

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ И ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИВА МАЗУТА В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ (РМКП-2024)

С. Н. Зацева^{1*}, Н. А. Дианский^{1,2,3}, А. А. Ивченко¹, Е. А. Коршенко¹,
А. А. Кучейко⁴, И. И. Панасенкова^{1,5}, В. В. Солбаков⁶, В. В. Фомин^{1,3,5}

¹ Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет,
Россия, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6;

² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Физический факультет,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1;

³ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 8;

⁴ ООО «Рисксат», Россия, 129515, Москва, ул. 1-я Останкинская, д. 25, кв. 37;

⁵ Гидрометцентр России, Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, 13;

⁶ Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН,
Россия, 119333, Москва, Вавилова, 44/2;

*e-mail: zatsepa@gmail.com

В статье обсуждаются феноменология, особенности поведения в морской среде и, как следствие, особенности моделирования распространения мазута после аварии танкеров «Волгонепфть» и разлива мазута в Керченском проливе в декабре 2024 г. (РМКП-2024). Регион Керченского пролива и прилегающих акваторий характеризуется значительной пространственной и сезонной изменчивостью полей температуры и солености, особенно в осенне-зимний период. В результате РМКП-2024 сложилась гидрометеорологическая ситуация, когда после сильного шторма мазутное пятно подошло к песчаному берегу города-курорта Анапа в условиях умеренно сильного волнения, что привело к затоплению значительной части разлива, его уходу на дно в виде песчано-нефтяных матов. Такое «поведение» мазута обусловлено его высокой плотностью, вязкостью и адгезией (липкостью). Соединение мазута с песком и водорослями привело к образованию конгломератов с плотностью, выше плотности морской воды. Подводные песчано-нефтяные маты стали источником вторичного загрязнения морской среды и побережий на протяжении нескольких месяцев. В первые дни и недели после аварии рассматривалась непрерывная утечка мазута как консервативный сценарий, приводящий к наиболее неблагоприятным последствиям. Результаты моделирования распространения мазута сравнивались с данными ДЗЗ и береговыми наблюдениями спасателей и волонтеров и, в целом, соответствовали этим наблюдениям. Моделирование подтвердило распространение мазута от Анапы до Севастополя. Отдельное рассмотрение модели вытекания мазута из разломанных фрагментов танкеров объясняет факт загрязнения побережья Крымского полуострова на 2–3 порядка в меньшей степени, чем загрязнения в районе Анапской агломерации.

Ключевые слова: SPILLMOD, INMOM, WRF, нефтяные разливы, феноменология, ДЗЗ, планы ликвидации разливов нефти, математическое и численное моделирование

Введение

За последнюю четверть века в Черном море и прилегающих к нему морях случилось три схожих крупных аварии однотипных судов. Каждая из аварий произошла во время шторма, вследствие разлома судна класса река–море серии «Волгонефть». Во время шторма 29 декабря 1999 г. танкер «Волгонефть-248» разломился на две части на якорной стоянке в Мраморном море недалеко от Стамбула. Судно перевозило 4 365 тонн тяжелого мазута. По оценкам общий объем разлива составил 1 578 тонн. Штормовые юго-западные ветры быстро выбросили разлитый мазут на берег в стамбульском пригороде Флория. Мазут в основном отложился на уровне отметки высокой воды и выше, в области заплеска штормовых волн, образовав полосу длиной 5 км, шириной от 2 до 10 метров, а толщина слоя была до 5 сантиметров. Мазут постепенно проникал в толщу пляжа, образуя слои песка, насыщенного нефтью. Большая часть мазута, попавшего на пляжи, быстро оказалась занесенной свежими отложениями песка (Moller, 2002). Операций по локализации разлива в море не проводилось.

Во время экстремального шторма в северо-восточной части Черного моря, с 11 по 13 ноября 2007 г., в береговой зоне от Новороссийска до Севастополя потерпели крушение 13 судов. В море оказалось значительное количество (до 45 тонн) дизельного топлива из топливных резервуаров затонувших сухогрузов. Стоявший на якорной стоянке в черноморском устье Керченского пролива танкер «Волгонефть-139» разломился на две части. Корма отделилась от носовой части и начала дрейфовать, прибывшись к острову Тузла через пару часов после аварии. Нос остался стоять на якорю и затонул вместе с грузом. В результате кораблекрушений в акваторию попало, по разным оценкам, от 1300 т до 1600 т мазута марки М-100. Всего в море вылилось от 1200 т до 2000 т топочного мазута, загрязнившего пролив, Таманский залив и 250 км береговой полосы (Фащук и др., 2009; Oil spill accident..., 2011). Локализация разлива на море была невозможна из-за шторма.

В результате крушения двух танкеров серии «Волгонефть» – «Волгонефть-212» (ВН212) и «Волгонефть-239» (ВН239) во время шторма 15 декабря 2024 г. произошел разлив мазута в черноморском устье Керченского пролива. В дальнейшем изложении будем называть этот разлив РМКП-2024 (разлив мазута в Керченском проливе 2024 г.). Разрушение обоих танкеров произошло однотипно, суда разломались на две части каждое. В результате, по меньшей мере два танка каждого из судов по одной из сторон оказались открыты и находились в непосредственном контакте с морской средой. Три фрагмента судов через некоторое время затонули и оказались на морском дне, а корма танкера «Волгонефть-239» после свободного дрейфа была выброшена на берег Таманского полуострова в районе мыса Панагия. В море попало по разным оценкам от 2400 т до 3200 т вредных веществ. Масштабному загрязнению подверглись песчаные пляжи от Анапы до поселка Волна, очаговые выбросы на берег были зафиксированы на обоих берегах Керченского пролива, а также в районе Севастополя и на Бердянской косе.

Чрезвычайные ситуации (ЧС) на морских акваториях, сопровождающиеся загрязнением окружающей среды, как правило, приводят к нелокальным экологическим последствиям. Для того, чтобы оценить возможные последствия ЧС и выбрать адекватную стратегию реагирования, необходимо использовать комплексное математическое и численное моделирование. При построении моделей разлива нефтепродуктов проводится анализ факторов и механизмов, обуславливающих трансформацию разлива конкретного нефтепродукта в морской среде, строится физическая модель и формулируется постановка математической задачи. Для решения этой задачи необходима информация об источнике сброса нефтепродуктов, сведения о состоянии морской среды и прогноз этого состояния, расчеты которых, в свою очередь, проводятся с помощью моделей атмосферной и морской динамики. В рамках данной работы была использована разработанная авторами ранее модель нефтяного разлива SPILLMOD (Zatsepa et al., 2022) и система морских ретроспективных расчетов и прогнозов (СМРП) гидрометеорологических характеристик, реализованная для Азовского моря и Керченского пролива (Дианский и др., 2020). Начиная с первых дней после аварии и до установки на затонувшие фрагменты судов коффердамов, авторы составляли прогнозы возможного распространения мазута и его легких фракций. Опыт примерно полугодичной подготовки таких прогнозов обсуждается в представленной статье.

Цель статьи – анализ проведенного моделирования разлива мазута в Керченском проливе и выделение выявленных проблем, требующих дополнительного исследования. Обобщенный анализ РМКП-2024 в статье проводится с выделением следующих основных положений:

- хронология развития аварийной обстановки;
- физико-химические свойства перевозимого мазута;
- феноменологическая модель разлива мазута в морской среде;
- источник сброса мазута на морскую поверхность;
- используемые модели для расчетов гидрометеорологических полей;
- дистанционное зондирование Земли из космоса;
- используемая модель SPILLMOD и проведенные расчеты – прогнозы и реконструкция разлива.

Представление о пространственно-временных масштабах РМКП-2024 дает приводимая ниже краткая хронология разлива, основанная на фактических данных наблюдений за разливом, главным образом, за счет мониторинга на берегу. Дополнительные сведения о фактическом положении разлива мазута в отдельные моменты времени предоставляет спутниковый мониторинг.

Физико-химические свойства мазута дают основания для построения феноменологической модели его распространения и трансформации в морской среде. Феноменология разлива мазута описывает взаимосвязи между различными процессами, в совокупности составляющими физико-химическую трансформацию этого нефтепродукта в морской среде. По словам Вернера Гейзенберга (Гейзенберг, 1967): «...Феноменологические теории всегда там, где наблюдаемые явления еще не могут быть сведены к общим законам природы. Причина этой невозможности может состоять либо в чрезвычайной

сложности соответствующих явлений, которая еще не допускает такое сведение из-за математических трудностей, либо в незнании упомянутых законов...». В рамках феноменологического описания анализу подвергаются только наблюдаемые изменения в состоянии объекта, но не рассматриваются внутренние механизмы процессов.

Для решения математической задачи о распространении мазута в море необходимо собрать сведения об источнике сброса нефтепродукта. Когда, где, на какой глубине находится источник и какова интенсивность и продолжительность истечения нефтепродукта. Состояние морской среды описывается рядом параметров, таких, как температура и соленость, скорость течений, содержание минеральной и органической взвеси. Все эти параметры необходимо представлять в виде меняющихся во времени трехмерных полей с максимально возможной детализацией по времени и пространству. Такая информация может быть получена только на основе современных моделей гидротермодинамики атмосферы и океана.

И, наконец, для расчета распространения нефтепродуктов в морской среде необходимо применять современные математические модели распространения нефти в море, описывающие совокупность процессов трансформации нефти в морской среде с учетом всех ее особенностей.

Данные и методы

Основные сведения о РМКП-2024

Хронология разлива

15.12.24 Два танкера разломались на части в черноморском устье Керченского пролива. Штормовой юго-западный ветер пригнал оставшуюся на плаву корму танкера ВН239 вместе с экипажем к берегу в районе порта Тамань в середине дня 15 декабря. Три оставшиеся фрагмента судов затонули в районе рейдовой стоянки в промежутке от 10 до 13 часов местного времени. К вечеру воскресенья 15 декабря отдельные фрагменты мазутного пятна были вынесены на побережье п-ова Тамань севернее м. Панагия.

16.12.24 Перемена ветра на северо-западный в районе аварии судов привела к распространению мазута в юго-восточном направлении. Сформировался мазутный шлейф, протянувшийся на десятки километров от источника до Анапы. Западный ветер во второй половине дня и в ночь с 16 на 17 декабря стал причиной выноса мазута на побережье Краснодарского края от поселка Волна до города-курорта Анапа.

17.12.24 Значительная часть мазута была вынесена на песчаные пляжи Анапской агломерации. В этот день началась уборка пляжей силами МЧС, Морской спасательной службы и волонтеров.

18.12.24 Перемена ветра на северо-западный привела к накоплению мазута в «орографической ловушке» для этого направления ветра от н.п. Витязево до морского вокзала.

19.12.24 Перемена ветра на юго-западный привела к движению мазутного загрязнения в северо-восточном направлении к южной оконечности Таманского полуострова и Бугазской косе.

20.12.24 Мазутный шлейф вытянулся от затонувших фрагментов судов в северном направлении, произошел вынос мазута на остров Тузла и далее в сторону Керчи.

21.12.24 Единичные выбросы мазута обнаружили в районе Керчи.

22.12.24 Отмечены выносы мазута на побережья в районе Маяка, Еникале, в Капканах, Георгиевская, Аршинцево, у городской набережной г. Керчь.

23.12.24 Перемена ветра на северо-восточный привела к распространению мазутных пятен от источника вдоль южного берега Крыма.

24.12.24 Мазут замечен в районе г. Ялта.

25.12.24 Замечены повторные выносы комков мазута на Анапское побережье.

25.12.24-30.12.24 Северо-восточный ветер «гонит» мазутное загрязнение вдоль южного берега Крыма.

03.01.25-04.01.25 Отдельные комки мазута обнаружены на пляжах г. Севастополя и в Балаклавской бухте.

05.01.25 РЛИ Sentinel-1A от 5 января и 9 января позволяют утверждать, что мазутное загрязнение достигло г. Севастополя и его окрестностей. Как у побережья, так и в открытом море, загрязнение представлено отдельными пятнами.

10.01.25 Мазут начал вытекать из кормы танкера ВН239, сидящей на мели рядом с портом Тамань.

11.01.25 – 01.11.25 В районе затонувших фрагментов судов фиксируются шлейфы нефтепродуктов, разрушающиеся на расстоянии до 30 км. Время от времени происходят повторные выбросы мелкой фракции мазута на побережье от н.п. Волна до города-курорта Анапа.

Сведения о мазуте

Свойства тяжелых мазутов могут быть весьма разнообразны. Это связано с тем, что такие нефтепродукты часто состоят из вязких и смолистых остатков переработки сырой нефти со сложными смесями тяжелых алифатических и ароматических соединений, битумов и асфальтенов, разбавленных легким топливом, чтобы обеспечить соответствие требованиям по вязкости, подходящим для устройств, для которых предназначено топливо.

Согласно документам на товарную продукцию, плотность перевозимого мазута марки М100 при температуре 15 °С составляет 976 кг/м³ (ВН212) и 980 кг/м³ (ВН239), содержание фракций с температурами кипения до 250 °С порядка 2 %, до 350 °С – порядка 25 %. Присутствие в составе мазутов керосино-газойлевой фракции дает основания для вывода о том, что с течением времени за счет процессов испарения на поверхности моря и растворения в водной толще мазут будет увеличивать плотность.

На рисунке 1а показано изменение плотности для мазута из ВН212 с плотностью при 20 °С (линия 972.7), для мазута без фракций с температурами кипения до 250 °С

(линия 975.2), для мазута без фракций с температурами кипения до 350 °С (линия 1004.5), что соответствует изменению плотности в процессе выветривания. Аналогично для мазута из ВН239 (рисунок 1б). Изменение плотности морской воды различной солености показаны на рисунках 1а, б синими линиями.

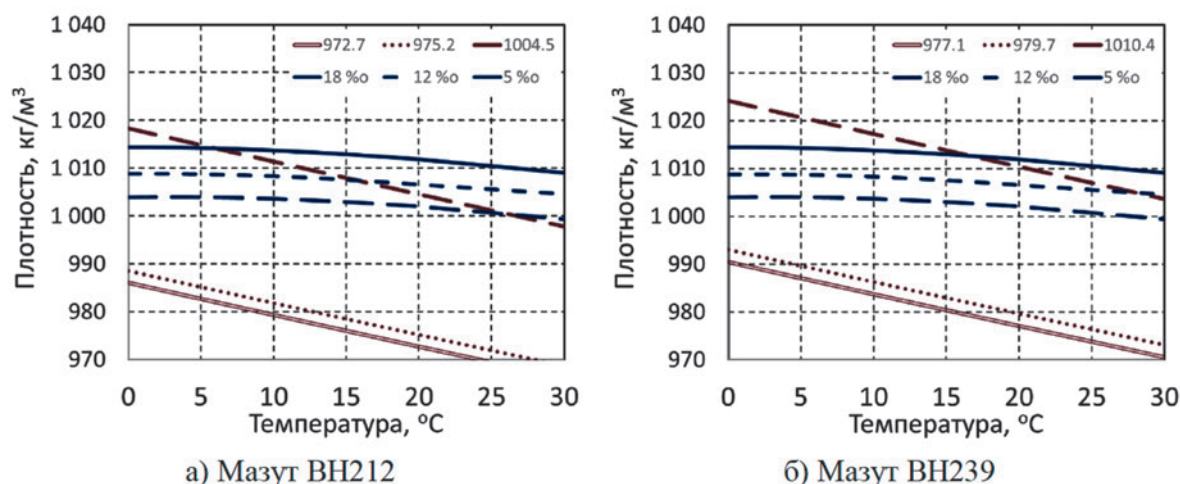


Рис. 1 – Зависимость плотности морской воды при различной солености (5, 12, 18 епс) и мазута танкеров ВН212 (а) и ВН239 (б) от температуры

По результатам исследования мазута (Отчет..., 2025), собранного 21 декабря 2024 г. на пляже Анапы, в Сколковском институте науки и технологий (таблица 1) можно сделать вывод, что «чистый» мазут, претерпевший выветривание в течение недели до попадания на пляжи Анапы, также сохраняет положительную (близкую к нейтральной) плавучесть при температурах вплоть до 5 °С относительно воды с соленостью порядка 18 епс.

Табл. 1 – Результаты определения плотности и вязкости по образцам мазута, отобранных на побережье Анапы

Образец	Плотность, г/см³					Вязкость, сПз			
	40 °С	30 °С	20 °С	10 °С	5 °С	20 °С	30 °С	40 °С	50 °С
Мазут, исходный	0.981	0.987	0.993	0.997	0.997	297900	59340	18420	8762
Мазут, верхний слой	0.991	0.996	1.002	1.007	1.009	*	*	43020	13890

Примечание: * – выше предела определения.

Гидрометеорологические данные

Текущие анализы, прогнозы и реанализ гидрометеорологических полей рассчитывались с помощью СМРП (Дианский и др., 2020). В этой системе необходимые приводные поля метеоданных рассчитывались по региональной негидростатической атмосферной модели WRF с пространственным разрешением 10 км. При этом в первые недели после аварии были использованы поля метеохарактеристик на основе данных метеорологического прогноза COSMO-Ru с пространственным разрешением 6.6 км

(Ривин и др., 2019), ежедневно предоставляемого Гидрометцентром РФ с заблаговременностью 5 суток.

Рассчитанные по атмосферным моделям поля метеопараметров использовались в СМРП для расчетов трехмерных полей гидротермодинамических характеристик с помощью российской модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) (Zalesny et al., 2012; Дианский, 2013; Moshonkin et al., 2018). Следует отметить, что здесь для акватории Керченского пролива и прилегающих акваторий Азовского и Черного морей была реализована версия модели INMOM с переменным пространственным разрешением так, что в акватории Керченского пролива пространственное разрешение модели составляет 120–200 м, а при удалении от него увеличивается до нескольких километров, оставаясь, однако, высоким (не хуже 1 км) в области распространения мазута. Для использования в программном комплексе SPILLMOD результаты гидродинамических расчетов интерполировались на равномерную сетку с пространственным разрешением 500 м.

Поля приводного ветра и морских течений передавались в ПК SPILLMOD с временной дискретностью в 1 час. Примеры полей рассчитанных гидрометеорологических параметров приведены на рисунке 2.

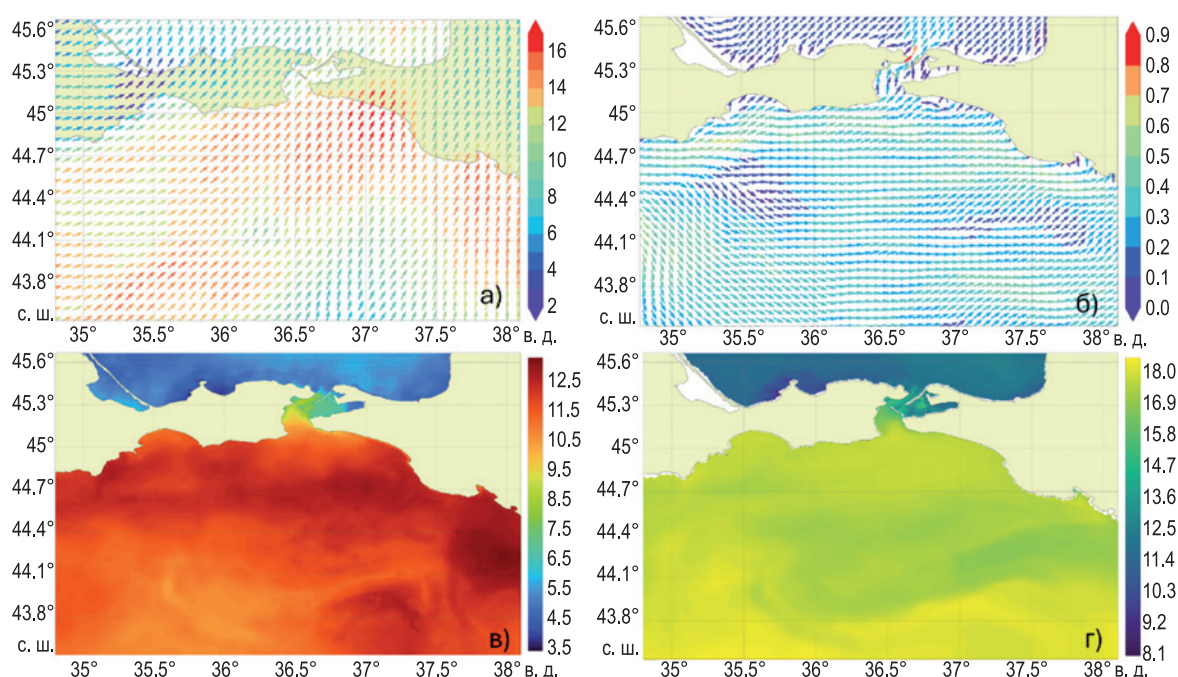


Рис. 2 – Примеры гидрометеорологической информации: скорость ветра на 10 м, м/с (а); скорость течений, м/с (б); температура, °С (в) и соленость воды, епс (г) на поверхности на 12:00 UTC 15.12.2024 г.

Обратим внимание, что для расчета распространения тяжелых видов нефти и нефтепродуктов в дополнение к традиционным полям приводного ветра и поверхностных течений необходимы трехмерные поля плотности (температуры и солености) и течений, в том числе и в придонном горизонте.

Состояние морской среды в районе аварии танкеров характеризуется сезонным изменением температуры и солености в придонном слое моря. На рисунке 3 показано расчетное изменение температуры морской воды в поверхностном (0 м), промежуточном (10 м) и придонном (20 м) слое в районе затопления фрагментов судов. Данные о температуре морской воды подготовлены на основе данных анализа и прогноза Черного моря (BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001), доступным на сайте европейской службы CMEMS¹. Красной пунктирной линией на рисунке 3 показана температура текучести мазута согласно паспортам на перевозимый груз.

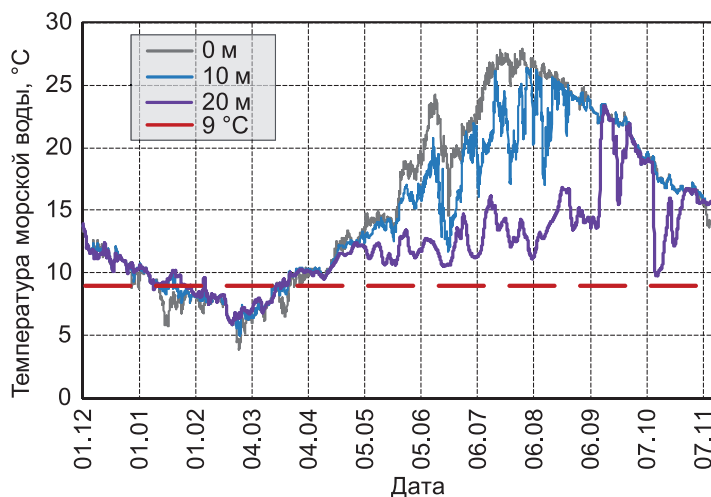


Рис. 3 – Изменение температуры морской воды в районе аварии танкеров в период с 15.12.24 по 07.11.25

Обратим внимание, что в период с декабря 2024 г. по май 2025 г. температура морской воды от поверхности до дна была близка к температуре текучести мазута, что позволяет сделать вывод о том, что в этот период утечки мазута из затонувших фрагментов судов могли быть минимальными из-за огромной вязкости мазута в этом диапазоне температур.

В период сентябрь–октябрь температура в придонном слое поднималась выше 20 °C, что могло приводить к существенному уменьшению вязкости мазута в танках и возникновению новых утечек, вследствие негерметичности затонувших фрагментов судов.

Анализ данных ДЗЗ, проведенный в ИО РАН (Клименко, Иванов, 2025), показывает существенное увеличение площади поверхности моря, покрытой пленкой нефти, в октябре 2025 г. (рисунок 4), причем представленная статистика отражает состояние на 15 октября, когда проводились расчеты.

Заметим, что в месте затопления танкеров имеются значительные иловые отложения, возникшие вследствие осадконакопления при выносе водных масс Дона и Кубани. На оптических снимках хорошо видны шлейфы распространения минеральной взвеси в сторону открытой части Черного моря.

¹ https://data.marine.copernicus.eu/product/BLKSEA_ANALYSISFORECAST_PHY_007_001/description

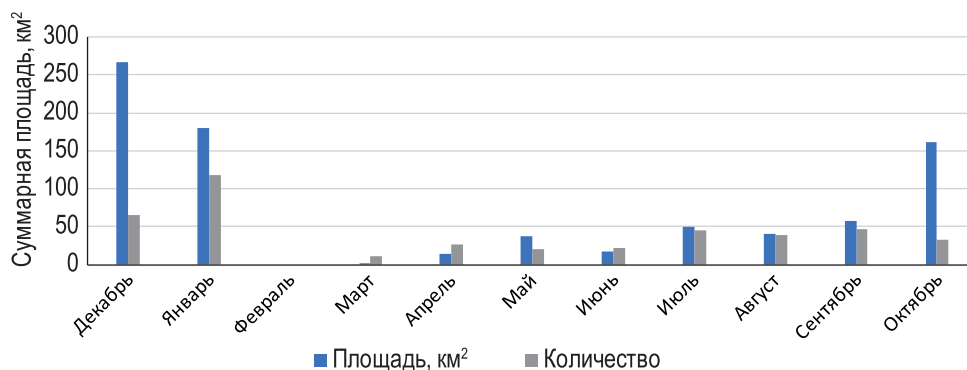


Рис. 4 – Площади разливов нефтепродуктов в районе аварии судов с декабря 2024 г. по 15 октября 2025 г. по данным ДЗЗ

Месторасположение затонувших фрагментов судов находится в западной части черноморского устья Керченского пролива, где глубина моря примерно 20 метров. В этом районе придонные течения имеют преимущественно южное направление. Вынос основной части мазута произошел в мелководную прибрежную зону Анапы в первые дни после аварии судов. Дальнейшее распространение мазута происходило как по поверхности моря, так и путем транспорта песчано-нефтяных агломератов, как варианта *донных отложений*, загрязненных мазутом (Фомин и др., 2025).

Феноменология разлива

Первым выводом, следующим за анализом сведений о физико-химических свойствах мазута, было утверждение, что «чистый» мазут будет распространяться по поверхности моря, и в Черном, и в Азовском морях, при наблюдавшихся в момент аварии температуре и солености морской воды в районе катастрофы и в прилегающих акваториях. С течением времени, в результате удаления низкокипящих фракций из-за выветривания, плотность мазута могла бы увеличиться до значений, когда было бы возможно его погружение на дно, как показано на рисунках 1а, б пунктирной коричневой линией.

На основании результатов, представленных на рисунке 1 и в таблице 1, можно предположить, что при понижении температуры воды *выветрившийся* мазут может опускаться на дно, а при повышении – всплывать. Поскольку для весеннего сезона для Черного и Азовского морей в районе аварии характерен диапазон температур 5 °С–15 °С, можно допустить, что часть мазута, собираясь в комки, будет плавать в притопленном состоянии по причине практически нейтральной плавучести, а при сильном волнении моря – опускаться до дна (см. рисунок 5а).

Результаты фактических наблюдений, проводимых Северо-Кавказским и Крымским УГМС, и расчетных значений полей температуры и солености морской воды дали основания полагать, что после попадания в воду мазут находился в условиях ниже своей температуры застывания, равной 9 °С, указанной в документах на перевозимый груз. Этот показатель означает, что в морской среде с меньшими температурами мазут

будет распространяться в виде комков/лепешек с толщиной до нескольких сантиметров и горизонтальными размерами в десятки сантиметров/метров.

Согласно документам, в перевозимом мазуте содержится до 25 % фракций с температурами кипения до 350 °С. Поэтому, по крайней мере, в первое время после аварии комки мазута на поверхности моря могли быть окружены пленкой легких фракций нефтепродукта.

Близкая к плотности морской воды плотность мазута и высокая вязкость обуславливают его крайне медленное растекание по поверхности воды, а высокая вязкость и большая толщина слоя мазута на поверхности приводит к существенному замедлению испарения и растворения легких фракций (Зацепа и др., 2020).

Факт распространения свежего мазута по поверхности моря подтверждают кадры вытекания мазута от 10 января текущего года из кормовой части танкера «Волгонефть-239», севшей на мель у берега Тамани². Вытекший из танкера мазут был локализован с помощью боновых ограждений. В связи с тем, что плотность мазута в это время была близка к плотности морской воды, толщина слоя мазута на поверхности моря достигала десятков сантиметров, вследствие чего боновые ограждения при сильном волнении частично пропускали мазут за пределы ограждения.

По опыту аварии с танкером «Волгонефть-248» в 1999 г. были основания предполагать, что при выходе в мелководные прибрежные районы мазут может связываться с минеральной взвесью и опускаться на дно.

Существует три основных механизма, приводящих к затоплению нефти. Первый, когда плотность исходной нефти больше плотности окружающей воды; второй, когда плотность исходной нефти со временем становится выше плотности воды за счет выветривания; и третий, когда нефть образует конгломераты с минеральной взвесью, водорослями и морским мусором. Есть еще четвертый тип увеличения плотности нефти на поверхности моря – при сжигании нефти на поверхности воды. При этом остаток от горения также опускается на морское дно. В случае РМКП-2024, по-видимому, имел место третий вариант затопления разлива мазута. Это также подтверждается результатами отчета Сколковского института.

Феноменология образования таких конгломератов матов представлена в (Jacqueline and Bambach, 2022). Плотность мазута является одним из ключевых показателей, определяющих, будут ли образовываться конгломераты с последующим опусканием на дно как затопленные нефтяные маты (ЗНМ). Другим ключевым свойством нефти, приводящим к образованию ЗНМ, является вязкость. Нефть с высокой вязкостью содержит большее количество асфальтенов и смол, которые делают ее «липкой». Вязкость и адгезия (лабораторный показатель липкости) взаимосвязаны (National Academies of Sciences..., 2016). Как правило, нефтепродукты с низкой вязкостью также обладают низкой адгезией. В работе (Jacqueline and Bambach, 2022) сделан вывод, что ЗНМ с большей вероятностью образуются из плавающей нефти с вязкостью от ~10 000 до 100 000 сантипуазов (сП). Обратим внимание, что вязкость образцов мазута, *собранных*

² <https://t.me/opershtab23/10237>

на пляже Анапы спустя неделю после попадания в морскую среду, по результатам измерений составляла сотни тысяч СП (см. таблицу 1). Более низкая вязкость снижает вероятность прилипания нефтепродукта к песку и образования когезионных песчано-нефтяных слоев или комков смолы. При более высокой вязкости песку труднее проникнуть внутрь слоя нефти и сделать его плотнее воды.

Для образования ЗНМ важна также морфология прибрежной зоны и наличие приглубых участков с пониженной энергией волн, где песчано-нефтяные конгломераты могут накапливаться. Связывание нефти с песком происходит либо в прибрежной зоне, где частицы песка поднимаются волнами, либо непосредственно на берегу. И в том, и в другом случае песчано-нефтяные конгломераты, имеющие «стартовую» плавучесть, близкую к нейтральной, скапливаются во впадинах морского дна. Согласно (Jacqueline and Bambach, 2022), образование ЗНМ маловероятно в условиях сильного волнения, когда нефть «рассеивается», а пляжные отложения переносятся в сторону моря, или в условиях слабого волнения, когда в зоне прибоя мало взвешенного песка. Маловероятно, что ЗНМ образуются в результате взаимодействия с отложениями, состоящими из ила, так как мелкодисперсные отложения плохо связываются с нефтью или с гравием, который, будучи очень крупным, может удерживаться во взвешенном состоянии только очень большими волнами, а они, в свою очередь, «рассеивают» нефть.

Затопленные нефтяные маты были обнаружены на дне моря недалеко от берега Анапы спустя месяц после аварии, когда на берег, с которого был убран мазут, вновь стало выносить мелкие комки мазута.

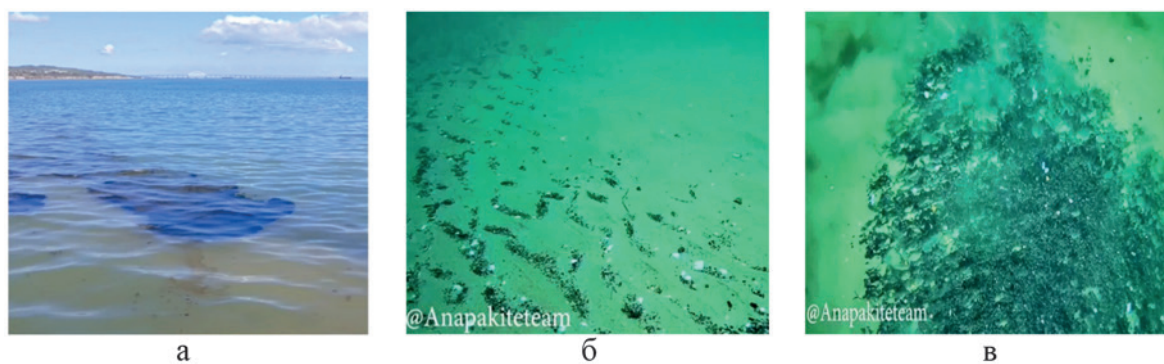


Рис. 5 – Фото плавающего и затонувшего мазута: **а** – плавающий под поверхностью мазут³ (Керчь, 13.04.25), **б** – затопленные нефтяные маты⁴ под песком (Анапа, 03.02.25), **в** – затопленные нефтяные маты без песка (Анапа, 03.02.25)

Вынос на берег комков мазута в течение длительного времени после аварии – свидетельство залегания на дне ЗНМ. Так, например, после разлива нефти на платформе Deep Water Horizon ЗНМ образовались во многих районах Мексиканского залива и были источником повторного загрязнения пляжей в течение 4 лет (Jacqueline and Bambach, 2022).

³ <https://t.me/ecozhora/5234>

⁴ <https://t.me/anapakiteteam/1222>

Мониторинг ситуации

В день аварии штормовые условия не позволили надежно обнаруживать нефтяные разливы на поверхности моря средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Фиксировались лишь фрагменты общего загрязнения. Впервые зона разлива в разрывах облачности была обнаружена на оптических снимках MODIS/Terra и Pleiades-1A от 16.12.2024, однако анализ этих данных не позволил сделать однозначные выводы о характере и масштабе разлива. Только благодаря радиолокационным изображениям, полученным 18.12.2024 и 19.12.2024, было установлено, что источниками разлива в открытом море являются две части затонувшего танкера «Волгонепфть-212» и носовая часть танкера «Волгонепфть-239». Более обстоятельный обзор спутникового мониторинга приведен в работе (Лаврова и др., 2025).

Отметим, что обнаружение тяжелых типов нефти на поверхности моря, которые в результате высокой плотности практически полностью погружены в воду, имеет особенности. Обнаружение нефти на поверхности моря, покрытой пленкой нефтепродуктов, с помощью радиолокации основано на изменении параметров ветрового волнения. При разливе мазута такие пленки могут не создавать сплошного покрытия области загрязнения, а лишь окружать комки мазута, плавающие на поверхности.

Несмотря на отмеченные выше недостатки, альтернативы ДЗЗ для мониторинга разливов нефти, распространяющихся на десятки и сотни километров от места аварии, пока, по-видимому, нет. Фиксация областей загрязнения в конкретные моменты времени служит хорошим способом верифицирования результатов прогнозов распространения нефтяных загрязнений. На рисунках ба, б показаны дешифрованные по данным ДЗЗ (КА RADARSAT, 20-12-2024 15:13 UTC) области нефтяного загрязнения (белая область на рисунке ба, желтый контур на рисунке бб), протянувшиеся от места затопления танкера ВН239 в северном направлении, и расчетный шлейф на этот момент времени, показанный красным контуром. Шлейф довольно узкий, так как растекание мазута происходит крайне медленно. На рисунке ба показана область мазутного шлейфа (белый контур), дешифрованная в ИО РАН (Клименко и др., 2025), на рисунке бб – желтый контур выделяет шлейф по данным ДЗЗ канадского спутника (RCM, 21.12.2024 01:18 UTC), приведенных на сайте Хартии «Космос и стихийные бедствия»⁵. Обратим внимание на красный контур мазутного загрязнения севернее Крымского моста на рисунке ба. Похожие контуры нефтяного загрязнения присутствует на снимке канадского спутника. В модельных расчетах «северная часть» шлейфа возникает как результат взаимодействия мазутного пятна с берегом Таманского полуострова в предшествующие спутниковой съемке дни.

Сравнение данных ДЗЗ и модельных расчетов следует проводить с необходимым комментарием, что существует ряд причин, затрудняющих интерпретацию спутниковых радиолокационных изображений и выделение на них нефтяных загрязнений, которые нелегко отличить от проявлений других явлений и объектов, называемых

⁵ <https://disasterscharter.org/activations/oil-spill-in-russian-federation-activation-937>

РЛ-подобиями пятен (Лаврова и др., 2016). С другой стороны, модельные шлейфы нефтяного загрязнения существенно зависят от сведений об интенсивности источника сброса и его продолжительности.

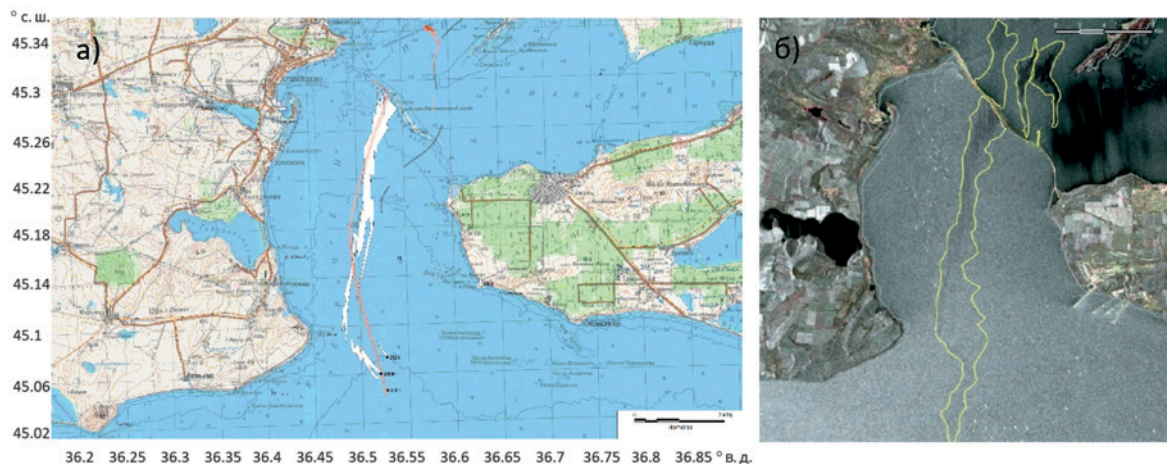


Рис. 6 – а) Сравнение конфигурации разлива по результатам моделирования (показана красным) и по данным ДЗЗ с КА RADARSAT, 20-12-2024 15:13 UTC (белый контур, по материалам ИО РАН); б) то же самое по данным ИКИ РАН показано желтым контуром

С учетом неизбежной погрешности гидрометеорологического прогноза, сравнение модельных расчетов и фактического определения области нефтяного загрязнения по данным ДЗЗ, приведенное на рисунке 6а, можно считать удовлетворительным.

Источник сброса

Моделирование распространения мазута как математическая задача начинается с задания исходных условий. Какова интенсивность истечения мазута? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо рассмотреть условия катастрофы танкеров. Во всех трех случаях, упомянутых выше, во время шторма танкеры разламывались надвое. Возникал т.н. гильотинный разрыв, когда нефтяной танк с размерами примерно $24 \text{ м} \times 4.4 \text{ м} \times 6.8 \text{ м} \approx 718 \text{ м}^3$ опускался на дно, и через открытую боковую стенку за счет сил плавучести мазут поднимался к поверхности, как показано на рисунках 7а, б.

Трудность оценки времени вытекания мазута из такого резервуара осложняется несколькими причинами. Во-первых, во время транспортировки мазут в танках подогревается до температуры 30–40 °С (РД 31.27.05-99). По этой причине в момент разлома танкера вязкость мазута могла составлять порядка 1000 сП, однако при контакте с морской водой температура мазута понижается, а при температуре близкой к температуре застывания (9°) вязкость увеличивается до значений в сотни тысяч сантипуазов (Отчет..., 2025). При температурах близких к температуре застывания мазута его реология может отличаться от реологии ньютоновской жидкости. Вязкий мазут обладает свойством налипать на стенки резервуара и прочно удерживаться на них тем большим слоем, чем ниже температура.

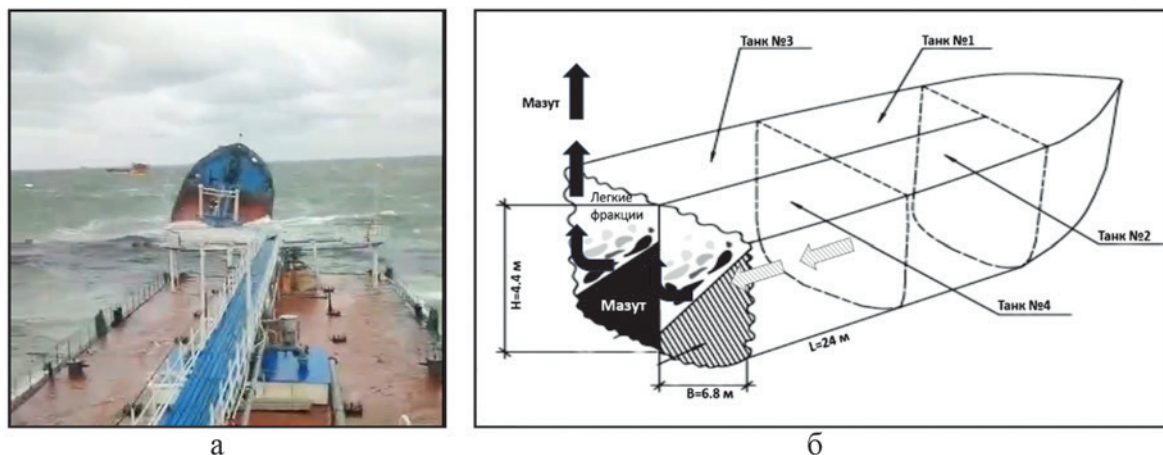


Рис. 7 – Фото⁶ разлома танкера ВН212 15 декабря 2024 года (а) и схематизация выхода мазута на поверхность моря (б)

Вообще говоря, вытекание вязкой ньютоновской жидкости из резервуара теоретически бесконечно и происходит либо по экспоненциальному, либо по степенному закону, в зависимости от выбранной модели течения. Представляется вероятным два режима вытекания мазута со дна моря из танков с открытой стенкой – гравитационно-инерционный и гравитационно-вязкий. При высокой вязкости (вблизи точки застывания) мазута гравитационно-инерционным режимом, по-видимому, можно пренебречь, так как число Рейнольдса будет небольшим:

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\sqrt{g'H} \cdot H}{\nu} \approx \frac{4.4\sqrt{0.3 \cdot 4.4}}{0.250} \approx 20, \quad (1)$$

где $L, U = \sqrt{g'H}$ – масштабы длины и скорости; $g' = g(\rho_w - \rho_o) / \rho_w$; ρ_w, ρ_o – плотности воды и мазута соответственно; g – ускорение силы тяжести; H – высота нефтяного танка; ν – кинематическая вязкость мазута.

В первые моменты времени толстый слой мазута под действием сил плавучести выталкивается из резервуара, а в дальнейшем возможно формирование течения типа Хагена-Пуазейля. С учетом возможной неньютоновской реологии мазута вблизи точки застывания можно предположить, что мазут будет медленно сползать под действием плавучести, как ледник или вулканическая лава. Основное сопротивление будет создаваться за счет прилипания к верхней и боковым стенкам резервуара. Сдвиговое течение будет локализовано в тонком слое у верхней стенки, где градиенты скорости максимальны.

При открытой боковой стенке танка течение мазута не происходит равномерно по всей высоте. Из-за большой вязкости и быстрого охлаждения у поверхности воды формируется застывший слой, который сужает эффективную область истечения. Фактически, мазут вытекает через узкий канал в верхней части танка, где температура еще сохраняется достаточно высокой для течения. Авторы провели эксперимент, в котором в роли вытекающего

⁶ <https://www.vesti.ru/article/4268750>

мазута рассматривалось вытекание меда с вязкостью порядка 15000 сСт из резервуара, расположенного на некоторой высоте от лабораторного стола. Фото экспериментальной установки на рисунках 8а, б, в. Длина резервуара – 68 мм, высота и ширина – 25 мм. Римскими цифрами на рисунке 8в обозначены профили свободной поверхности вытекающей жидкости (мед) через промежутки времени 1, 3, 5, 16 и 40 секунд. Вытекание меда из резервуара практически закончилось (80 %) через 100 секунд. Далее капиллярные эффекты существенно ограничили скорость вытекания. В натуральных условиях мазут, в отличие от эксперимента, вытекает под действием силы плавучести вверх к поверхности моря.

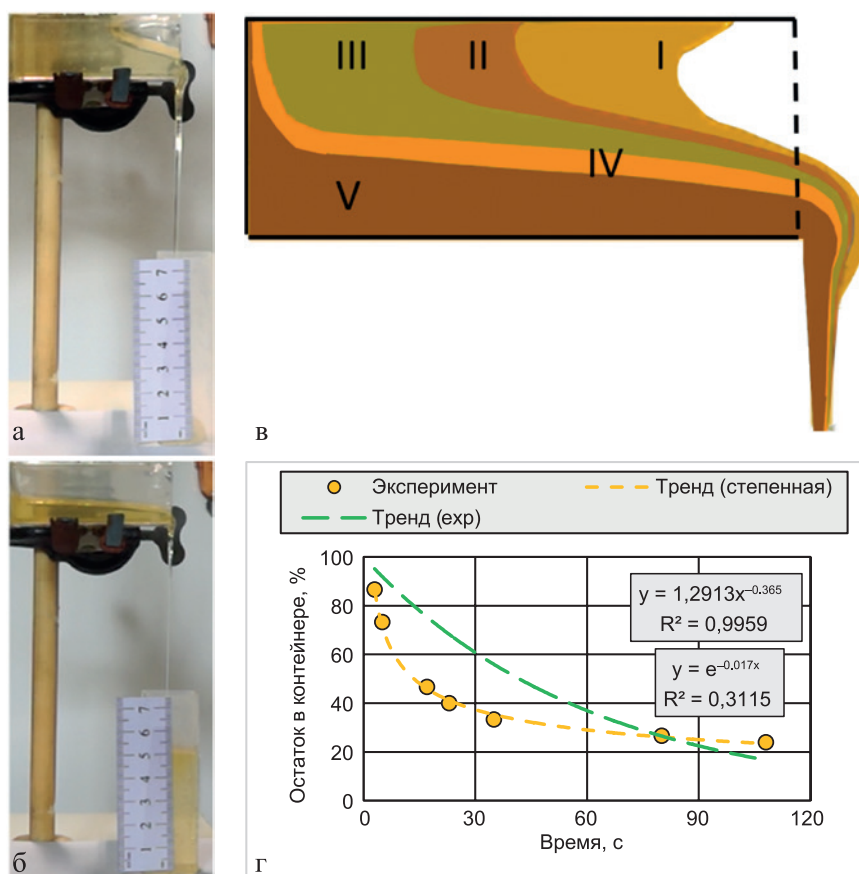


Рис. 8 – Схема экспериментальной установки, фото вытекающей жидкости через 2 секунды (а) и 40 секунд (б) после начала «сброса», схематизированные профили свободной поверхности вытекающей жидкости (в), аппроксимация эксперимента линиями тренда (г)

Проведенный эксперимент дает основания для предположения, что вытекание мазута будет происходить относительно тонким слоем через открытую боковую стенку нефтяного танка. Обозначим толщину этого слоя, как δ . Баланс количества жидкости (мазута) в резервуаре:

$$\frac{dV}{dt} = -Q, \quad (2)$$

где V – объем мазута в танке, Q – поток мазута наружу.

Поток на единицу ширины резервуара аппроксимируем решением Пуазейля для течения в плоском канале с перепадом давления:

$$\Delta P = \rho_o g' H, \quad (3)$$

$$Q = \frac{\delta^3 g' H}{12 \nu L}, \quad (4)$$

где L – длина нефтяного танка. Обратим внимание, что, учитывая наблюдавшиеся в эксперименте профили свободной поверхности жидкости (рисунок 8в), соотношение (3) может считаться лишь предварительной оценкой. Кроме того, аппроксимация результатов эксперимента степенной зависимостью оказывается лучшим приближением в сравнении экспоненциальной (см. рисунок 8г). Однако, тенденция к существенному уменьшению «мощности» источника мазута со временем имеет место в обоих вариантах.

Из (2) и (4) получаем, что изменение объема мазута в резервуаре, пропорционального его текущей толщине $H(t)$ (по высоте), будет описываться экспоненциальной зависимостью.

$$H(t) = H_o e^{-t/\tau}, \quad \tau = \frac{12 \nu L^2}{\delta^3 g'}. \quad (5)$$

Пусть $L = 24$ м, $H = 4.4$ м, $\nu = 0.25$ м²/с, $g' = 0.3$ м/с². Оценки временных параметров вытекания приведены в таблице 2.

Табл. 2 – Оценки характеристик вытекания мазута из танка

Толщина вытекающего мазута δ , м	Постоянная времени τ , час	Время полного (99 %) опустошения, сутки	Количество вытекшего мазута, %		
			1 сутки	2 суток	3 суток
0.3	60	11,5	32	55	69
0.4	25	4,7	61	85	94
0.5	12	2,3	87	98	99

Количество мазута, попавшего в море 15 декабря, оценивалось как 3400 тонн, а спустя две недели в пресс-релизе Минтранса была названа цифра в 2400 тонн.

Кроме очевидных трудностей с оценкой потока мазута, вытекающего из затонувших танкеров, необходимо принять во внимание наличие нескольких источников загрязнения моря нефтепродуктами, определение местоположения которых также представляло некоторые сложности из-за дрейфа фрагментов танкеров под действием ветра и течений.

Из официальной информации: «15 декабря 2024 г. 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» (Обзор аварийности..., 2024; Сборник..., 2025).

«15 декабря 2024 г. 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» (Обзор аварийности..., 2024; Сборник..., 2025).

На рисунке 9 показано положение точек сброса по данным информации из Морского спасательного координационного центра (МСКЦ) и по данным ДЗЗ. Данные МСКЦ показаны белыми треугольниками на рисунке 9, место выноса на мель кормы ВН239 – фиолетовым треугольником. Итоговое положение фрагментов танкеров на дне моря удалось установить по шлейфам утечек нефтепродуктов (черные точки), зафиксированных на космическом снимке⁷. Обозначения местоположения кормы танкера «Волгонефть 212» – 212 К, носовой части – 212 Н. Аналогично для фрагментов танкера «Волгонефть 239».

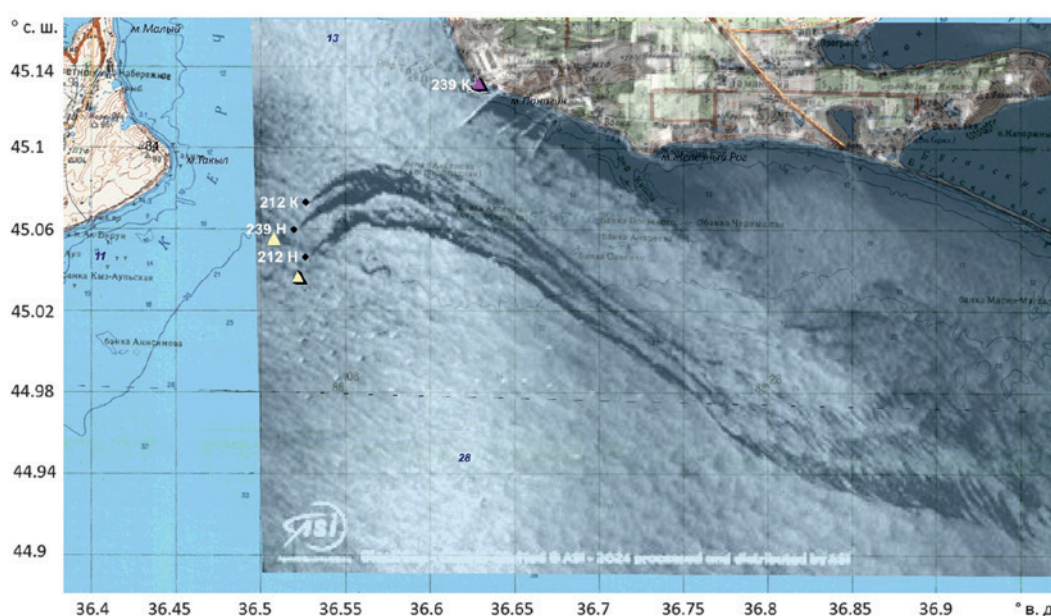


Рис. 9 – Положение точек разлома танкеров и фактического их положения на дне моря по данным РЛИ COSMO-SkyMed-1 19.12.2024, 02:57 UTC

Кроме приведенной информации о времени и месте крушения судов, есть данные от Морской спасательной службы о том, что носовая часть и корма танкера «Волгонефть-212» ушли под воду 15.12.2024 г. в 12:58 МСК. Таким образом, есть некоторая неопределенность в оценках времени и координат вытекания нефти из танкеров в морскую среду. Принимая во внимание, что под воду ушли и носовые, и кормовые части танкера, можно предположить, что в морскую среду могут поступать, кроме перевозимого груза, другие нефтепродукты, такие как топливо для двигателей и другие смазочные материалы.

Резюмируя анализ доступных материалов, необходимых для задания начальных условий в математической задаче об определении последующих конфигураций разлива, отметим, что практически все компоненты – Где? Когда? Сколько? – в первые дни после аварии были известны с существенными погрешностями.

⁷ https://www.asi.it/wp-content/uploads/2024/12/mar_nero_stretto_kerch-1-1.jpg

Моделирование распространения мазута – прогнозы и реконструкция

Для моделирования распространения мазута был использован программный комплекс SPILLMOD (Ивченко и др., 2019). В программном комплексе реализована современная модель разлива нефти и нефтепродуктов гидродинамического типа (Zatsepa et al., 2022; Solbakov et al., 2025). Расчеты проводились как на основании прогностической информации о гидрометеорологических условиях (прогнозы на 2–3 суток), так и по результатам реанализа метеорологических полей (реконструкции на срок до 3–4 недель). На рисунке 10 приведены расчетные конфигурации с 16 декабря 2024 г. по 08 января 2025 г. (каждые сутки) области загрязнения моря мазутом в предположении, что вытекание нефтепродукта продолжается непрерывно. Начало вытекания было задано в 9 часов МСК 15 декабря 2024 г. в соответствии с данными МСКЦ. Модельный комплекс SPILLMOD включает в себя модели адвекции и растекания нефтепродукта, модели выветривания – испарения и диспергирования, приводящие к изменениям вязкости и плотности нефтепродуктов. Для моделирования была использована информация о береговой линии Черного моря по материалам ЕКО ЕСИМО масштаба 1:500000. Аккумуляционные свойства берегов задавались единообразно, ориентируясь в основном на песчаный характер берегового ландшафта.

Даты и время для каждой конфигурации области загрязнения приведены рядом с красными шлейфами. Дата и время рядом с береговым контуром соответствуют выходу мазутного загрязнения на побережье по результатам моделирования. Толстая *цветная* линия вдоль побережья указывает на районы выхода разлива на берег, в соответствии с расчетами на основании использованной гидрометеорологической информации. Цветовая шкала приведена для оценки примерного количества мазута на погонный метр береговой линии в предположении вытекания нефтепродукта с постоянной интенсивностью утечки. Каждая из синих стрелок на рисунке 10 указывает на *одну* из последовательных конфигураций области нефтяного загрязнения, рассчитанных в предположении непрерывного поступления мазута на поверхность моря.

Спустя месяц после катастрофы танкеров стало бессмысленным считать утечку мазута как продолжающуюся. Начиная с середины января, моделирование проводилось на основании данных ДЗЗ. Обнаруженные на оптических и радиолокационных снимках области пленочного загрязнения обрабатывались и представлялись в форме данных ГИС, которые в свою очередь принимались в качестве начального состояния разлива в ПК SPILLMOD (Зацева и др., 2018). Более 100 спутниковых снимков с января по декабрь 2025 г., зафиксировавших пленочные загрязнения в районе затопленных фрагментов судов, были обработаны авторами, результаты прогнозов распространения детектированных областей загрязнения были переданы в НЦУКС МЧС. Как следует из рисунка 4, в летние месяцы количество обнаруженных сликов на поверхности моря, связанных с затонувшими фрагментами танкеров, увеличилось. Так, *например*, по результатам ДЗЗ от 22 августа 2025 г. в северо-восточной части Черного моря в районе крушения танкеров и на акваториях, подвергшихся воздействию разлива мазута от Анапы до Севастополя, *были зафиксированы области загрязнения пленочного типа, неподтвержденного генезиса* (см. рисунок 11).



Рис. 10 – Расчетные конфигурации распространения разлива мазута в период с 16 декабря 2024 г. по 08 января 2025 г.

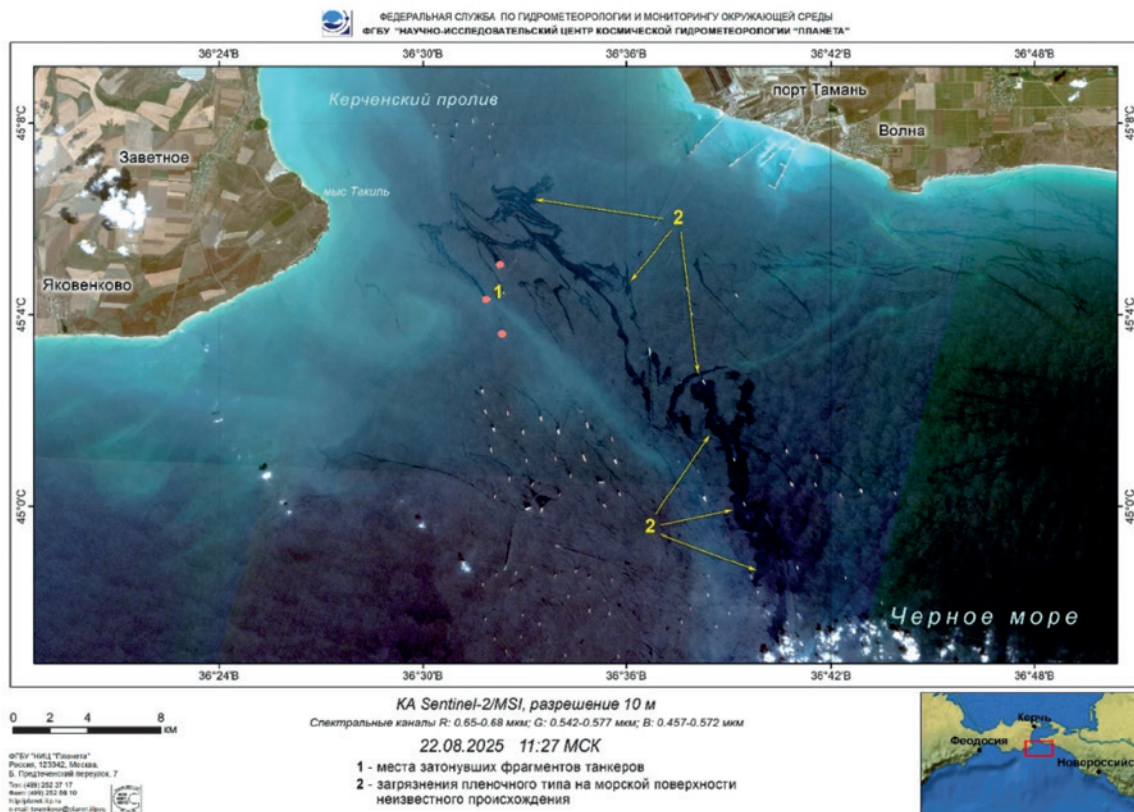


Рис. 11 – Вероятные пленочные загрязнения неподтвержденного генезиса в южной части Керченского пролива 22 августа 2025 г.

На оптическом снимке с КА Sentinel-2/MSI видно большое количество судов (белые точки) южнее района с затопленными фрагментами танкеров, показанными красными кружками. Целью космического мониторинга являются возможные утечки из фрагментов танкеров. Желтыми стрелками на снимке указано на возможные области загрязнения акватории нефтепродуктами.

На основании результатов гидрометеорологического прогноза были рассчитаны последовательные конфигурации распространения областей обнаруженного пленочного загрязнения неподтвержденного генезиса по результатам обработки данных ДЗЗ от 22 августа 2025 г., показанные на рисунке 12. Серым цветом на рисунке 12 показаны контуры загрязнения по данным ДЗЗ на 11:27 МСК 22 августа 2025 г., красным – результаты расчетов.

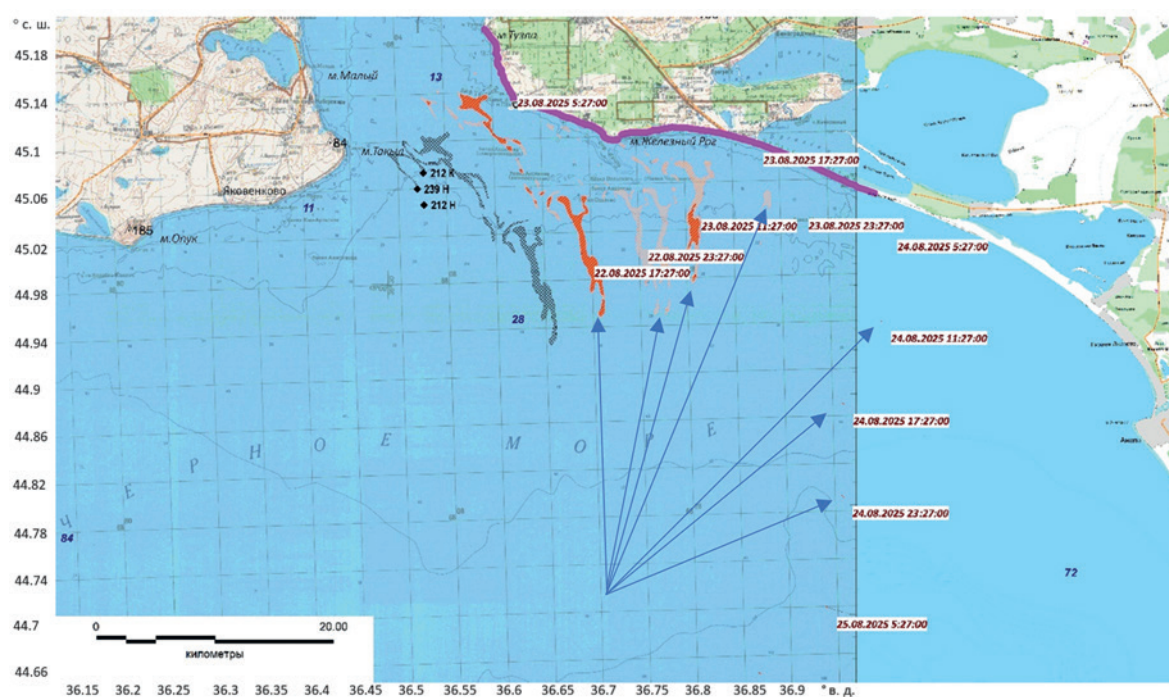


Рис. 12 – Возможное распространение выявленных областей пленочного загрязнения акватории неподтвержденного генезиса на период до 25 августа 2025 г. (по данным ДЗЗ от 22 августа 2025 г. 11:27 МСК)

Сложившаяся в это время гидрометеорологическая обстановка обуславливала распространение выявленных областей пленочного загрязнения неподтвержденного генезиса в восточном направлении. Фиолетовая линия показывает участки береговой линии, на которых было возможно появление нефтепродуктов. Синими стрелками указаны положение и конфигурации детектированных областей загрязнения акватории. Из результатов моделирования следует, что основная часть загрязнения была вынесена на берег к вечеру следующих суток, а оставшаяся часть продолжила дрейф в южном направлении. Представленное на рисунке 12 возможное распространение обнаруженных загрязнений следует рассматривать как консервативный прогноз в предположении, что никакие меры борьбы с разливом не предпринимаются. По сообщению Морской

спасательной службы шлейфы нефтепродуктов в районе затонувших фрагментов танкеров обрабатываются биоразлагаемыми сорбентами для удаления их с поверхности моря. Наблюдения за распространением областей загрязнения в предшествующий период (июль–август) показали, что далее 30 км от места выхода на поверхность шлейфы нефтепродуктов, обработанные сорбентами, не распространяются. При наличии в детектированной области тяжелых фракций нефтепродуктов они могли быть вынесены на участки побережья, отмеченного на рисунке 12 фиолетовой линией.

Дешифрирование космических снимков в настоящее время не позволяет определять количество/толщину и тип нефтепродукта на поверхности моря и, как следствие, невозможно с помощью моделей аргументированно оценивать выветривание обнаруженных загрязнений. По этой причине прогнозирование велось на срок 2–3 суток, а в случае обнаружения ранее детектированного пятна нефтепродуктов могло быть продолжено.

Обсуждение

Общий принцип реагирования на морские разливы нефти⁸ – проведение локализации и ликвидации разливов на море, недопущение выхода разливов на побережья. Разливы мазута в Черноморском регионе никогда не ликвидировались на море. В чем причины?

На наш взгляд, проблемы связаны со свойствами перевозимых мазутов и метеорологических условиями. Мазуты обладают высокой вязкостью, препятствующей использованию традиционных скиммеров для сбора нефти и нефтепродуктов с морской поверхности, с одной стороны, а рассматривать мазут в море как морской мусор и собирать сетями не позволяет их текучесть. Указанная проблема была отмечена и ранее, почти полвека назад, во время ликвидации аварии танкера *Globe Asimi* в порту Клайпеды 21 ноября 1981 г. (Катастрофа..., 1990). Плаучесть мазута, близкая к нейтральной, приводит к его распространению в верхнем слое моря, а не только в виде пленки на поверхности моря, что затрудняет локализацию боновыми заграждениями. Еще одной причиной, обусловившей серьезные экологические последствия всех перечисленных выше аварий, явились штормовые условия. При шторме невозможна локализация разливов нефти на море, а близость берега приводит к быстрому выносу загрязнения на него. Поэтому конкретные метеорологические ситуации (туманы, темное время суток, шторм и пр.), когда немедленное реагирование на разлив нефти невозможно, следует анализировать и учитывать при подготовке Планов предупреждения и ликвидации разливов нефти (Зацепя и др., 2023).

Данные ДЗЗ после катастрофы танкеров были доступны весьма нерегулярно. Причинами этого являются недостаточность спутниковых ресурсов, которые можно было использовать, и штормовые погодные условия, препятствующие идентификации

⁸ Здесь и далее под термином нефть будем обозначать как сырую нефть, так и нефтепродукты, в том числе, мазут.

нефтяных пленок на поверхности моря. В большинстве случаев верификация модельных расчетов проводилась на основании заявлений волонтеров и спасателей, сохранившихся в телеграмм-каналах и материалах СМИ.

Отметим, что время и места выхода мазута на побережье, отмеченные на рисунке 10, в целом совпали с результатами берегового мониторинга, но необходимы комментарии. Так, в первые дни после аварии в качестве консервативного сценария рассматривалось непрерывное вытекание мазута от района аварии, т. е. источник был задан как точечный и непрерывный во времени. Это предположение привело к завышенным оценкам загрязнения береговой зоны Крыма. Для моделирования распространения нефти и нефтепродуктов важно задание аккумулярующих свойств побережий, отражающих свойства разных типов берегов удерживать на себе нефтепродукты (Etkin et al., 2007; Gundlach, 1987). Для повышения точности моделирования разливов необходимо, чтобы каждый участок береговой линии был описан отдельно. В противном случае неизбежны существенные ошибки, связанные с формированием вторичных источников загрязнения. В ситуации с РМКП-2024 оказалось, что значительная часть мазута осела на дно в прибрежной зоне Анапы, что нетипично для легких и средних типов нефти. Это обстоятельство, по-видимому, нельзя не принимать во внимание при моделировании распространения тяжелых видов нефти и нефтепродуктов.

Оценки изменения потока мазута из фрагментов танкеров, приведенные выше, дают основания для вывода о том, что значительная часть (~50 %) нефтепродукта вышла на поверхность моря в первые сутки после разлома судов, а в следующие сутки – до 80 %. Шлейф мазута, вследствие высокой плотности и вязкости, на поверхности моря представлял не пленочное загрязнение, а толстый «ковер» с толщинами в несколько сантиметров. Метеорологические условия 15 и 16 декабря привели к формированию огромного многокилометрового мазутного шлейфа, который из-за перемены ветра в ночь на 17 декабря был вынесен на черноморское побережье Краснодарского края от поселка Волна до Анапы. Благодаря высокой липкости (адгезии) мазутного ковра к различным материалам он легко связывался с песком, морскими водорослями и прочим морским мусором, образуя конгломераты с отрицательной плавучестью. Эти конгломераты образовывали затопленные нефтяные маты, с течением времени покрывавшиеся слоем песка. Таким образом, в последующие дни и недели после аварии из затопленных фрагментов танкеров, отмеченных на рисунке 9 черными точками, продолжал вытекать мазут, однако с интенсивностью на несколько порядков меньше, чем в первые часы. По этой причине, мазутный шлейф, развернувшийся в северном направлении 20 декабря (см. рисунок 6), представлял собой не сплошной мазутный ковер, а цепочку отдельных комков или блинов нефтепродукта, принимая во внимание высокую температуру застывания мазута в 9 °С. Этот шлейф, вытянувшийся в сторону северной части пролива и далее в Азовское море, привел к очаговому загрязнению и Таманского, и Крымского побережий.

В третьей декаде декабря сильный северо-восточный ветер привел к распространению мазутного загрязнения вдоль побережья Крыма, в начале января загрязнение фиксировали в районе Севастополя. Результаты моделирования подтверждают

возможность выноса «керченского» мазута на западное побережье Крыма, однако, принимая во внимание уменьшающуюся интенсивность вытекания мазута, есть основания для вывода, что эти загрязнения также имели очаговый характер. Спутниковые снимки, зафиксировавшие в отдельные дни третьей декады декабря загрязнение южнее мыса Опук, в районе Алушты, на траверзе Балаклавской бухты, подтверждают этот вывод. По информации МЧС⁹ России «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». Приведенные цифры подтверждают, что уровень загрязнения мазутом побережья Анапской агломерации на 2–3 порядка превышает уровень загрязнения Крымского побережья. Синие стрелки на рисунке 10 указывают на конфигурацию рассчитанного по модели SPILLMOD мазутного шлейфа на 2 января 2025 г. Принимая во внимание вышеприведенные рассуждения об источнике сброса мазута на поверхность моря, следует рассматривать эту и «соседние» (по времени) конфигурации области нефтяного загрязнения как области, внутри которых дрейфовали отдельные комки или «блины» (см. рисунок 5а) мазута. Указанные выше свойства перевозимого танкерами мазута марки M100 – практически нейтральная плавучесть, высокая вязкость и высокая температура текучести, приводят к тому, что мазут плавает в море не в виде поверхностных пленок, а в виде комков, практически не подверженных разрушению и распространяющихся как по поверхности воды, так и в водной толще.

Отдельные комки мазута могли быть вынесены морскими течениями за пределы экономической зоны РФ, однако в данном случае их стоит рассматривать как субстрат или морской мусор, количество которого невелико, а возникающие области загрязнения как очаговые, не приводящие к заметным экологическим последствиям. В (Ansell et al., 2001) содержатся сведения о загрязнении сотен километров береговой линии в результате дрейфа и выноса на берег фрагментов разливов тяжелых типов нефти при некоторых инцидентах.

Все вышеизложенные рассуждения об особенностях моделирования распространения мазута необходимо принимать во внимание при анализе проведенных расчетов.

Большой объем работ по информационной поддержке специализированных служб, занятых в компании по ликвидации последствий РМКП-2024, был проделан в МГИ РАН (Кубряков и др., 2025). Созданный в МГИ программный комплекс FOTS и функционирующая система диагностики и прогноза состояния Черного и Азовского морей позволили рассчитать времена и места выхода мазутного загрязнения на побережье Крыма и Краснодарского края. Вместе с тем отметим, что особенности РМКП-2024 – свойства перевозимого мазута, оценка интенсивности его вытекания из нескольких затопленных фрагментов, в цитированной работе не были проанализированы.

⁹ <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/5577800>, доступ 15/08/2025.

К большому сожалению, в настоящее время не созданы физико-математические модели и алгоритмы, позволяющие надежно описывать образование и расположение затопленных нефтяных матов. Эти маты, сформировавшиеся на мелководьях вдоль береговой полосы Бугазской косы и Анапы, имеют слабо отрицательную плавучесть и в периоды штормов могут разрушаться на фрагменты, которые будут выноситься на берег спустя недели и месяцы после инцидента.

Уборка мазута с песчаных пляжей Анапы, согласно утверждениям волонтеров, осложнялась загазованностью в районе проведения работ за счет испарения легких фракций мазута, в том числе и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Этот крайне токсичный компонент, присутствующий в мазуте, выветривался в течение нескольких месяцев. Причиной столь долгой загазованности пляжной полосы могло быть существенное замедление испарения ПАУ из толстых слоев высоковязкого нефтепродукта (Зацепя и др., 2020).

Заключение

Произошедший в Керченском проливе 15 декабря 2024 г. разлив мазута привел к огромному ущербу для курортных зон Краснодарского края и прибрежных экосистем, который по данным Росприроднадзора оценивается в 84 млрд рублей (https://t.me/government_rus/19930). Особенностью этой и других подобных аварий на море является нелокальный характер воздействия на социально-экономические, курортные и экологические объекты, часть из которых могут отстоять от района аварии на десятки и сотни километров. Как отмечено в (Ansell et al., 2001), серьезность (и стоимость) разлива нефти определяют различные факторы, включая тип нефти, ее количество, интенсивность и продолжительность сброса, физические, биологические и экономические характеристики места разлива, погодные и морские условия, эффективность очистки. Из этих факторов одним из наиболее значимых является тип нефти, при этом тяжелые мазуты являются одними из наиболее проблемных из-за их высокой вязкости, которая более выражена в холодной воде и в зимние месяцы. Так, кампания по ликвидации последствий разлива 14 500 тонн мазута, пролитого из танкера “Tanio” в 1980 г., оказалась столь же затратной, что и в случае разлива 223 000 тонн сырой нефти при аварии танкера “Amoco Cadiz” в 1978 году.

Описываемое в настоящей статье событие заслуживает дальнейшего тщательного изучения. Для научных исследований и практических приложений важно получить сведения о местах, количестве, формах нахождения мазута в водной толще и на морском дне, проанализировать изменения физических и физико-химических характеристик, происходящих с мазутом в сложившихся гидрометеорологических условиях. Необходимо исследование поведения в морской среде тяжелых видов топлива и, в том числе мазутов, особенностей их обнаружения средствами ДЗЗ. Полученный опыт будет использован для будущих оценок возможных последствий разливов тяжелых видов топлива в других регионах РФ.

Для реагирования на экологические угрозы необходим оперативный мониторинг и доведение информации до лиц, принимающих решения за короткое время. Для решения этой задачи необходимо обеспечить создание и функционирование технологий прогнозирования распространения ЗВ с учетом получения, обработки и передачи данных ДЗЗ и выпуска оперативных прогнозов гидрометеорологических полей высокого разрешения для акваторий морей РФ, на которых проводится разведка, добыча и транспортировка нефти.

Опыт РМКП-2024 показал важность оперативной съемки зоны ЧС с максимальной частотой всеми имеющимися средствами ДЗЗ в первые сутки после аварии, когда выливается основной объем нефти и нефтепродуктов, особенно при залповом характере истечения загрязняющих веществ. В первые сутки ЧС должны быть использованы ресурсы открытых данных ДЗЗ, мобилизованы все отечественные КА ДЗЗ «Канопус-В», «Ресурс-П», «Кондор-ФКА», «Метеор-М», МКС и зарубежные ресурсы ДЗЗ по линии Хартии «Космос и Крупные Бедствия», БРИКС и стран-партнеров, а также предусмотрена возможность срочной закупки данных от отечественных и зарубежных коммерческих операторов космических аппаратов (КА) ДЗЗ. На сегодняшний день самыми информативными инструментами контроля остаются спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА). Основной объем информации о последствиях РМКП-2024, начиная с декабря 2024 г., был получен с помощью спутников с РСА. Возможности КА с оптоэлектронными системами видимого и инфракрасного диапазона ограничивались условиями недостаточной видимости в зимне-весенний период в Керченском проливе.

Открытые данные ДЗЗ играют важную роль в задачах реагирования на чрезвычайные ситуации (ЧС) в силу плановой беззаявочной съемки и открытого оперативного доступа к данным (программы Sentinel, Landsat и др.). Тем не менее, опыт спутникового контроля района РМКП показал, что ресурсов открытых данных ДЗЗ было недостаточно для мониторинга последствий разлива мазута в декабре 2024 г. Так, частота радиолокационной съемки района ЧС на первом этапе с декабря 2024 до марта 2025 гг. одним спутником с РСА составляла всего 8–9 раз в месяц (после подключения нового КА Sentinel-1С в апреле–мае 2025 г. частота съемки была доведена до 15–16 кадров в месяц).

Частично проблема нехватки радиолокационных изображений (РЛИ) была решена благодаря активации Хартии «Космос и Крупные Бедствия»¹⁰. Благодаря сотрудничеству по линии Хартии были получены важные РЛИ спутников RCM-1/-2/-3, Radarsat-2 (все – Канада), Gaofen-3 (Китай), например, по загрязнению Анапского побережья, Керченского пролива за Крымским мостом, дрейфа пятна в южном направлении вдоль Абрауского полуострова.

Одним из уроков РМКП-2024 является понимание необходимости создания в России сервиса поддержки реагирования на разливы. В структуре сервиса следует предусмотреть оперативное прогнозирование распространения разливов нефтепродуктов, возможность выбора эффективной в сложившихся гидрометеорологических условиях стратегии реагирования на разлив, базу знаний с рекомендованными действиями при

¹⁰ <https://disasterscharter.org/activations/oil-spill-in-russian-federation-activation-937->

ликвидации последствий инцидента, вместе представляющих оперативную картину реагирования. По мнению авторов, наличие продуманных регламентов взаимодействия участников кампании по ликвидации разлива мазута (различных ведомств) и его последствий, могло бы существенно уменьшить и время, и стоимость мероприятий по всем видам необходимой рекультивации.

Список литературы

1. *Гейзенберг В.* Роль феноменологических теорий в системе теоретической физики // *Успехи физ. наук.* 1967. Т. 91. № 4. С. 731–733. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0091.196704g.0731>
2. *Дианский Н. А.* Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с. ISBN 978-5-9221-1433-2. EDN: **UGLFQB**
3. *Дианский Н. А., Фомин В. В., Коршенко Е. А., Кабатченко И. М.* Система морских ретроспективных расчетов и прогнозов гидрометеорологических характеристик Азовского моря и Керченского пролива // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг.* 2020. Т. 2. № 5. С. 131–140. EDN: **GBWEBF**. <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140>
4. *Зацева С. Н., Ивченко А. А., Книжников А. Ю., Солбаков В. В.* Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации // *Арктика: экология и экономика.* 2023. Т. 13. № 3 (51). С. 369–381. EDN: **GTCOVT**. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-369-381>
5. *Зацева С. Н., Ивченко А. А., Журавель В. И., Солбаков В. В.* Исследование чувствительности псевдокомпонентной модели испарения нефти на поверхности моря к вариации параметров // *Процессы в геосредах.* Вып. 2 (24). 2020. С. 662–674. EDN: **SVUJKV**
6. *Зацева С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В., Становой В. В.* Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях (научно-методическое пособие). М.: АО «Финпол», 2018. 140 с. ISBN 978-5-7637-0112-8. EDN: **ATUGEA**
7. *Зацева С. Н., Ивченко А. А., Книжников А. Ю., Солбаков В. В.* Подход к анализу гидрометеорологических условий, определяющих задержку в реагировании на морские разливы нефти в Арктической зоне Российской Федерации // *Арктика: экология и экономика.* 2023. Т. 13. № 3 (51). С. 369–381. EDN: **GTCOVT**. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-369-381>
8. *Ивченко А. А., Зацева С. Н., Журавель В. И., Солбаков В. В.* Модельный комплекс SPILLMOD-RF для расчета характеристик разлива нефти в море с учетом применения средств реагирования // *Программы для ЭВМ.* № 2019613316. 2019. EDN: **ZIGNSK**
9. Катастрофа танкера «Глобе Ассими» в порту Клайпеда и ее экологические последствия (Результаты исследований по междуведомственной программе) / Под редакцией д-ра геогр. наук А. И. Симонова. М.: Гидрометеиздат, 1990. 267 с. https://www.academia.edu/7762597/Катастрофа_танкера_Глобе_Ассими_в_порту_Клайпеда_и_ее_экологические_последствия
10. *Клименко С. К., Иванов А. Ю., Зацева С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В.* Результаты радиолокационного мониторинга и сопутствующего численного моделирования катастрофических разливов тяжелых нефтепродуктов в Керченском проливе в 2024–2025 гг. // *Труды XIII Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы оптики естественных вод».* 2025. С. 146–151. EDN: **FKDZXR**
11. *Клименко С. К., Иванов А. Ю.* Загрязнение Керченского предпролива 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](#)
12. Кубряков А. А., Георга-Копулос А. А., Станичный С. В., Холод А. Л., Клещенок А. В., Кулыгин В. В., Пузина О. С., Мизюк А. И. Распространение мазутного загрязнения в Черном море после аварии на судах «Волгонефть» в декабре 2024 года по данным контактных, спутниковых измерений и расчетов системы FOTS Морского гидрофизического института РАН // Морской гидрофизический журнал. 2025. Т. 41. № 6. С. 767–787. EDN: [XWXESN](#)
 13. 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>
 14. Лаврова О. Ю., Митягина М. И., Костяной А. Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. М.: ИКИ РАН, 2016. 334 с. ISBN 978-5-00015-004-7. EDN: [XXTFLN](#)
 15. Обзор аварийности судов на море и внутренних водных путях Российской Федерации за 2024 год. Управление государственного морского и речного надзора. Федеральная служба по надзору в сфере транспорта. Москва. 2025. <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/Обзор%202024.pdf>
 16. 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.
 17. РД 31.27.05-99 Инструкция по приему, хранению, отпуску на суда к контролю качества топлив и смазочных материалов на нефтебазах и складах. ЗАО «ЦНИИМФ». 1996. 83 с. <https://docs.cntd.ru/document/1200046699>
 18. Ривин Г. С., Розинкина И. А., Астахова Е. Д., Блинов Д. В., Бундель А. Ю., Кирсанов А. А., Шатунова М. В., Чубарова Н. Е., Алферов Д. Ю., Варенцов М. И., Захарченко Д. И., Копейкин В. В., Никитин М. А., Полохов А. А., Ревокатова А. П., Татаринич Е. В., Чурюлин Е. В. Система краткосрочного численного прогноза высокой детализации COSMO-Ru, ее развитие и приложения // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (374). С. 37–53. EDN: [NTQCSD](#)
 19. Сборник характерных аварий судов на море и транспортных происшествий на внутренних водных путях российской федерации, произошедших в 2024 году / Управление государственного морского и речного надзора. Федеральная служба по надзору в сфере транспорта Москва. 2025. <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/2024.pdf>
 20. Фащук Д. Я., Флинт М. В., Монин В. Л., Сапожников В. В., Овсиенко С. Н., Зацепя С. Н., Ивченко А. А. Керченский пролив: год спустя после катастрофы танкера «Волгонефть-139» // Труды Государственного океанографического института. 2009. № 212. С. 186–196. EDN: [PXRUTZ](#)
 21. Фомин В. В., Харитонова Л. В., Алексеев Д. В., Лазоренко Д. И., Белоконов А. Ю., Шокуров М. В., Барабанов В. С., Гуров К. И., Иванча Е. В., Полозок А. А. Гидро- и литодинамические процессы в Прикерченском районе Черного моря в период разлива мазута после крушения танкеров (декабрь 2024 года) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 4. С. 33–52. <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2025/04/02/>
 22. Ansell D., Dicks B., Guenette C., Moller T., Santner R., White I. A Review of the Problems Posed By Spills of Heavy Fuel Oils // International Oil Spill Conference Proceedings. 2001. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-1-591>

23. *Etkin D. S., French-McCay D., and Michel J.* Review of the State-Of-The-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling. MMS OCS Study 2007-063. Environmental Research Consulting. Cortlandt Manor. New York. 2007. MMS Contract 0106PO39962. 157 p.
24. *Gundlach E. R.* Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters // Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference. 1987. Pp. 451–457. <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-451>
25. *Jacqueline M., Bambach P.* A Response Guide for Sunken Oil Mats (SOMs): Formation, Behavior, Detection, and Recovery // Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10. No. 3. Pp. 368. <https://doi.org/10.3390/jmse10030368>
26. *Moller T. H.* Recovery of sunken oil in the Sea of Marmara. In: Proceedings of the Third Research and Development Forum on High-Density Oil Spill Response, Brest, France, 11–13 March 2002; International Maritime Organization: London. UK. 2002. Pp. 337–345. <https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Papers/recovery.pdf>
27. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Spills of Diluted Bitumen from Pipelines: A Comparative Study of Environmental Fate, Effects, and Response; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2016. 144 p. <https://doi.org/10.17226/21834>
28. *Moshonkin S., Zalesny V., Gusev A.* Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization // J. Mar. Sci. Eng. 2018. Vol. 6. No. 3. Paper No. 95. <https://doi.org/10.3390/jmse6030095>
29. Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007: Commission for the protection of the Black Sea against pollution; chief ed. Alexander Korshenko. Moscow: Nauka, 2011. 284 p. ISBN 978-5-87317-832-2. EDN: QKKWZV
30. *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: Earth and Environmental Sciences Library / Ed. T. Chaplina. Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0_1
31. *Zalesny V., Diansky N., Fomin V., Moshonkin S., Demyshev S.* Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2012. Vol. 27. No. 1. Pp. 95–111. EDN: PDOVUV. <https://doi.org/10.1515/rnam-2012-0006>
32. *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)

Статья поступила в редакцию 05.11.2025, одобрена к печати 05.03.2026.

Для цитирования: Зацева С. Н., Дианский Н. А., Ивченко А. А., Коршенко Е. А., Кучейко А. А., Панасенкова И. И., Солбаков В. В., Фомин В. В. Феноменология и особенности моделирования разлива мазута в Керченском проливе (PMKП-2024) // Океанологические исследования. 2026. Т. 54. № 1. С. 51–83. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).4](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).4)

PHENOMENOLOGY AND MODELING FEATURES OF THE FUEL OIL SPILL IN THE KERCH STRAIT (FOSKS-2024)

S. N. Zatsepa^{1*}, N. A. Diansky^{1,2,3}, A. A. Ivchenko¹, E. A. Korshenko¹,
A. A. Kucheiko⁴, I. I. Panasenkova^{1,5}, V. V. Solbakov⁶, V. V. Fomin^{1,3,5}

¹ N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6, Kropotkinsky Lane, Moscow, 119034, Russia;

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia;

³ G. I. Marchuk Institute of Computational Mathematics of RAS,
8, str. Gubkina, Moscow, 119333, Russia;

⁴ OOO "Risksam", flt. 37, 25, ul. 1st Ostankinskaja, Moscow, 129515, Russia;

⁵ Hydrometeorological Center of Russia,
13, Bol'shoj Predtechenskij pereulok, Moscow, 123376, Russia;

⁶ Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS,
44/2, Vavilova street, Moscow, 119333, Russia,

* e-mail: zatsepa@gmail.com

The phenomenology, features of behavior in the marine environment and, as a result, the specifics of modeling the spread of fuel oil after the accident of the Volgoneft tankers in the Kerch Strait in December 2024 are discussed. The Kerch Strait region and adjacent waters are characterized by significant spatial and seasonal variability in temperature and salinity fields, especially during the autumn-winter period. A notable feature of FOSKS-2024 was the prevailing hydrometeorological conditions, when, following a severe storm, an oil slick approached the sandy shore of the resort city of Anapa amid moderately strong wave activity. This caused a significant amount of the oil spill to sink to the bottom, forming sand-oil mats. This behavior of the fuel oil is due to its high density, viscosity and adhesion. The combination of fuel oil with sand and algae resulted in the formation of conglomerates denser than seawater. These underwater sand-oil mats became a source of secondary pollution for the marine environment and coasts for several months. In the first days and weeks after the accident, continuous leakage of fuel oil was considered as a conservative scenario leading to the most adverse consequences. The results of the fuel oil spread modeling were compared with remote sensing data as well as coastal observations by rescuers and volunteers and, in general, corresponded to these observations. Modeling confirmed the spread of fuel oil from Anapa to Sevastopol. A separate consideration of the model of fuel oil leakage from broken tankers fragments explained why coastal pollution of the Crimean Peninsula was 2–3 orders of magnitude less than pollution in the Anapa agglomeration area.

Keywords: SPILLMOD, INMOM, WRF, oil spills, phenomenology, remote sensing, oil spill response plans, mathematical and numerical modeling

References

1. Ansell, D., B. Dicks, C. Guenette, T. Moller, R. Santner, and I. White, 2001: A Review of the Problems Posed By Spills of Heavy Fuel Oils. *Proceedings International Oil Spill Conference*, 2001, <https://doi.org/10.7901/2169-3358-2001-1-591>
2. Diansky, N. A., 2013: *Modelirovanie cirkulyacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodny'e i dolgoperiodny'e atmosferye vozdeystviya (Modeling of ocean circulation and investigation of its response to the short-period and long-period atmospheric impacts)*, Moscow, Fizmatlit, 272 p., EDN: UGLFQB

3. Diansky, N. A., V. V. Fomin, E. A. Korshenko, and I. M. Kabatchenko, 2020: Sistema morskikh retrospektivnyh raschetov i prognozov gidrometeorologicheskikh harakteristik Azovskogo morya i Kerchenskogo proliva (Marine Hindcast and Forecast System of hydrometeorological characteristics of the Azov Sea and the Kerch Strait). *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Geoinformacionnye tehnologii i kosmicheskij monitoring*, Vypusk 5, Rostov, Izd-vo YuNCz RAN, 131–140, EDN: GBWEBF, <https://doi.org/10.23885/2500-123X-2020-2-5-131-140>
4. Etkin, D. S., D. French-McCay, and J. Michel, 2007: *Review of the State-Of-The-Art on Modeling Interactions between Spilled Oil and Shorelines for the Development of Algorithms for Oil Spill Risk Analysis Modeling*. MMS OCS Study 2007-063. Environmental Research Consulting, Cortlandt Manor, New York. MMS Contract 0106PO39962, 157 p.
5. Fashchuk, D. Y., M. V. Flint, V. L. Monin, V. V. Sapozhnikov, S. N. Ovsienko, S. N. Zatsepa, and A. A. Ivchenko, 2009: *Kerchenskij proliv: god spustya posle katastrofy tankera "Volgoneft'-139" (Kerch Strait: one year after the tanker "Volgoneft'-139" disaster)*. Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta, **212**, 186–196, EDN: PXRUTZ
6. Fomin, V. V., L. V. Haritonova, D. V. Alekseev, D. I. Lazorenko, A. Yu. Belokon', M. V. Shokurov, V. S. Barabanov, K. I. Gurov, E. V. Ivancha, and A. A. Polozok, 2025: Hidro- i litodinamicheskie processy v Prikerchenskom rajone Chernogo morya v period razliva mazuta posle krusheniya tankerov (dekabr' 2024 goda) (Hydro- and lithodynamic processes in the Black Sea basin during the fuel oil spill after the tanker crash (December 2024 year)). *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel' fovoj zon moray*, **4**, 33–52, <https://ecological-safety.ru/repository/issues/2025/04/02/>
7. Gundlach, E. R., 1987: Oil-holding capacities and removal coefficients for different shoreline types to computer simulate spills in coastal waters. *Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference*, 451–457, <https://doi.org/10.7901/2169-3358-1987-1-451>
8. Heisenberg, W., 1967: Rol' fenomenologicheskikh teorij v sisteme teoreticheskoy fiziki (The Role of Phenomenological Theories in the System of Theoretical Physics). *Uspehi fiz. nauk*, **91** (4), 731–733, <https://doi.org/10.3367/UFNr.0091.196704g.0731>
9. Ivchenko, A. A., S. N. Zatsepa, V. I. Zhuravel, and V. V. Solbakov, 2019: *Model'nyj kompleks SPILLMOD-RF dlya rascheta harakteristik razliva nefti v more s uchetom primeneniya sredstv reagirovaniya (SPILLMOD-RF modeling system for calculating the characteristics of oil spills in the sea considering the application of response measures)*. Programmy dlya EVM, No. 2019613316, 2019, EDN: ZIGNSK
10. Jacqueline, M. and P. Bambach, 2022: A Response Guide for Sunken Oil Mats (SOMs): Formation, Behavior, Detection, and Recovery. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10** (3), 368, <https://doi.org/10.3390/jmse10030368>
11. *Katastrofa tankera "Globe Assimi" v portu Klajpeda i ee ekologicheskie posledstviya (Rezul'taty issledovanij po mezhdovedomstvennoj programme) (The catastrophe of the tanker 'Globe Asimi' in the port of Klaipeda and its environmental consequences (Results of research under the interdepartmental program))*. Pod redakciej d-ra geogr. nauk A. I. Simonova, Moscow, Gidrometeoizdat, 1990, 267 p., https://www.academia.edu/7762597/Катастрофа_танкера_Глобе_Ассими_в_порту_Клайпеда_и_ее_экологические_последствия
12. Klimenko, S. K., A. Yu. Ivanov, S. N. Zatsepa, A. A. Ivchenko, and V. V. Solbakov, 2025: *Rezul'taty radiolokacionnogo monitoringa i sopushtvuyushogo chislennogo modelirovaniya katastroficheskikh razlivov tyazhelyh nefteproduktov v Kerchenskom prolive v 2024–2025 gg. (Results of radar monitoring and associated numerical modeling of catastrophic heavy oil product spills in the Kerch Strait in 2024–2025)*. Trudy XIII Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy optiki estestvennyh vod», 2025, 146–151, EDN: FKDZXR
13. Klimenko, S. K. and A. Yu. Ivanov, 2025: *Zagryaznenie Kerchenskogo predproliviya posle tekhnogennoj katastrofy i ego ocenki po dannym DZZ (Pollution of the Kerch pre-strait after*

- a man-made disaster and its assessment according to remote sensing data*). *Materialy 23-j Mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*. Moscow, IKI RAN, 237, EDN: [CHUZTO](#)
14. Kubryakov, A. A., A. A. Georga-Kopoulos, S. V. Stanichny, A. L. Kholod, A. V. Kleshchenkov, V. V. Kulygin, O. S. Puzina, and A. I. Mizyuk, 2025: Rasprostranenie mazutnogo zagryazneniya v Chernom more posle avarii na sudakh "Volgoneft" v dekabre 2024 goda po dannym kontaktnykh, sputnikovykh izmerenij i raschetov sistemy FOTS Morskogo gidrofizicheskogo instituta RAN (Spread of Oil Pollution in the Black Sea after the Accidents at the "Volgoneft" Tankers in December 2024 Based on Numerical Simulations using the Model FOTS MHI, as well as Satellite and In-Situ Measurement Data). *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal*, **41** (6), 767–787, EDN: [XWXESN](#)
 15. Lavrova, O. Yu., E. A. Lupyanyan, and A. G. Kostyanoy, 2025: Sputnikovyy monitoring mazutnogo razliva v rajone Kerchenskogo proliva 15 dekabrya 2024 g.: predvaritel'nye rezul'taty (Satellite monitoring of the heavy fuel oil spill near the Kerch Strait on December 15, 2024: preliminary results). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, **22** (1), 327–335, EDN: [ITPALB](#), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2025-22-1-327-335>
 16. Lavrova, O. Yu., M. I. Mityagina, and A. G. Kostianoy, 2016: *Sputnikovyye metody vy'yavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskix akvatorij (Satellite Methods for Detecting and Monitoring Marine Zones of Ecological Risk)*, Moscow, IKI RAN, 2016, 334 p., EDN: [XXTFLN](#)
 17. Moller, T. H., 2002: Recovery of sunken oil in the Sea of Marmara. In: *Proceedings of the Third Research and Development Forum on High-Density Oil Spill Response*. Brest, France, 11–13 March 2002; International Maritime Organization: London, UK, 337–345.
 18. Moshonkin, S., V. Zalesny, and A. Gusev, 2018: Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization. *J. Mar. Sci. Eng.*, **6** (3), Paper No. 95, <https://doi.org/10.3390/jmse6030095>
 19. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Spills of Diluted Bitumen from Pipelines: A Comparative Study of Environmental Fate, Effects, and Response*; The National Academies Press: Washington, DC, USA, 2016, 144 p., <https://doi.org/10.17226/21834>
 20. *Obzor avarijnosti sudov na more i vnutrennih vodnyh putyakh Rossijskoj Federacii za 2024 god*. Upravlenie gosudarstvennogo morskogo i rechnogo nadzora. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere transporta Moscow 2025 (Review of vessel accident rates at sea and inland waterways of the Russian Federation for 2024. Department of State Maritime and River Supervision. Federal Transport Oversight Service. Moscow, 2025), <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/Обзор%202024.pdf>
 21. *Oil spill accident in the Kerch Strait in November 2007*. Edited by Alexander Korshenko, Yuriy Ilyin, Violeta Velikova. Black Sea Commission Publications 2011, Moscow, Publishing House "Nauka", 288 p., EDN: [QKKWZV](#)
 22. *Otchet "V ramkax iniciativnoj raboty po analizu obrazczov mazuta obohrannykh na poberezh'e Anapy"* Centr nauki i tehnologij dobychi uglevodorodov ANKO-OVO "Skolkovskij institut nauki i tehnologij" (Report "Within the framework of an initiative work on the analysis of fuel oil samples collected on the coast of Anapa" Center for Science and Technology of Hydrocarbon Production ANKOOBO "Skolkovo Institute of Science and Technology"), Moscow, 2025, 64 p.
 23. RD 31.27.05-99 *Instrukciya po priemu, hraneniyu, otpusku na suda k kontrolyu kachestva topliv i smazochnykh materialov na neftebazah i skladah (Instruction for receiving, storing, and supplying to ships with quality control of fuels and lubricants at oil depots and warehouses)*, ZAO CzNIIMF, 1996, 83 p., <https://docs.cntd.ru/document/1200046699>
 24. Rivin, G. S., I. A. Rozinkina, E. D. Astakhova, D. V. Blinov, A. Yu. Bundel', A. A. Kirsanov, M. V. Shatunova, N. Ye. Chubarova, D. Yu. Alferov, M. I. Varentsov, D. I. Zakharchenko, V. V. Kopeykin, M. A. Nikitin, A. A. Poliukhov, A. P. Revokatova, E. V. Tatarinovich, and

- E. V. Churiulin, 2019: Sistema kratkosrochnogo chislennogo prognoza vysokoj detalizacii COSMO-Ru, ee razvitie i prilozheniya (COSMO-Ru high-resolution short-range numerical weather prediction system: its development and applications). *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, **374** (4), 37–53, EDN: NTQCSD
25. *Sbornik harakternyh avarij sudov na more i transportnyh proisshestvij na vnutrennih vodnyh putyakh Rossijskoj Federacii, proizshedshih v 2024 godu (Collection of typical ship accidents at sea and transport incidents on the inland waterways of the Russian Federation that occurred in 2024)*. Upravlenie gosudarstvennogo morskogo i rechnogo nadzora. Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere transporta Moskva 2025 <https://rostransnadzor.gov.ru/storage/Госморречнадзор/Анализ%20состояния%20аварийности/2024.pdf>
26. Solbakov, V. V., S. N. Zatsepa, and A. A. Ivchenko, 2025: *Spillmod, A CFD Model for Marine Oil Spill, Modeling, Analysis, Control and Removal of Oil and Hydrocarbon Spills: Earth and Environmental Sciences Library*. Ed. T. Chaplina. Cham, Springer Nature Switzerland, 1–38, https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0_1
27. Zalesny, V., N. Diansky, V. V. Fomin, and S. G. Demyshev, 2012: Numerical model of the circulation of the Black Sea and the Sea of Azov. *Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling*, **27** (1), 95–111, EDN: PDOVUV, <https://doi.org/10.1515/rnam-2012-0006>
28. Zatsepa, S. N., A. A. Ivchenko, A. Y. Knizhnikov, and V. V. Solbakov, 2023: Podhod k analizu gidrometeorologicheskikh uslovij, opredelyayushih zaderzhku v reagirovanii na morskije razlivy nefti v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii (Analysis approach to the of meteorological conditions that determine the gap in response to marine oil spills in the Arctic zone of the Russian Federation). *Arktika: ekologiya i ekonomika*, **13**, **3** (51), 369–381, EDN: GTCOVT, <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-369-381>
29. Zatsepa, S. N., A. A. Ivchenko, V. I. Zhuravel, and V. V. Solbakov, 2020: Issledovanie chuvstvitel'nosti psevdokomponentnoj modeli ispareniya nefti na poverhnosti morya k variacii parametrov (Investigation of the sensitivity of the pseudocomponent model of oil evaporation on the sea surface to parameter variation). *Processy v geosredah*, **2** (24), 662–674, EDN: SVUJKV
30. Zatsepa, S. N., A. A. Ivchenko, V. V. Solbakov, and V. V. Stanovoy, 2018: *Prognozirovanie rasprostraneniya nefti i nefteproduktov v sluchae avariynogo razliva na morskikh akvatoriyah (nauchno-metodicheskoe posobie) (Forecasting the spread of oil and petroleum products in the event of an emergency spill in marine areas (scientific and methodological manual))*, Moscow, AO "Finpol", 140 p., EDN: ATUGEA
31. Zatsepa, S. N., A. A. Ivchenko, A. Y. Knizhnikov, and V. V. Solbakov, 2023: Podhod k analizu gidrometeorologicheskikh uslovij, opredelyayushih zaderzhku v reagirovanii na morskije razlivy nefti v Arkticheskoy zone Rossijskoj Federacii (Analysis approach to the of meteorological conditions that determine the gap in response to marine oil spills in the Arctic zone of the Russian Federation). *Arktika: ekologiya i ekonomika*, **13**, **3** (51), 369–381, EDN: GTCOVT, <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-369-381>
32. Zatsepa, S. N., A. A. Ivchenko, and V. V. Solbakov, 2022: SPILLMOD – a CFD-model for information support of marine oil spill response. *Journal of Oceanological Research*, **50** (2), 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)

Submitted 05.11.2025, accepted 05.03.2026.

For citation: Zatsepa, S. N., N. A. Diansky, A. A. Ivchenko, E. A. Korshenko, A. A. Kucheiko, I. I. Panasenkov, V. V. Solbakov, and V. V. Fomin, 2026: Phenomenology and modeling features of the fuel oil spill in the Kerch Strait (FOSKS-2024). *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 51–83, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).4](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).4)

刻赤海峡重质燃料油泄漏现象学及其模拟特征 (RMKP-2024)

S. N. Zatsepa^{1*}, N. A. Diansky^{1,2,3}, A. A. Ivchenko¹, E. A. Korshenko¹,
A. A. Kucheiko⁴, I. I. Panasenкова^{1,5}, V. V. Solbakov⁶, V. V. Fomin^{1,3,5}

¹ N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6, Kropotkinsky Lane, Moscow, 邮编: 119034, Russia;

² Lomonosov Moscow State University,

1, Leninskie Gory, Moscow, 邮编: 119991, Russia;

³ G. I. Marchuk Institute of Computational Mathematics of RAS,
8, str. Gubkina, Moscow, 邮编: 119333, Russia;

⁴ OOO "Risksat", flt. 37, 25, ul. 1st Ostankinskaja, Moscow, 邮编: 129515, Russia;

⁵ Hydrometeorological Center of Russia,

13, Bol'shoj Predtechenskij pereulok, Moscow, 邮编: 123376, Russia;

⁶ Federal Research Center "Computer Science and Control" of the RAS,

44/2, Vavilova street, Moscow, 邮编: 119333, Russia,

* 电子邮件: zatsepa@gmail.com

本文讨论了2024年12月“Volgoneft”号油轮事故及刻赤海峡重质燃料油泄漏 (RMKP-2024) 后·重质燃料油在海洋环境中的现象学·行为特征及其扩散模拟的特殊性。刻赤海峡及邻近海域在秋冬季具有显著的空间和季节变异性·尤其在温度和盐度场方面。RMKP-2024事件期间的气象水文条件表现为: 强风暴过后·重质燃料油污渍在中度海浪条件下漂流至阿纳帕度假城市的沙滩沿岸·导致泄漏物大量沉没·并以砂-油垫形式沉入海底。这种“行为”是由重质燃料油的高密度·高粘度和高粘附性所决定的。重质燃料油与沙粒和藻类结合形成密度高于海水的聚合物·在事故后的数月内·水下砂-油垫成为海洋环境和海岸带的二次污染源。事故初期及随后数周·持续泄漏被视为导致最严重后果的保守情景。重质燃料油扩散的模拟结果与遥感数据·救援人员及志愿者的岸基观测进行了对比·总体吻合良好。模拟证实了重质燃料油从阿纳帕扩散至塞瓦斯托波尔。对油轮断裂碎片中重质燃料油泄漏的单独模拟分析表明·克里米亚半岛沿岸的污染程度比阿纳帕集聚区低2–3个数量级。

关键词: SPILLMOD, INMOM, WRF, 石油泄漏, 现象学, 遥感, 溢油应急计划, 数学与数值模拟