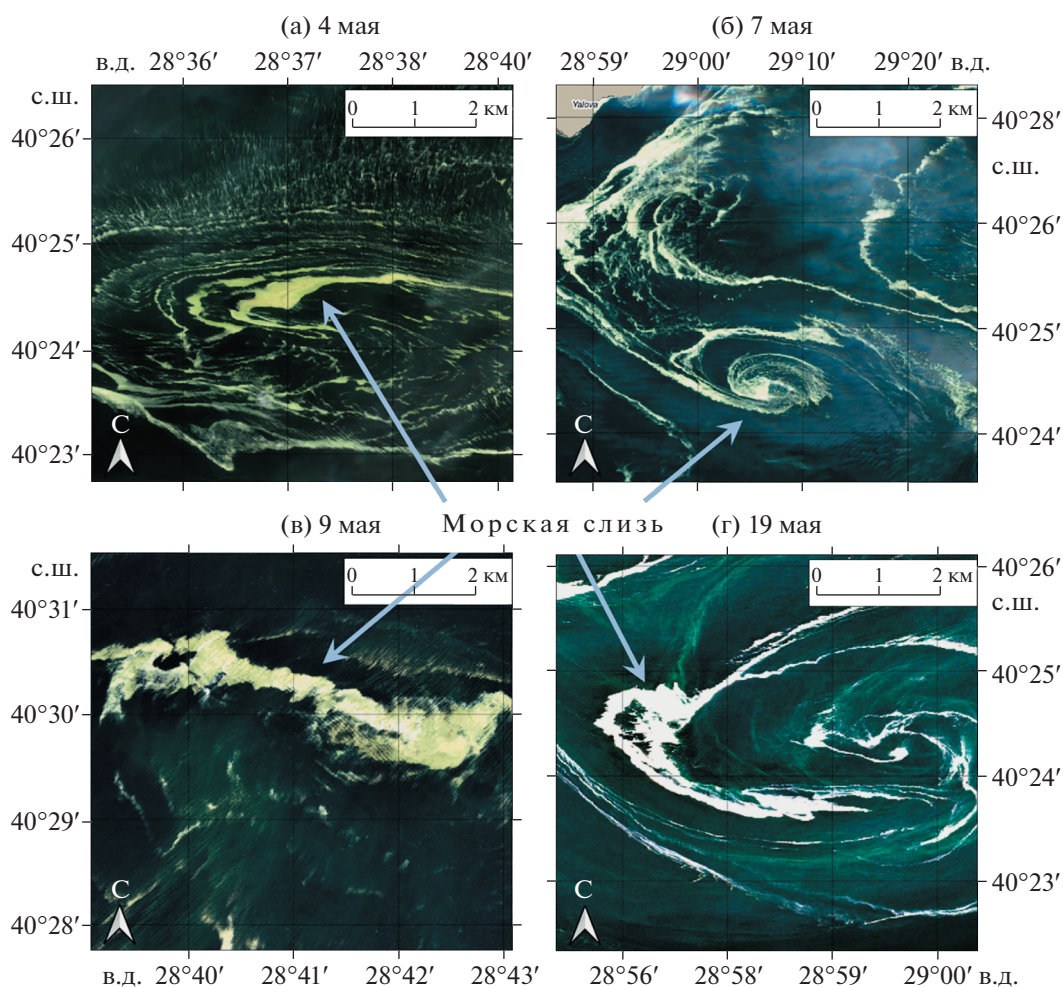
1. Пространственные распределения температуры морской поверхности (ТМП), полученные на основе данных спутниковых спектро радиометров AVHRR и модельных данных NOAA OISST за период времени с 1981 по 2021 г. (<https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/sea-surface-temperature-optimum-interpolation>).

2. Пространственные распределения уровня фотосинтетически активной радиации (ФАР), вычисленные по данным спектро радиометров MODIS AQUA/TERRA (с 2000 по 2021 г.) (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

3. Пространственные распределения широтной и меридиональной составляющих векторов приповерхностного ветра. Эти характеристики были получены за период времени с 1979 по 2021 г. по данным модели NCEP CFSv2 ([https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CFSv2/CFSv2\\_body.html](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/CFSv2/CFSv2_body.html)).

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ предварительных попыток выявления морской слизи, предпринятых, например, в работах [14, 15], показал, что биогенные загрязнения этого типа обладают характерными спектральными особенностями и отображаются на многоспектральных спутниковых изображениях морской поверхности среднего пространственного разрешения в виде желто-бежевых пятен, хорошо



**Рис. 2.** Примеры выявления морской слизи на поверхности Мраморного моря в 2021 г. по изображениям, полученным со спутников SENTINEL-2A/B.

поддающихся идентификации. Дополнительным дешифровочным признаком морской слизи является геометрическая форма (обычно линейчатая, нитевидная, спиралевидная), которая определяется гидрометеорологическими условиями и вовлеченностью в структуру поверхностных течений (см. рис. 2 а–г).

Для корректного распознавания исследуемых объектов и отсеивания объектов, обладающих аналогичными спектральными сигнатурами (блики, пена, скопления взвешенных веществ, мелководье и др.) использовался опыт анализа спутниковых многоспектральных изображений (см., в том числе [7, 8, 16]). В настоящей работе выявление морской слизи на спутниковых многоспектральных изображениях (Sentinel-2A/B) осуществлялось в полуавтоматическом режиме с применением облачной платформы Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com>). Для этого использовался метод классификации с обучением CART (Classification and Regression Trees) [17].

После выявления и систематизации зон распространения морской слизи выполнялись исследования длительных временных рядов значимых параметров водной среды и гидрометеорологических характеристик в акватории Мраморного моря. В ряде работ (см., например, [9, 10, 13, 18]) было показано, что такие исследования позволяют выявлять предпосылки развития вредоносных цветений водорослей на основе анализа динамики значимых параметров водной среды с учетом особенностей биофизических механизмов, связывающих режимы и циклы жизнедеятельности фитопланктона и среду его обитания.

В настоящей работе для анализа аномального биогенного загрязнения Мраморного моря по спутниковым данным использовался подход, предложенный в работах [9, 10]. Этот подход основан на сопоставлении значимых параметров водной среды, регистрируемых в период подготовки и развития аномального события, с их “нормальными” (фоновыми) уровнями и анализе

выявленных отклонений. Под “нормальными” (фоновыми) уровнями в данном случае понимаются значения параметров водной среды, вычисляемые с использованием линейной аппроксимации доступного для анализа ретроспективного ряда результатов измерений, выполненных для рассматриваемых дат в предшествующие года.

Выявленные отклонения от фоновых уровней значимых параметров водной среды, измеренных спутниковыми методами, анализировались с учетом статистических характеристик ретроспективного ряда результатов измерений. Результаты анализа обобщались и представлялись в виде графиков, характеризующих фоновые и фактические значения ключевых параметров водной среды, которые могут оказывать влияние на процессы интенсификации цветения водорослей.

При решении рассматриваемой задачи применялась регулярная временная сетка с интервалом 1 мес [10]. Среднемесячные значения выбранного значимого параметра водной среды  $P_{\text{ср.мес}_m}$  в пределах Мраморного моря для текущего месяца вычислялись по формуле:

$$P_{\text{ср.мес}_m} = \sum_{j=1}^{n_m} s_{j,m} / n_m, \quad (1)$$

где  $m$  – сквозной порядковый номер месяца в многолетнем временном ряду наблюдений;

$n_m$  – количество пикселей в пределах исследуемой акватории, в которых было хотя бы одно спутниковое измерение в заданный месяц;

$s_{j,m}$  – среднемесячное значение исследуемого параметра в текущем пикселе ( $j$  – номер пикселя) в пределах исследуемой акватории на заданный месяц.

Для оценки разброса ретроспективного ряда наблюдаемых ранее значимых параметров водной среды определялась среднеквадратическая ошибка аппроксимации этих параметров  $\sigma_M$  для каждого месяца (в настоящем исследовании использована линейная аппроксимация). Для этого использовалась формула:

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum ((P_{\text{ср.мес}_M})_l - (\overline{P_M})_l)^2}{N}}, \quad (2)$$

где  $\overline{P_M}$  – аппроксимированное значение исследуемого параметра, соответствующее месяцу с порядковым номером  $M$ ;

$l$  – номер года;

$N$  – число лет, вошедших в анализируемый временной ряд.

Описанный подход к обработке долговременных рядов данных применялся для каждого из 4 типов исследуемых значимых параметров водной среды (температура морской поверхности,

уровень фотосинтетически активной радиации, две составляющие векторов приповерхностного ветра). Эти параметры определялись для каждого месяца в период времени с июля 2020 г. по июнь 2021 г. Результаты измерения фактических среднемесячных параметров водной среды  $P_{\text{ср.мес}_m}$  (48 реализаций – 4 типа значимых параметров для 12 мес) анализировались с использованием условия:

$$P_m > \overline{P_M} + \sigma_M \quad \text{или} \quad P_m < \overline{P_M} - \sigma_M \quad (3)$$

Выполнение условия (3) является признаком наличия аномальной ситуации для месяца  $m$ .

На рис. 3 в качестве примера приведен временной ряд значений температуры поверхности Мраморного моря в феврале, полученный с использованием формулы (1) для ряда спутниковых наблюдений, охватывающего период времени с 1982 по 2021 г. Как видно из рис. 3, фактическое значение ТМП в феврале 2021 г. составило  $10.34^\circ\text{C}$ , что выше среднего фонового уровня ( $9.10^\circ\text{C}$ ). Фактическое значение ТМП выходит за пределы диапазона  $\overline{P_M} + \sigma_M$  и  $\overline{P_M} - \sigma_M$ , показанного на рис. 3 пунктиром (т.е. интерпретируется как аномальная ситуация).

Помимо фоновых и фактических уровней исследуемых параметров водной среды, вычислялись их среднеемноголетние значения. Среднеемноголетнее значение исследуемого значимого параметра водной среды (в представленном на рис. 3 примере – ТМП, февраль с 1981 по 2021 г.) составило  $8.28^\circ\text{C}$ . Расхождения фоновых (ожидаемых с учетом линейной аппроксимации) и среднеемноголетних значений свидетельствуют о вкладе многолетнего тренда роста ТМП, что должно приниматься во внимание при анализе результатов исследования.

Для временных периодов, в пределах которых выполнялось условие (3), формировались пространственные распределения значимых параметров водной среды, которые анализировались с использованием геоинформационной системы (ГИС), созданной в ходе выполнения настоящего исследования с применением программного инструментария платформы QGIS (<https://qgis.org>). После этого выполнялись интерпретация и комплексный анализ выявленных аномальных отклонений значимых параметров водной среды и их сочетаний с привлечением данных о полях течений в Мраморном море.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Систематизация результатов обработки спутниковых и других данных проводилась с использованием ГИС. Это позволило выявить особенности пространственно-временного распределе-



**Рис. 3.** Пример одного из исследуемых долговременных рядов значений температуры поверхности Мраморного моря за февраль с 1981 по 2021 г. (данные NOAA OISST), иллюстрирующий отклонение фактически измеренного значения в 2021 г. (красный кружок) от фонового (черный кружок) и среднемноголетнего значения (синий кружок).

ния морской слизи в акваториях Мраморного моря. На рис. 4 иллюстрируется временной ряд карт зон скопления морской слизи (а–г), зарегистрированных по спутниковым изображениям (SENTINEL-2A/B) в течение 4 временных интервалов длительностью 1 мес каждый — с марта по июнь 2021 г.

На рис. 4 д приведен график, демонстрирующий динамику площади морской слизи за период времени с 01 февраля 2021 г. по 31 июля 2021 г. На рис. 4 е представлена обобщенная карта количества случаев наблюдений морской слизи с выделенными участками ее наиболее плотных скоплений.

Из анализа результатов обработки многоспектральных оптических изображений, полученных со спутников SENTINEL-2A/B (см. рис. 4 д), следует, что наиболее интенсивные загрязнения поверхности Мраморного моря слизью наблюдались в мае 2021 г. Общая площадь выявленной морской слизи, вычисленная как сумма площадей векторных полигонов (окирчивающих морскую слизь), составила  $\sim 973 \text{ км}^2$ .

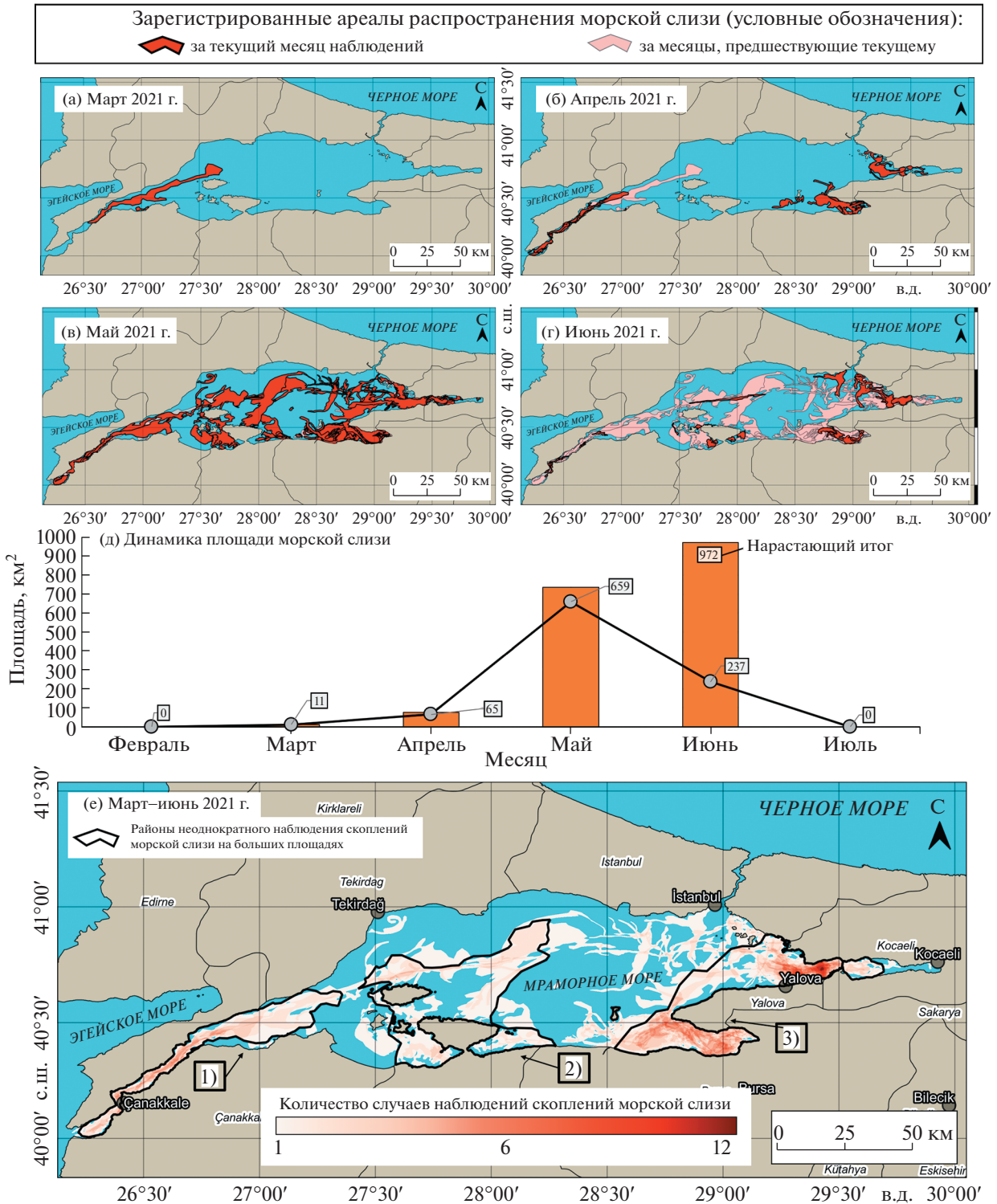
Анализ карт, представленных на рис. 4, свидетельствует о том, что морская слизь наиболее часто регистрировалась в восточном и юго-восточном (у провинций Yalova/Kocaeli и Bursa соответственно), южном, а также в центральном (у провинции Balikesir) и западном (у провинции Çanakkale) районах моря (см. рис. 4 е).

Результаты обработки долговременных серий спутниковых и модельных данных о ТМП, ФАР и составляющих скоростей приповерхностного ветра приведены в виде графиков, представленных

ных на рис. 5. Наибольший интерес вызывает анализ совокупности графиков, демонстрирующих временной ряд ТМП с июня 2021 г. по июль 2022 г. (рис. 5 а). Обращают на себя внимание отклонения среднемноголетних значений ТМП (синяя линия на рис. 5 а) от уровней, ожидаемых согласно линейной аппроксимации (черная линия на рис. 5 а), которые для некоторых месяцев превышают величину более  $1^\circ\text{C}$ . Эти отклонения свидетельствуют о значительном многолетнем положительном тренде ТМП в Мраморном море. Этот тренд также хорошо виден на примере графика межгодовой динамики температур февраля (на рис. 3).

Следует отметить наличие сильных положительных температурных аномалий, выходящих за пределы диапазона, определяемого условием (3)  $\overline{P}_M + \sigma_M$  и  $\overline{P}_M - \sigma_M$  (см. рис. 5 а, аномалии I, II, III), которые были обнаружены в октябре 2020 г. (приблизительно за месяц до поступления первых сообщений о судовых наблюдениях морской слизи в Мраморном море), а также в январе и феврале 2021 г. (приблизительно за два месяца до интенсификации процесса формирования слизи на морской поверхности).

Анализ рис. 5 а показал, что температурная аномалия I, зафиксированная в октябре 2020 г., характеризуется превышением фонового уровня ТМП на  $2.22^\circ\text{C}$  (на 11.5%), а аномалии II и III (январь и февраль 2021 г.) — на  $1.6^\circ\text{C}$  (16.7%) и на  $1.38^\circ\text{C}$  (15.4%) соответственно (см. рис. 5 а). Выявленные температурные аномалии рассматриваются в качестве одного из значимых факторов интенсификации развития микроводорослей [9, 10,



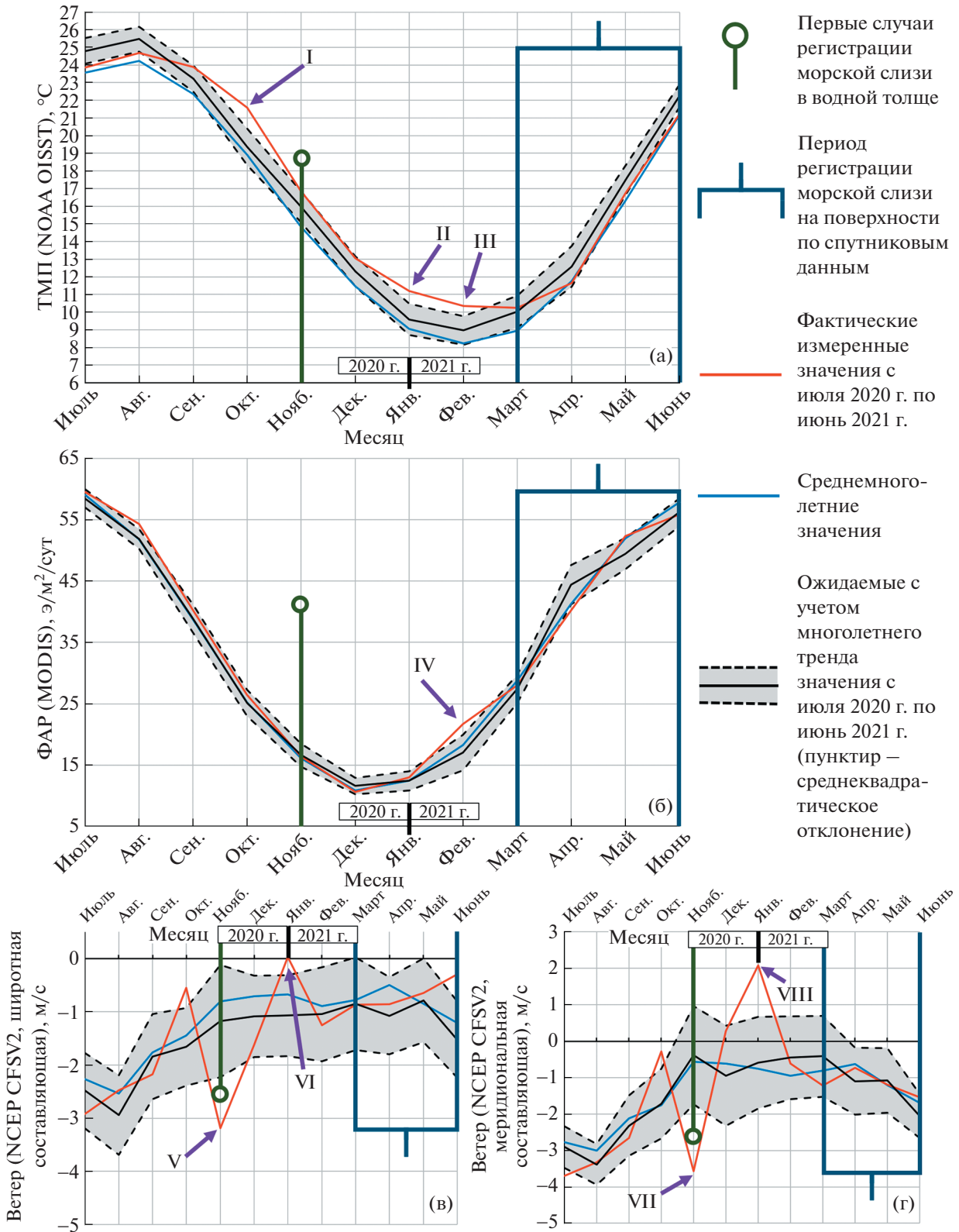
**Рис. 4.** Временной ряд карт зон скопления морской слизи (а–г), зарегистрированных по спутниковым изображениям SENTINEL-2A/B; график динамики площади морской слизи (д); карта количества случаев наблюдений морской слизи (е) с выделенными участками (1, 2, 3) наиболее плотных скоплений морской слизи.

19], продуцировавших аномально большое количество морской слизи в 2021 г.

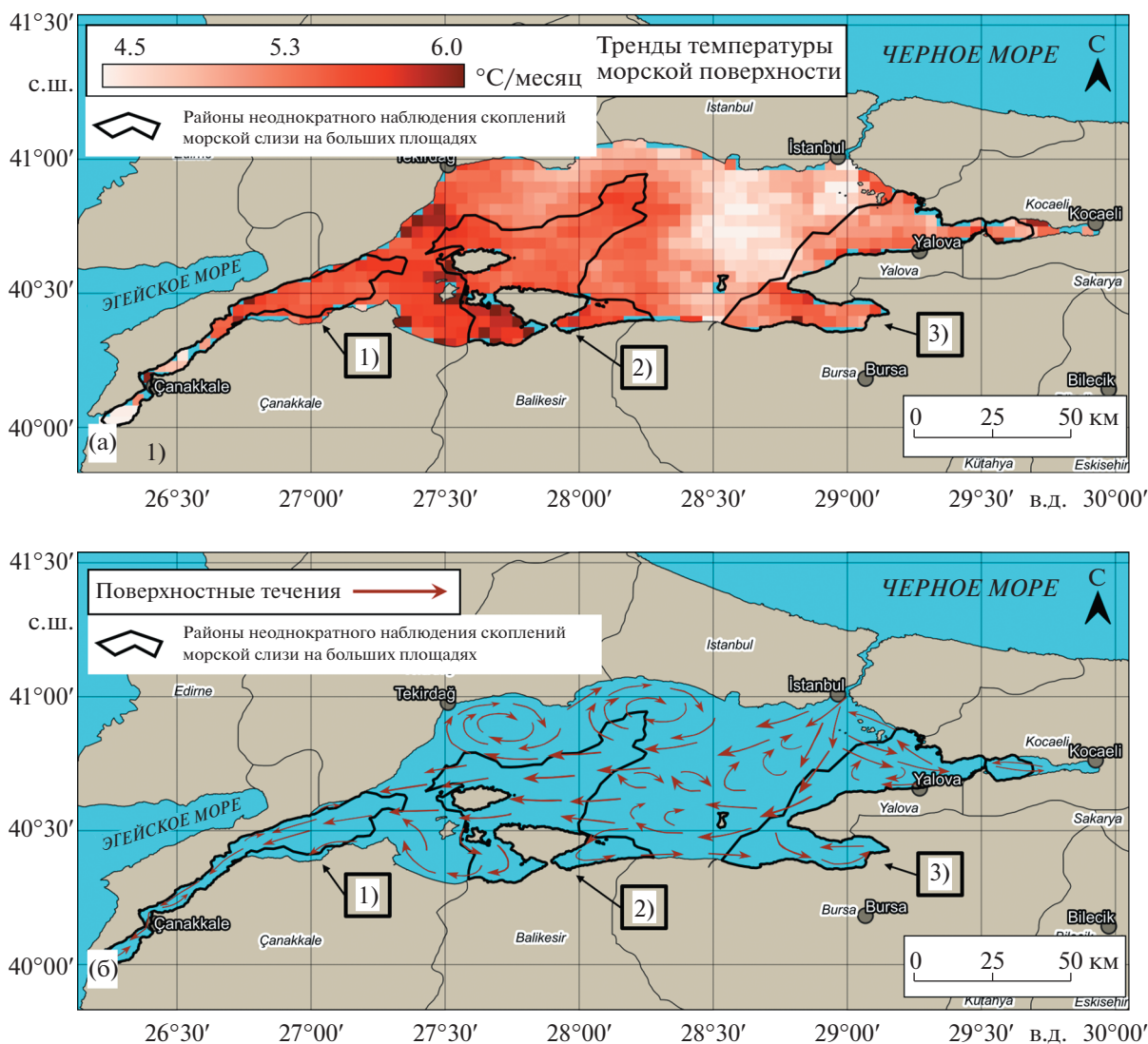
Из анализа рис. 5 б следует, что в феврале 2021 г. наблюдалась также сильная положительная аномалия уровня ФАР, достигавшая 4.65 э/м<sup>2</sup>/сут, что

на 27.3% превысило ожидаемое значение (см. рис. 5 б, IV).

На основании результатов анализа рис. 5 а и рис. 5 б справедливо предположить, что положительные аномалии ФАР и ТМП оказали суще-



**Рис. 5.** Графики, характеризующие аномалии гидрометеорологических условий, способствовавших интенсификации генерации морской льдины: температура морской поверхности ((а), аномалии I, III, III), уровень фотосинтетически активной радиации ((б), аномалия IV), компоненты векторов приповерхностного ветра ((в, г), экстремумы V–VIII).



**Рис. 6.** Пространственные распределения биогенных загрязнений акватории Мраморного моря. Участки 1,2,3 (показывают наиболее плотные скопления морской слизи в Мраморном море), наложенные на карту трендов температуры морской поверхности в период с марта по июнь 2021 г. (а) и карту поверхностных течений (б).

ственное влияние на интенсификацию развития фитопланктона. Положительные аномалии ТМП рассматриваются в качестве ключевого фактора для интенсификации развития микроводорослей в ряде работ (см., например, [5, 9, 19]). При этом известно [20], что влияние высоких уровней ФАР в весенний период имеет большое значение для метаболизма фитопланктона.

Вместе с этим анализ рис. 5 в–г показывает, что как в ноябре 2020 г. во время начала образования скоплений морской слизи на глубине (о чем сообщено в работе [1]), так и в январе 2021 г. в преддверии развития обширных образований слизи на морской поверхности была зарегистрирована нетипичная для исследуемой акватории изменчивость полей приповерхностного ветра.

Так, в ноябре 2020 г. меридиональная и широтная составляющие характеризовались значениями — 3.56 м/с и —3.18 м/с соответственно (см. рис. 5 в, V и рис. 5 г, VI), что эквивалентно скорости ветра 4.78 м/с (ожидаемое значение —1.24 м/с). В январе 2021 г. (см. рис. 5 в, VI и 5 г, VIII) также наблюдались аномалии составляющих приповерхностного ветра, обусловившие нетипичное для января направление ветра в Мраморном море (превалировала меридиональная составляющая величиной 2.08 м/с — при практически нулевой широтной составляющей).

Примечательно, что в ноябре 2020 г. аномалия поля ветра выразилась в значительном увеличении его скорости (на 285%) по сравнению с ожидаемым уровнем (см. рис. 5 в, V и рис. 5 г, VI), а в



январе аномалия была выражена в изменении направления ветра на практически противоположное (см. рис. 5 в, VI и 5 г, VIII). Повышенные скорости ветра в ноябре 2020 г. обеспечивали интенсификацию перемешивания приповерхностного слоя, что являлось благоприятным фактором для развития фитопланктона [11, 13]. При этом нетипичное направление ветра в январе 2021 г. (на север) усиливало перенос прогретых вод от южных берегов вглубь акватории. В данном направлении и концентрировались наиболее обширные биогенные загрязнения Мраморного моря (см. рис. 4).

Пространственные распределения биогенных загрязнений акватории Мраморного моря и трендов температуры морской поверхности в период с марта по июнь 2021 г. иллюстрируются на рис. 6 а. Их совместный анализ позволил выявить приблизительное соответствие зон скопления морской слизи и районов, характеризующихся высокими значениями скорости изменения температуры морской поверхности (участки карты трендов температуры морской поверхности темно-красного цвета на рис. 6 а) в марте-июне 2021 г.

При этом следует обратить внимание на то, что наиболее свободный от морской слизи район Мраморного моря был расположен в зоне действия течений, направленных со стороны пролива Босфор (см. рис. 6 б), характеризующийся самыми низкими скоростями изменения температуры (участки карты температуры морской поверхности белого цвета, рис. 6 а) в марте-июне 2021 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов исследований, проведенных с использованием многоспектральных спутниковых изображений, установлено, что с 23 марта по 30 июня 2021 г. выявлено аномальное биогенное загрязнение морской слизию поверхности Мраморного моря на площади ~973 км<sup>2</sup>.

В результате обработки и анализа длительных временных рядов спутниковых и модельных данных о гидрометеорологических параметрах Мраморного моря (с 1981 по 2021 г.) показано, что вследствие сложившегося комплекса специфических гидрометеорологических условий (превышение температуры на ~17% от нормы, превышение уровня фотосинтетически активной радиации на 27% от нормы, необычные для исследуемых сезонов скорости и направления ветра), согласованно способствующих интенсификации размножения водорослей-продуцентов морской слизи, интенсивно производились биогенные макроагрегаты, впоследствии образовавшие обширные скопления слизи на морской поверхности.

Таким образом, была продемонстрирована эффективность применения предложенного подхода к анализу длительных ретроспективных рядов значимых параметров водной среды, сформированных с использованием комплекса спутниковых и модельных данных (SENTINEL-2A/B, NOAA OISST, NCEP CFSV2, MODIS AQUA/TERRA), к задаче исследования редкого экологического происшествия, связанного с аномально интенсивными загрязнениями морской среды биогенными макроагрегатами.

Результаты и методика исследования могут быть использованы в будущем для изучения предпосылок и оценки рисков возникновения вредоносных цветений водорослей и биогенных загрязнений в морских акваториях.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Karadurmuş U., Sari M.* Marine mucilage in the Sea of Marmara and its effects on the marine ecosystem: mass deaths // *Turk J Zool.* 2022. P. 93–102. <https://doi.org/10.3906/zoo-2108-14>
2. *Topçu N.E., Öztürk B.* The impact of the massive mucilage outbreak in the Sea of Marmara on gorgonians of Prince Islands: A qualitative assessment // *Black Sea/Mediterranean Environment.* 2021. V. 27. № 2. P. 270–278. <https://blackmedjournal.org/volumes-archive/vol-27-2021/vol-27-2021-no-2/the-impact-of-the-massive-mucilage-outbreak-in-the-sea-of-marmara-on-gorgonians-of-prince-islands-a-qualitative-assessment/>
3. *Ergul H., Balkis-Ozdelice N., Koral M., Aksan S., Durmuş T., Kaya M., Kayal M., Ekmekci F., Canlı O.* The early stage of mucilage formation in the Marmara Sea during spring 2021 // *Black Sea/Mediterranean Environment.* 2021. V. 27. № 2. P. 232–257. <https://blackmedjournal.org/volumes-archive/vol-27-2021/vol-27-2021-no-2/the-early-stage-of-mucilage-formation-in-the-marmara-sea-during-spring-2021/>
4. *Tüfekçi V., Balkis N., Beken Ç.P., Ediger D., Mantıkci M.* Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara // *Turk. J. Biol.* 2010. V. 34. P. 199–210. <https://doi.org/10.3906/BIY-0812-1>
5. *Savun B., Gazioglu C.* Mucilage Problem in the Semi-Enclosed Seas: Recent Outbreak in the Sea of Marmara // *Int. J. Environ. Geoinformatics.* 2021. V. 8. P. 402–413. <https://doi.org/10.30897/ijgeo.955739>
6. *Bondur Valery G.* Satellite monitoring and mathematical modelling of deep runoff turbulent jets in coastal water areas // *Waste Water – Evaluation and Management,* 2011. ISBN978-953-307-233-3. P. 155–180. <https://doi.org/10.5772/16134>

- <http://www.intechopen.com/articles/show/title/satellite-monitoring-and-mathematical-modelling-of-deep-runoff-turbulent-jets-in-coastal-water-areas>.
7. *Бондур В.Г., Воробьев В.Е., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Исследования полей течений и загрязнений прибрежных вод на Геленджикском шельфе Черного моря с использованием космических данных // Исследование Земли из космоса. 2012. № 4. С. 3–11.
  8. *Бондур В.Г., Килер Р.Н., Старченков С.А., Рыбакова Н.И.* Мониторинг загрязнений прибрежных акваторий с использованием многоспектральных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 42–49.
  9. *Бондур В.Г., Замишин В.В., Чверткова О.И.* Исследование из космоса экологического происхождения у полуострова Камчатка в сентябре-октябре 2020 года, связанного с красным приливом // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 497. № 1. С. 83–90.  
<https://doi.org/10.31857/S2686739721030014>
  10. *Bondur V., Zamshin V., Chvertkova O., Matrosova E., Khodaeva V.* Detection and Analysis of the Causes of Intensive Harmful Algal Bloom in Kamchatka Based on Satellite Data // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. V. 9. № 10. P. 1–19.  
<https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
  11. *Stumpf R.P., Tomlinson M.C.* Remote Sensing of Harmful Algal Blooms // Remote Sensing and Digital Image Processing. 2007. P. 277–296.  
[https://doi.org/Stumpf, R.P., & Tomlinson, M.C. \(2007\). Remote Sensing of Harmful Algal Blooms. Remote Sensing and Digital Image Processing, 277–296. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3100-7\\_12](https://doi.org/Stumpf, R.P., & Tomlinson, M.C. (2007). Remote Sensing of Harmful Algal Blooms. Remote Sensing and Digital Image Processing, 277–296. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3100-7_12)
  12. *Klemas V.* Remote Sensing of Algal Blooms: An Overview with Case Studies // J. Coast. Res. 2012. V. 28. P. 34–43.  
<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00051.1>
  13. *Komuscu A.U., Aksoy M., Doğan O.H.* An Analysis of Meteorological Conditions in Relation to Occurrence of the Mucilage Outbreaks in Sea of Marmara, An Analysis of Meteorological Conditions in Relation to Occurrence of the Mucilage Outbreaks in Sea of Marmara, March-June 2021 // Int. J. Environ. Geoinformatics. 2022. V. 9. P. 126–145.  
<https://doi.org/10.30897/ijegeo.1037842>
  14. *Медведева А.В., Станичный С.В.* Морская слизь — проявление в данных спутникового дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 314–319.  
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-3-314-319>
  15. *Hu C., Qi L., Xie Y., Zhang S., Barnes B.B.* Spectral characteristics of sea snot reflectance observed from satellites: Implications for remote sensing of marine debris // Remote Sens. Environ. 2022. V. 269. P. 112842.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112842>
  16. *Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson O., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P.* Dissolved organic matter and its optical characteristics in the Laptev and East Siberian seas: spatial distribution and interannual variability (2003–2011) // Ocean Science. 2018. V. 14. No 1. P. 87–103.  
<https://doi.org/10.5194/os-14-87-2018>
  17. *Breiman L., Friedman J., Stone C.J., Olshen R.A.* Classification and Regression Trees. Taylor & Francis. 1984. 372 p.
  18. *Kuroda H., Taniuchi Y., Watanabe T., Azumaya T., Hasegawa N.* Distribution of Harmful Algae (*Karenia* spp.) in October 2021 Off Southeast Hokkaido, Japan // Front. Mar. Sci. 2022. V. 9.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.841364>
  19. *Anderson D.M.* Toxic algal blooms and red tides: A global perspective. Elsevier. 1989. P. 11–16.
  20. *Horn H., Paul L.* Interactions between Light Situation, Depth of Mixing and Phytoplankton Growth during the Spring Period of Full Circulation // Int. Rev. Gesamten Hydrobiol. Hydrogr. 1984. V. 69. № 4. P. 507–519.  
<https://doi.org/10.1002/iroh.19840690405>

## STUDYING OF ANOMALOUS BIOGENIC POLLUTION OF THE SEA OF MARMARA USING SATELLITE DATA

Academician of the RAS **V. G. Bondur<sup>a,#</sup>**, **V. V. Zamshin<sup>a,#</sup>**, and **O. I. Chvertkova<sup>a,#</sup>**

<sup>a</sup> AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: [office@aerocosmos.info](mailto:office@aerocosmos.info)

Negative effect of anomalous algae blooms in the Sea of Marmara in spring–summer 2021 were studied and assessed using long-term time series of satellite data. It has been found that the area of extensive clumps of jelly-like organic matter (marine mucilage) was 973 km<sup>3</sup>. The most intensive biogenic pollutions were detected in the coastal waters of Canakkale, Bursa, and Yalova/Kocaeli provinces of Turkey. A set of factors that could contribute to favorable conditions for such an anomalously intense biogenic pollution was analyzed. It has been shown that the most probable causes for such pollution were the increase in marine environment temperature (the monthly average value exceeded the climatic norm by 17%), as well as in the level of photosynthetic active radiation (exceeded the climatic norm by 27%) accompanied by the uncommon for the studied water area and near-surface wind field variability.

**Keywords:** remote sensing, satellite data, marine water areas, algae blooms, marine mucilage, the Sea of Marmara