

Научная статья

УДК 532.54+504.5  
EDN: GRKCTA

## Моделирование разлива мазута с использованием программного комплекса *SPILLMOD*

**В. В. Солбаков**<sup>1, ✉</sup>, **С. Н. Зацепа**<sup>2</sup>, **Н. А. Дианский**<sup>2, 3, 4</sup>,  
**А. А. Ивченко**<sup>2</sup>, **Е. А. Коршенко**<sup>2</sup>, **И. И. Панасенкова**<sup>2, 5</sup>,  
**В. В. Фомин**<sup>2, 4, 5</sup>

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова,  
Росгидромет, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Физический факультет, Москва, Россия*

<sup>4</sup> *Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, Москва, Россия*

<sup>5</sup> *Гидрометцентр России, Москва, Россия*

✉ [vsolbakov@frccsc.ru](mailto:vsolbakov@frccsc.ru)

Поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена после рецензирования 29.12.2025;  
принята к публикации 16.03.2026.

### Аннотация

**Цель.** Цель работы – провести комплексный анализ факторов, отличающих аварию танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239» в Керченском проливе 15 декабря 2024 г. от многих других разливов, а именно: характеристик мазута, особенностей источника загрязнения и гидрометеорологических условий, значимых для математического моделирования.

**Методы и результаты.** Моделирование проведено с использованием комплекса математических моделей *SPILLMOD*. Гидрометеорологические прогнозы осуществлялись в системе оперативного прогнозирования гидрометеорологических характеристик (Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов, СМРП), включающей региональную атмосферную модель *WRF* и российскую модель морской циркуляции *INMOM*. Характер аварии и свойства перевозимого мазута, как показали проведенные оценки, приводят к тому, что источник разлива действует длительно, однако истечение 95 % содержимого танков происходит менее чем за несколько первых суток. За это время мощность источника снижается не менее чем на два порядка.

**Выводы.** Результаты моделирования, проведенного в первые дни после аварии, подтверждены сведениями берегового мониторинга. Модель позволила определить время и локацию выхода мазутного загрязнения в прибрежную зону. Последующие оценки интенсивности истечения мазута показали, что основная масса попавшего в море мазута была вынесена на побережье и мелководья в районе от пос. Веселовка до города-курорта Анапы. Сведения о времени, местах и количестве собранного мазута в этом районе согласуются с гипотезой о быстром снижении со временем интенсивности выхода мазута в морскую среду и свидетельствуют об адекватности выбранных моделей, прогнозов гидрометеорологических характеристик и расчетных комплексов. Близость плотности мазута к плотности воды, его высокая вязкость и гидрологические условия Керченского пролива, Азовского и Черного морей обуславливают возможность как положительной, так и отрицательной плавучести, а также формирование песчано-нефтяных матов на дне при соединении со взвешенными веществами и песком. Для адекватного прогноза распространения тяжелых сортов нефти необходимы уточненные модели, описывающие процессы трансформации, включая седиментацию диспергированной и плавающей на поверхности нефти.

© Солбаков В. В., Зацепа С. Н., Дианский Н. А., Ивченко А. А., Коршенко Е. А., Панасенкова И. И., Фомин В. В., 2026

**Ключевые слова:** разлив мазута, Керченский пролив, математическое моделирование, численное моделирование, прогноз гидрометеорологических характеристик, гидрометеорологические характеристики, морские разливы нефти, *INMOM*, *SPILLMOD*, Черное море

**Для цитирования:** Моделирование разлива мазута с использованием программного комплекса *SPILLMOD* / В. В. Солбаков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 3. С. 483–505. EDN GRKCTA.

Original article

## Simulation of a Fuel Oil Spill Using the Oil-Spill Model *SPILLMOD*

V. V. Solbakov<sup>1, ✉</sup>, S. N. Zatsëpa<sup>2</sup>, N. A. Diansky<sup>2, 3, 4</sup>,  
A. A. Ivchenko<sup>2</sup>, E. A. Korshenko<sup>2</sup>, I. I. Panasenkova<sup>2, 5</sup>,  
V. V. Fomin<sup>2, 4, 5</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center “Computer Science and Control”, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

<sup>2</sup> N. N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia

<sup>3</sup> M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Marchuk Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>5</sup> Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, Russia

✉ vsolbakov@frcsc.ru

### Abstract

**Purpose.** The aim of the work consists in comprehensive analyzing the key factors distinguishing the accident of the “Volgoneft-212” and “Volgoneft-239” tankers in the Kerch Strait on December 15, 2024 from many other spills, namely the fuel oil characteristics, the pollution source features, and the hydro-meteorological conditions significant for mathematical modeling.

**Methods and Results.** The oil spill transport was simulated using a set of the *SPILLMOD* mathematical models. An integrated system for operational forecasting the hydrometeorological characteristics (Marine Hindcast and Forecast System, MHFS) including the regional atmospheric model *WRF* and the Russian marine circulation model *INMOM* was applied for hydrometeorological forecasts. The conducted assessments have shown that the specific features of the accident and the properties of transported fuel oil resulted in the prolonged fuel spilling from the source. However, 95 % of the tank contents leak out within the first few days. During this period the source power decreases by at least two orders of magnitude.

**Conclusions.** The results of simulation performed in the first days after the accident are confirmed by coastal monitoring data. Application of the *SPILLMOD* model made it possible to determine the time and locations of the release of fuel oil pollution into the coastal zone. Subsequent assessments of the intensity of fuel oil spill revealed the fact that the bulk of fuel that had got to the sea was brought to the coast and shallow waters in the area from Veselovka settlement to Anapa resort city. The information on time, locations and volumes of fuel oil collected in this area are consistent with the proposed hypothesis on a rapid decrease with time of the intensity of fuel oil release to marine environment, and also indicate the adequate choice and successful application of the selected models, forecasts of hydro-meteorological characteristics and calculation systems. The likeness of fuel oil density to that of water, its high viscosity and the hydrological characteristics of the Kerch Strait, the Azov and Black seas condition the possibility both of positive and negative buoyancy, as well as formation of seabed oil-mineral aggregates when fuel oil is combined with suspended matter and sand. Adequate forecast of the distribution of heavy oil types requires the improved models describing the transformation processes which include sedimentation of the dispersed and floating-on-surface oil.

**Keywords:** fuel oil spill, Kerch Strait, mathematical modeling, numerical modeling, forecast of hydrometeorological characteristics, hydrometeorological characteristics, marine oil spills, *INMOM*, *SPILLMOD*, Black Sea

**For citation:** Solbakov, V.V., Zatsëpa, S.N., Diansky, N.A., Ivchenko, A.A., Korshenko, E.A., Panasenkova, I.I. and Fomin, V.V., 2026. Simulation of a Fuel Oil Spill Using the Oil-Spill Model *SPILLMOD*. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 516-537.

## Введение

Чрезвычайные происшествия, сопровождающиеся масштабными разливами нефти и нефтепродуктов в море, несмотря на редкость, по негативным последствиям являются серьезным вызовом как для общества в целом, так и для ведомств, ответственных за ликвидацию последствий. В ходе таких событий приобретает ценность опыт.

Во время шторма 15 декабря 2024 г. в черноморском устье Керченского пролива потерпели крушение два танкера одной серии: «Волгонефть-212» (ВН212) и «Волгонефть-239» (ВН239). Разрушение обоих танкеров произошло однотипно: они разломались по шпангоутам на две отдельные части. В результате по меньшей мере два танка каждого из судов с одной стороны оказались открыты и мазут вошел в непосредственный контакт с морской средой. Три фрагмента судов через некоторое время затонули и до сих пор находятся на морском дне, а один после свободного дрейфа сел на мель у берегов Тамани<sup>1, 2</sup>. Для краткости далее будем называть этот инцидент «Разлив мазута в Керченском проливе в 2024 г.» (РМКП-2024).

По прошествии более полугода после аварии можно выделить некоторые обстоятельства, учет которых в будущем позволил бы снизить ущерб от подобных событий. Штормовые условия, явившиеся главной причиной катастрофы, не позволили приступить к локализации разлива и сбору мазута с морской поверхности непосредственно после аварии [1, 2]. Шторм также сделал невозможным надежное обнаружение разлива мазута на поверхности моря средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Первым подтверждением загрязнения стали результаты обработки космических снимков, полученных лишь 18 декабря 2024 г. [3–5].

В течение нескольких дней после аварии основные выбросы мазута приходились главным образом на берег Таманского п-ова – от пос. Волна до города-курорта Анапы. Позднее на дне прибрежной зоны в районе Анапы были обнаружены значительные скопления мазута, смешанного с песком и образующего на дне так называемые нефтяные маты, местами скрытые под слоем песка, что типично для разливов тяжелых видов топлива [6, 7]. У побережья Крымского п-ова, в Азовском море и на берегах Керченского пролива появление мазута также отмечалось, но сообщений о массовых выбросах на берег не поступало. Нет сведений и о том, что мазут в значительном количестве наблюдался на Черноморском побережье на всем протяжении от Анапы до Сочи.

Наиболее масштабный выброс мазута на побережье произошел 17 декабря, когда поверхность моря у берега на большом протяжении была покрыта сплошным слоем мазута, а берег оказался сильно загрязнен. В дальнейшем вынос на берег нефтяного загрязнения хотя и регистрировался, но был гораздо

---

<sup>1</sup> Обзор аварийности судов на море и внутренних водных путях Российской Федерации за 2024 год. Москва : Федеральная служба по надзору в сфере транспорта, 2025. 22 с. URL: <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/Обзор%202024.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>2</sup> Сборник характерных аварий судов на море и транспортных происшествий на внутренних водных путях Российской Федерации, произошедших в 2024 году. Москва : Федеральная служба по надзору в сфере транспорта, 2025. 90 с. URL: <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/2024.pdf> (дата обращения: 15.08.2025).

меньшего масштаба: наблюдались лишь отдельные фрагменты мазута, возможно поднятые со дна волновыми процессами. Корма танкера ВН239, находившаяся на мели у берегов Тамани, долгое время не рассматривалась как источник загрязнения, однако после 10 января из этой части судна была обнаружена значительная утечка мазута.

Прогноз распространения нефтяного загрязнения в море на основе математического (численного) моделирования служит важным источником информации для принятия управленческих решений при ликвидации аварийных разливов нефти, а также входит в систему мониторинга развития аварийной ситуации. Многообразие физико-химических свойств нефти и нефтепродуктов, процессов их выветривания и возможных гидрометеорологических условий делает каждый разлив уникальным.

На текущий момент имеется ограниченное число публикаций, посвященных рассматриваемому разливу мазута [3–5, 8–11]. В работах [3–5, 8, 9] значительное место занимает анализ спутниковой информации, в статье [10] – анализ физико-химической трансформации мазута по результатам экспедиционных исследований, исследование [11] представляет результаты полевых исследований побережья. Только в работах [9, 12] приведены результаты моделирования распространения мазута.

Развитие методов и методологии прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов в морской среде при аварийных разливах имеет продолжительную историю. Основные методические подходы отечественной практики изложены в пособии [13]. Зарубежный опыт и прогресс в рассматриваемой области описаны в работе [14], которая была профинансирована в рамках исследовательской инициативы по Мексиканскому заливу (*The Gulf of Mexico Research Initiative, GoMRI*) после аварии *Deepwater Horizon (DwH)*. В статье [15] проводится анализ «нефтяных» моделей с точки зрения описания транспорта и выветривания нефти. В обзоре [16] предпринята попытка сравнить системы прогноза распространения разливов нефти (авторы называют их моделями). Значительное внимание в работе [16] уделено наборам данных, которые используются для прогнозов распространения морских разливов нефти гидрометеорологическими службами разных стран. Однако эти обзоры [14–16] нельзя считать исчерпывающими без упоминания российского опыта и описания моделей, приведенных, например, в работах [9, 17–21].

Ряд моделей нефтяных разливов, разрабатываемых отечественными научными группами, представлен в двух работах, опубликованных почти одновременно [22, 23]. В первой из них [22] анализируется численное моделирование в Азовском и Черном морях, а также для двух отечественных моделей приводятся результаты моделирования реально произошедших на море инцидентов. Вторая [23] кратко описывает две разработанные в России модели, но в контексте исследования загрязнения Черного моря различными веществами, не ограничиваясь только нефтяными углеводородами.

Проблема прогнозирования распространения морских разливов нефти и нефтепродуктов далека от окончательного решения. Как отмечено в работе [13, с. 47], прогнозирование требует системного подхода и «при отсутствии или ненадлежащем функционировании одной из компонент прогноз будет невозможен либо ограниченно эффективен».

Цель настоящей работы – провести комплексный анализ факторов, которые в значительной степени отличают произошедшую аварию от многих других: физико-химических характеристик мазута, особенностей источника загрязнения и гидрометеорологических условий, важных при моделировании.

### Модели, методы и исходные данные

Для решения задач анализа и прогноза распространения нефтяного загрязнения необходима комплексная технология, включающая математическое обеспечение (программы, реализующие модели процессов); информационное обеспечение (картография, данные об источнике аварии, прогноз гидрометеорологических характеристик и результаты аэрокосмического мониторинга); организационное обеспечение, которое включает ситуационный центр и дежурную смену; передачу исходных и прогнозируемых данных между частями системы [13]. Регламент, форматы и спецификации должны быть согласованы на этапах создания, тестирования и запуска системы.

#### *Данные гидрометеорологических прогнозов*

В ходе рассматриваемого инцидента оперативные анализы и прогнозы полей гидрометеорологических характеристик рассчитывались с помощью Системы морских ретроспективных расчетов и прогнозов (СМРП), реализованной для Азовского моря и Керченского пролива с прилегающей акваторией Черного моря [24]. В большинстве случаев приводные поля метеоданных рассчитывались по региональной негидростатической атмосферной модели *WRF (Weather Research and Forecasting Model)*<sup>3</sup> с пространственным разрешением 10 км. Однако в первые недели после аварии использовались поля метеорологических характеристик на основе данных метеорологических прогнозов *COSMO-Ru* с пространственным разрешением 6,6 км, ежедневно предоставляемых Гидрометцентром РФ с заблаговременностью 5 сут.

Рассчитанные по этим атмосферным моделям поля метеорологических характеристик использовались в СМРП для расчета полей гидрологических характеристик с помощью российской модели морской циркуляции *INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model)* [25–27]. При рассматриваемом инциденте СМРП была реализована для акватории Керченского пролива и прилегающих акваторий Азовского и Черного морей с переменным пространственным разрешением: 120–200 м в Керченском проливе с увеличением до нескольких километров при удалении от него, при этом разрешение остается вполне приемлемым в области распространения мазута (не хуже 1 км). Особенности функционирования СМРП подробно описаны в работе [24].

Разработка и внедрение в практику оперативных прогнозов состояния морей ведутся в России несколькими научными коллективами. Эти работы носят как теоретический [28–30], так и практический характер [31, 32]. Кроме того, разрабатываются программные средства доступа к массивам данных прогнозов [33]. Выбор СМРП для прогнозов распространения мазута при РМКП-2024 обусловлен отсутствием технических, организационных и административных

---

<sup>3</sup> A description of the advanced research WRF Model Version 4 / W. C. Skamarock [et al.]. Boulder, Colorado, USA : National Center for Atmospheric Research, 2019. 162 p. (NCAR Technical Note ; NCAR/TN-556+STR). <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>

сложностей при организации доступа к данным, а также успешным опытом моделирования распространения нефти и нефтепродуктов для других морей РФ и районов Черного моря [34, 35].

В большинстве случаев поисково-спасательные операции и мероприятия по ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов завершаются в течение нескольких суток после возникновения чрезвычайной ситуации. Соответственно, прогнозирование распространения нефтяного разлива предполагает наличие гидрометеорологической информации в области, охватывающей акваторию распространения загрязнения в первые несколько суток. Такое компромиссное решение относительно размеров области принимается из-за роста объемов дискового пространства для хранения данных при расширении области, а также из-за увеличения времени на передачу и обработку информации.

В случае РМКП-2024 штормовые условия не позволили проводить операции на море в первые дни после аварии, и район распространения мазутного загрязнения, а следовательно, и область, для которой готовились прогнозы гидрометеорологических параметров, вынужденно расширялись несколько раз. Если первые расчеты были проведены на сетке  $321 \times 201$  узлов и пространственным шагом  $\sim 500$  м, то спустя месяц рассчитывать пришлось уже на сетке  $1421 \times 730$  узлов с тем же шагом. Финальная сеточная область включала в себя полностью Азовское море и прилегающую акваторию Черного моря с прибрежными водами Крыма и Северного Кавказа вплоть до г. Туапсе.

#### *Программный комплекс прогноза распространения разливов нефти и нефтепродуктов SPILLMOD*

Программный комплекс (ПК) *SPILLMOD* предназначен для расчета/прогноза эволюции нефтяного разлива на поверхности моря, включая поле толщины, количество нефти на поверхности, испарившейся и диспергированной в водную толщу, а также для оценки возможности поражения особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

В ПК *SPILLMOD* реализовано численное решение математической модели распространения и трансформации разлива нефти на поверхности моря на основе двумерных уравнений движения нефтяного пятна в области со свободными и меняющимися контактными границами [20, 21]. Численный метод является развитием метода частиц в ячейках [36], при этом используются адаптивные эйлеровы и лагранжевы сетки [37]. Реализованы также алгоритмы применения мер противодействия – постановка боновых заграждений, сбор нефти судами-нефтеесборщиками и применение диспергентов<sup>4</sup>. Пользовательский интерфейс интегрирован с геоинформационной системой, которая используется для визуализации результатов расчетов. Подробное описание функциональных возможностей, структуры и основных функций ПК *SPILLMOD* приведено в работе [13].

---

<sup>4</sup> Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019613316 Российской Федерация. Модельный комплекс *SPILLMOD-RF* для расчета характеристик разлива нефти в море с учетом применения средств реагирования: № 2019610949: заявл. 04.02.2019; опубл. 13.03.2019 / А. А. Ивченко, С. Н. Зацева, В. В. Солбаков, В. И. Журавель; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова». EDN ZIGNSK.

### *Сведения об аварии*

15.12.2024 в 08:57 LT (UTC + 3) в Керченском проливе Черного моря в координатах  $\varphi = 45^{\circ}03'03''$  с. ш.;  $\lambda = 036^{\circ}32'06''$  в. д. во время шторма произошел разлом корпуса в районе танков № 3 и 4 танкера «Волгонефть-212» (судовладелец ООО «КамаТрансОйл», п/п Санкт-Петербург). По УКВ капитаном подан сигнал SOS. Экипаж в количестве 13 человек собрался в кормовой части судна. На борту находился груз – нефтепродукты тяжелых сортов (мазут) наливом в количестве 4251,781 т, топливо 10,0 т. Произошла утечка мазута в море. В 12:58 кормовая часть судна «Волгонефть-212» ушла под воду. 12 членов экипажа спасены, один погиб<sup>1, 2</sup>.

15.12.2024 в 10:20 LT (UTC + 3) в Керченском проливе Черного моря в координатах  $\varphi = 45^{\circ}04'03''$  с. ш.;  $\lambda = 036^{\circ}31'09''$  в. д. во время шторма произошел разлом корпуса танкера «Волгонефть-239» (судовладелец ЗАО «Волгатранс-нефть», п/п Астрахань)<sup>1, 2</sup>. Экипаж 14 человек. На борту груз мазут 4300,938 т, топливо 15,0 т. Носовая часть судна стоит на якоре, кормовая часть с экипажем дрейфует в сторону Таманского п-ова к м. Панагия. В 13:10 кормовая часть т/х «Волгонефть-239» вынесена на мель в районе м. Панагия в 82 м от береговой черты. Экипаж не пострадал. Погода в районе судна: ветер скоростью 20 м/с, высота волны до 3,0 м, температура воздуха +3 °С.

### *Характеристики нефтепродукта*

Согласно документам на товарную продукцию (паспорт 4744 на топочный мазут М100 от 08.11.24 г., загруженный на танкер ВН212, и паспорт 4467 на топочный мазут М100 от 22.10.24 г., загруженный на ВН239), плотность мазута при температуре 15 °С составляет 976 кг/м<sup>3</sup> (ВН212) и 980 кг/м<sup>3</sup> (ВН239) соответственно. Таким образом, при вытекании из танков затопленных фрагментов судов следует ожидать выхода мазута к поверхности моря.

Согласно приложениям к указанным паспортам, в перевозимом грузе приблизительно 2 % фракций с температурой кипения до 250 °С и 25 % фракций с температурой кипения до 350 °С. Эти сведения дают основания полагать, что с течением времени за счет испарения на поверхности моря и растворения в морской воде плотность мазута может увеличиваться. Известно, что нефтяные остатки нефтеперегонки на нефтеперерабатывающих заводах различного состава являются основой мазута. Для достижения нормативных показателей вязкости и температуры застывания в исходные смеси добавляются дизельные фракции.

Согласно паспортам, плотность мазута ВН212 при 20 °С составляет 972,6 кг/м<sup>3</sup>, а ВН239 – 977,1 кг/м<sup>3</sup> (табл. 1). Представленные сведения, а также данные о диапазоне значений температуры морской воды в пределах от 8 до 11 °С в первые несколько дней после аварии, дают основания предполагать, что разлитый в результате аварии мазут находился на поверхности моря.

Температура застывания, согласно паспорту, для этого сорта нефтепродукта составляет 9 °С. Это означает, что при температуре ниже 9 °С вязкость становится очень высокой, скорость растекания значительно уменьшается. В таких условиях мазут преимущественно распространяется в виде комков или лепешек толщиной до нескольких сантиметров с горизонтальными размерами

от десятков сантиметров до метров. При транспортировке мазута его температура поддерживалась в пределах 45–50 °С, поэтому в момент аварии содержимое танков было способно растекаться.

Отметим еще один важный момент. Как отмечалось очевидцами и подтверждено исследованием образцов мазута, взятых с пляжа Анапы, с этим нефтепродуктом механически связываются минеральные взвешенные вещества, в частности песок. При содержании взвешенных веществ в нефтяном конгломерате более 4 % по объему его плотность заведомо превышает плотность морской воды, и такие образования имеют тенденцию опускаться на дно.

Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Оценка зависимости плотности (кг/м<sup>3</sup>) морской воды разной солености и мазута в исходном состоянии (I), после удаления фракций с температурой кипения до 250 °С (II) и до 350 °С (III) от температуры**  
**Assessment of the temperature dependence of density (kg/m<sup>3</sup>) of seawater with different salinity and of fuel oil in the initial state (I), after removal of fractions boiling up to 250 °С (II) and up to 350 °С (III)**

t, °С	Морская вода при солености, ЕПС / Sea water, PSU, at salinity			Мазут / Fuel oil					
				ВН212 / VN212			ВН239 / VN239		
	18	12	5	I	II	III	I	II	III
0	1014,4	1008,8	1003,9	986,0	988,5	1018,3	990,4	993,0	1024,2
5	1014,4	1008,8	1004,0	982,7	985,2	1014,8	987,1	989,7	1020,7
10	1014,4	1008,8	1004,0	979,3	981,8	1011,3	983,7	986,3	1017,2
15	1014,3	1008,8	1004,0	976,0	978,5	1007,9	980,4	983,0	1013,8
20	1014,3	1008,7	1004,0	972,6	975,2	1004,5	977,1	979,7	1010,4
25	1014,2	1008,7	1003,9	969,4	971,9	1001,1	973,8	976,4	1007,0
30	1014,2	1008,6	1003,9	966,2	968,6	997,8	970,6	973,1	1003,6

*Характеристики источников сброса мазута и режим истечения*

Первые сведения об аварии поступили в Главный морской спасательно-координационный центр (ГМСКЦ) в 10:50 МСК 15 декабря 2024 г. от морского спасательного подцентра (МСПЦ) Керчь. По данным Морской спасательной службы, носовая часть ВН239 затонула в точке с координатами 45°05'14" с. ш., 36°32'2" в. д. в 10:50 МСК, а в 12:58 затонула носовая часть и корма ВН212, причем нос судна затонул в точке 45°03'60" с. ш., 36°32'20" в. д., а корма – 45°08'08" с. ш., 36°32'3" в. д. Предварительно характер повреждений судов давал основания для оценки количества мазута, попавшего в море, ~ 3500 т. Позднее, 2 января, в пресс-релизе Минтранса эта оценка была снижена до 2500 т, что приблизительно вдвое превышает объем разлива мазута при аварии танкера «Волгонепфть-139», произошедшей в 2007 г. [38, 39].

Важно отметить, что места разлома судов не совпадают с их положением на морском дне, которые были определены позднее по данным ДЗЗ [5]. На радиолокационных изображениях (РЛИ) отмечались три источника распространения мазута, идентифицируемых по шлейфам.

При этом, как это часто бывает при авариях в открытом море, нет достоверных сведений об интенсивности и продолжительности истечения нефтепродукта. В некоторых случаях проблема оценки объемов нефтяного разлива превращается в серьезное научное исследование<sup>5</sup>. Сначала в качестве консервативного сценария была принята непрерывная утечка в месте аварии. Такой сценарий наиболее сложен для реагирования в море и при защите побережий.

В общем случае при аварии судна рассматривают различные сценарии сброса нефти или нефтепродукта. Наиболее распространенный – залповый или почти мгновенный сброс, когда весь перевозимый груз выходит на поверхность моря за короткое время, что соответствует полному или значительному разрушению емкости, содержащей маловязкую субстанцию с низкой плотностью. В другом сценарии, при сравнительно небольшом повреждении судовых танков, истечение считают продолжительным с медленным изменением расхода при сбросе нефтепродукта. В рассматриваемом случае разлом танкера по шпангоуту и открытие одной из стенок обоих танков в морскую среду представляется новым режимом истечения. На момент аварии подогретый мазут (при транспортировке его температуру обычно поддерживают близкой к значениям при разгрузке, т. е. намного выше температуры застывания) был высоковязким, но еще текучим и, предположительно, вытек в значительном количестве (большая доля от общего объема в танке).

Проведем оценку режима истечения, воспользовавшись для этого моделью течения Пуазейля. Представим танк в виде прямоугольного параллелепипеда длиной  $L$ , шириной  $B$  и высотой  $H_0$  и, следовательно, объемом  $V_0 = L \cdot B \cdot H_0$ . Объемный расход вязкой жидкости в трубе, согласно закону Пуазейля, определяется как  $Q = \pi R^4 \Delta P / (8\eta L)$ , где  $R$  – радиус трубопровода;  $\Delta P$  – перепад давления на участке трубы длиной  $L$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости. Избыточное давление, обусловленное силами плавучести в танке,  $\Delta P = \Delta \rho g H$ , где  $\Delta \rho = \rho_w - \rho_m$ ;  $\rho_w, \rho_m$  – плотность воды и мазута;  $H$  – слой мазута в танке. После подстановки в уравнение расхода соотношения для избыточного давления и с учетом того, что  $H = V/(BL)$ , получаем дифференциальное уравнение относительно объема, решением которого является экспоненциальная зависимость от времени:

$$V(t) = V_0 \exp(-\alpha t), \quad \alpha = 3.85 (R^4 \Delta \rho) / (\eta L^2 B). \quad (1)$$

Обозначим остаток в танке  $\lambda = V(t)/V_0$ , тогда время опорожнения до заданного уровня  $t = -\ln(\lambda)/\alpha$ .

При моделировании в качестве источника загрязнения нефтью и нефтепродуктами был принят сброс мазута из разрушенных танков судов как наиболее значительный. Кроме мазута, каждое из судов на момент аварии имело на

---

<sup>5</sup> Lehr B., Bristol S., Possolo A. Oil budget calculator–Deepwater Horizon: technical documentation: A report to the National Incident Command. The Coastal Response Research Center [S. l.], 2010. 217 p.

борту 10–15 т топлива и 0,5–1 т моторного масла в двигателях <sup>6</sup>. Однако расположение, возможность и режим вытекания нефтепродуктов этих типов изучены еще в меньшей степени, чем для мазута. Отметим, что в работе [9] предполагается экспоненциальное уменьшение интенсивности поступления мазута в морскую среду из фрагментов танкеров, однако без указания параметров.

### Результаты расчетов и обсуждение

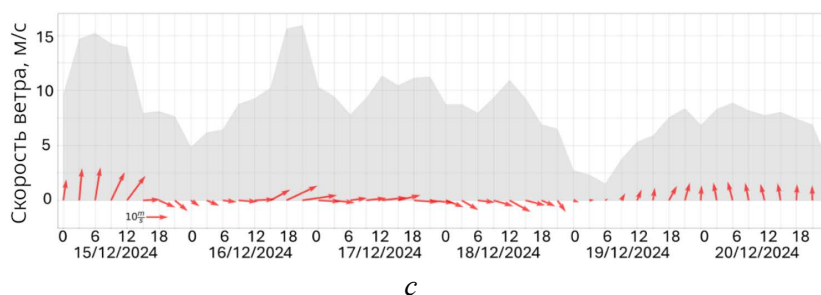
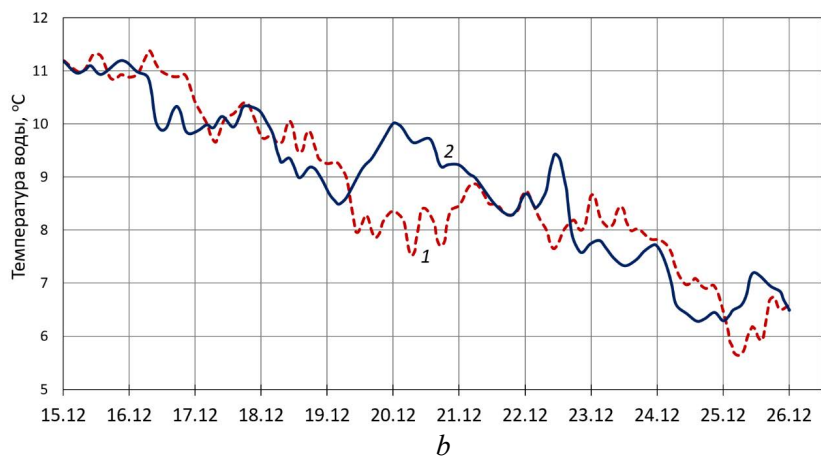
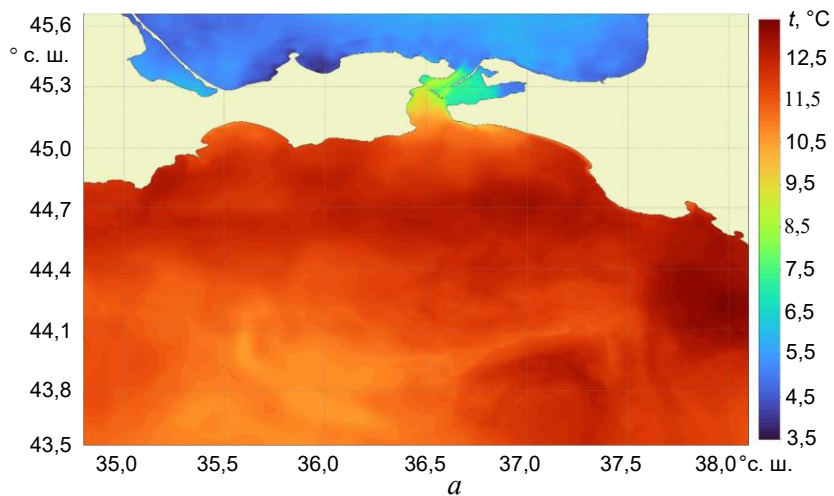
Информация о термохалинных полях акватории Керченского пролива и прилегающих акваторий имеет ключевое значение для данного разлива. Это связано с тем, что плотность разлитого нефтепродукта оказалась близка к плотности морской воды и изменяется в зависимости от температуры. На рис. 1, *a* представлено распределение температуры в поверхностном слое воды в Керченском проливе и прилегающих акваториях Черного и Азовского морей на дату аварии. Рис. 1, *b* показывает изменение температуры в приповерхностном и придонном горизонтах в районе затонувших фрагментов судов в первые недели после аварии. На рис. 1, *c* приведена диаграмма изменения скорости ветра на 5 сут, включая день аварии. Сопоставление данных из табл. 1 и рис. 1 позволяет сделать вывод, что в случае переноса мазута в Азовское море плотность выветрившегося нефтепродукта превысит плотность морской воды (см. столбцы «5» и «III» в табл. 1) и он утонет, однако мазут, не подвергшийся выветриванию, будет оставаться на поверхности моря во всем диапазоне значений температуры морской воды в районе кораблекрушения.

В табл. 2 приведены оценки параметров вытекания мазута из танка. Набор значений параметров отражает неопределенность характеристик мазута. Выбрано несколько значений температуры мазута. Наиболее вероятное значение температуры груза в танках превышало 20 °С, однако из сводок об аварии известно, что на одном из танкеров за несколько дней до крушения вышло из строя оборудование подогрева груза и температура мазута снижалась. Значения динамической вязкости могут быть оценены с помощью модели, предложенной в работе <sup>7</sup>, на основе данных о вязкости при различных температурах нефтепродукта. Однако вблизи температуры застывания мазута эта модель может быть неточной. Поэтому на основе результатов исследования образцов мазута с пляжей Анапы <sup>8</sup> было принято решение оценивать скорость вытекания в диапазоне вязкости от 2 до 150 Па·с. В табл. 2 приведены оценки для пяти значений вязкости из этого диапазона: I – 2 Па·с, II – 10 Па·с, III – 50 Па·с, IV – 100 Па·с и V – 150 Па·с. При проведении оценок использовались следующие значения параметров: объем танка – 566 м<sup>3</sup>, ширина танка – 5,7 м, глубина танка – 20 м, высота танка – 5 м, плотность воды – 1014 кг/м<sup>3</sup>, плотность мазута – 983 кг/м<sup>3</sup>, разница плотностей воды и мазута – 31,4 кг/м<sup>3</sup>, доля остатка мазута в танке принималась равной 0,05.

<sup>6</sup> Эксплуатация и ремонт двигателей типа NVD-48, NVD-36 и NVD-24: пособие. Москва : Пищевая промышленность, 1965. 368 с.

<sup>7</sup> Oil spill processes and models / D. Mackay [et al.]. Ottawa, Ontario : Environmental Protection Service, 1980. 91 p.

<sup>8</sup> Отчет «В рамках инициативной работы по анализу образцов мазута отобранных на побережье Анапы» Центр науки и технологий добычи углеводородов АНКООВО «Сколковский институт науки и технологий». Москва, 2025. 64 с.

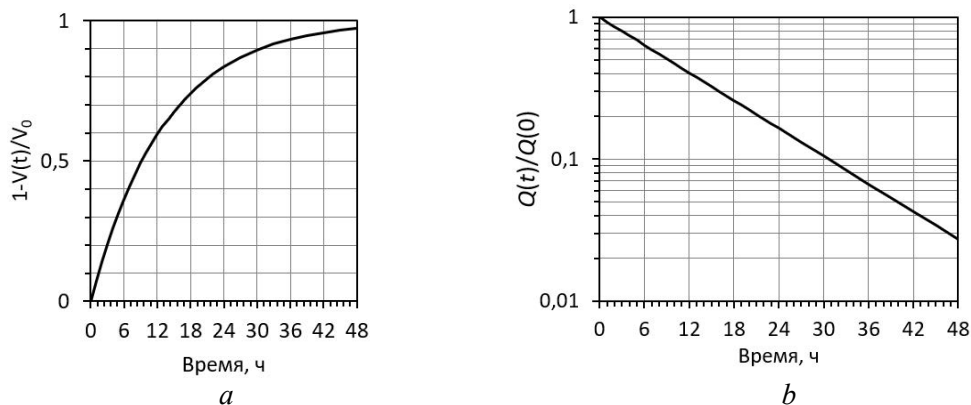


**Рис. 1.** Температура воды ( $^{\circ}\text{C}$ ) в Керченском проливе и прилегающих акваториях (*a*) и в районе затонувших фрагментов судов (*b*) в приповерхностном (*1*) и придонном (*2*) горизонтах, скорость ветра в районе кораблекрушения (*c*)

**Fig. 1.** Water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the Kerch Strait and adjacent water areas (*a*), as well as in the region of sunken ship fragments (*b*) at the near-surface (*1*) and bottom (*2*) horizons; wind speed in the accident region (*c*)

**Оценки параметров вытекания мазута для сценариев с различной динамической вязкостью**  
**Assessments of the parameters of fuel oil leakage for the scenarios with different dynamic viscosity**

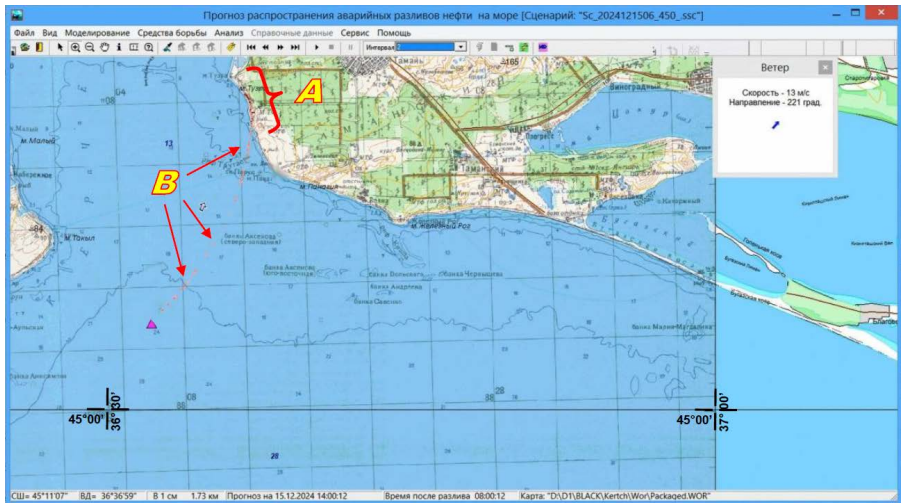
Параметр / Parameter	Сценарий вытекания / Leakage scenario				
	I	II	III	IV	V
Динамическая вязкость $\eta$ , Па·с / Dynamic viscosity $\eta$ , Pa·s	2	10	50	100	150
Толщина слоя вытекания $R$ , м / Thickness of leakage layer $R$ , m	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Параметр $\alpha$ , 1/с / Parameter $\alpha$ , 1/s	1,0E-4	2,1E-5	4,2E-6	2,1E-6	1,4E-6
Время опорожнения $T(\lambda)$ , ч / Emptying time $T(\lambda)$ , h	8	40	199	399	598
Время опорожнения $T(\lambda)$ , сут / Emptying time $T(\lambda)$ , day	0,3	1,7	8,3	17	25
Остаток через 48 ч $\lambda(48)$ , % / Remainder after 48 h $\lambda(48)$ , %	0	2,7	48,6	69,7	78,6



**Рис. 2.** Зависимость количества вытекшего мазута (а) и расхода мазута (b) от времени  
**Fig. 2.** Dependence of the amount of leaked fuel oil (a) and fuel oil flow rate (b) on time

Согласно приведенным в табл. 2 данным, бóльшая часть мазута попадает в морскую среду из разрушенных танков в любом из вариантов в течение нескольких первых суток. Один из вероятных сценариев (II) предполагает истечение около 95 % мазута за время, немного меньшее 2 сут. На рис. 2 для сценария II приведены графики нормированного объема мазута в танке и нормированного расхода мазута в зависимости от времени. Видно, что объемный расход мазута в морскую среду снижается на два порядка в течение первых двух суток, а объем в танке на конец вторых суток составляет около 3 %. Таким

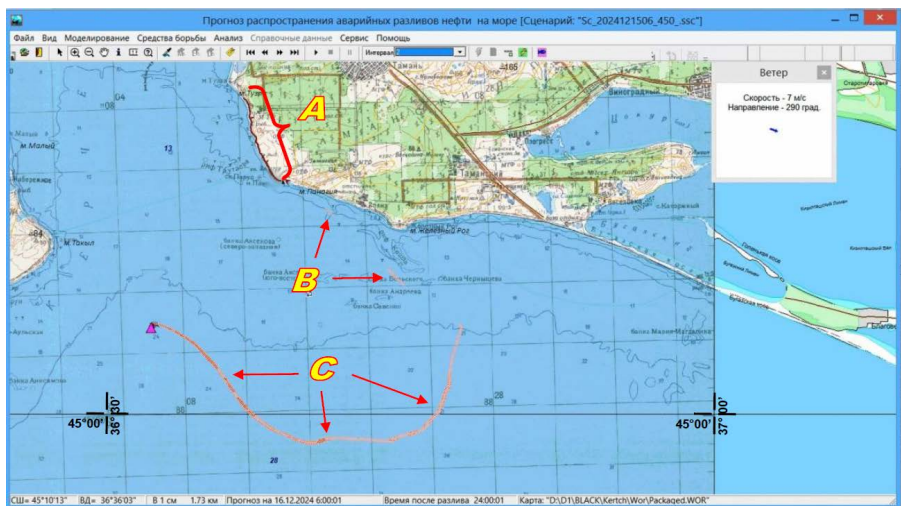
образом, масштабы последующих выбросов через несколько дней после аварии должны радикально уменьшиться. Согласно официальным сведениям, объем разлитого мазута составляет от 2500 до 3500 т. Чтобы получить оценку значения в тоннах, для рассматриваемого сценария (II) данные графика на рис. 2, *a* нужно умножить на соответствующий объем разлива.



*a*

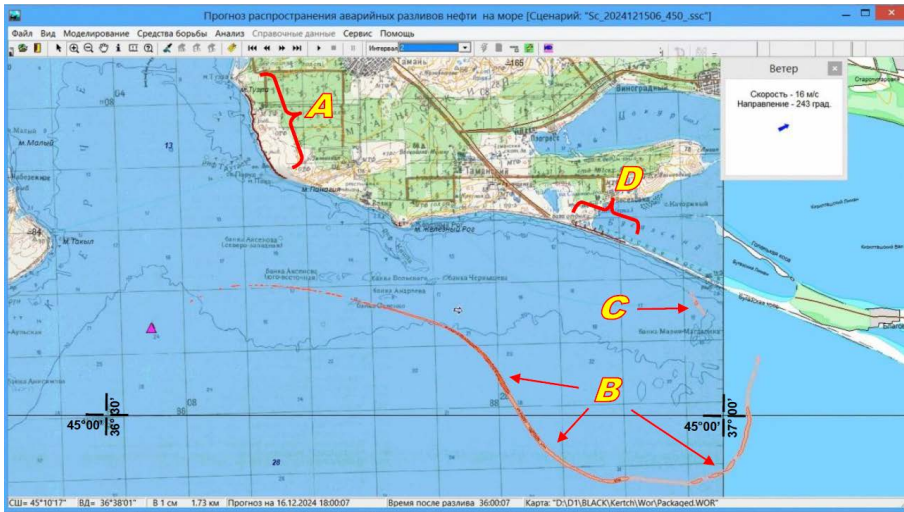
**Рис. 3.** Конфигурация мазутного загрязнения в акватории Черного моря и Керченского пролива по результатам моделирования через 8 ч (*a*), 24 ч (*b*), 36 ч (*c*), 48 ч (*d*) после начала разлива. Красным контуром обозначен расчетный шлейф (*B*, *C*), коричневым – загрязнение береговой зоны (*A*, *D*), треугольником – положение источника разлива, используемое при моделировании

**Fig. 3.** Configuration of fuel oil pollution in the Black Sea and the Kerch Strait based on the results of simulation in 8 (*a*), 24 (*b*), 36 (*c*) and 48 (*d*) hours after the spill began. The calculated plume (*B*, *C*) is shown in red, the polluted coastal zone (*A*, *D*) – in brown, triangle indicates the position of the spill source used in the simulations



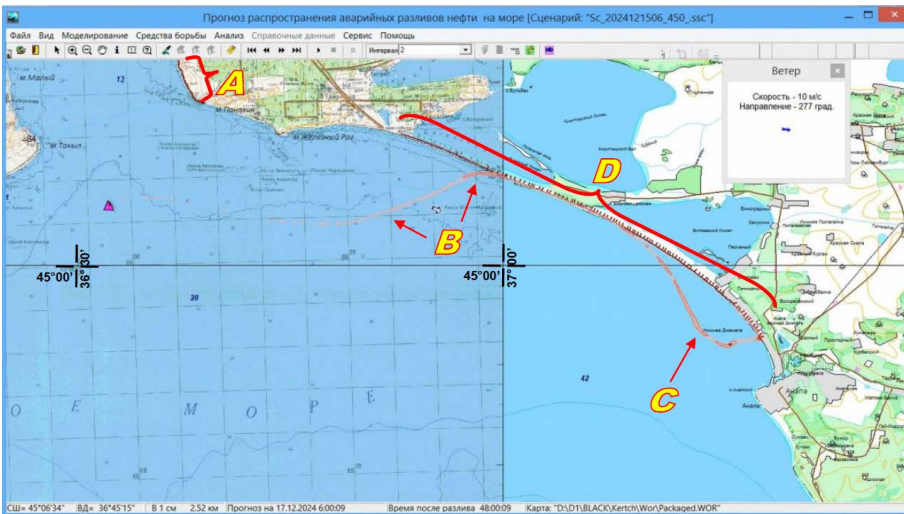
*b*

**Рис. 3.** Продолжение  
**Fig. 3.** Continuation



c

Рис. 3. Продолжение  
Fig. 3. Continuation



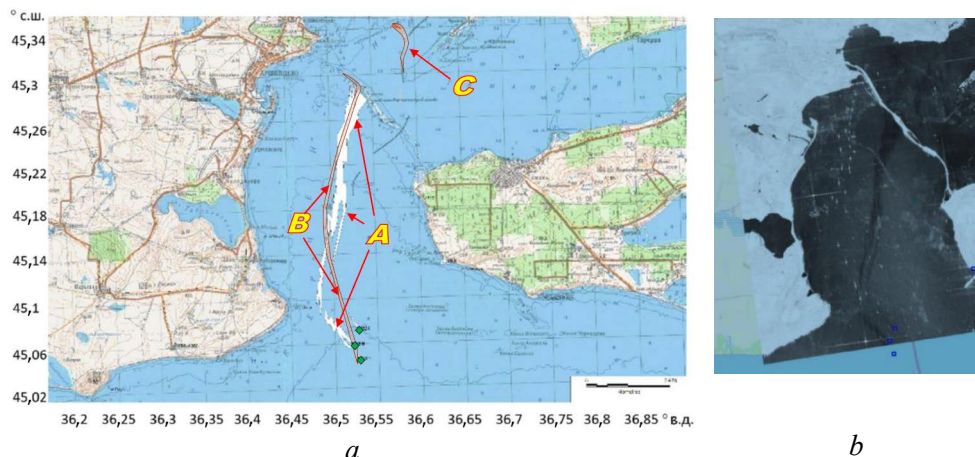
d

Рис. 3. Окончание  
Fig. 3. End

На рис. 3 приведены последовательные конфигурации разлива мазута на поверхности моря и обозначены места его выхода на берег последовательно через 8, 24, 36 и 48 ч после аварии, полученные в результате моделирования.

Рассмотрим результаты прогноза распространения разлива мазута, полученные в первые двое суток с использованием ПК *SPILLMOD*. РМКП-2024 имеет ряд особенностей. Высокая вязкость мазута обуславливает ослабление испарения. В модели *SPILLMOD* [19, 20] используется современная параметризация, учитывающая эту феноменологию [40]. Близость плотности мазута к плотности воды в значительной степени препятствует его растеканию [20,

21], что приводит к образованию сравнительно узких шлейфов на морской поверхности. Характерные для мазута высокие значения плотности и вязкости также уменьшают естественное диспергирование. Для описания этого процесса в модели *SPILLMOD* в ГОИН разработана современная модель диспергирования [41, 42].



**Р и с. 4.** Конфигурация нефтяного разлива на 20 декабря 2024 г.: результаты моделирования и обработки спутникового снимка КА *RADARSAT* (а) и РЛИ *GaoFen-3* (b). Белым цветом обозначена область нефтяного загрязнения по результатам дешифровки спутникового снимка (А), красным контуром – расчетный шлейф (В, С)

**F i g. 4.** Oil spill configuration on December 20, 2024: results of simulation and processing the *RADARSAT* satellite image (a) and the *GaoFen-3* radar image (b). The area of oil contamination resulted from interpreting satellite image is shown in white (A), and the estimated plume (B, C) is outlined in red

Таким образом, рассматриваемая модель адекватно работает в широком диапазоне значений характеристик нефти и гидрометеорологических условий. Юго-западный и юго-юго-западный штормовой ветер (см. рис. 1, с) привел к распространению мазута к побережью Таманского п-ова, о чем свидетельствует конфигурация разлива через 8 ч после его начала по результатам моделирования (см. рис. 3, а). На этом рисунке символом «А» обозначен участок береговой зоны, подвергшийся воздействию разлива, а символом «В» и стрелками – нефтяное загрязнение на поверхности моря, которое представляет собой вытянутый узкий шлейф, состоящий из фрагментов. Впоследствии направление ветра сменилось на западные румбы, и к концу первых суток после аварии сформировался вытянутый шлейф сложной конфигурации протяженностью 50–60 км. За это время, согласно оценкам (см. табл. 2 и рис. 2, а), из затонувших фрагментов танкеров вытекло значительное количество мазута. Часть загрязнения, изначально оказавшаяся у Таманского п-ова в районе м. Панагия, стала переноситься вдоль побережья в сторону Анапы, о чем свидетельствует конфигурация пятна через 24 ч после начала разлива (см. рис. 3, b). На рис. 3, b коричневой линией и символом «А» обозначена береговая зона, подвергшаяся воздействию разлива, символом «С» обозначен протяженный шлейф, одним концом связанный с затонувшим фрагментом танкера, а символом «В» –

фрагмент нефтяного загрязнения на поверхности моря, оторвавшийся от основного шлейфа в результате взаимодействия с берегом.

Во второй половине вторых суток после аварии некоторое количество мазута достигло берега в районе Бугазской косы (участок береговой зоны, подвергшейся воздействию разлива, обозначен символом «D» на рис. 3, с) в условиях сильного ветра с южной компонентой (см. рис. 1, с). На момент времени 36 ч после начала разлива картина загрязнения показана на рис. 3, с. Часть фрагментов разлива (символ «С» на рис. 3, с) продолжала движение в сторону берега в направлении Анапы. Основное загрязнение поверхности моря представлено областью с контуром красного цвета и обозначено стрелками и символом «B». Ситуация с загрязнением берега и акватории в конце вторых суток после начала разлива представлена на рис. 3, d. В предшествующий период преобладал сильный ветер юго-западного направления, который вызвал выход поверхностного мазутного загрязнения к берегу, а волнение выносило мазут на берег, что привело к интенсивному взаимодействию мазута с прибрежным и береговым грунтом (песком) и частичному захоронению нефти в толще пляжа. В то же самое время мазутное загрязнение на поверхности моря продолжало двигаться в сторону берега. Сроки и места выхода мазута на берег совпадают с данными, засвидетельствованными очевидцами и волонтерами.

В случае непрерывного действия источника с постоянной интенсивностью была бы существенно загрязнена береговая зона Крымского п-ова, включая районы вблизи г. Керчи, берега Таманского п-ова в районе Керченского пролива, а также некоторые участки в Азовском море. Однако, согласно информации МЧС России <sup>9</sup>, «в Краснодарском крае... <...> Проведена очистка (в том числе повторно) 629,14 км береговой линии, собрано более 178,7 тыс. тонн загрязненного песка, грунта и гальки. В Республике Крым... Проведена очистка (в том числе повторно) более 259,5 км береговой линии, собрано порядка 908,4 тонн загрязненного песка и грунта. В городе Севастополе... ..Собрано и вывезено на полигоны для сбора и утилизации 850,17 тонн загрязненного песка и грунта». Кроме того, в прибрежной зоне Анапы и Темрюкского района сводной водолазной группировкой выполнялся ежедневный мониторинг и сбор мазута со дна моря. Существенно меньшие масштабы загрязнения береговой линии за пределами зоны Анапа – Темрюкский район подтверждают сделанные выводы о значительном снижении количества мазута, поступающего в морскую среду со временем (см. табл. 2 и рис. 2).

Еще одним подтверждением гипотезы об уменьшении поступления мазута в морскую среду служат результаты моделирования, приведенные в работе [9]. Как утверждают авторы работы, «19–21 декабря ветер поменял свое направление на южное, в результате чего мазут начал движение в северном направлении... Согласно расчетам, большая часть мазута должна была попасть на побережье Тузлы и в район порта Тамань. Однако информации из открытых источников о загрязнении в этих районах не поступало» [9, с. 11]. Там же приведена фотография западного побережья Керченского пролива, на которой видны лишь отдельные сравнительно редкие фрагменты мазута, покрывающие

---

<sup>9</sup> Продолжаются работы по ликвидации последствий разлива нефтепродуктов при крушении танкеров в Керченском проливе // МЧС России [сайт]. 2025. 15 августа. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5577800> (дата обращения: 15.08.2025).

зону заплеска, что радикально отличается от загрязнения берегов в районе Анапы (сплошное покрытие значительной толщины). Масштабному мазутному загрязнению подверглось также морское дно в прибрежной зоне Анапы, где позднее водолазами обнаружены песчано-нефтяные маты, сформированные под воздействием волнения в условиях высокой концентрации взвешенных веществ.

Количество мазута, вынесенного к побережью Анапы, может быть оценено достаточно грубо из-за неопределенности расположения фрагментов танкеров на морском дне, вязкости продукта, зависящей от его свойств и температуры среды. По результатам моделирования, примерно половина мазутного шлейфа, вытекшего из фрагментов танкеров в первые двое суток, была вынесена в прибрежную область от м. Анапа до станицы Благовещенской (см. рис. 3, *d*). Используя соотношение (1) и оценки постоянной времени вытекания мазута (табл. 2) для разных значений вязкости вытекающей субстанции, можно сделать вывод, что от 50 до 95 % содержимого танков могло быть вынесено на этот участок берега и осесть в виде песчано-мазутных матов в прибрежной зоне. Согласно официальным сведениям, объем разлива составил от 2500 т до 3500 т, таким образом, количество мазута, вынесенного к побережью, составляет от 250 т до 3325 т.

Оценим количество мазута, собранного в районе Анапы. Согласно информации МЧС России<sup>9</sup>, на полигоны вывезено 178,7 тыс. т загрязненного мазутом грунта. По данным университета «Сириус»<sup>10</sup>, содержание мазута в песке составляет 0,42 %, что соответствует ~ 700 т нефтяных углеводородов. Сотрудники МЧС России, аварийно-спасательного отряда «Кубань-СПАС» и Морспасслужбы собрали 2 тыс. т нефтесодержащих отходов в прибрежной зоне моря<sup>11</sup>. Содержание мазута в таких отходах оценивается в 15 % и более. Таким образом, с морского дна было поднято ~ 300 т мазута. Итого со дна моря и с пляжей в районе Анапы было вывезено более 1 тыс. т мазута. В предположении, что некоторое количество мазута все еще находится в рассеянном состоянии на пляжах и морском дне, данная оценка удовлетворительно согласуется с оценками, приведенными выше.

Перейдем к анализу данных, представленных на рис. 4. Обращает на себя внимание красный контур мазутного загрязнения севернее Крымского моста (символ «С» на рис. 4, *a*). В модельных расчетах «северная часть» шлейфа возникает в результате взаимодействия мазутного пятна с берегом Таманского п-ова в предшествующие спутниковой съемке дни. Форма шлейфа, полученного по результатам дешифровки спутникового снимка (область белого цвета на рисунке, обозначена символом «С»), и его бо́льшая, по сравнению с моделированием, ширина соответствуют эволюции нефтяного разлива от трех источников, расположенных в местах затопленных фрагментов танкеров. При моделировании предполагалось действие одного источника (нефтяное загрязнение на

---

<sup>10</sup> Назарова А. Ученые «Сириуса»: загрязнение песка из Анапы превышает норму в 14 раз // РБК [сайт]. 2025. 24 янв. URL: <https://kuban.rbc.ru/krasnodar/freenews/6793adfa9a7947c10ca57e17> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>11</sup> Мазут полностью убрали со дна моря на побережье Анапы и Темрюкского района // Кубань 24 [сайт]. 19.09.2025. URL: <https://kuban24.tv/item/mazut-polnostyu-ubrali-so-dna-morya-naroberezhe-anapy-i-temryukского-rajona> (дата обращения: 20.09.2025).

поверхности моря, полученное в результате расчетов, – область с красным контуром, обозначенная символами «B» и «C»). Модельные шлейфы нефтяного загрязнения существенно зависят от задаваемой интенсивности и продолжительности сброса. С учетом неизбежной погрешности гидрометеорологического прогноза сравнение модельных расчетов с данными ДЗЗ (рис. 4, а и б) можно считать удовлетворительным.

Модельный комплекс ПК *SPILLMOD* предназначен для моделирования распространения нефти и нефтепродуктов на поверхности моря на основе двумерной гидродинамической модели. В модели процессы испарения, диспергирования и взаимодействия с берегом параметризуются, однако образование нефтяных матов не моделируется, как и во всех иных оперативных моделях, описание которых нам доступно [16]. Таким образом, через несколько дней после аварии, когда расход мазута значительно ослабевает, загрязнение представляет собой область из разрозненных фрагментов или комков мазута. При моделировании эволюция конфигурации загрязненной области воспроизводится неплохо, однако уровень доверия к значениям содержания мазута на поверхности моря соответствует качеству идентификации источника загрязнения. В проведенных оценках вытекания мазута остается неопределенность, связанная с характеристиками мазута (после аварии неизвестны точные значения его температуры и вязкости), а также с пространственным положением фрагментов танкеров на дне и конфигурацией разломов.

Средства ДЗЗ из космоса, начиная с февраля 2025 г., регулярно регистрируют появление, предположительно, нефтяных пленок на поверхности моря в районе затопленных фрагментов танкеров, причем положение источников этих пленок иногда совпадает с координатами обломков на дне. Однако зона распространения пленок, по данным ДЗЗ, ограничивается радиусом около 30 км вокруг затонувших частей судов, а одновременное отсутствие выбросов мазута на берег приводит к выводу, что это тонкие пленки, имеющие короткое время существования на поверхности [40, 43, 44]. Можно предположить, что идентифицируемые на космических снимках нефтяные пленки (образы) также могут быть проявлением источников нефти и нефтепродуктов различного рода. Источником пленок могут быть: просачивание мазута из танков с выделением дизельных фракций, формирующих пленочное загрязнение, заметное из космоса; топливо, моторное масло и технические жидкости из устройств, машин и механизмов танкеров; судовые следы и следы горюче-смазочных материалов, образующихся при проведении мероприятий по обеспечению экологической безопасности в районе затопления фрагментов танкеров.

### **Заключение**

Результаты моделирования соответствуют сообщениям в СМИ о наблюдениях выноса мазутных пятен на берег и данным ДЗЗ. Моделирование развития аварийной ситуации проведено с использованием ПК *SPILLMOD* на основе данных о гидрометеорологических параметрах, рассчитанных по СМРП для Черного моря. Моделирование позволяет оценивать, какие области акватории были подвержены воздействию нефтяного загрязнения, для последующих полевых обследований.

Особенности аварии РМКП-2024 и свойства перевозимого мазута, согласно проведенным оценкам, приводят к выводу, что источник разлива действовал продолжительное время, однако вытекание до 95 % содержимого танков происходило за время меньше нескольких первых суток. Мощность источника, согласно проведенным выше оценкам, убывала за это время не менее чем на два порядка. Предварительные оценки показывают: более половины объема мазута должно было попасть на поверхность в пределах нескольких суток после погружения частей судов на дно. По этой причине основной удар приняла на себя Анапа, что подтверждено фактическими данными и моделированием.

Фиксация средствами ДЗЗ пленочных загрязнений на последовательных снимках показала: выявленные области загрязнения никогда не обнаруживаются на последующих снимках, что дает основания признать их коротко живущим поверхностным загрязнением вследствие малой толщины пленки.

Произошедший в Керченском проливе 15 декабря 2024 г. разлив мазута, с одной стороны, нанес колоссальный ущерб окружающей среде, а с другой – является событием, мониторинг и анализ которого крайне полезны для дальнейшего развития методологии анализа и прогнозирования нефтяных разливов. Обратим внимание на свойства мазута, которые существенно определяют его эволюцию в морской среде:

- плотность мазута близка к плотности морской воды, коэффициент температурного расширения мазута и диапазоны изменения температуры и солености морской воды могут приводить к тому, что фрагменты мазутного загрязнения мигрируют в водной толще от поверхности до дна и наоборот за счет изменения соотношения плотностей воды и мазута;

- высокая вязкость мазута обуславливает низкую способность растекаться на поверхности моря и практическое отсутствие диспергирования в водной толще, что приводит к наличию в море сравнительно крупных конгломератов в условиях соответствующих температур;

- высокая адгезия к взвешенным веществам приводит к образованию мазутных матов, затопленных в прибрежной зоне;

- наличие в составе дизельных фракций, добавляемых как технологические добавки для улучшения возможности перекачивания мазута по трубопроводам, приводит к выходу этих компонент на поверхность моря с образованием тонких пленок, которые могут регистрироваться методами ДЗЗ.

В целом полученный в результате проведенной работы опыт подтверждает правильность выбранных средств и методов. При этом становится очевидной необходимость наращивания усилий, расширения возможностей и ресурсной базы для проведения научных, лабораторных и полевых исследований разливов мазута. Отдельно следует подчеркнуть необходимость повышения скорости и качества обмена информацией между субъектами, участвующими в ликвидации разливов нефтяных загрязнений в море, для обеспечения экологической безопасности. Авторы статьи надеются, что результаты работы будут использоваться для будущих оценок возможных последствий разливов тяжелых видов топлива в других акваториях морей РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации / С. Н. Зацепа [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 3. С. 369–381. EDN GTCOVT. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-369-381>
2. Polemicheskaya stat'ya po rezul'tatam issledovaniya na temu: «Podkhod k analizu gidrometeorologicheskikh usloviy, opredelyayushchikh zaderzhku v reagirovaniy na morskije razlivy nefiti v Arkticheskoy zone Rossiyskoy Federatsii» / В. К. Донченко [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13, № 4. С. 482–487. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-4-pw1>
3. Лаврова О. Ю., Лупян Е. А., Костяной А. Г. Последствия аварий танкеров в черноморском керченском предпроливье 15 декабря 2024 г.: комплексный анализ спутниковых и метеорологических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 2. С. 282–299. EDN WQJKUT. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-2-282-299>
4. Лаврова О. Ю., Лупян Е. А., Костяной А. Г. Спутниковый мониторинг мазутного разлива в районе Керченского пролива 15 декабря 2024 г.: предварительные результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22, № 1. С. 327–335. EDN ITPALB. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-1-327-335>
5. Результаты радиолокационного мониторинга и сопутствующего численного моделирования катастрофических разливов тяжелых нефтепродуктов в Керченском проливе в 2024–2025 гг. / С. К. Клименко [и др.] // Современные проблемы оптики естественных вод : Труды XIII Всероссийской конференции с международным участием: сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 08–10 октября 2025 года. Санкт-Петербург, 2025. С. 146–151. EDN FKDZXR.
6. *Gustitus S. A., Clement T. P.* Formation, fate, and impacts of microscopic and macroscopic oil-sediment residues in nearshore marine environments: A critical review // *Reviews of Geophysics*. 2017. Vol. 55, iss. 4. P. 1130–1157. <https://doi.org/10.1002/2017RG000572>
7. *Michel J., Vambach P.* A response guide for sunken oil mats (SOMs): Formation, behavior, detection, and recovery // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 3. 368. <https://doi.org/10.3390/jmse10030368>
8. *Клименко С. К., Иванов А. Ю.* Загрязнение Керченского предпроливья после техногенной катастрофы и его оценки по данным ДЗЗ // Материалы 23-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2025. С. 237. EDN CHUZTO.
9. Распространение мазутного загрязнения в Черном море после аварии на судах «Волго-нефть» в декабре 2024 года по данным контактных, спутниковых измерений и расчетов системы FOTS Морского гидрофизического института РАН / А. А. Кубряков [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41, № 6. С. 767–787. EDN XWXESN.
10. Трансформация мазута в Черном море через два с половиной месяца после аварии танкеров / И. А. Немировская [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 523, № 2. С. 234–240. EDN MBVFAV.
11. Аварии и последствия танкерной перевозки мазута (Керченский пролив – 2007 г., г. Анапа – 2024 г.): препринт / Г. Г. Матишов [и др.]. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮНЦ РАН, 2025. 152 с.
12. Феноменология и особенности моделирования разлива мазута в Керченском проливе (РМКП-2024) / С. Н. Зацепа [и др.] // *Океанологические исследования*. 2026. Т. 54, № 1. С. 51–83. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).4)
13. Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях / С. Н. Зацепа [и др.]. Москва : АО «Финпол», 2018. 140 с. EDN ATUGEA.
14. Progress in operational modeling in support of oil spill response / С. Н. Barker [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, iss. 9. 668. <https://doi.org/10.3390/jmse8090668>

15. Oil spill modeling: A critical review on current trends, perspectives, and challenges / P. Keramea [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 2. 181. <https://doi.org/10.3390/jmse9020181>
16. Modes of operation and forcing in oil spill modeling: State-of-art, deficiencies and challenges / P. Keramea [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 6. 1165. <https://doi.org/10.3390/jmse11061165>
17. *Zatsepa S., Ivchenko A., Ovsienko S.* A local operative model for oil drift and dispersion // *Proceedings of Combatting Marine Oil Spills in Ice and Cold Conditions*. Helsinki, Finland, 1992. С. 189–192.
18. *Korotenko K. A., Bowman M. J., Dietrich D. E.* High-resolution numerical model for predicting the transport and dispersal of oil spilled in the Black Sea // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*. 2010. Vol. 21, no. 1. P. 123–136. [https://doi.org/10.3319/TAO.2009.04.24.01\(IWNOP\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2009.04.24.01(IWNOP))
19. *Становой В. В., Лавренов И. В., Неелов И. А.* Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. № 3(77). С. 7–16. EDN JVUBQH.
20. *Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V.* SPILLMOD – A CFD model for information support of marine oil spill response // *Journal of Oceanological Research*. 2022. Vol. 50, no. 2. P. 72–105. EDN NVPQNE. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50\(2\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).4)
21. *Solbakov V. V., Zatsepa S. N., Ivchenko A. A.* Spillmod, A CFD model for marine oil spill // *Modeling, analysis, control and removal of oil and hydrocarbon spills* / ed. T. Chaplina. Cham: Springer, 2025. P. 1–38. (Earth and Environmental Sciences Library). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0_1)
22. Numerical models for oil spillages in the Black Sea and the adjacent Sea of Azov / G. Zodiatis [et al.] // *The Handbook of Environmental Chemistry*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2021. P. 1–34. [https://doi.org/10.1007/698\\_2021\\_815](https://doi.org/10.1007/698_2021_815)
23. *Pokazeev K., Sovga E., Chaplina T.* Numerical modeling of the hydrocarbon spot shape on the water surface // *Pollution in the Black Sea*. Cham : Springer, 2021. P. 37–44. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61895-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61895-7_4)
24. Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива / Н. А. Дианский [и др.] // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг*. Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2020. Т. 2, вып. 5. С. 131–140. EDN GBWEBF. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140>
25. Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov / V. B. Zalesny [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 27, no. 1. P. 95–111. EDN PDOVUV. <https://doi.org/10.1515/rnam-2012-0006>
26. *Дианский Н. А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. Москва : Физматлит, 2013. 272 с. EDN UGLFQB.
27. *Moshonkin S., Zalesny V., Gusev A.* Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a two-equation K-Omega turbulence parameterization // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018. Vol. 6, iss. 3. 95. EDN AAZESJ. <https://doi.org/10.3390/jmse6030095>
28. Развитие системы диагноза и прогноза состояния Мирового океана и отдельных морей России / Г. К. Коротаев [и др.] // *Морская стратегия и политика России в контексте обеспечения национальной безопасности и устойчивого развития в XXI веке: сборник научных трудов*. Симферополь : ИТ «АРИАЛ», 2024. С. 115–117. EDN SZEIEWS.
29. *Коротаев Г. К.* Оперативная океанография – новая ветвь современной океанологической науки // *Вестник Российской академии наук*. 2018. Т. 88, № 7. С. 579–588. EDN RZVKBD. <https://doi.org/10.31857/S086958730000081-7>
30. Оперативная океанография северо-восточной части Черного моря: оценки точности моделирования в сравнении с данными натурных измерений / А. В. Григорьев [и др.] // *Моря России: методы, средства и результаты исследований*, Севастополь, 24–28 сентября 2018 года. Севастополь : Морской гидрофизический институт РАН, 2018. С. 36. EDN VSEDGJ.

31. Оперативная система диагноза и прогноза гидрофизических характеристик Черного моря / Г. К. Коротаев [и др.] // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 5. С. 609–617. EDN WORWIV. <https://doi.org/10.7868/S0002351516050072>
32. Инновационная система оперативных морских прогнозов / А. И. Мизюк [и др.] // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Новые материалы и энергетика в ВС РФ»: сборник статей научно-технической конференции. Анапа, 2023. Т. 1. С. 104–110. EDN SKLUXH.
33. *Кузнецов С. А., Холод А. Л.* Информационная подсистема выборки данных из специализированного архива данных Черноморского центра морских прогнозов // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы IV межрегиональной научно-практической конференции. Севастополь : Севастопольский государственный университет, 2018. С. 303–304. EDN YQFOKD.
34. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря / С. Н. Зацева [и др.] // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3(15). С. 30–45. EDN STTOPT.
35. The study of pollutants' pathways in the Caspian Sea by modeling Lagrangian trajectories / O. S. Klyagina [et al.] // Physical and mathematical modeling of Earth and environment processes / ed. V. I. Karev. Cham : Springer, 2022. P. 99–105. (Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences). EDN JQWQMO. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99504-1_11)
36. *Harlow F. H.* The particle-in-cell computing method for fluid dynamics // Methods in Computational Physics. 1964. Vol. 3. P. 319–343.
37. *Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V.* Conditionally Eulerian–Lagrangian method on the example of the problem on the dynamics of an intrathermocline vortex lens // Mathematical Models and Computer Simulations. 2023. Vol. 15, no. 3. P. 539–553. EDN BCYLIZ. <https://doi.org/10.1134/s2070048223030201>
38. Шторм 11 ноября 2007 г. в Керченском проливе: хроника событий, математическое моделирование и географоэкологический анализ нефтяного разлива / С. Н. Овсиенко [и др.] // Труды Государственного океанографического института. 2008. № 211. С. 307–339. EDN PXMGNF.
39. *Фащук Д. Я.* Эколого-географические последствия катастрофы танкера «Волгонепфть-139» в Керченском проливе 11 ноября 2007 г. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2009. № 1. С. 105–117. EDN JVYJGF.
40. Исследование чувствительности псевдокомпонентной модели испарения нефти на поверхности моря к вариации параметров / С. Н. Зацева [и др.] // Процессы в геосредах. 2020. № 2(24). С. 662–674. EDN SVUJKV.
41. Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов / С. Н. Зацева [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 6. С. 843–853. EDN YOJSBV. <https://doi.org/10.1134/S0030157418060163>
42. О роли ветрового волнения в процессе диспергирования нефтяного разлива в море / С. Н. Зацева [и др.] // Океанология. 2018. Т. 58, № 4. С. 556–564. EDN XWLIRV. <https://doi.org/10.1134/S0030157418040135>
43. Исследование особенностей поведения тонких пленок нефтепродуктов на поверхности моря методом математического моделирования / С. Н. Зацева [и др.] // Вести газовой науки. 2023. № 3(55). С. 101–117. EDN GQXWST.
44. Об интерпретации результатов мониторинга загрязнений поверхности моря с учетом особенностей поведения тонких нефтяных пленок / С. Н. Зацева [и др.] // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» : электронный сборник материалов конференции. Москва : Институт космических исследований Российской академии наук, 2020. С. 80. EDN XMNCLN. <https://doi.org/10.21046/18DZZconf-2020a>

*Об авторах:*

**Солбаков Вячеслав Викторович**, старший научный сотрудник, ФИЦ ИУ РАН (119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 6506793953**, **ResearcherID: AAB-6735-2019**, **SPIN-код: 7656-6621**, vsolbakov@frccsc.ru

**Зацева Сергей Николаевич**, заведующий лабораторией, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-7072-3920**, **ResearcherID: T-1242-2018**, **Scopus Author ID: 55950369100**, **SPIN-код: 3922-3330**, zatsepa@gmail.com

**Дианский Николай Ардальянович**, главный научный сотрудник, кафедра физики моря и вод суши физического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2), доктор физико-математических наук, доцент, **ORCID ID: 0000-0002-6785-1956**, **ResearcherID: R-8307-2018**, **SPIN-код: 5450-6667**, nikolay.diansky@gmail.com

**Ивченко Александр Александрович**, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), **ORCID ID: 0009-0003-3828-378X**, **Scopus Author ID: 55950528300**, **SPIN-код: 5443-1160**, alivch654@gmail.com

**Коршенко Евгения Александровна**, научный сотрудник, отдел численного моделирования гидрофизических процессов, лаборатория оперативного моделирования, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (119034, Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1), **ORCID ID: 0000-0003-2310-9730**, **ResearcherID: AAE-3617-2019**, **Scopus Author ID: 57194570985**, **SPIN-код: 1754-4563**, zhenyakorshenko@gmail.com

**Панасенкова Ирина Игоревна**, научный сотрудник, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1), **ORCID ID: 0000-0002-8338-4825**, **ResearcherID: AAE-4131-2019**, **Scopus Author ID: 57202425753**, **SPIN-код: 1193-6046**, ipanasenkova@mail.ru

**Фомин Владимир Васильевич**, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6, стр. 1), **ORCID ID: 0000-0001-8857-1518**, **ResearcherID: C-2124-2017**, **Scopus Author ID: 57208310824**, **SPIN-код: 8803-9548**, vladimirfomin@gmail.com