

Научная статья  
УДК 551.468.1  
EDN TUWYZA

## Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года)

**В. В. Фомин, Л. В. Харитонова \*, Д. В. Алексеев, Д. И. Лазоренко,  
А. Ю. Белоконь, М. В. Шокуров, В. С. Барабанов, К. И. Гуров,  
Е. В. Иванча, А. А. Полозок**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

\* e-mail: [kharitonova.dntmm@gmail.com](mailto:kharitonova.dntmm@gmail.com)

### Аннотация

Интенсификация транспортировки энергоносителей в Керченском проливе приводит к аварийным разливам нефтепродуктов, наиболее экологически опасным из которых является мазут. Цель работы – развитие методических подходов к исследованию динамики донных отложений, загрязненных мазутом, под влиянием ветро-волновых условий на примере Прикерченского района Черного моря. На основе численного моделирования гидро- и литодинамических процессов за период 13–27 декабря 2024 г. проведен совместный анализ полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для песчано-нефтяных агломератов (размер от 0.03 до 10 см), образованных осевшим на дно мазутом. Атмосферная циркуляция, поля волнения и течений рассчитаны с помощью моделей *WRF* и *ADCIRC+SWAN*. Проанализирована пространственная изменчивость индекса подвижности агломератов, определяемого как отношение сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями, к его критическому значению для заданного класса агломератов. Для расчета потока донных наносов использована модифицированная методика Солсби, учитывающая размер песчано-нефтяных агломератов и плотность смеси песка и мазута. Установлено, что в первые дни после аварии большая часть нефтепродуктов была перемещена к Анапской пересыпи и в Керченский пролив. После смены направления ветра мазут попал в береговую зону Юго-Восточного Крыма. Выявлены основные районы потенциального перемещения и оседания песчано-нефтяных агломератов: прибрежная зона от м. Чауда до м. Такиль, акватория Керченского пролива, а также участки вдоль Анапской пересыпи. Установлено, что песчано-нефтяные агломераты размером до 1 см могли перемещаться в береговой зоне на глубинах до 10 м, тогда как более крупные агломераты (5 см и более) оставались неподвижными. Определены зоны конвергенции потока наносов в районе м. Железный Рог и южной части Анапской пересыпи,

© Фомин В. В., Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Лазоренко Д. И.,  
Белоконь А. Ю., Шокуров М. В., Барабанов В. С., Гуров К. И.,  
Иванча Е. В.. Полозок А. А.. 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0

International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0  
International (CC BY-NC 4.0) License

где возможно накопление песчано-нефтяных агломератов. Разработанные методические подходы позволяют реконструировать и прогнозировать перемещение и накопление загрязненных донных отложений, что важно при планировании работ по ликвидации последствий загрязнения, а также в качестве рекомендаций при возможных аварийных ситуациях.

**Ключевые слова:** Черное море, разлив нефтепродуктов, разлив мазута, донные наносы, волны, течения, литодинамика, численное моделирование, *ADCIRC+SWAN*, индекс подвижности

**Благодарности:** работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNНN-2025-0002.

**Для цитирования:** Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года) / В. В. Фомин [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 33–52. EDN TUWYZA.

## Hydro- and Lithodynamic Processes in the Area near the Kerch Strait (the Black Sea) During the Oil Spill Following the Tanker Accident (December 2024)

V. V. Fomin, L. V. Kharitonova \*, D. V. Alekseev, D. I. Lazorenko,  
A. Yu. Belokon, M. V. Shokurov, V. S. Barabanov, K. I. Gurov,  
E. V. Ivancha, A. A. Polozok

*Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia*

\* e-mail:kharitonova.dntmm@gmail.com

### Abstract

The expansion of maritime energy transport in the Kerch Strait may lead to accidental oil spills, with mazut posing a particularly severe ecological threat. The study aims to develop a methodological framework for investigating the dynamics of mazut-polluted bottom sediments under various wind-wave conditions, using the area near the Kerch Strait (the Black Sea) as a case study. We applied numerical modeling of hydro- and lithodynamic processes for 13–27 December 2024 to conduct an integrated analysis of wave fields, currents, bottom sediment transport, and mobility ratio for sand and oil agglomerates (ranging in size from 0.03 to 10 cm) formed by sunken mazut. Atmospheric circulation, wave fields and currents were calculated using the WRF and ADCIRC+SWAN models. We analysed the spatial variability of the agglomerate mobility ratio, defined as the ratio of the shear stress induced by waves and currents to its critical value for a given agglomerate size class. To calculate the bottom sediment transport, we used a modified Soulsby method considering the size of sand and oil agglomerates and the density of the sand-mazut mixture. The results indicate that on the first days following the spill, most of petroleum products were transported towards the Anapa Bay-Bar and into the Kerch Strait. After a shift in wind direction, mazut entered the coastal zone of Southeastern Crimea. The key areas of the possible agglomerate transport and deposition included the coastal zone from Cape Chauda to Cape Takil, the waters of the Kerch Strait and areas along the Anapa Bay-Bar. The study established that agglomerates up to 1 cm could be transported in the coastal zone at depths of up to 10 meters, while larger agglomerates (5 cm and above) remained immobile. Zones of sediment transport convergence were identified near Cape Zhelezny Rog and the southern part of the Anapa Bay-Bar, where the accumulation of sand and oil agglomerates is likely to occur. The developed

methodological framework enables the reconstruction and forecasting of the transport and accumulation of contaminated sediments. This is crucial for planning effective oil spill response measures and for providing recommendations in case of emergency situations.

**Keywords:** Black Sea, petroleum products spill, mazut spill, sediments, waves, currents, lithodynamics, numerical modelling, *ADCIRC+SWAN*, mobility ratio

**Acknowledgements:** The work was performed under state assignment no. FNNN-2025-0002 of MHI RAS.

**For citation:** Fomin, V.V., Kharitonova, L.V., Alekseev, D.V., Lazorenko, D.I., Belokon, A.Yu., Shokurov, M.V., Barabanov, V.S., Gurov, K.I., Ivancha, E.V. and Polozok, A.A., 2025. Hydro- and Lithodynamic Processes in the Area near the Kerch Strait (Black Sea) During the Oil Spill Following the Tanker Accident (December 2024). *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 33–52.

## Введение

В связи с увеличением объемов транспортировки энергоносителей морскими путями в Керченском проливе периодически происходят аварийные разливы нефтепродуктов, создающие катастрофические последствия для Азо-во-Черноморского бассейна [1]. В основном эти разливы нефтепродуктов вызваны крушением танкеров класса «река – море». Так, 11 ноября 2007 г. в проливе получили повреждения танкеры «Волгогонефть-123» и «Волгогонефть-139». Один из танкеров разломился и затонул, что привело к выбросу нефтепродуктов в морскую среду. Вторая авария с гораздо более серьезными последствиями произошла 15 декабря 2024 г. В южной части пролива потерпели крушение танкеры «Волгогонефть-212» и «Волгогонефть-239». Танкеры разломились пополам, три их части затонули на глубинах 19–22 м, а кормовую часть судна «Волгогонефть-239» транспортировали к берегам Таманского п-ова в район м. Панагия (рис. 1). По заключению официальных комиссий, причиной аварий стало несоблюдение сезонных ограничений на плавание в Азовском море и Керченском проливе для судов класса «река – море».

Танкеры перевозили около 9.2 тыс. т мазута марки М100, который частично вытек. По разным оценкам, в воде оказалось от 3 до 5 тыс. т нефтепродуктов, большая часть которых попала в акваторию Керченского пролива в первые дни после аварии. Обломки танкеров оставались источниками активного поступления нефтепродуктов в акваторию Черного моря в течение нескольких месяцев после аварии. В конце января 2025 г. очаг загрязнения мазутом в районе м. Панагия был изолирован от акватории моря путем сооружения земляного вала.

От места катастрофы различные фракции мазута переносились течениями на значительные расстояния, достигнув берегов Крыма и Краснодарского края. Наиболее пострадала береговая зона Прикерченского района от м. Чауда (Ленинский район, Республика Крым) до м. Анапского (г. Анапа, Краснодарский край). Загрязнения были обнаружены также в районах юго-восточного, южного и западного берегов Крыма, часть мазута проникла в Азовское море.

По мере распространения мазут адсорбировался частицами взвеси, смешивался с донными наносами в зоне прибоя и образовывал более тяжелые, чем вода, песчано-нефтяные агломераты (ПНА), которые опускались на дно [2].

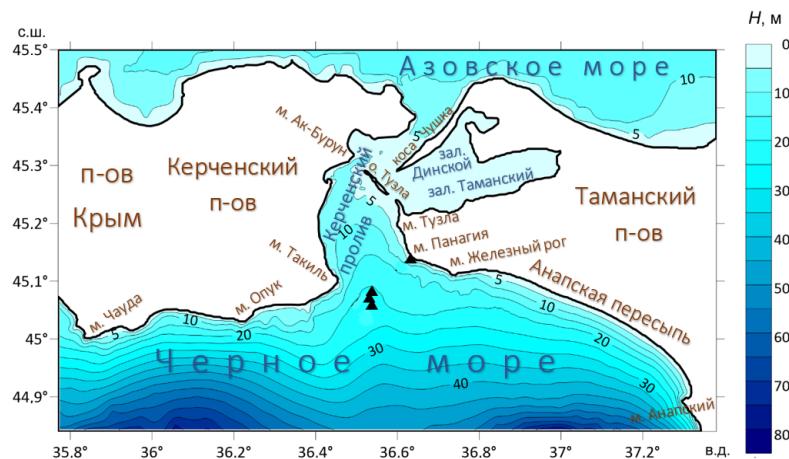


Рис. 1. Батиметрическая карта Прикерченского района. Черные треугольники – расположение обломков танкеров  
Fig. 1. Bathymetric map of the area near the Kerch Strait. The black triangles indicate the location of tanker wreckage

Несмотря на масштабные усилия властей по очистке дна, в береговой зоне Прикерченского района находится еще много ПНА, и при определенных условиях они могут стать источником вторичного загрязнения побережья.

Различные последствия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе исследовались в работах [1, 3–13]. Однако механизмы образования, перемещения и осаждения мазутосодержащих отложений мало изучены, поэтому имеющихся методик и технологий оказалось недостаточно для всестороннего обоснования мер реагирования и принятия решений по очистке береговой зоны Крыма и Краснодарского края от загрязнения.

До настоящего времени в литературе не представлено математических моделей, позволяющих в достаточно полном виде исследовать динамику донных отложений, загрязненных мазутом в прибрежных водах. Главная проблема заключается в том, что ПНА чрезвычайно неоднородны по размеру, форме, пространственному распределению и средней плотности вследствие зависимости от локальных особенностей гранулометрического состава донных отложений и реологических свойств мазута.

В данной ситуации для исследования динамики донных отложений, загрязненных мазутом, целесообразно использовать известные математические модели, учитывающие наличие нефтяных загрязнений в параметрическом виде. Такой подход был реализован для северного побережья Мексиканского залива, которое подверглось сильному загрязнению после аварии на нефтедобывающей платформе *Deepwater Horizon* [14, 15]. В исследованиях<sup>1)</sup> [16] проведено численное моделирование прибрежных течений, потенциального

<sup>1)</sup> Application of a hydrodynamic and sediment transport model for guidance of response efforts related to the Deepwater Horizon oil spill in the Northern Gulf of Mexico along the coast of Alabama and Florida / N. G. Plant [et al.]. 2013. Vol. 2013 (2012–1234). US Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20121234>

перемещения ПНА и их взаимодействия с морским дном. Возможность движения нефтесодержащих донных отложений также определялась по индексам подвижности (мобильности) путем сравнения моделируемого напряжения сдвига, вызванного волнами и течениями, с пороговыми значениями сдвига для ПНА различных размеров. Статистический анализ распределения ПНА, основанный на данных, которые были получены в ходе очистки береговой зоны залива, показал общее соответствие результатам численного моделирования [16]. Описанный выше подход с некоторыми модификациями применяется в настоящей работе.

Цель работы – развитие методических подходов к исследованию динамики загрязненных мазутом донных отложений под влиянием ветро-волновых условий на примере Прикерченского района Черного моря.

В задачи работы входит:

- модификация алгоритма расчета потока донных наносов Солсби [17] путем включения в него размеров ПНА и плотности смеси песка и мазута;
- проведение совместного анализа полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для песчано-нефтяных агломератов разных размеров в Прикерченском районе в декабре 2024 г.;
- определение зон с высокими значениями индекса подвижности, в которых потенциально возможно перемещение ПНА;
- выявление зон конвергенции и снижения емкости потока наносов, где возможно накопление ПНА.

### **Материалы и методы**

Областью исследования является Прикерченский район, охватывающий акваторию Черного моря, которая прилегает к участку берега от м. Чауда на западе до м. Анапского на юго-востоке, включая Керченский пролив (рис. 1).

Математическое моделирование проводилось для всего Азово-Черноморского бассейна. Расчеты охватывали период возникновения и развития аварийной ситуации с 13 по 27 декабря 2024 г.

*Моделирование приводной атмосферы.* Для воспроизведения полей приводного ветра и атмосферного давления над Азово-Черноморским бассейном применяли мезомасштабную модель *WRF-ARW* версии 4.5 с пространственным разрешением 5 км<sup>2)</sup>. В качестве входных данных использовали массив глобальной системы ассимиляции данных (*GDAS*) с горизонтальным разрешением 0.25° и дискретностью по времени 6 ч. Вывод метеорологических полей проводили с дискретностью 1 ч. Расчеты выполняли на вычислительном кластере МГИ в режиме параллельных вычислений.

*Моделирование волнения и течений.* Гидродинамические процессы моделировали на неструктурированной расчетной сетке со сгущением в прибрежной зоне исследуемого района, что обеспечивало повышение точности моделирования вблизи берега. Для всего Азово-Черноморского бассейна на основе оцифровки спутниковых снимков высокого разрешения и всех доступных навигационных карт были получены конфигурация береговой линии и массив глубин соответственно. В зависимости от расстояния между точками береговой

---

<sup>2)</sup> URL: [www.mmm.ucar.edu/wrf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf) (дата обращения: 21.11.2025).

линии генерировались узлы расчетной сетки (~ 76 тыс. узлов), для которых интерполировались глубины. Минимальный размер конечных элементов в прибрежной зоне Прикерченского района составлял около 200 м. Фрагмент неструктурированной расчетной сетки для моделирования гидро- и литодинамических процессов в Прикерченском районе представлен на рис. 2.

Использована совместная численная модель *ADCIRC+SWAN* [18, 19], которая объединяет две модели – *Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC)*<sup>3), 4)</sup> и *Simulation Waves Nearshore (SWAN)*<sup>3)</sup>. На входе в совместную модель задавали поле глубин, поля приземного ветра и атмосферного давления над исследуемой акваторией.

Использовался осредненный по глубине вариант модели *ADCIRC*. Касательные напряжения трения ветра и донное трение аппроксимировали квадратичными зависимостями от скорости. При расчете коэффициента донного трения использовали параметр донной шероховатости Маннинга  $n = 0.02 \text{ с}/\text{м}^{1/3}$ . Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости равнялся  $5 \text{ м}^2/\text{с}$ . Шаг интегрирования по времени составлял 1 с. Результатами моделирования являлись поле осредненной по глубине скорости течений и поле уровня моря.

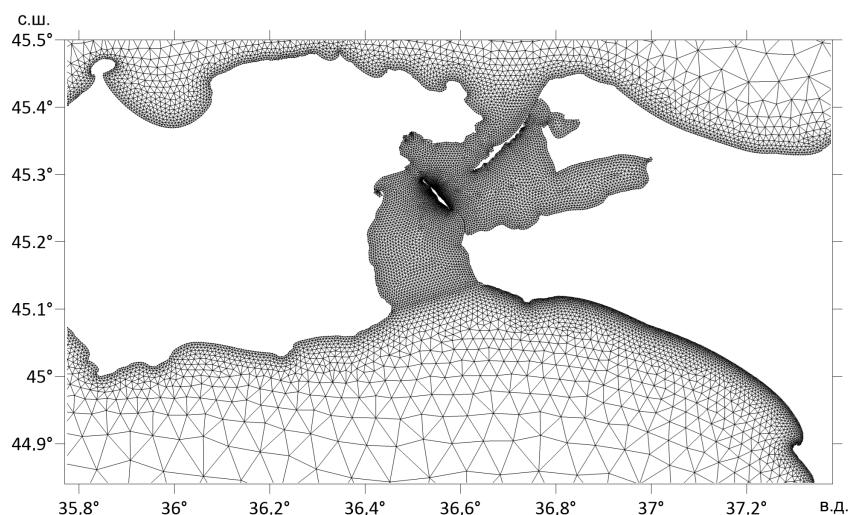


Рис. 2. Фрагмент неструктурированной расчетной сетки для моделирования гидро- и литодинамических процессов в Прикерченском районе

Fig. 2. Fragment of an unstructured computational grid for modelling hydro- and lithodynamic processes in the area near the Kerch Strait

<sup>3)</sup> Luettich R. A., Westerink J. J., Scheffner N. W. ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries. Report 1 : Theory and Methodology of ADCIRC2DDI and ADCIRC-3DL. Vicksburg : U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, 1992. 137 p.

<sup>4)</sup> Luettich R. A., Westerink J. J. Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC. Finite Element Model Version 44.XX. 2004. 74 p. URL: [https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/adcirc\\_theory\\_2004\\_12\\_08.pdf](https://adcirc.org/wp-content/uploads/sites/2255/2018/11/adcirc_theory_2004_12_08.pdf) (дата обращения: 19.08.2025).

В модели *SWAN* угловое разрешение составляло 10°. По частотной координате использовали неравномерную сетку с 40 узлами в диапазоне частот 0.03–1.4 Гц. Основные настройки модели были взяты с учетом рекомендаций для версии *SWAN* 3.31 (*swanmodel.sourceforge.io/settings*), которая входит в совместную модель. Шаг интегрирования по времени составлял 20 мин. Результатами расчета являлись поля высот значительных волн, среднего направления волнения, периодов волн и скорости придонных орбитальных движений.

Интервал совмещения моделей *ADCIRC* и *SWAN* равнялся 20 мин. Вначале на этом интервале определяли поля течений и уровня моря по модели *ADCIRC*, затем рассчитывали волновые поля по модели *SWAN*. При этом в *ADCIRC* использовали волновые напряжения из *SWAN*, а в *SWAN* – скорости течений и уровень моря из *ADCIRC*. Подробности алгоритма совместной модели даны в [18]. Расчеты по совместной модели проводили на вычислительном кластере МГИ в режиме параллельных вычислений. Вывод модельных данных выполнялся с дискретностью 1 ч.

*Придонные напряжения, вызванные волнами и течениями.* По данным гидродинамического моделирования рассчитывали комбинированные придонные сдвиговые напряжения  $\tau_{wc}$ ,  $\tau_m$ , вызванные волнами и течениями, на основе метода Солсби [17] ( $\tau_{wc}$  соответствует среднему значению сдвигового напряжения за волновой период [17] и применяется для оценки подвижности донных наносов;  $\tau_m$  представляет максимальное сдвиговое напряжение за волновой период и используется для определения потока донных наносов):

$$\tau_{wc} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cdot \cos\varphi)^2 + (\tau_w \cdot \sin\varphi)^2},$$

$$\tau_m = \tau_c \left[ 1 + 1.2 \cdot \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right],$$

где  $\tau_w$ ,  $\tau_c$  – сдвиговые напряжения, вызванные волнами и течениями соответственно, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\varphi$  – угол между направлением течений и волн. Для определения  $\tau_w$  и  $\tau_c$  используются осредненная по глубине скорость течений, амплитуда скорости придонных волновых движений и пиковый период волн [20, 21].

*Свойства донных наносов, включающих ПНА.* Для численного моделирования перемещения песка и ПНА необходимо знать их физические свойства. Для песчаных наносов (без мазута) медианный диаметр песка в районе исследования принимался равным 0.3 мм. До глубин 3–5 м наносы в этом регионе преимущественно кварцевые с органогенно-обломочными разностями<sup>5), 6)</sup> [22, 23] плотностью около 2650 кг/м<sup>3</sup>.

<sup>5)</sup> Шнюков Е. Ф., Паланский М. Г. Геологическое значение некоторых геохимических исследований современных донных отложений Керченского пролива // Литолого-геохимические условия формирования донных отложений. Киев : Наукова думка, 1979. С. 3–17.

<sup>6)</sup> Геология шельфа УССР. Керченский пролив / под ред. Д. Е. Макаренко. Киев : Наукова думка, 1981. 158 с.

В работе<sup>7)</sup> предложена формула для оценки плотности смеси донных отложений из песка, воды и мазута:

$$\rho_{SOA} = \left[ \frac{\alpha_w}{\rho} + \frac{(1-\alpha_w) \times \alpha_m}{\rho_m} + \frac{1-\alpha_w - (1-\alpha_w) \times \alpha_m}{\rho_s} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $\rho_{SOA}$ ,  $\rho$ ,  $\rho_m$ ,  $\rho_s$  – плотность смеси, плотность воды, плотность мазута и плотность песка, кг/м<sup>3</sup>, соответственно;  $\alpha_w$ ,  $\alpha_m$  – процентная доля воды и процентная доля мазута соответственно.

Некоторые результаты лабораторных исследований образцов мазута и его смеси с песком из района крушения танкеров приведены в неопубликованном отчете Института нефтехимического синтеза РАН. Согласно этой информации, в диапазоне изменения температуры воды 8–40 °С плотность вытекшего мазута изменяется от 985 до 962 кг/м<sup>3</sup>. Средняя процентная доля мазута в песке  $\alpha_m = 13\%$ . Процентная доля воды в песке неизвестна.

Подстановка указанных значений в формулу (1) при  $\alpha_w = 0$ ,  $\rho = 1012$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_m = 985$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_s = 2650$  кг/м<sup>3</sup> дает  $\rho_{SOA} = 2173$  кг/м<sup>3</sup>. Такая оценка плотности смеси является достаточно приблизительной, поскольку получена на основе очень ограниченного набора данных. Основные ошибки в определении плотности смеси донных отложений связаны с заданием весовых коэффициентов  $\alpha_w$ ,  $\alpha_m$ . Как показали расчеты, варьирование  $\alpha_m$  в пределах 10–15 % приводит к увеличению  $\rho_{SOA}$  на 7 %, а варьирование  $\alpha_w$  в пределах 0–5 % – к уменьшению  $\rho_{SOA}$  на 5.5 %.

В Прикерченском районе наблюдения за распределением размеров ПНА не проводились. Анализ имеющихся в открытом доступе фото- и видеоматериалов показал, что в береговой зоне ПНА имеют самые разные размеры и конфигурации. Более крупные сгустки распластаны на дне в виде мазутных матов, которые скапливаются в углублениях рельефа дна (рис. 3, а). Протяженность таких образований достигает 100 м, толщина – нескольких сантиметров<sup>8)</sup> [24].

Рис. 3. Песчано-нефтяные маты [24, с. 92] (а); агломераты в виде гальки (б) на дне в районе Анапской пересыпи [24, с. 90]

Fig. 3. Sand and oil mats [24, p. 92] (a); agglomerates in the form of pebble (b) on the bottom near the Anapskaya Bay-Bar [24, p. 90]

<sup>7)</sup> Application of a hydrodynamic and sediment transport model for guidance of response efforts related to the Deepwater Horizon oil spill in the Northern Gulf of Mexico along the coast of Alabama and Florida / N. G. Plant [et al.]. 2013. Vol. 2013 (2012–1234). US Geological Survey. P. 45. <https://doi.org/10.3133/ofr20121234>

<sup>8)</sup> Информационный бюллетень по итогам экспедиции ЮНЦ РАН на Анапскую пересыпь 9–15 июня 2025 г. / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2025. 104 с.

Характеристики ПНА и соответствующие им критические напряжения

Characteristics of sand and oil agglomerates and their corresponding critical shear stresses

Класс / Class	$d_{SOA}$ , см / $d_{SOA}$ , cm	$\rho_{SOA}$ , кг/м <sup>3</sup> / $\rho_{SOA}$ , kg/m <sup>3</sup>	Критическое напряжение $\tau_{cr}$ , Па / Critical stress $\tau_{cr}$ , Pa		
			сильное $\tau_{crh}$ / high $\tau_{crh}$	среднее $\tau_{crm}$ / moderate $\tau_{crm}$	слабое $\tau_{crl}$ / low $\tau_{crl}$
<i>S1</i>	0.03	2173	0.95	0.32	0.16
<i>S2</i>	0.5	2173	7.77	2.59	1.30
<i>S3</i>	1	2173	10.21	3.40	1.70
<i>S4</i>	2.5	2173	13.58	4.53	2.26
<i>S5</i>	5	2173	18.71	6.24	3.12
<i>S6</i>	10	2173	34.29	11.43	5.72

Частично мазут перемешан с песком и подводной растительностью. При слабом волнении мазутные маты с места не сдвигаются, но происходит взмучивание и перенос песка, который постепенно засыпает мазут на дне (рис. 3, *a*).

Часть сгустков мазута, которые образовались на месте или оторвались от мазутных матов под воздействием волн, имеют форму гальки диаметром 2–10 см (рис. 3, *b*). Согласно работе [25], подобные образования состоят из выветрившегося нефтяного ядра, покрытого тонким слоем песка или битой ракуши. Они могут перемещаться по дну волнами и выбрасываться на берег [26, 27].

С учетом изложенного выше, для исследования свойств подвижности донных отложений в Прикерченском районе выбран ряд классов ПНА с размерностью  $d_{SOA}$  от 0.03 до 10 см, чтобы охватить предполагаемый диапазон изменчивости размеров ПНА. Выбранные классы агломератов приведены в таблице.

*Критические напряжения для разных классов ПНА.* Критические сдвиговые напряжения для каждого класса ПНА определялись выражением [2]

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} g \rho \Delta d_{SOA}, \quad (2)$$

где  $\theta_{cr}$  – параметр Шильдса<sup>9)</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\Delta = \rho_{SOA}/\rho - 1$ . Это классическая формула для расчета сдвиговых напряжений, в которой вместо среднего диаметра донных наносов  $d_{50}$  и плотности песка используется соответственно размер и плотность ПНА.

Параметр Шильдса в формуле (2) оценивался по эмпирической зависимости [28]

$$\theta_{cr} = \frac{0.3}{1 + 1.2d^*} + 0.055 \cdot [1 - \exp(-0.02d^*)], \quad (3)$$

<sup>9)</sup> Shields A. Anwendung der Ähnlichkeits-Mechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung // Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau. Berlin : Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, 1936. N. 26. 26 S.

$$d_* = d_{SOA} \left[ \frac{g \Delta}{\nu^2} \right]^{1/3}, \quad (4)$$

где  $d_*$  – безразмерный диаметр частиц;  $\nu = 1.36 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость воды.

Натурные эксперименты показывают, что в зависимости от степени выступания отдельной частицы из слоя наносов (что можно ожидать и в случае отдельного ПНА) значение критического напряжения может быть снижено [29–31]. Поскольку отдельные ПНА могут иметь разное положение относительно донной поверхности, рассматривалось три типа критического напряжения<sup>1)</sup>: высокое (сильное) ( $\tau_{crh}$ ) – агломерат находится в слое наносов; среднее ( $\tau_{crm}$ ) – агломерат частично выступает из слоя наносов; низкое (слабое) ( $\tau_{crl}$ ) – агломерат расположен полностью на поверхности слоя наносов. Высокие значения критического напряжения рассчитывали по формулам (2)–(4). Средние и низкие значения критического напряжения оценивали соответственно как одна треть и одна шестая значения высокого критического напряжения.

*Индексы подвижности ПНА.* Индексы подвижности донных наносов широко используются для классификации свойств подвижности донных отложений, а также прогнозирования процессов размыва дна и осаждения наносов в конкретных акваториях [32–34].

В настоящей работе под индексом подвижности ПНА понимается отношение сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями, к критическому значению сдвигового напряжения заданного класса агломератов:

$$MI_{SOA} = \tau_{wc} / \tau_{cr, SOA}.$$

Выполнение в некоторой области условия  $MI_{SOA} \geq 1$  означает, что агломераты заданного класса могут начать перемещаться. При этом вероятность возникновения этого движения зависит от продолжительности действия условия.

*Потоки донных наносов.* В качестве еще одного показателя для выявления вероятных закономерностей перераспределения ПНА вдоль берега используются емкость и направление потока донных наносов (*bedload flux*)  $q_b = (q_{bx}, q_{by})$ , где  $q_{bx}, q_{by}$  – зональная и меридиональная компоненты потока. Расчеты  $q_b$  проводились по методике Солсби [17, 20], которая была модифицирована путем включения в формулы размеров ПНА и плотности смеси донных отложений песка и мазута на основе формул (1) и (4).

### Обсуждение результатов

Рассмотрим результаты численного моделирования атмосферной циркуляции, волнения, течений и потоков наносов в Прикерченском районе в период возникновения и развития аварийной ситуации. В тексте время указывается в стандарте *UTC* (всемирное координированное время), а под высотой волн понимается высота значительных волн.

*Атмосферная циркуляция.* С 15 по 17 декабря 2024 г. циркуляция атмосферы над Азово-Черноморским бассейном определялась прохождением холодного фронта крупного среднеширотного циклона, центр которого располагался в районе Санкт-Петербурга. В первый день наблюдений, 15 декабря,

холодный фронт проявлялся в виде струи сильного юго-западного ветра, вытянутой с юго-запада от Стамбула на северо-восток до Керченского пролива. Максимальная скорость ветра достигала 15 м/с. Такая конфигурация поля ветра была благоприятна для развития ветровых волн вдоль направления струи с юго-запада на северо-восток, так как обеспечивала довольно большой разгон для ветровых волн (более 1000 км). Для Черного моря это почти максимальная величина разгона.

С течением времени фронт продвигался на юго-восток, и благоприятная для разгона конфигурация была непродолжительной. После 16:00 15 декабря фронт переместился на юго-восток, и на всей благоприятной линии разгона от пролива Босфор до Керченского пролива установился умеренный северо-западный ветер (скорость до 10 м/с) холодного сектора циклона, не создавший ветровых волн в районе Керченского пролива. Зыбь, сгенерированная на линии благоприятного разгона, еще некоторое время (с 16:00 15 декабря до 02:00 16 декабря, если считать началом разгона 09:00) продолжала приходить в район Керченского пролива.

*Ветровое волнение.* Штормовой ситуации 15–17 декабря 2024 г. предшествовало волнение с северо-запада с высотами около 0.5 м. Шторм начался в ночь на 15 декабря, когда направление волн сменилось на южное, а высота волн начала расти. Согласно доступной информации<sup>10)</sup>, крушение танкеров произошло в 06:00 15 декабря, когда модельные высоты волн в месте аварии достигали 2.5 м (рис. 4, *a*).

В дальнейшем штормовая ситуация развивалась следующим образом. С 14:00 до 19:00 направление волнения сменилось с южного на юго-западное, при этом высоты волн составляли ~ 2 м. Следующие 2.5 сут волны с высотами 1.7–2.8 м приходили из сектора юго-запад – западо-юго-запад. Максимальных значений высоты волн достигли в 22:00 16 декабря (рис. 4, *b*).

С 18 декабря интенсивность шторма снизилась и на сутки установилось волнение западного направления с высотами волн 1–1.5 м. Далее 19 декабря начался поворот волнения через южный сектор к юго-востоку: в 05:00 волны имели юго-западное направление, в 22:00 – южное, при этом их высоты составляли 0.5–0.6 м. Следующие двое суток (с 20 по 22 декабря) в исследуемый район приходило волнение из сектора юго-юго-восток – юго-восток с высотами ~ 0.8 м (рис. 4, *c*).

С 05:00 до 14:00 22 декабря происходил разворот волнения на юго-западное направление. Далее до конца расчетного времени (00:00 23 декабря) высота волн возросла до 2 м (рис. 4, *d*).

*Ветро-волновые течения.* На рис. 5 представлены поля осредненных по глубине ветро-волновых течений для четырех временных срезов. В момент аварии (рис. 5, *a*) для района исследования были характерны течения со скоростями ~ 0.2 м/с в мористой части. Вдоль побережья Краснодарского края и от м. Такиль (п-ов Крым) течения со скоростями до 0.3–0.4 м/с были направлены в Керченский пролив, а из пролива – в Азовское море, где на некоторых участках акватории скорости составляли более 0.8 м/с.

<sup>10)</sup> URL: <https://ngs.ru/text/incidents/2025/01/15/74987513/> (дата обращения: 10.07.2025).

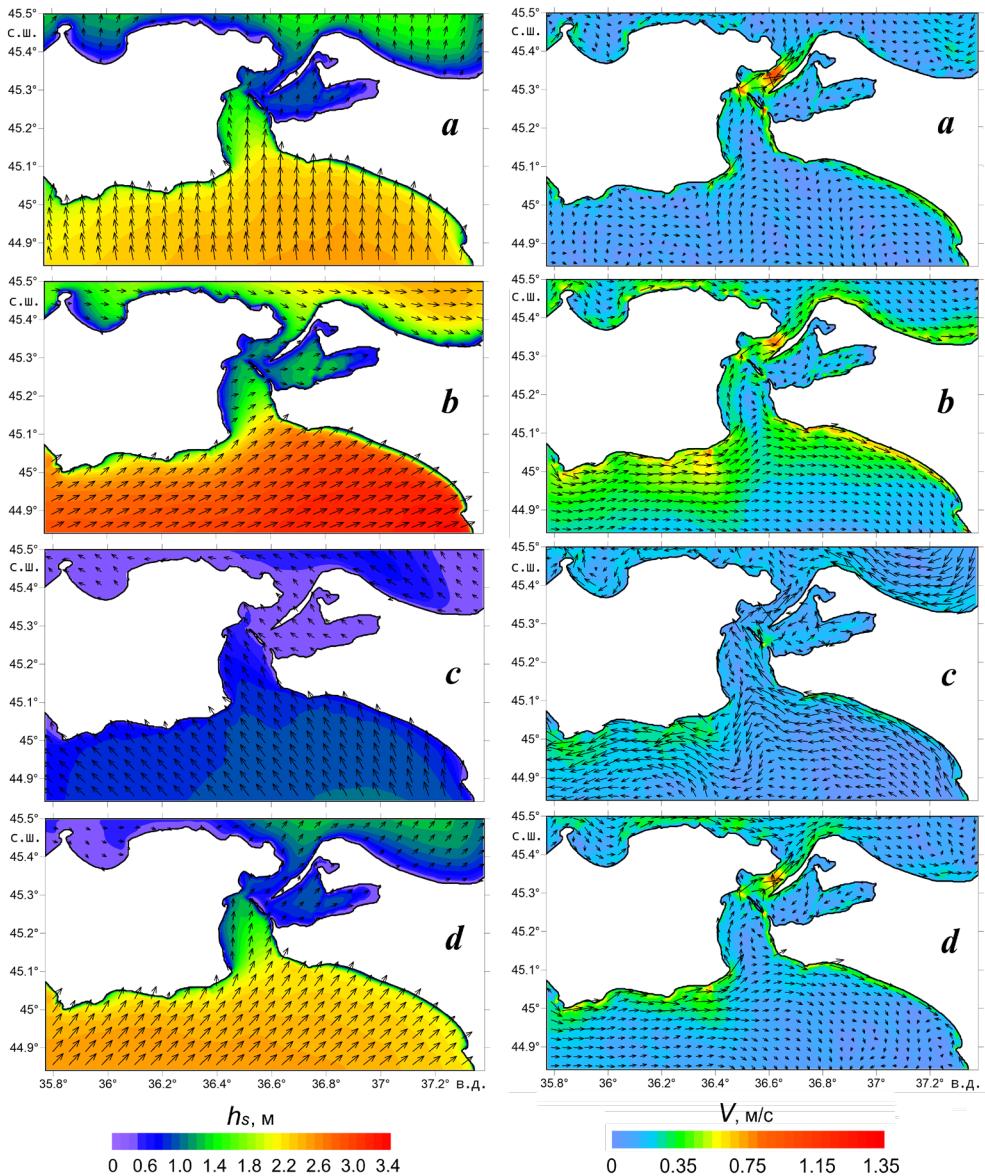


Рис. 4. Высота значительных волн  $h_s$  и среднее направление волнения в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (a), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (b); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (c); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (d)

Fig. 4. Significant wave height  $h_s$  and average direction of waves in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d)

Рис. 5. Скорость  $V$  и направление течений в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (a), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (b); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (c); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (d)

Fig. 5. Velocity  $V$  and direction of currents in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d)

С 14:00 до 21:00 15 декабря произошла перестройка течений: вдоль юго-восточного берега Крыма направление течения было с запада на восток; от м. Такиль вода частично направлялась в Керченский пролив и далее вдоль его западного берега в Азовское море; вдоль Таманского п-ова и Анапской пересыпи течения были направлены на юго-восток. При этом скорости течений к 22:00 16 декабря достигли максимума и составляли 0.3–0.4 м/с на большей части исследуемой акватории, в струе вдольберегового течения они достигали 0.6–0.7 м/с (рис. 5, *b*), после чего наблюдалось их снижение. Такая пространственная структура течений с незначительными изменениями просуществовала трое суток и способствовала переносу нефтепродуктов от обломков танкеров к Анапской пересыпи и далее на юго-восток.

19 декабря изменилось направление течений севернее м. Панагия, а к 19:00 вдоль Анапской пересыпи и Таманского п-ова течения были направлены в Керченский пролив. От места аварии течения направлялись на юго-запад, а мористее – в сторону м. Опук (рис. 5, *c*), перенося загрязнение к Крымскому п-ову. Скорости течений составляли 0.1–0.3 м/с.

С 08:00 до 18:00 22 декабря снова произошла перестройка поля течений. Вдоль побережья Крыма течение имело восточное направление, а далее от м. Такиль было направлено в Керченский пролив. От места аварии водные массы распространялись к м. Панагия, который стал зоной дивергенции: к югу от него течения были направлены на юго-восток; к северу от мыса – в Керченский пролив. Течения от м. Железный Рог были направлены на юго-восток, от м. Анапский – в противоположную сторону, формируя зону конвергенции в южной части Анапской пересыпи (рис. 5, *d*).

*Индексы подвижности.* Исследуемая в работе ситуация возможного перемещения ПНА в первые дни после попадания нефтепродуктов в морскую среду предполагает, что образовавшиеся агломераты располагаются на поверхности слоя наносов, поэтому анализировались результаты расчетов для низких значений критических напряжений ( $\tau_{crl}$ ).

На рис. 6 приведено пространственное распределение максимальных за период расчетных значений индексов подвижности ( $M_{SOA}$ ) для песка с медианным диаметром 0.03 см и трех классов ПНА с размерами 1, 2.5 и 5 см. Области с коэффициентом  $M_{SOA} \geq 1$  (показаны розовым цветом) указывают на превышение порогового значения подвижности.

На рис. 6, *a*, *b* видно, что для песка и ПНА размером 1 см расчетные площади потенциального перемещения материала почти совпадают. Таким образом, при наличии на дне таких наносов перемещение вероятно в береговой зоне от м. Чауда до м. Такиль и от м. Панагия до м. Анапского до глубин 10 м, в Керченском проливе и вдоль берегов Азовского моря – не глубже 5 м.

ПНА размером 2.5 см могут быть перемещены лишь на очень ограниченных участках до изобаты 5 м (рис. 6, *c*). Вдоль побережья Крыма перемещение таких агломератов, возможно, будет происходить у мысов, в Керченском проливе – по обе стороны от о. Тузла и между косой Чушка и Керченским п-овом. Вдоль Анапской пересыпи такие участки видны фрагментарно в северной, центральной и южной частях. Наибольшие области потенциального перемещения агломератов находятся в районе между м. Тузла и м. Железный Рог. Для ПНА размером 5 см и более не наблюдаются области превышения единицы индекса подвижности (рис. 6, *d*).

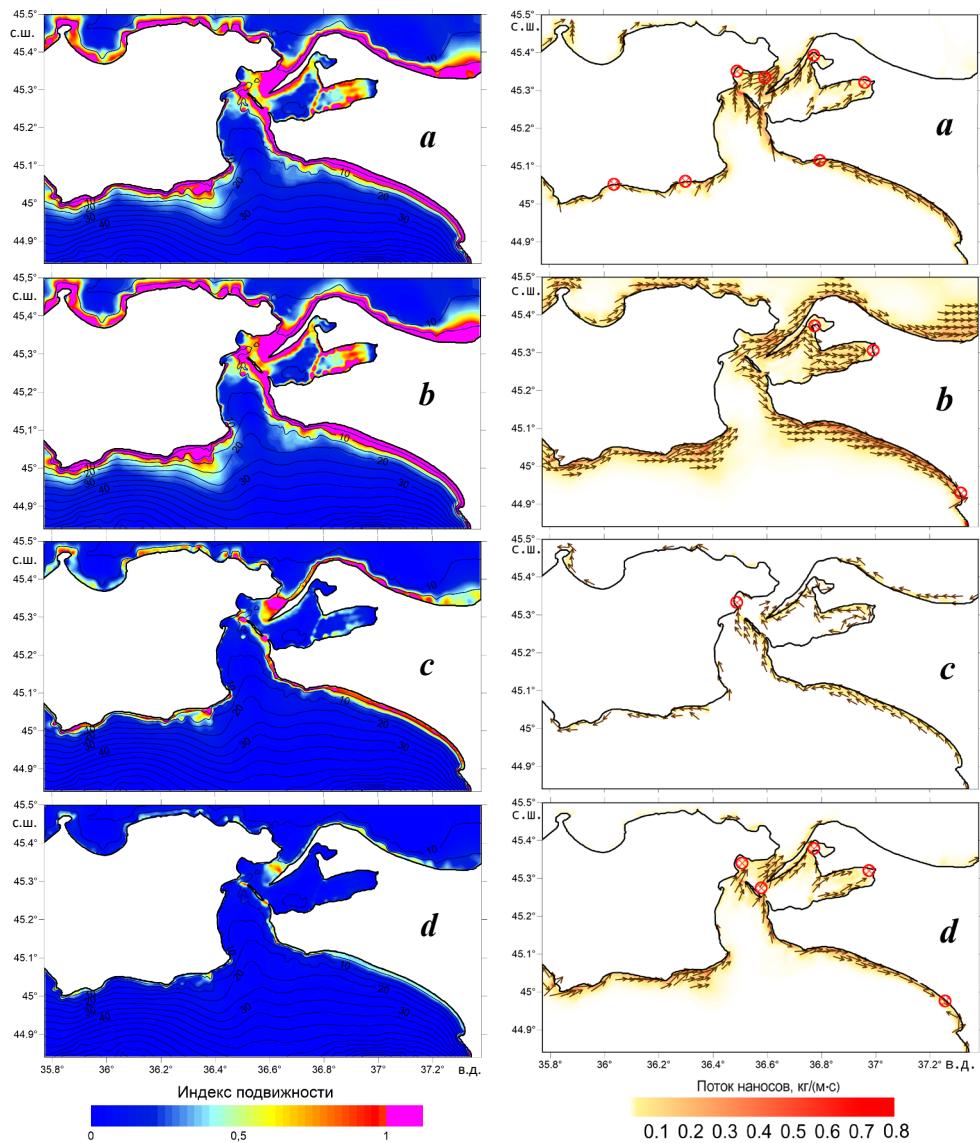


Рис. 6. Индекс подвижности донных отложений в Прикерченском районе для песка (а) и ПНА размером 1 см (б), 2.5 см (в), 5 см (г) в период 13–22 декабря 2024 г. Изобаты нанесены на карты с шагом 5 м

Fig. 6. Mobility ratio for bottom sediments in the area near the Kerch Strait for sand (a) and sand and oil agglomerates 1 cm (b), 2.5 cm (c) and 5 cm (d) in size on 13–22 December 2024. The bathymetric contour interval is 5 m

Рис. 7. Потенциальная емкость и направление потоков наносов в Прикерченском районе: 15 декабря 2024 г. в 06:00 (а), 16 декабря 2024 г. в 22:00 (б); 21 декабря 2024 г. в 20:00 (в); 22 декабря 2024 г. в 23:00 (г). Красными кружками обозначены зоны конвергенции и замедления скорости потоков наносов

Fig. 7. Potential volume and direction of sediment flows in the area near the Kerch Strait: on 15 December 2024 at 06:00 (a), 16 December 2024 at 22:00 (b); 21 December 2024 at 20:00 (c); 22 December 2024 at 23:00 (d). The red circles indicate zones of convergence and velocity deceleration of sediment flows

В областях, где песок подвижен, а ПНА не перемещаются, более вероятна ситуация, при которой ПНА будут засыпаны песком, в таком случае расчеты индекса подвижности необходимо будет проводить при высоком значении критического напряжения.

*Потоки наносов.* На следующем этапе исследования были рассчитаны параметры потенциальных потоков наносов. На рис. 7 приведено пространственное распределение и направления движения в Прикерченском районе для песка размерностью 0.03 см. В поле потоков наносов выделяются зоны конвергенции (встречного движения двух потоков) либо зоны снижения емкости, которые могут быть интерпретированы как районы возможного накопления песка и ПНА. Напротив, области, где наблюдаются дивергенции либо увеличения емкости потока, менее подвержены накоплению наносов.

При волнении южного направления с высотами волн  $\sim 2.5$  м (рис. 7, a) вдоль Анапской пересыпи возникает поток наносов в направлении с юго-востока на северо-запад, при этом в северной части пересыпи (у м. Железный Рог) формируется зона конвергенции. Севернее (от м. Железный Рог и м. Панагия) поток наносов направлен в Керченский пролив. Вдоль Крыма существуют разнонаправленные потоки, образуя в вогнутостях берега зоны конвергенции; от м. Такиль наносы перемещаются в пролив. Области потенциального осаждения наносов в Керченском проливе расположены севернее м. Ак-Бурун и в кутовых частях заливов Таманского и Динского.

На рис. 7, b представлена ситуация в момент максимального развития шторма 15–17 декабря 2024 г., когда в район исследования с юго-запада приходили волны с высотами 2.5–2.8 м. Вдоль берега Крыма наносы двигались на восток. В северной части Керченского пролива материал перемещался в сторону Азовского моря. Вдоль черноморских берегов Краснодарского края существовал устойчивый поток наносов на юго-восток, который, согласно расчетам, имел область разгрузки в южной части Анапской пересыпи у м. Анапского.

Волнение с высотами  $\sim 0.8$  м с юго-востока привело к возникновению потока наносов от м. Анапского на северо-запад в Керченский пролив вдоль о. Тузла к м. Ак-Бурун (рис. 7, c). В береговой зоне Крыма сформировалась зона дивергенции у м. Такиль, от которого материал перемещался в Керченский пролив, и вдоль юго-восточного побережья Крыма. При рассмотренных условиях потенциальные емкости потоков имели небольшие значения. Следовательно, частицы песка и ПНА могли быть смещены на малые расстояния, однако при усилении возмущающего ветро-волнового воздействия юго-восточного сектора наносы смогут перемещаться по рассчитанным траекториям на большие расстояния.

Под действием волнения с юго-запада (рис. 7, d) у юго-восточного берега Крыма существует односторонний поток на восток. Вдоль берегов Краснодарского края в поле потоков выделяется зона дивергенции у м. Панагия. От этой зоны материал будет распространяться на юго-восток к южной части Анапской пересыпи, где будет осаждаться, и на северо-запад через пролив между о-вом Тузла и одноименным мысом. При подобной ветро-волновой ситуации донные наносы у м. Панагия, загрязненные в результате вытекания мазута из кормовой части судна «Волгонефть-239» до обвалования в конце января 2025 г., будут являться источником перемещения ПНА в сторону Керченского пролива и Анапской пересыпи.

## Заключение

Разработан численный алгоритм для расчета динамических характеристик загрязненных мазутом донных отложений. Алгоритм включает несколько блоков:

- моделирование полей волн и течений;
- расчет придонного сдвигового напряжения, вызванного волнами и течениями;
- определение критического сдвигового напряжения на основе заданных характеристик ПНА;
- расчет индексов подвижности донных отложений; определение потоков донных наносов;
- выявление возможных зон накопления загрязненных наносов в береговой зоне.

На основе численного моделирования гидро- и литодинамических процессов при возникновении и развитии аварийной ситуации, произошедшей в декабре 2024 г., проведен совместный анализ полей волнения, течений, потоков донных наносов и индексов подвижности для ПНА разных размеров в Прикерченском районе Черного моря.

Результаты моделирования показали, что во время шторма 15–17 декабря 2024 г. ветровые волны с юга и юго-запада достигали высоты 2.8 м. Следующие четверо суток после окончания шторма в исследуемую акваторию приходило волнение (с высотами волн 0.8–1.5 м) из сектора юго-запад – юго-восток. За период с 22 декабря до конца расчетного времени направление волн сменилось на юго-западное при росте высоты волн до 2 м.

Расчеты показали, что за исследуемый период структура поля течений изменялась трижды. Во время крушения танкеров вдоль побережья Крыма и Краснодарского края течения имели скорость 0.3–0.8 м/с и были направлены в сторону Керченского пролива. В активную фазу шторма и в последующие сутки направление течений изменилось: движение стало проходить от обломков танкеров к Анапской пересыпи. Этим потоком в первые трое суток переносился разлившийся мазут.

С 19 по 22 декабря скорости течений снизились до 0.1–0.3 м/с. Вдоль берегов Краснодарского края поток был направлен на северо-запад, загрязнение от места аварии перемещалось в сторону Крымского п-ова. Далее до конца расчетного периода нефтепродукты переносились из района залегания обломков танкеров в Керченский пролив и к Анапской пересыпи.

Анализ индексов подвижности показал, что в рассматриваемый временной интервал песок и ПНА размером 1 см могли перемещаться на одних и тех же участках береговой зоны до глубин 10 м. Взмучивание ПНА размером 2.5 см потенциально происходило до изобаты 5 м на очень ограниченных участках. При существовавшей ветро-волновой ситуации ПНА размером 5 см и более оставались неподвижными.

Определены особенности пространственного распределения потоков наносов при различных сценариях волнения. Во время шторма вдоль берегов Таманского п-ова образовался довольно устойчивый поток наносов юго-восточного направления с областью разгрузки в южной части Анапской пересыпи. При движении волн с юго-востока вдоль черноморских берегов

Краснодарского края наносы перемещались в Керченский пролив. В период действия юго-западного ветра у м. Панагия сформировалась зона дивергенции двух потоков, направленных на северо-запад и юго-восток.

Результаты полученных оценок могут быть использованы при планировании и выполнении мероприятий по ликвидации последствий загрязнения, а также в качестве рекомендаций при возможных аварийных ситуациях в исследуемом районе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефтяное загрязнение Азовского и Черного морей растет / Г. Г. Матишин [и др.] // Природа. 2016. № 5. С. 64–69. EDN VZXXNJ.
2. Nearshore dynamics of artificial sand and oil agglomerates / P. S. Dalyander [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2015. Vol. 96, iss. 1–2. P. 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.049>
3. Шторм 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе: хроника событий, математическое моделирование и географо-экологический анализ нефтяного разлива / С. Н. Овсиенко [и др.] // Труды Государственного океанографического института. Москва, 2008. Вып. 211. С. 307–339. EDN PXMGNF.
4. Иванов А. Ю., Литовченко К. Ц., Затяголова В. В. Аварийный разлив мазута в Керченском проливе: радиолокационный мониторинг и результаты моделирования // Исследование Земли из космоса. 2008. № 4. С. 62–76. EDN JHNAEV.
5. Матишин Г. Г., Бердников С. В., Савицкий Р. М. Экосистемный мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. Ростов-на-Дону : Южный научный центр РАН, 2008. 80 с. EDN VYSDJT.
6. Кузнецов А. Н., Федоров Ю. А. Закономерности распределения и трансформации нефтяного загрязнения в районе техногенной катастрофы в Керченском проливе // Известия Русского географического общества. 2010. Т. 142, № 2. С. 53–59. EDN OJDBWZ.
7. Любарцева С. П., Рябцев Ю. Н. Моделирование загрязнения Керченского пролива нефтяными углеводородами // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2010. № 22. С. 245–252. EDN WTBIDV.
8. Нефтяное загрязнение среды в Керченском проливе по результатам исследований 2007–2009 гг. / Д. Я. Фащук [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2010. № 4. С. 86–97. EDN MTCPDD.
9. Межведомственные полевые исследования последствий катастрофы танкера «Волгонефть-139» в Керченском проливе / Д. Я. Фащук [и др.] // Океанология. 2010. Т. 50, № 3. С. 468–471. EDN MSQKZX.
10. Кленкин А. А., Агапов С. А. Динамика распределения нефтепродуктов в воде и донных отложениях Азовского и Черного морей после аварии судов в Керченском проливе // Водные ресурсы. 2011. Т. 38, № 2. С. 214–222. EDN NDOYYL.
11. Гидрохимический режим и загрязнение вод Керченского пролива в 1979–2009 гг. / С. А. Шибаева [и др.] // Морський екологічний журнал. 2011. Т. 10, № 4. С. 77–87. EDN SZIOMR.
12. Матишин Г. Г., Инжебейкин Ю. И., Савицкий Р. М. Воздействие на среду и биоту аварийного разлива нефтепродуктов в Керченском проливе в ноябре 2007 г. // Водные ресурсы. 2013. Т. 40, № 3. С. 259–273. EDN PYSKRN. <https://doi.org/10.7868/S0321059613020041>

13. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. / П. О. Завьялов [и др.] // Океанология. 2022. Т. 62, № 2. С. 194–203. EDN УНРЕНИ. <https://doi.org/10.31857/S0030157422020174>
14. Review of flow rate estimates of the Deepwater Horizon oil spill / M. K. McNutt [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2011. Vol. 109, no. 50. P. 20260–20267. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1112139108>
15. Composition and fate of gas and oil released to the water column during the Deepwater Horizon oil spill / C. M. Reddy [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 2011. Vol. 109, no. 50. P. 20229–20234. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1101242108>
16. Assessing mobility and redistribution patterns of sand and oil agglomerates in the surf zone / P. S. Dalyander [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2014. Vol. 80. P. 200–209. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.004>
17. Soulsby R. L. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. London : Tomas Telford Services, 1997. 253 p.
18. Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations / J. C. Dietrich [et al.] // Coastal Engineering. 2011. Vol. 58. P. 45–65. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.08.001>
19. Fomin V. V. Numerical modeling of wind waves in the Black Sea generated by atmospheric cyclones // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 899, iss. 5. 052005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/899/5/052005>
20. Иванов В. А., Фомин В. В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море–суша. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 363 с.
21. Фомин В. В., Иванча Е. В., Полозок А. А. Взмучивание донных осадков в мелководной лагуне течениями и волнами по данным численного моделирования (на примере залива Сиваш, Азовское море) // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 3. С. 469–488. EDN ATKXPR.
22. Изменения прибрежной зоны Керченского пролива и их экологические последствия / Д. Я. Фащук [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2013. № 5. С. 125–138. EDN RFXCMP.
23. Органический углерод и карбонатность современных донных отложений Керченского пролива / Е. И. Овсяный [и др.] // Геохимия. 2015. № 12. С. 1120–1131. EDN UVEMLQ. <https://doi.org/10.7868/S0016752515120079>
24. Аварии и последствия танкерной перевозки мазута (Керченский пролив – 2007 г., г. Анапа – 2024 г.) / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов-на-Дону : Издательство ЮНЦ РАН, 2025. 152 с.
25. Extent and degree of shoreline oiling: Deepwater Horizon Oil Spill, Gulf of Mexico, USA / J. Michel [et al.] // PLOS ONE. 2013. Vol. 8, iss. 6. e65087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065087>
26. Gabche C. E., Folack J., Yongbi G. C. Tar ball levels on some beaches in Cameroon // Marine Pollution Bulletin. 1998. Vol. 36, iss. 7. P. 535–539. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(97\)00200-2](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(97)00200-2)
27. Beach tar accumulation, transport mechanisms, and sources of variability at Coal Oil Point, California / T. S. Del Sontro [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2007. Vol. 54, iss. 9. P. 1461–1471. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.04.022>
28. Soulsby R. L., Whitehouse R. J. S. Threshold of sediment motion in coastal environments // Pacific Coasts and Ports '97 : Proceedings of the 13th Australasian

- Coastal and Ocean Engineering Conference and the 6th Australasian Port and Harbour Conference, Christchurch, New Zealand, 1997. Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, 1997. Vol. 1. P. 145–150. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.929741720399033> (date of access: 24.11.2025).
29. *Fenton J. D., Abbott J. E.* Initial movement of grains on a stream bed: the effect of relative protrusion // Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1977. Vol. 352, iss. 1671. P. 523–537. <https://doi.org/10.1098/rspa.1977.0014>
  30. *Wiberg P. L., Smith J. D.* Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments // Water Resources Research. 1987. Vol. 23, iss. 8. P. 1471–1480. <https://doi.org/10.1029/WR023i008p01471>
  31. Probabilistic description of grain resistance from simultaneous flow field and grain motion measurements / A. Bottacin-Busolin [et al.] // Water Resources Research. 2008. Vol. 44, iss. 9. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006224>
  32. *Hemer M.* The magnitude and frequency of combined flow bed shear stress as a measure of exposure on the Australian continental shelf // Continental Shelf Research. 2006. Vol. 26, iss. 11. P. 1258–1280. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.03.011>
  33. Modelling seabed shear stress, sediment mobility, and sediment transport in the Bay of Fundy / M. Z. Li [et al.] // Canadian Journal of Earth Sciences. 2015. Vol. 52, iss. 9. P. 757–775. <https://doi.org/10.1139/cjes-2014-0211>
  34. A new seabed mobility index for the Irish Sea: Modelling seabed shear stress and classifying sediment mobilisation to help predict erosion, deposition, and sediment distribution / M. Coughlan [et al.] // Continental Shelf Research. 2021. Vol. 229. 104574. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104574>

Поступила 03.08.2025 г.; одобрена после рецензирования 21.08.2025 г.;  
принята к публикации 17.09.2025 г.; опубликована 30.12.2025 г.

*Об авторах:*

**Фомин Владимир Владимирович**, главный научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 6992-2688**, **ResearcherID: H-8185-2015**, **ORCID ID: 0000-0002-9070-4460**, *fomin.dntmm@gmail.com*

**Харитонова 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-17802018**, **ORCID ID: 0000-0003-0705-0812**, *l.kharitonova@mhi-ras.ru*

**Алексеев Дмитрий Владимирович**, ученый секретарь, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 2439-6853**, **ResearcherID: I-3548-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4006-0967**, *dalexeev@rambler.ru*

**Лазоренко Дмитрий Иванович**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат технических наук, **SPIN-код: 4712-6050**, **ResearcherID: J-1925-2015**, **ORCID ID: 0000-0001-7524-565X**, *d.lazorenko.dntmm@gmail.com*

**Белоконь Александра Юрьевна**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 5633-9877**, **ResearcherID: M-6839-2018**, **ORCID ID: 0000-0002-1299-0983**, *a.bazykina@mhi-ras.ru*

**Шокуров Михаил Викторович**, ведущий научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **SPIN-код: 9445-5295**, **ResearcherID: V-7160-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-1595-8281**, *shokurov.m@gmail.com*

**Барабанов Владислав Сергеевич**, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **SPIN-код: 2761-7629**, **ResearcherID: C-6007-2013**, **ORCID ID: 0000-0002-2689-161X**, *wbarbs@gmail.com*

**Гуров Константин Игоревич**, научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **SPIN-код: 5962-7697**, **ResearcherID: L-7895-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-3460-9650**, **Scopus Author ID: 57200248245**, *gurovki@gmail.com*

**Иванча Елена Васильевна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9981-7991**, **ResearcherID: AAG-9265-2020**, **ORCID ID: 0000-0001-8328-4915**, *ev\_ivancha@rambler.ru*

**Полозок Антон Александрович**, старший инженер-программист, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5745-1021**, **ResearcherID: ADJ-1790-2022**, **ORCID ID: 0000-0002-0825-8669**, *polozok.umi@gmail.com*

*Заявленный вклад авторов*

**Фомин Владимир Владимирович** – постановка задачи, разработка численного алгоритма расчета динамических характеристик загрязненных мазутом донных отложений, выполнение численных экспериментов, обработка результатов моделирования, подготовка и редактирование текста статьи

**Харитонова Людмила Викторовна** – обзор литературы по проблеме исследования, визуализация результатов расчетов индекса подвижности и потоков наносов, анализ и интерпретация результатов моделирования, подготовка иллюстраций и текста статьи

**Алексеев Дмитрий Владимирович** – постановка задачи, обзор литературы по проблеме исследования, подготовка и редактирование текста статьи

**Лазоренко Дмитрий Иванович** – создание неструктурированной расчетной сетки и проведение математического моделирования течений, визуализация результатов расчетов, подготовка иллюстраций

**Белоконь Александра Юрьевна** – визуализация и анализ результатов расчетов полей волн и течений, подготовка иллюстраций, подготовка текста статьи

**Шокуров Михаил Викторович** – моделирование полей приводного ветра и атмосферного давления, интерпретация результатов

**Барабанов Владислав Сергеевич** – моделирование полей приводного ветра и атмосферного давления, визуализация результатов расчетов

**Гуров Константин Игоревич** – анализ гранулометрического состава донных наносов района исследований

**Иванча Елена Васильевна** – сбор материала для обзора, редактирование текста и оформление статьи

**Полозок Антон Александрович** – визуализация результатов расчетов характеристик волнения

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*