



Количественный подход к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности по космическим изображениям

В. В. Замшин , Е. Р. Матросова, В. Н. Ходаева, О. И. Чверткова

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС»,
Москва, Россия

 viktor.v.zamshin@gmail.com

Поступила в редакцию 08.04.2021 г., после доработки – 11.06.2021 г.

Цель. С использованием космического мониторинга морей и океанов выполняется большое количество исследований пленочных загрязнений различного типа (нефтепроявления, поверхностно-активные вещества и др.). При этом остается нерешенной задача формальной классификации участков исследуемых акваторий по частоте и интенсивности таких загрязнений. Условия и периодичность проведения космических съемок могут существенно различаться в зависимости от региона мониторинга, что обуславливает пространственную изменчивость вероятности обнаружения пленочных загрязнений и необходимость учета этой особенности. Целью настоящей работы является развитие количественного подхода к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности на основании обработки больших объемов космических многоспектральных и радиолокационных изображений.

Методы и результаты. Введено понятие и предложена методика расчета количественной величины «показатель подверженности морской поверхности пленочным загрязнениям» $d_{пзМОН}$ на регулярной пространственной сетке. Величина $d_{пзМОН}$ определяется как отношение площади пленочных загрязнений, наблюдавшихся на участке, к площади проанализированных элементов разрешения (на которых обнаружение пленочных загрязнений было теоретически возможным). Посредством учета вариаций метеорологических условий и пространственного распределения количества наблюдений предлагаемый подход развивает известные способы анализа результатов длительного космического мониторинга загрязнений морских акваторий. С использованием этого подхода изучено пространственное распределение небогенных пленочных загрязнений в акватории северной части Черного моря, обнаруженных по результатам дешифрирования 4428 космических изображений, полученных со спутников *Landsat-8*, *Sentinel-2A/B*, *Sentinel-1A/B* в 2019 г. (обработано 2499 загрязнений). Среднее значение показателя $d_{пзМОН}$ составило 0,012 %. Выделено три района, в которых зарегистрированы превышения $d_{пзМОН}$ более чем в 30 раз по сравнению со средним значением.

Выводы. На примере участка северной части Черного моря продемонстрирована возможность получения репрезентативных информационных продуктов спутниковой океанографии, количественно характеризующих пространственную изменчивость пленочных загрязнений морской поверхности, зарегистрированных в течение длительных эпизодов космического мониторинга.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, морская поверхность, пленочные загрязнения, нефтепроявления, оптическая съемка, многоспектральная съемка, радиолокационная съемка, спутниковая океанография, Черное море


Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания № 0588-2019-0030 и приглашения № 075-15-2020-776.

Для цитирования: Количественный подход к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности по космическим изображениям / В. В. Замшин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 610–622. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-610-622

Quantitative Approach to Studying Film Pollution of the Sea Surface Using Satellite Imagery

V. V. Zamshin , E. R. Matrosova, V. N. Khodaeva, O. I. Chvertkova

AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

 viktor.v.zamshin@gmail.com

Purpose. Numerous studies of various film pollutions (oil spills, surfactants etc.) are performed by means of satellite monitoring of seas and oceans. However, the problem of formal ranking the water areas of the regions under study by frequency and intensity of pollution is still unsolved. The conditions and periodicity of satellite survey can differ greatly depending on the monitoring region that determines both spatial variability of the probability of film pollution detection and the need to take this feature into consideration. Here we attempt to develop a quantitative approach to studying the sea surface film pollutions based on processing of large volumes of satellite optical and radar imagery.

Methods and Results. The concept “index of sea surface exposure to film pollutions”, d_{fPMON} , and the method for calculating its quantitative value on a regular spatial grid are proposed. The value of d_{fPMON} is defined as a ratio of the pollution area observed at the site to the area of the analyzed resolution elements (where detection of film pollution is theoretically possible). Within the framework of this approach, the already existing methods for analyzing the results of long-term satellite seawater pollution monitoring were improved due to taking into account the meteorological conditions and the spatial distribution of the observation amount. Having been applied, the proposed approach permitted to study spatial distribution of the non-biogenic film pollutions in the northern part of the Black Sea; they were detected resulting from interpretation of 4428 satellite images obtained in 2019 by the *Landsat-8*, *Sentinel-2A/B* and *Sentinel-1A/B* satellites (2499 cases of pollution processed). The average value of the d_{fPMON} index was 0.012 %. Three regions, where the d_{fPMON} values exceeded the average one by more than 30 times were identified.

Conclusions. The example of a site in the northern Black Sea has shown the possibility of obtaining representative information products of satellite oceanography, which quantitatively characterize spatial variability of the sea surface film pollution recorded during the long-term episodes of space monitoring.

Keywords: Earth remote sensing, sea surface, film pollutions, oil slicks, optical survey, multispectral imagery, radar imagery, satellite oceanography, Black Sea

Acknowledgements: the study was carried out within the framework of the state task No. 0588-2019-0030, and agreement No. 075-15-2020-776.

For citation: Zamshin, V.V., Matrosova, E.R., Khodaeva, V.N. and Chvertkova, O.I., 2021. Quantitative Approach to Studying Film Pollution of the Sea Surface Using Satellite Imagery. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(5), pp. 567-578. doi:10.22449/1573-160X-2021-5-567-578

1. ВВЕДЕНИЕ

С использованием космической съемки выполнено большое количество исследований пленочных загрязнений (ПЗ) в морях и океанах (см., например, работы [1–6]). Анализ современного уровня исследований, выполняемых в рамках этой тематики, позволяет указать на некоторые нерешенные проблемы.

Наиболее известная проблема связана со сложностью дешифрирования ПЗ морской поверхности. Это касается как многоспектральных, так и радиолокационных космических изображений. Известны различные классификации ПЗ, в соответствии с которыми загрязнения могут подразделяться, например, на

минеральные и биогенные, естественные и антропогенные. Проблема идентификации пленок различного типа на космических изображениях морской поверхности обсуждалась в многочисленных работах, например в [1, 2, 5, 7, 8]. Несмотря на сложности, визуальное дешифрирование космических изображений, выполненное подготовленными специалистами, в сочетании с возможностями так называемого геоинформационного подхода [9] позволяет получить в целом адекватные результаты.

Другая проблема связана с получением количественных оценок результатов обнаружения ПЗ. Обычно [2] исследование сводится к формированию обобщенных карт-схем обнаруженных и классифицированных по типу ПЗ, а также к сопоставлению этих карт-схем с ситуационной картой с использованием геоинформационных технологий [9–12]. Такой подход позволяет существенно продвинуться в анализе особенностей и причин возникновения обнаруженных ПЗ. Однако при этом остается нерешенной задача формальной классификации участков исследуемых акваторий по частоте и интенсивности загрязнений. Особенно сложно провести количественное сопоставление результатов мониторинга, полученных для различных морей, поскольку условия и частота проведения космических съемок могут существенно различаться.

В работах [4, 10, 13, 14] авторы глубже продвинулись в развитии подходов к количественному анализу данных об обнаруженных ПЗ морских акваторий: полученные при мониторинге оценки соотносятся с количеством наблюдений или часами наблюдений (для авиационных методов исследования). В [14] подход к анализу ПЗ наиболее совершенен: авторы проводят пространственно-временной анализ распределения районов зарегистрированных ПЗ, соотнесенных с картой количества космических съемок, что позволяет получить более релевантные оценки подверженности акваторий загрязнению. Однако в работе все же не учтен метеорологический фактор (при формально выполненной съемке возможность наблюдать ПЗ морской поверхности может отсутствовать ввиду неблагоприятных метеоусловий, что фактически уменьшает число наблюдений).

В настоящем исследовании осуществлена попытка дальнейшего развития количественного подхода к исследованию ПЗ обширных участков морской поверхности по данным космических съемок. Рассматривается процесс обработки и анализа результатов дешифрирования (выявления ПЗ) больших объемов космических многоспектральных и радиолокационных изображений морской поверхности с учетом вариаций метеорологических условий и пространственного распределения частоты выполнения релевантных съемок различными спутниковыми системами (СС).

2. МЕТОД

Рассмотрим случай разового наблюдения из космоса некоторого участка подстилающей поверхности и выразим результаты регистрации ПЗ заданного типа в процентах (%) от его площади:

$$d_{\text{пз}} = \frac{S_{\text{пз}}}{S_{\text{д}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $d_{пз}$ – доля наблюдаемой площади акватории участка, характеризующаяся ПЗ; $s_{пз}$ – площадь, отмеченная дешифровщиками как «ПЗ»; $s_{д}$ – площадь водной поверхности, подвергшейся дешифрированию.

При этом величина

$$d_{пзСС} = \frac{\sum_i (s_{пзСС})_i}{\sum_i (s_{дСС})_i} \cdot 100 \% \quad (2)$$

будет показывать осредненную за весь период мониторинга долю площади ПЗ выбранного участка водной поверхности, наблюдаемую с использованием конкретной СС (i обозначает порядковый номер съемки).

При разных i величина $s_{пзСС}$ принимает различные значения:

$$(s_{пзСС})_i = (n_{пзСС})_i \cdot s_{пикСС}, \quad (3)$$

где $n_{пзСС}$ – количество пикселей, соответствующих ПЗ; $s_{пикСС}$ – площадь пикселя для выбранной СС.

Отметим, что величина $s_{дСС}$ (площадь водной поверхности, подвергшейся дешифрированию) для одного и того же участка для разных i также принимает различные значения, так как анализируемый участок в зависимости от эпизода съемки может:

- а) не полностью покрываться съемкой;
- б) характеризоваться неблагоприятными метеорологическими условиями, не позволяющими наблюдать ПЗ даже при наличии результатов съемки.

Отдельно остановимся на особенностях учета гидрометеорологических условий на примере трех наиболее производительных в настоящее время спутниковых радиолокационных и многоспектральных систем *Sentinel-1A/B*, *Sentinel-2A/B*, *Landsat-8*, используемых для дешифрирования ПЗ различного типа (табл. 1). Значения $n_{гм}$ (количество наблюдаемых пикселей водной поверхности, для которых гидрометеорологические условия находились в допустимых пределах), для каждого участка и эпизода съемки могут быть получены на основании обработки дополнительных данных. Как известно [2–4, 8, 11, 12, 14], для обнаружения ПЗ космическими радиолокационными системами важным гидрометеорологическим фактором является скорость ветра, которая, согласно некоторым исследованиям, должна быть в диапазоне от 2 до 9 м/с [15]. Для использования космических многоспектральных данных необходимо отсутствие плотной облачности.

Как видно из табл. 1, для определения ветровых условий, соответствующих времени и месту радиолокационной съемки, использовались данные *NCEP Climate Forecast System Version 2*, поставляемые в виде пространственных распределений с шестичасовыми интервалами. Для учета условий при многоспектральной съемке использовались маски плотной облачности, включаемые в стандартные продукты *USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance* и *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*.

С учетом вышеизложенного,

$$(s_{дСС})_i = (n_{гмСС})_i \cdot s_{пикСС}, \quad (4)$$

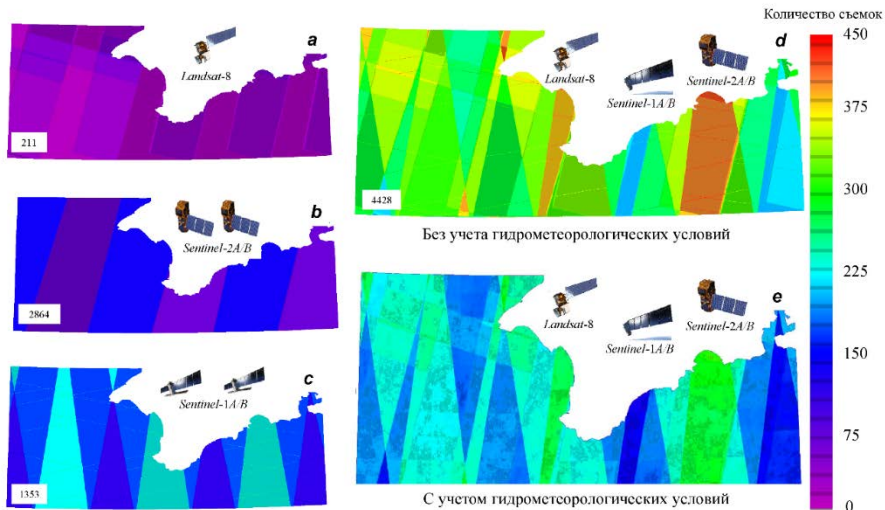
где $n_{гмСС}$ – количество наблюдаемых пикселей водной поверхности, для которых гидрометеорологические условия находились в допустимых пределах.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Примененные в исследовании способы определения количества таких пикселей в обрабатываемых фрагментах космических изображений ($n_{ГМСС}$), на которых обнаружение ПЗ считается теоретически возможным
Methods applied for quantifying the pixels in the processed fragments of satellite images ($n_{ГМСС}$), at which detection of the film pollution is considered theoretically possible

Шаг обработки / Step of processing	Радиолокационная СС / Radar SS	Многоспектральные СС / Multispectral SS	
	<i>Sentinel-1</i>	<i>Landsat-8</i>	<i>Sentinel-2</i>
Шаг 1 / Step 1	Формирование фрагмента изображения, соответствующего анализируемому участку / Formation of an image fragment corresponding to the analyzed area		
Шаг 2 / Step 2	Исключение из фрагмента (маскирование) пикселей, не входящих в зону мониторинга, а также пикселей, соответствующих суше / Exclusion (masking) of the pixels which are outside the monitoring area, and those corresponding to land, from the fragment		
Шаг 3 / Step 3	Подбор данных о скорости приповерхностного ветра по дате и времени съемки из архива <i>NCEP Climate Forecast System Version 2</i> / Selection of the near-surface wind speed data based on date and time of the survey from the archive <i>NCEP Climate Forecast System Version 2</i>	Исключение пикселей, для которых выполняется условие (наличие маркера плотной облачности в служебном канале <i>BQA</i>) / Exclusion of the pixels for which the condition is met (presence of a dense cloud marker in the service channel <i>BQA</i>)	Исключение пикселей, для которых выполняется условие (наличие маркера плотной облачности в служебном канале <i>SCL</i>) / Exclusion of pixels for which the condition is met (presence of a dense cloud marker in the service channel <i>SCL</i>)
Шаг 4 / Step 4	Исключение пикселей, попадающих в участки, для которых скорость ветра $V < 2$ м/с или $V > 9$ м/с / Exclusion of the pixels falling on the areas where the wind speed $V < 2$ m/s or $V > 9$ m/s		
Шаг 5 / Step 5	Вычисление количества оставшихся (не маскированных в результате шагов 1–4) пикселей / Calculation of a number of remaining pixels (not masked in steps 1–4)		
Результат / Result	$(n_{ГМС1})_i$	$(n_{ГМЛ8})_i$	$(n_{ГМС2})_i$

Принципиальная важность учета количества выполненных релевантных (с учетом гидрометеоусловий) наблюдений может быть продемонстрирована на примере. На рис. 1 представлены сформированные по формуле (4) карты для северной части Черного моря, полученные для интервала дат с 01.01.2019 по 31.12.2019 включительно. Общее количество учтенных изображений составило 4428. Из них 211 были получены со спутника *Landsat-8*, 2864 – спутниковой системой *Sentinel-2A/B*, 1353 – спутниковой системой *Sentinel-1A/B*.



Р и с. 1. Карты пространственных распределений количества наблюдений в 2019 г. для северной части Черного моря, выполненных со спутников *Landsat-8* (a), *Sentinel-2A/B* (b), *Sentinel-1A/B* (c), и карты распределения количества суммарных наблюдений без учета (d) и с учетом (e) облачности и неблагоприятных ветровых условий

F i g. 1. Maps of spatial distributions of a number of observations in 2019 for the northern part of the Black Sea carried out in from the *Landsat-8* (a), *Sentinel-2A/B* (b) and *Sentinel-1A/B* (c) satellites, and maps of distribution of a number of total observations with no account (d) and with account (e) cloudiness and unfavorable wind conditions

Из рис. 1 видно, что космическая многоспектральная система *Landsat-8* позволила выполнить наименьшее количество наблюдений (в пределах участка значения варьируют преимущественно в диапазоне от ~ 10 до ~ 60 наблюдений). На втором месте по производительности оказалась космическая многоспектральная система *Sentinel-2A/B* (в пределах участка значения варьируют приблизительно в диапазоне от ~ 70 до ~ 150 наблюдений). Наиболее часто съемка проводилась с радиолокационных спутников *Sentinel-1A/B* (от ~ 110 до ~ 240 наблюдений за 2019 г. в зависимости от конкретного участка района исследований). Суммарное количество наблюдений за год для всех трех СС достигло в некоторых точках участка 467. С учетом гидрометеоусловий количество релевантных наблюдений, по которым производилось дешифрирование, варьировалось в пределах участка преимущественно в диапазоне от 150 до 300 наблюдений за год (рис. 1, e). Сильная пространственная изменчивость количества выполненных наблюдений свидетельствует о необходимости учета

этого фактора при оценке результатов выявления ПЗ, что и реализовано в предлагаемом подходе.

Обобщая результаты мониторинга, полученные с нескольких СС, с учетом формул (2) – (4), для любого выбранного участка исследуемой акватории можно вычислить отношение

$$d_{\text{пзМОН}} = \frac{\sum_{j=1}^Y (s_{\text{пиксСС}j} \cdot \sum_{i=1}^X (n_{\text{пзСС}j})_i)}{\sum_{j=1}^Y (s_{\text{пиксСС}j} \cdot \sum_{i=1}^X (n_{\text{гмСС}j})_i)} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где Y – количество применяемых СС дистанционного зондирования; j – порядковый номер СС ($j = 1, \dots, Y$); $s_{\text{пиксСС}j}$ – площадь пикселя для j -ой СС; X – количество съемок для выбранной СС; i – порядковый номер съемки ($i = 1, \dots, X$); $(n_{\text{пзСС}j})_i$ – количество пикселей, соответствующих ПЗ, зарегистрированным в результате дешифрирования результатов i -й съемки; $(n_{\text{гмСС}j})_i$ – количество наблюдаемых пикселей водной поверхности, для которых гидрометеорологические условия во время проведения i -й съемки находились в допустимых пределах.

Числитель формулы (5) показывает общее количество ПЗ, наблюдаемых на участке с использованием всех примененных СС, выраженное в единицах площади. Знаменатель формулы (5) показывает выраженное в единицах площади общее количество тех элементов разрешения всех проанализированных изображений, на которых теоретически возможно было обнаружить ПЗ.

Суть предлагаемого подхода состоит в получении пространственного распределения величины $d_{\text{пзМОН}}$, вычисляемой по формуле (5). В рамках настоящего исследования данная величина названа «показатель подверженности морской поверхности ПЗ» (%).

Далее будет рассмотрен пример применения предлагаемого подхода для мониторинга ПЗ в северной части Черного моря.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим пример реализации предложенного подхода для мониторинга ПЗ небактериального происхождения (естественные нефтегазопроявления, судовые и береговые сбросы, разливы у морских нефтегазовых платформ, утечки подводных трубопроводов) в северной части Черного моря в период с 01.01.2019 по 31.12.2019. Этот участок был хорошо изучен ранее [4, 11, 14, 16, 17], что дает возможность провести оценку адекватности полученных в настоящем исследовании результатов. Выбор участка обусловлен также значительным количеством источников ПЗ небактериального происхождения (судовые трассы, нефтегазовые сипы), находящихся в его пределах [12, 18–20].

В данной работе в качестве исходных данных использован массив из 4428 предварительно дешифрированных космических изображений, полученных со спутников *Landsat-8*, *Sentinel-1A/B*, *Sentinel-2A/B* с 01.01.2019 по 31.12.2019. Выше (рис. 1) были продемонстрированы пространственные распределения количества выполненных релевантных наблюдений $(n_{\text{гмСС}j})_i$ для этих СС на исследуемом участке. Общая площадь использованных космических изображений морской поверхности составила $\sim 25,7$ млн км², при этом дешифрируемая площадь ($s_{\text{дСС}})_i$, соответствующая допустимым метеорологическим условиям, составила $\sim 18,2$ млн км². Таким образом, неблагоприятные погодные

условия сопутствовали ~ 29 % исходных космических данных. Для данных *Landsat-8* дешифрируемая площадь (S_{DL8}) составила ~ 1,6 млн км², для *Sentinel-2A/B* ($S_{дS2}$) ~ 5,5 млн км², для *Sentinel-1A/B* ($S_{дS1}$) ~ 11,1 млн км². Отношение дешифрируемой площади космических изображений к площади исследуемой акватории составило ~ 229 (столько раз в среднем был проконтролирован каждый из фрагментов акватории).

В ходе дешифрирования коллективом операторов-дешифровщиков были выделены 2499 небιοгенных пленочных образований антропогенного и естественного происхождения, в том числе судовые разливы, сбросы сточных вод, разливы у морских нефтегазовых платформ, а также пленки, образованные на морской поверхности в результате активизации подводных источников углеводородов (грязевые вулканы, сипы, грифоны и другие) (рис. 2).

Анализ рис. 2 показывает, что области сосредоточения ПЗ исследуемого типа, обнаруженных различными СС, в целом совпадают, т. е. можно указать на взаимоподкрепляемость результатов обработки космических многоспектральных и радиолокационных изображений, полученных с использованием различных СС. Общая площадь обнаруженных небιοгенных ПЗ составила ~ 2,1 тыс. км².

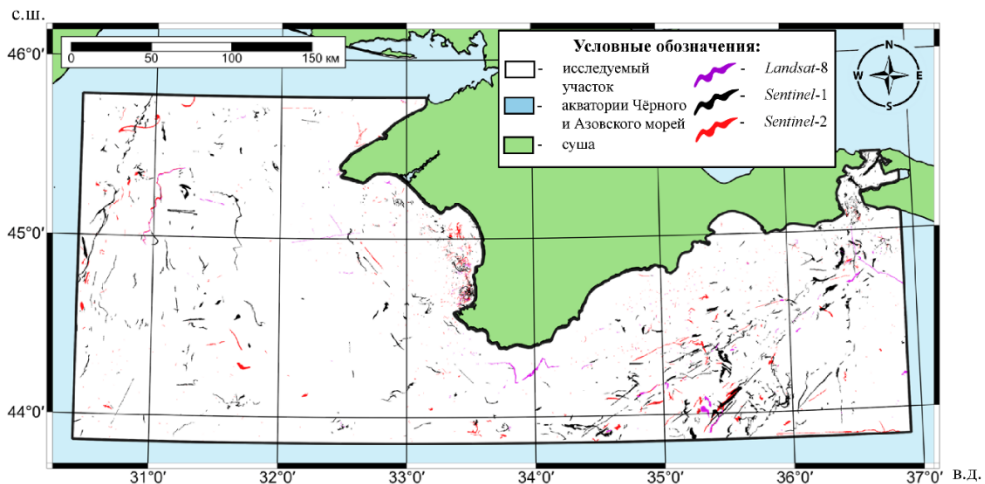


Рис. 2. Карта небιοгенных ПЗ, обнаруженных с 01.01.2019 по 31.12.2019 г. в результате дешифрирования данных спутников *Landsat-8* (фиолетовые полигоны), *Sentinel-2A/B* (красные полигоны) и *Sentinel-1A/B* (черные полигоны) на тестовом участке

Fig. 2. Map of non-biogenic film pollutions revealed from 01.01.2019 to 31.12.2019 as a result of interpreting the data from the satellites *Landsat-8* (purple polygons), *Sentinel-2A/B* (red polygons) and *Sentinel-1A/B* (black polygons) at the test site

Разобьем зону мониторинга на N квадратных фрагментов и будем вычислять ($d_{пзмон}f$) (см. формулу (5)) для каждого из них ($f = 1, 2, \dots, N$). Значения $n_{пзсс}$ вычисляются на основе обработки результатов выполненного дешифрирования объектов интереса, представленных в виде растровых масок, путем суммирования значения всех пикселей, входящих в обрабатываемый фрагмент (пиксели, соответствующие объекту интереса, имеют значение 1, фон – 0).

Карта пространственного распределения показателя подверженности водной поверхности небактериальным ПЗ, полученная с помощью предложенного количественного подхода для тестового участка Черного моря, представлена на рис. 3.

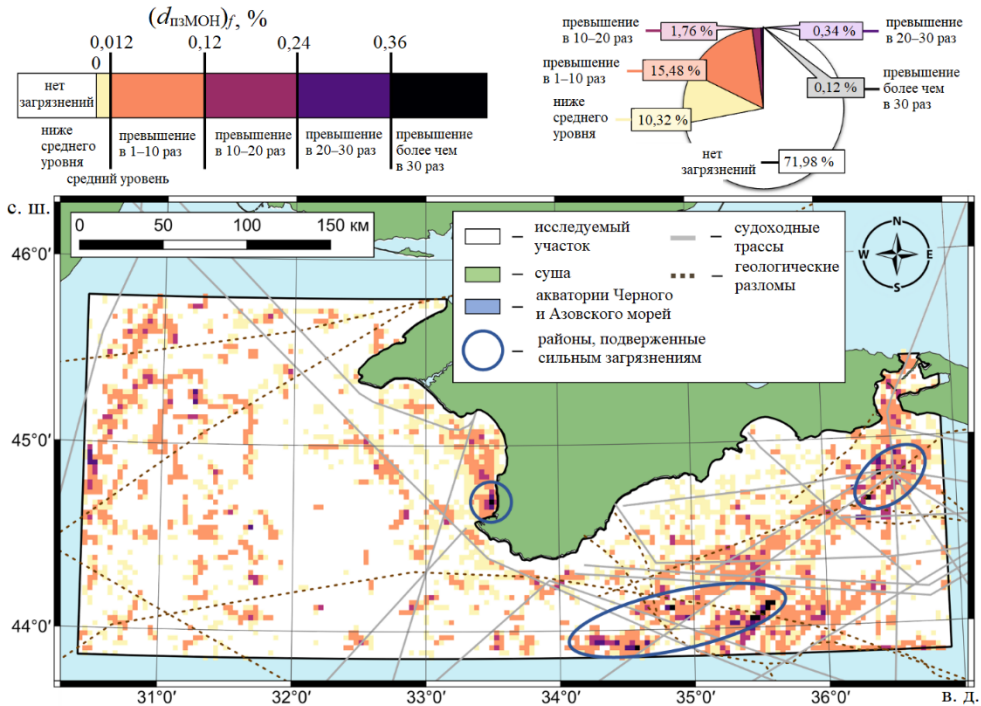


Рис. 3. Пространственное распределение значений показателя подверженности водной поверхности ПЗ ($d_{пзмон}f$) небактериального происхождения, вычисленных для каждой ячейки ($3 \times 3 \text{ км}^2$) исследуемой акватории на основании результатов дешифрирования данных спутников *Landsat-8*, *Sentinel-2A/B*, *Sentinel-1A/B*, полученных в 2019 г.

Fig. 3. Spatial distribution of the values of the index of sea surface exposure to film pollution, ($d_{пзмон}f$), of non-biogenic origin calculated for each cell ($3 \times 3 \text{ км}^2$) of the water area under study based on the results of interpreting the data from the *Landsat-8*, *Sentinel-2A/B* and *Sentinel-1A/B* satellites obtained in 2019

Карта представлена в разрешении 3 км (количество анализируемых фрагментов акватории при этом составило $N = 8857$). Информационные продукты подобного типа могут быть получены для любых произвольных размеров ячейки.

Анализ карты, представленной на рис. 3, показывает, что в пределах района исследования на $\sim 72\%$ площади небактериальные ПЗ не наблюдались в 2019 г. ни разу. Области, характеризующиеся показателем подверженности загрязнениям со значением ниже среднего по акватории, составляют $\sim 10\%$ площади района исследования. Оставшиеся области ($\sim 18\%$ площади участка) характеризуются показателем подверженности загрязнениям, равным среднему значению или выше его (рис. 2). В целом высокие показатели подверженности небактериальным ПЗ наблюдаются вдоль судоходных трасс и геологических

разломов, что соответствует результатам проведенных ранее исследований [4, 12, 14]. При этом на основании результатов настоящего исследования могут быть выделены три зоны, в которых зарегистрированы скопления ячеек с превышением среднего показателя подверженности загрязнению указанного типа более чем в 30 раз: вблизи г. Севастополя, вблизи Керченского пролива, юго-восточная часть тестового участка Черного моря (синие эллипсы на рис. 3).

Обобщенные количественные характеристики, полученные в результате применения предложенного подхода к исследованию ПЗ небиогенного происхождения на тестовом участке Черного моря в 2019 г., приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Обобщенные количественные характеристики и результаты выполненного с использованием предложенного подхода мониторинга небиогенных ПЗ на севере Черного моря в 2019 г.
Generalized quantitative characteristics and results of the non-biogenic film pollution monitoring performed using the proposed approach in the northern Black Sea in 2019

Характеристика / Characteristic	Спутниковая система / Satellite system			Всего / Total
	<i>Landsat-8</i>	<i>Sentinel-2</i>	<i>Sentinel-1</i>	
Количество съемок N , ед. / Number of surveys N , unit	211	2864	1353	4428
Дешифрованная площадь s_d , млн км ² / Interpreted area s_i , mil- lion km ²	1,6	5,5	11,1	18,2
Количество объектов $N_{пз}$, ед. / Number of objects N_{fp} , unit	209	952	1338	2499
Площадь объектов $s_{пз}$, км ² / Area of objects s_{fp} , km ²	170	514	1441	2126
Доля площади загрязнений отно- сительно дешифрованной пло- щади $d_{пзМОН}$, % / Portion of the pollution area relative to the interpreted area $d_{fpМОН}$, %	0,010	0,009	0,013	0,012

П р и м е ч а н и е. Объекты дешифрирования для всех СС – визуально-интерпретируемые ПЗ небиогенного происхождения (судовые разливы, естественные выходы углеводородов, сбросы сточных вод и др.).

N o t e. The objects of interpretation for all the satellite systems are the visually interpreted film pollutions of non-biogenic origin (ship spills, natural hydrocarbon discharges, waste water discharges etc.).

Как видно из табл. 2, доля площади поверхности, покрытой ПЗ исследуемого типа, относительно общей дешифрованной площади космических изображений составляет 0,012 %. Это означает, что в пределах района исследу-

дований встретить небιοгенное ПЗ в произвольной точке морской поверхности в произвольный момент времени можно с вероятностью $\sim 0,012\%$ (в 12 из 100 тыс. случаев). Относительно низкое значение этого показателя связано с тем, что плотность загрязнений значительна лишь в отдельных зонах акватории (рис. 3). При расчете данного показателя отдельно для каждой космической системы были получены следующие результаты: для *Landsat-8* – $0,010\%$, для *Sentinel-2* – $0,009\%$, для *Sentinel-1* – $0,013\%$. Эти значения в целом близки друг к другу, что свидетельствует об адекватности таких оценок и их состоятельности даже в случае использования только одной из трех задействованных систем дистанционного зондирования Земли. Максимальное значение доли покрытой ПЗ водной поверхности получено на основании обработки космических радиолокационных изображений (*Sentinel-1*), что может являться следствием как высокой чувствительности радиолокационных данных к ПЗ, так и вовлечения в анализ некоторого количества ложно распознанных объектов ввиду специфики формирования космических радиолокационных изображений морской поверхности [1, 3, 5, 21].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен подход к исследованию пленочных загрязнений морской поверхности, предполагающий расчет количественной величины «показатель подверженности морской поверхности пленочным загрязнениям» на регулярной пространственной сетке на основе алгоритмизованной обработки результатов дешифрирования временных рядов космических многоспектральных и радиолокационных изображений. Посредством учета вариаций метеорологических условий и пространственного распределения количества наблюдений предложенный подход развивает известные способы анализа результатов длительного космического мониторинга пленочных загрязнений морских акваторий.

На примере участка северной части Черного моря продемонстрирована возможность получения репрезентативных информационных продуктов нового типа, количественно характеризующих пространственную изменчивость загрязнений морской поверхности, зарегистрированных в течение длительных эпизодов космического мониторинга. В приведенном примере в качестве объектов интереса выступили небιοгенные пленочные загрязнения. Однако предложенный подход может быть использован в интересах исследования и других площадных (не точечных) образований на морской поверхности. Классы исследуемых объектов определяются процессом дешифрирования космических изображений.

В условиях развития методов автоматического дешифрирования больших потоков космических изображений морской поверхности в интересах обнаружения пленочных образований различного типа (см., например, [21]) открываются перспективы практического применения рассмотренного подхода. В ближайшем будущем представляется реалистичной возможность формирования регулярно обновляемых, количественно сопоставимых стандартизованных информационных продуктов, характеризующих пространственные распределения пленочных образований в морских акваториях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов А. Ю.* Сликы и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. № 3. С. 73–96.
2. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И.* Спутниковый мониторинг пленочных загрязнений поверхности Черного моря // Исследование Земли из космоса. 2012. № 3. С. 48–65.
3. *Fingas M., Brown C.* Oil spill remote sensing // *Earth System Monitoring* / J. Orcutt (ed.). New York, NY : Springer, 2013. P. 337–388. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5684-1_15
4. Пространственно-временное распределение пленочных загрязнений в Черном и Каспийском морях по данным космической радиолокации: сравнительный анализ / А. Ю. Иванов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2017. № 2. С. 13–25. <https://doi.org/10.7868/S0205961417020038>
5. *Skrunes S., Johansson A. M., Brekke C.* Synthetic aperture radar remote sensing of operational platform produced water releases // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, iss. 23. 2882. <https://doi.org/10.3390/rs11232882>
6. Mineral oil slicks identification using dual co-polarized Radarsat-2 and TerraSAR-X SAR imagery / D. Ivonin [et al.] // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, iss. 7. 1061. <https://doi.org/10.3390/rs12071061>
7. *Бондур В. Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исследование Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
8. *Митягина М. И., Лаврова О. Ю., Бочарова Т. Ю.* Спутниковый мониторинг нефтяных загрязнений морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 130–149.
9. *Ivanov A. Yu., Zatyagalova V. V.* A GIS approach to mapping oil spills in a marine environment // *International journal of remote sensing*. 2008. Vol. 29, № 21. P. 6297–6313. <https://doi.org/10.1080/01431160802175587>
10. *Бульчева Е. В., Костяной А. Г., Крек А. В.* Межгодовая изменчивость нефтяного загрязнения морской поверхности Юго-Восточной Балтики в 2004–2015 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 4. С. 74–84. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-19-74-84
11. *Иванов А. Ю., Матросова Е. П.* Техногенная грифонная активность в северо-западной части Черного моря по данным съемок из космоса // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23, № 8. С. 57–63. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-8-57-63>
12. *Mityagina M., Lavrova O.* Satellite survey of inner seas: oil pollution in the Black and Caspian Seas // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, iss. 10. 875. <https://doi.org/10.3390/rs8100875>
13. *Carpenter A.* Oil pollution in the North Sea: the impact of governance measures on oil pollution over several decades // *Hydrobiologia*. 2019. Vol. 845, № 1. P. 109–127. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3559-2>
14. Long term monitoring of oil spills in European seas / G. Ferraro [et al.] // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30, iss. 3. pp. 627–645. <https://doi.org/10.1080/01431160802339464>
15. *Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г.* Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М. : ИКИ РАН, 2016. 334 с. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2016lavrova.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).
16. Наземно-космический мониторинг антропогенных воздействий на прибрежную зону Крымского полуострова / В. Г. Бондур [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 103–115. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-1-103-115>
17. *Круглякова Р. П., Круглякова М. В., Шевцова Н. Т.* Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводорода в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 1. С. 37–51. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geologo-geohimicheskaya-harakteristika-estestvennyh-proyavleniy-uglevodorodov-v-chernom-more/viewer> (дата обращения: 10.03.2021)

18. Регистрация из космоса особенностей глубинных стоков в прибрежные акватории при авариях сбросового коллектора / В. Г. Бондур [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2020. № 2. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0205961420020025>
19. Региональная геология и перспективы нефтегазоносности Черноморской глубоководной впадины и прилегающих шельфовых зон : [в 2 частях]. Часть 1 / И. Ф. Глумов [и др.] ; под редакцией Б. В. Сенина. М. : Недра, 2014. 279 с.
20. *Немировская И. А., Онегина В. Д., Коновалов Б. В.* Углеводороды во взвеси и осадках различных районов российского сектора Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 4. С. 48–60. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-4-48-60>
21. Oil spill identification from satellite images using deep neural networks / M. Krestenitis [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, iss. 15. 1762. <https://doi.org/10.3390/rs11151762>

Об авторах:

Замшин Виктор Викторович, научный сотрудник, НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0003-4285-172X**, **ResearcherID: G-3224-2014**, **Scopus Author ID: 57205502046**, viktor.v.zamshin@gmail.com

Матророва Екатерина Романовна, младший научный сотрудник, НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0003-2719-6210**, **ResearcherID: AAG-1442-2021**, **Scopus Author ID: 57216743579**, ematrosova95@gmail.com

Ходаева Василиса Николаевна, младший научный сотрудник, НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0002-8913-5555**, **ResearcherID: AAG-1392-2021**, **Scopus Author ID: 57222296283**, vasilisak.95@gmail.com

Чверткова Ольга Игоревна, младший научный сотрудник, НИИ «АЭРОКОСМОС» (105064, Москва, Гороховский пер., 4), **ORCID ID: 0000-0002-6097-9762**, **ResearcherID: AAG-1420-2021**, **Scopus Author ID: 57221663635**, chvertkovaolga@gmail.com