

Морская слизь — проявление в данных спутникового дистанционного зондирования

А. В. Медведева, С. В. Станичный

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: shift@mail.ua*

Морская слизь — плохо изученное явление, которое связано с образованием коллоидных структур, взвешенных в толще моря или плавающих на поверхности. В работе представлены результаты спутниковых наблюдений за районами акватории Мраморного моря, содержащими морскую слизь в период её экстремального проявления в 2021 г. Для исследования были использованы оптические и инфракрасные сенсоры высокого пространственного разрешения спутников Sentinel-2, Landsat-8, Gaofen-6, а также данные радара с синтезированной апертурой спутника Sentinel-1. Показано, что морская слизь оказывает влияние на оптические свойства воды, на характеристики шероховатости поверхности и температуру поверхностного слоя. Коэффициент яркости морской поверхности для плавающей слизи достигал величины 0,6 в ближней инфракрасной области спектра, а также имел высокие значения (до 0,1) для длин волн 1,6 и 2,1 мкм. Рассмотрены особенности проявления корабельных следов в районах с взвешенной слизью. Зарегистрированы прогревы в зоне плавающей слизи до 5 °С и более относительно окружающих вод. На радиолокационных изображениях области, покрытые слизью, в основном проявляются как зоны с отрицательным контрастом, хотя для слабых ветров были зафиксированы ситуации, когда контраст был положительным, что, возможно, связано с нахождением пузырьков газов в плавающей слизи.

Ключевые слова: морские экосистемы, дистанционное зондирование, морская слизь, Мраморное море

Одобрена к печати: 30.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-314-319

Морская слизь (*англ.* marine mucilage, sea snot) — достаточно плохо изученное явление, причины и возникновение которого в морских экосистемах вызывают дискуссии и различия в объяснениях. Одно из основных объяснений состоит в том, что слизь — результат жизнедеятельности определённых видов фитопланктона (Lancelot, 1995). Представляя собой вязкие коллоидные структуры, взвешенные или плавающие в поверхностном слое моря, морская слизь оказывает существенное влияние на биотические и абиотические характеристики морских экосистем (Xu et al., 2013). Подробно рассмотрена ситуация с экстремальным развитием морской слизи в Мраморном море весной и летом 2021 г., когда она наблюдалась практически на всей акватории моря, а площадь плавающих конгломератов составляла десятки квадратных километров. Такое ранее не наблюдавшееся интенсивное проявление нанесло огромный вред как экосистеме моря, так и деятельности человека (рыболовству, марикультуре, рекреации).

Данная краткая статья направлена на демонстрацию проявления морской слизи в оптическом и инфракрасном диапазонах, а также радарных данных. Для мониторинга ситуации с развитием слизи были использованы данные оптических сканеров MSI (*англ.* Multispectral Instrument), OLI (*англ.* Operational Land Imager), TIRS (*англ.* Thermal Infrared Sensor), WFV (*англ.* Wide Field of View Multispectral Cameras) и радара C-SAR (*англ.* Synthetic-Aperture Radar).

Проявление морской слизи в данных оптических сканеров

Формирования слизи, представляя собой конгломераты с отличными от воды оптическими свойствами, существенно влияют на распространение излучения. Отметим, что слизь, как правило, содержит пузырьки газов и поглощает другие гидрозоли минерального и органического происхождения, в том числе антропогенные загрязнители.

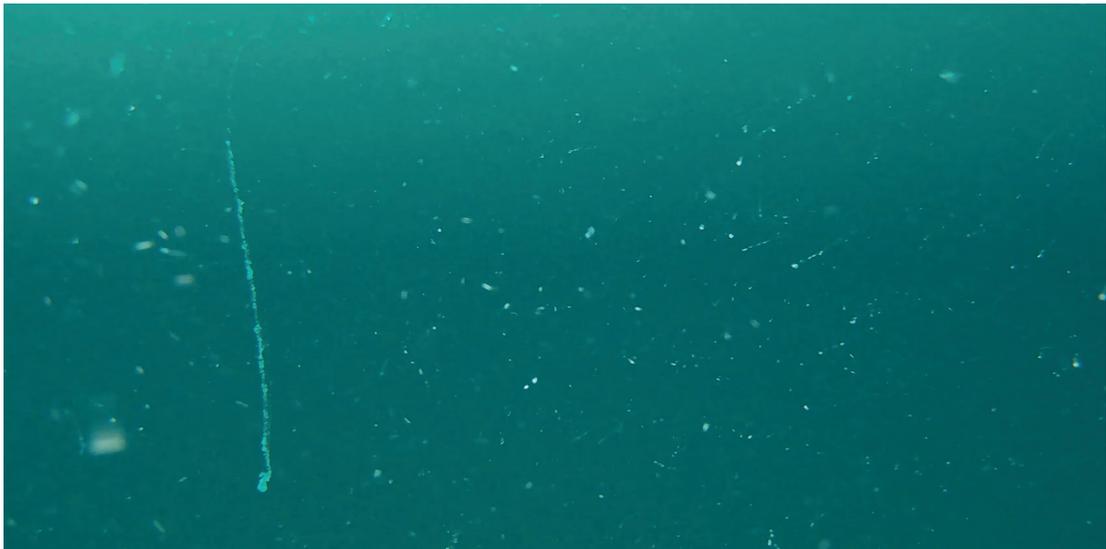


Рис. 1. Фотоснимок, выполненный подводным дроном с искусственным освещением в прибрежной зоне Севастополя. Съёмка от 23 июня 2020 г., глубина 55 м



Рис. 2. Фрагмент сцены MSI Sentinel-2 в псевдонатуральных цветах от 7 мая 2021 г., отображающий морскую слизь в Гемликском заливе (юго-восточный район Мраморного моря)

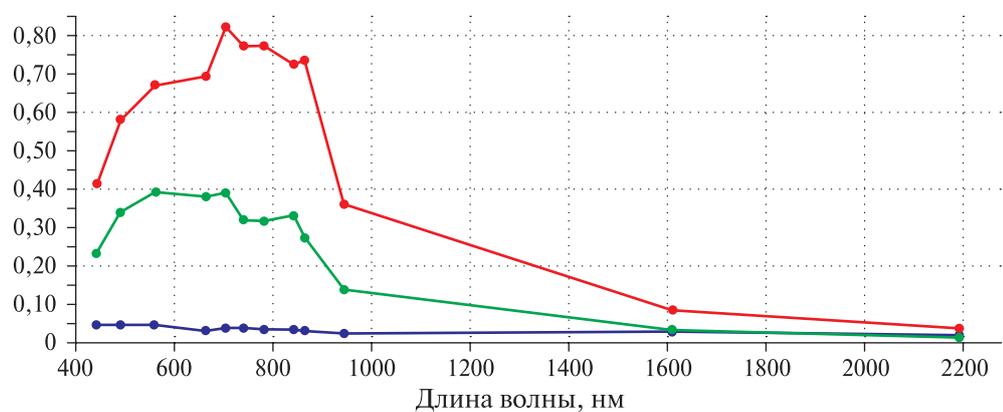


Рис. 3. Спектры R_{rs} для плавающей морской слизи (красный цвет), слизи в поверхностном слое (зелёный цвет) и вод без содержания слизи

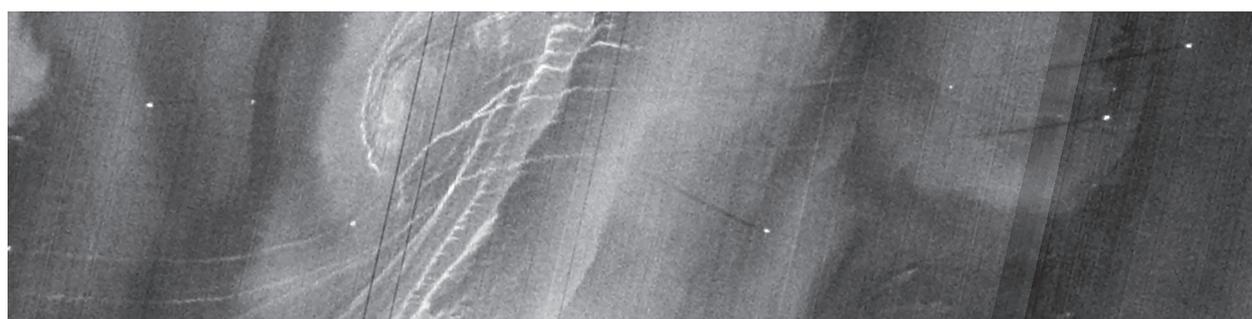
Фотоснимок на *рис. 1* (см. с. 315), сделанный подводным дроном в прибрежной зоне Севастополя, демонстрирует морскую слизь в толще вод в небольших концентрациях. Видно, что зафиксированные на изображении конгломераты слизи представляют собой частицы с размерами от миллиметров до десятков сантиметров в виде вытянутых нитевидных структур с рассеивающими свойствами.

Слизь может находиться как во взвешенном состоянии (как на *рис. 1*), так и собираться в большие формирования на поверхности и образовывать обширные области, покрытые сплошной плёнкой. В этом случае слизь дополнительно собирает и плавающие загрязнители, и воздушные аэрозоли (пыль). На *рис. 2* (см. с. 315) представлен фрагмент RGB-композиата (R — *англ.* red, красный; G — *англ.* green, зелёный; B — *англ.* blue, синий) сканера MSI спутника Sentinel-2 от 7 мая 2021 г., на котором хорошо выделяется плавающая слизь светло-жёлтого цвета, занимающая площади в десятки квадратных километров в зонах конвергенции. Такое проявление обусловлено достаточно высокими коэффициентами яркости (Rrs) в красной области спектра.

Анализ спектров коэффициента яркости для областей с морской слизью в различном состоянии выявляет определённые особенности (*рис. 3*, см. с. 315). Так, для плавающей слизи характерны величины Rrs на порядок выше, чем для слизи в поверхностном слое вод и для чистых вод. Они характеризуются максимумами значений в диапазонах 0,665–0,870 мкм и аномально высокими значениями Rrs на длинах волн от 1,6 и 2,2 мкм, тогда как для слизи в поверхностном слое вод в этом диапазоне Rrs соответствуют тем же величинам, что и для чистых вод.



a



б

Рис. 4. Фрагмент снимков сканеров OLI (*a*) и TIRS (*б*) от 17 мая 2021 г.

Отметим также особенности формирования поля яркости излучения в оптическом диапазоне при прохождении судов через области с взвешенной слизью. Следы судов остаются на поверхности достаточно долго и выделяются как области с повышенной яркостью. Вероятной причиной такого проявления может быть захват слизию воздуха при работе винтов судна и дальнейшее нахождение в виде плавающей субстанции. Это предположение подтверждается при анализе данных в тепловых диапазонах: обнаруженные следы

судов проявляются как области с повышенной температурой. Например, это хорошо видно на изображениях от 17 мая, полученных со сканеров OLI и TIRS спутника Landsat-8 (рис. 4, см. с. 316), которые представляют собой карту радиационной температуры в канале 11 мкм (TIRS) и разность зелёного и ближнего инфракрасного каналов (для устранения отражённой компоненты). На оптическом снимке более светлые области соответствуют присутствию слизи в поверхностном слое, а на снимке TIRS — повышенной температуре. На изображении, отражающем радиационную температуру, следы сразу за кораблями проявляются более холодными из-за перемешивания, но на расстоянии (т. е. через некоторое время после прохождения судов) заметен прогрев возмущённых областей.

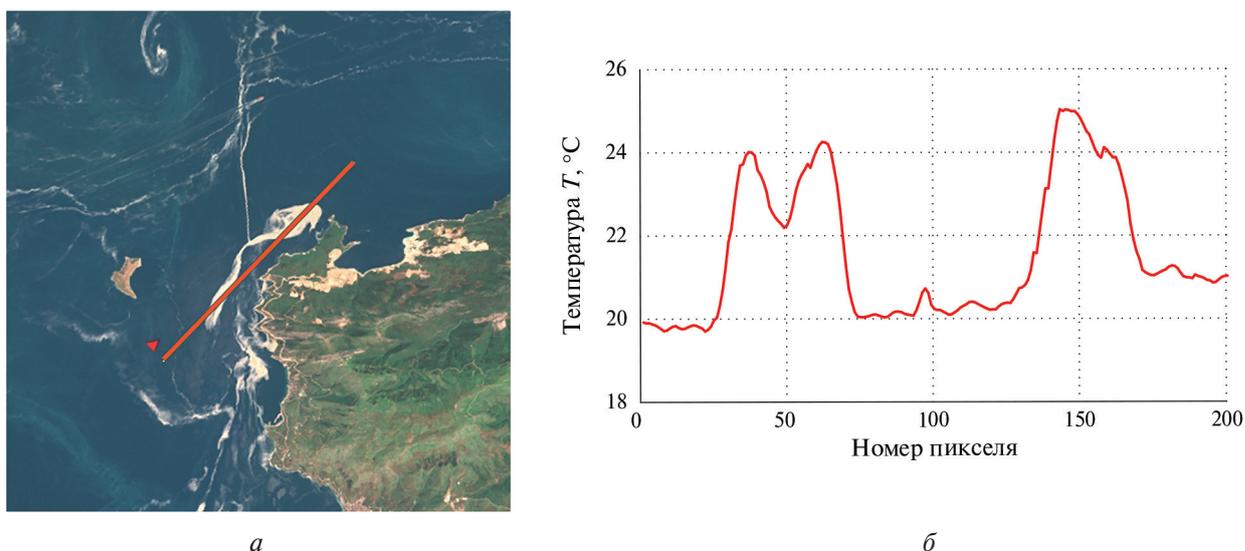


Рис. 5. Разрез (красная линия, стрелкой указано направление) на фрагменте спутникового снимка Landsat-8 (от 24.05.2021), нанесённый вблизи о-ва Пашалиманы и п-ова Капыдак в зал. Эрдек (а) и соответствующий ему график изменения температуры поверхности (б)

В целом при анализе изображений TIRS Landsat-8 в дни с экстремальным проявлением морской слизи получено, что в областях с плавающей слизью регистрируемая величина прогрева относительно окружающих вод может достигать величин до 5–6 °С. Например, в пределах разреза, проложенного на снимке со спутника Landsat-8 от 24 мая 2021 г. (рис. 5а) с данных сканера TIRS, получены следующие значения температуры поверхности (восстановлены с помощью двухканального метода (Алескерова и др., 2016)): минимальная температура — 19,82 °С («чистые» воды), максимальная — 25,03 °С (область с плавающей слизью), разница — 5,21 °С. Стоит отметить, что подобного рода перегревы могут уменьшать концентрацию кислорода в поверхностном слое моря.

Отображение в радарных данных

В большинстве случаев морская слизь, как и следовало ожидать, имеет отрицательный контраст с окружающими водами за счёт выглаживания поверхности и уменьшения рассеянного радиолокационного сигнала. На комбинированном изображении (рис. 6, см. с. 318) совмещены данные радара C-SAR Sentinel-1 и MSI Sentinel-2 от 22 мая 2021 г., интервал между зондированием сканерами составил 4 ч 59 мин. Морская слизь на радиолокационном изображении регистрируется в виде более тёмных областей, на оптическом — в виде более светлых. На данном композите хорошо проявляется смещение слизи за обозначенный интервал времени. Подобные последовательные изображения в ряде случаев могут быть использованы для оценки переноса слизи, например вихрями, для которых она нередко выступает в роли трассера.

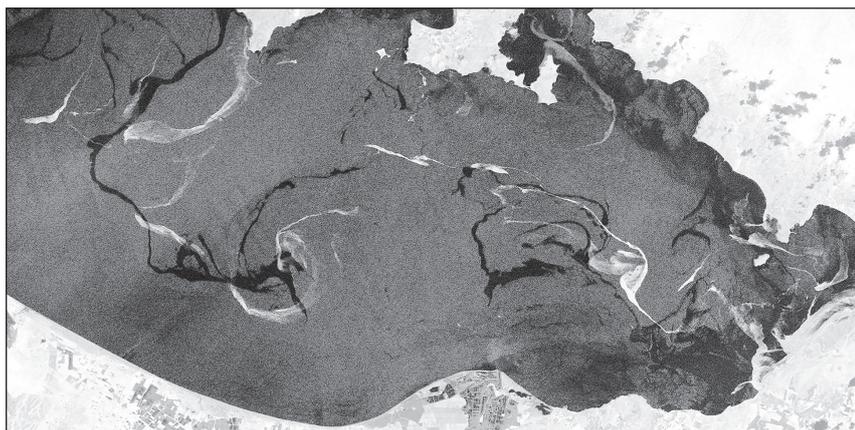


Рис. 6. Комбинированное изображение MSI и SAR-C от 22 мая 2021 г., зал. Эрдек. Тёмным областям соответствует морская слизь на радиолокационном снимке, светлым — на оптическом



Рис. 7. Фрагмент изображения C-SAR от 5 мая 2021 г., на котором покрытые слизью области имеют положительный контраст

Однако при слабых ветрах отдельные формирования морской слизи могут проявляться в виде зон с большим рассеянием, вероятно за счёт содержащихся в них пузырьков воздуха, как в пене при обрушениях волн. На фрагменте изображения C-SAR от 5 мая 2021 г. для Гемликского залива (рис. 7) зафиксированы области, покрытые слизью, которые имеют положительный контраст с окружающими водами. По данным реанализа MERRA-2 (*англ.* Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications), скорость ветра в это время не превышала 2–3 м/с.

Заключение

Экстремальное проявление морской слизи в Мраморном море, кроме формирования новых угроз морским экосистемам и деятельности человека в прибрежной зоне, продемонстрировало новые проблемы для методов дистанционного зондирования в оптическом диапазоне. Морская слизь, оказывая сильное влияние на оптические свойства вод, создаёт новый определяющий параметр при формировании коэффициента яркости и требует усовершенствования алгоритмов восстановления характеристик гидрозолей. Анализ спутниковых изображений теплового инфракрасного диапазона показал существенное влияние морской слизи на температуру морской поверхности: были выделены зоны интенсивного перегрева. Контрасты морской слизи в радиолокационных изображениях могут быть как положительными, так и отрицательными — в зависимости от метеоусловий и состояния слизи.

Работа выполнена в рамках госзаданий № 0555-2021-0003, 0555-2021-0006 и при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 20-35-70034 «Идентификация, межгодовая изменчивость и особенности распространения интенсивных цветений фитопланктона в южных морях России по спутниковым измерениям».

Литература

1. Алескерова А. А., Кубряков А. А., Станичный С. В. Двухканальный метод восстановления температуры поверхности Черного моря по измерениям Landsat-8 // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 57–64.
2. Lancelot C. The mucilage phenomenon in the continental coastal waters of the North Sea // Science of the total environment. 1995. V. 165. No. 1–3. P. 83–102.
3. Xu H., Yu G., Jiang H. Investigation on extracellular polymeric substances from mucilaginous cyanobacterial blooms in eutrophic freshwater lakes // Chemosphere. 2013. V. 93. No. 1. P. 75–81.

Marine mucilage: manifestation in satellite remote sensing data

A. V. Medvedeva, S. V. Stanichny

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: shift@mail.ua

Marine mucilage is a poorly understood phenomenon associated with the formation of colloidal structures suspended in the sea or floating on the surface. The paper presents the results of satellite observations of the areas of the Sea of Marmara containing marine mucilage during the period of its extreme manifestation in 2021. The study used high spatial resolution optical and infrared sensors of the Sentinel-2, Landsat-8, Gaofen-6 satellites, as well as data from the Sentinel-1 synthetic aperture radar. It is shown that mucilage affects the optical properties of water, the characteristics of the surface roughness and the temperature of the surface layer. The sea remote sensing reflectance for floating mucilage reached 0.6 in the near-infrared region of the spectrum, and also had high values (up to 0.1) for wavelengths of 1.6 and 2.1 μm . The features of the manifestation of ship tracks in areas with suspended mucus are considered. Warm-ups in the floating mucilage zone up to 5 °C and more relative to the surrounding waters have been recorded. In radar images, mucilage-covered areas mostly appear as areas with negative contrast, although situations where the contrast was positive were recorded for weak winds, which may be due to the presence of gas bubbles in the floating mucilage.

Keywords: marine ecosystems, remote sensing, marine mucilage, Marmara Sea

Accepted: 30.06.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-314-319

References

1. Aleskerova A. A., Kubryakov A. A., Stanichny S. V., A two-channel method for retrieval of the Black Sea surface temperature from Landsat-8 measurements, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 1155–1161.
2. Lancelot C., The mucilage phenomenon in the continental coastal waters of the North Sea, *Science of the total environment*, 1995, Vol. 165, No. 1–3, pp. 83–102.
3. Xu H., Yu G., Jiang H., Investigation on extracellular polymeric substances from mucilaginous cyanobacterial blooms in eutrophic freshwater lakes, *Chemosphere*, 2013, Vol. 93, No. 1, pp. 75–81.