

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ

Научная статья

УДК 551.465.4; DOI: 10.61260/2304-0130-2026-2-6-28

ЛАГРАНЖЕВО МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК КЛЮЧЕВОЙ ИНСТРУМЕНТ МЧС РОССИИ В ОКЕАНЕ

Будянский Максим Васильевич;

✉ Лебедева Мария Алексеевна;

Файман Павел Аркадьевич;

Белоненко Татьяна Васильевна.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Улейский Михаил Юрьевич.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия

✉ lebedevamasha671@gmail.com

Аннотация. В работе показано, что для решения задач МЧС России в морской среде принципиально недостаточно традиционных эйлеровых подходов, описывающих лишь поля скоростей и концентраций, но не реальные траектории распространения опасных веществ и объектов. На основе лагранжева моделирования продемонстрированы возможности оперативного прогноза переноса нефтяных и антропогенных загрязнений, радиоактивных выбросов от аварий на прибрежных АЭС, а также дрейфа тел и обломков судов в условиях сложной многомасштабной циркуляции океана. Рассмотрены примеры, имеющие непосредственное отношение к деятельности МЧС (авария в бухте Чажма, гипотетический разлив нефти в акватории порта Козьмино, загрязнение в Юго-Восточной Балтике, антропогенная нагрузка в Таганрогском заливе, последствия аварий на АЭС «Касивадзаки-Карива» и «Фукусима-1»), для которых лагранжев анализ позволяет выделять транспортные коридоры, зоны накопления загрязнений и временные «окна» риска. Показано, что интеграция лагранжева моделирования в систему мониторинга и поддержки принятия решений переводит МЧС России из режима запаздывающей реакции “по факту” в режим превентивного управления рисками, обеспечивая научно обоснованное планирование поисково-спасательных операций, экологического мониторинга и мер по защите населённых пунктов и ключевой инфраструктуры.

Ключевые слова: лагранжево моделирование, дрейф загрязнений, аварийные разливы нефти, радиоактивное загрязнение моря, поисково-спасательные операции, транспортные коридоры в океане, прогноз чрезвычайных ситуаций в морской среде

Для цитирования: Лагранжево моделирование как ключевой инструмент МЧС России в океане / М.В. Будянский [и др.] // Природные и техногенные риски(физико-математические и прикладные аспекты). 2026. № 2 (58). С. 6–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-2-6-28

Scientific article

**LAGRANGE MODELING AS A KEY TOOL
OF THE RUSSIAN EMERCOM IN THE OCEAN****Maxim V. Budyansky;**✉ **Maria A. Lebedeva;****Pavel A. Fayman;****Tatiana V. Belonenko.****St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia****Uleisky M. Yurievich.****V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia**✉ **lebedevamasha671@gmail.com**

Abstract. The paper shows that traditional Eulerian approaches, which describe only velocity and concentration fields, but not the actual trajectories of hazardous substances and objects, are fundamentally insufficient for solving the problems of the Russian Ministry of Emergency Situations in the marine environment. Based on Lagrangian modeling, the paper demonstrates the possibilities of operational forecasting of the transport of oil and anthropogenic pollutants, radioactive emissions from accidents at coastal nuclear power plants, as well as the drift of bodies and shipwrecks in the context of complex multiscale ocean circulation. Examples that are directly related to the activities of the Ministry of Emergency Situations (the accident in Chazhma Bay, a hypothetical oil spill in the Kozmino port, pollution in the South-Eastern Baltic, anthropogenic pressure in the Taganrog Bay, and the consequences of accidents at the Kashiwazaki-Kariwa and Fukushima-1 nuclear power plants) are considered, for which Lagrangian analysis allows us to identify transport corridors, areas of pollution accumulation, and temporary “windows” of risk. It is shown that the integration of Lagrangian modeling

Keywords: Lagrangian modeling, pollution drift, oil spills, radioactive contamination of the sea, search and rescue operations, ocean transport corridors, marine emergency forecasting

For citation: Lagrange modeling as a key tool of the Russian Emercom in the ocean / Budyansky M.V. [et al.] // Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects). 2026. № 2 (58). P. 6–28. DOI: 10.61260/2307-7476-2026-2-6-28

Введение

В океане невозможно «увидеть» движение вещества напрямую. Можно наблюдать температуру, уровень, скорость течений – но не траекторию конкретной капли нефти, радиоактивной частицы или иного загрязнителя. Между тем именно траектория, а не поле в целом, является ключевой величиной для служб, отвечающих за ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций. Для МЧС России это не абстрактная научная проблема, а вопрос времени, ресурсов и, в конечном счёте, эффективности реагирования: где окажется загрязнение, когда оно достигнет критически важных районов и какие территории попадут под удар [1].

Традиционные эйлеровы подходы описывают поля скоростей и концентраций, но принципиально не отвечают на главный практический вопрос: куда именно попадёт конкретное вещество и когда. Они дают «мгновенную картину океана», но не дают понимания «судьбы» вещества. Для задач МЧС этого недостаточно. Здесь требуется не распределение в данный момент времени, а прогноз траекторий – конкретных путей распространения опасности реальной и потенциальной [2, 3].

Именно это и обеспечивает лагранжево моделирование – метод, отслеживающий движение индивидуальных частиц (пассивных маркеров, имитирующих загрязнение) в реальном поле течений. По сути, это переход от описания среды к прогнозу последствий. И

этот переход радикально меняет возможности реагирования: от пассивного наблюдения к активному управлению рисками.

Наиболее очевидная и критически важная область применения – аварийные разливы нефти. В реальном океане нефтяное пятно не просто растекается; оно разрывается на фрагменты, вытягивается в тонкие струи, захватывается вихрями и переносится на сотни километров. Простые оценки здесь не работают. Лагранжевы расчёты позволяют заранее определить зоны риска, выявить приоритетные участки защиты побережья и оптимизировать размещение сил и средств. Без такого прогноза борьба с разливом неизбежно превращается в реакцию «постфактум», когда основные экологические и экономические потери уже произошли [4–7].

Не менее важна задача переноса антропогенных загрязнений – от сточных вод до микропластика. Эти процессы не столь зрелищны, но значительно более долговременны и опасны. Лагранжев подход позволяет выявлять устойчивые транспортные коридоры, зоны накопления и скрытые пути проникновения загрязнений в биологически и экономически значимые районы, включая рыбопромысловые акватории. Для МЧС это означает возможность долгосрочного прогноза экологических рисков, а не только реагирования на уже случившиеся события [8–12].

Наконец, существует крайне практическая задача – определение путей переноса тел погибших людей течениями в море. В поисково-спасательных операциях на море ошибка даже в десятки километров может означать потерю операции. В условиях сложной вихревой структуры океана такие ошибки неизбежны без использования лагранжевых методов. Только учёт реальных траекторий, включая влияние ветра, струйных течений и мезомасштабных вихрей, позволяет существенно повысить эффективность поисков.

Особое значение имеет перенос радиоактивных веществ. Опыт аварии на АЭС «Фукусима-1» показал, что океан способен переносить загрязнение на огромные расстояния в относительно короткие сроки [13–14]. Современные лагранжевы расчёты демонстрируют, что в реальных условиях перенос загрязнения (антропогенного или радиационного) может происходить не равномерно, а скачкообразно – порционно в определённые временные окна.

Например, моделирование показывает, что потенциально загрязнённые воды от одной из мощнейших атомных станций Японии «Касивадзаки-Карива» способны достигать российских рыбопромысловых районов за 58–60 суток, тогда как перенос к побережью Приморского края РФ может занимать порядка 4–5 месяцев (138–140 суток) и более [15–16]. Это означает, что у МЧС есть крайне ограниченное «окно реагирования» при возникновении реальной опасности, причём длительность такого временного окна определяется не только расстоянием, но и текущей океанологической ситуацией. Игнорирование этой динамики фактически лишает систему реагирования прогностической способности.

Все эти задачи объединяет одно фундаментальное обстоятельство: перенос вещества в океане определяется не средним течением, а сложной многомасштабной динамикой – системой струй, фронтов, вихрей и неустойчивых структур. Именно эта динамика формирует транспортные коридоры и временные окна переноса. Игнорирование особенностей делает любые прогнозы принципиально ненадёжными.

Таким образом, лагранжево моделирование следует рассматривать не как вспомогательный инструмент, а как основу современной прогностической системы МЧС России в морской среде. Только этот подход позволяет:

- определять реальные маршруты распространения загрязнений,
- оценивать время достижения критически важных районов,
- выявлять зоны повышенного риска,
- учитывать порционность и нестационарность переноса.

Таким образом – лагранжево моделирование необходимо при организации управления и оперативного (экстренного) реагирования при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Без лагранжева моделирования решение задач МЧС в океане – будь то антропогенное загрязнение, радиационная авария или поисково-спасательные операции на море –

становится принципиально неполным и в ряде случаев просто невозможным в прогностическом смысле [17].

Сегодня лагранжевы методы фактически открывают для МЧС России новую парадигму работы в морской среде. Они переводят систему реагирования из режима догоняющего анализа в режим опережающего прогноза. В условиях роста техногенной нагрузки на океан, увеличения числа потенциально опасных объектов и усложнения циркуляции под влиянием климатических изменений интеграция лагранжева моделирования в оперативную практику МЧС России является не рекомендацией, а объективной необходимостью: без этого инструмента невозможно обеспечить ни достоверный прогноз распространения опасных веществ, ни эффективное планирование спасательных операций, что напрямую ставит под угрозу устойчивость системы реагирования и уровень национальной безопасности России.

Лагранжево моделирование

Лагранжево моделирование – это подход, используемый для изучения движения частиц в жидкой среде, циркуляции вод, переноса веществ и микроорганизмов в океане. Данный метод позволяет глубже понять динамику океанологических процессов за счёт расчёта траекторий большого количества пассивных маркеров, имитирующих примесь или загрязнение, и исследования адвекции в пределах рассматриваемой акватории.

Лагранжевы траектории рассчитываются путем численного решения уравнений адвекции:

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t), \quad \frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где u и v – угловые зональные и меридиональные компоненты скорости, рассчитанные по данным некоторой гидродинамической модели, φ и λ – широта и долгота, t – время.

Угловые скорости используются для упрощения уравнений движения на сфере. Значения скоростей внутри ячеек пространственно-временной сетки получаются путём бикубической интерполяции в пространстве и интерполяцией полиномами Лагранжа третьей степени по времени. Расчет лагранжевых траекторий включает интегрирование уравнений (1) с использованием схемы Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным временным шагом 0,001 сут. Каждая траектория рассчитывалась на заданный временной интервал, либо в прямом направлении (вперед по времени), либо в обратном – в случае решения ретроспективной задачи.

В отличие от эйлеровых характеристик (например, распределения океанографических параметров – температуры, солености воды), которые дают лишь “мгновенные” снимки состояния среды [18], лагранжев подход позволяет отслеживать индивидуальные траектории пассивных трассеров во времени. Это даёт возможность строить дазиметрические карты – карты вероятных путей распространения загрязнения или других объектов [19, 20].

Возможности применение лагранжева моделирования в задачах МЧС Авария в бухте Чажма

Одним из показательных примеров практической эффективности лагранжева подхода является ретроспективное моделирование распространения радиоактивного загрязнения после аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма (Японское море) в 1985 году. Эта задача по своей сути полностью соответствует типичным сценариям, с которыми сталкивается МЧС России: внезапный выброс опасного вещества, ограниченность наблюдений и необходимость восстановления путей его распространения в сложной динамической среде.

Авария, произошедшая 10 августа 1985 года, стала одной из крупнейших радиационных катастроф на Тихоокеанском флоте в период холодной войны. В результате самопроизвольного пуска реактора на атомной подводной лодке К-431, находившейся у причальной стенки в бухте Чажма, произошёл мощный тепловой взрыв. Событие сопровождалось мгновенным разрушением активной зоны и выбросом в окружающую среду колоссального количества радиоактивных материалов – по оценкам специалистов, совокупная активность выброшенных изотопов достигла десятков тысяч кюри.

Картина загрязнения сформировалась в первые же часы по сложному, комбинированному сценарию. На начальном этапе доминировал атмосферный перенос: мощный радиоактивный факел, поднявшийся на высоту до 150–200 метров, был подхвачен господствующими ветрами. Значительная часть аэрозолей, минуя прибрежную зону, выпала на поверхность моря на удалении в несколько десятков километров от источника, а также осела на сопках и акватории соседней бухты Павловского. Одновременно с этим произошёл прямой сброс высокоактивных вод в морскую среду через ливневую систему и фильтрацию в грунтовые воды, что создало очаг локального загрязнения непосредственно в самой бухте Чажма. Таким образом, уже в первые часы после события сформировалась сложная, неоднородная структура загрязнения, включавшая как компактные придонные скопления в районе аварии, так и обширные поверхностные пятна, вытянутые вдоль траекторий ветрового переноса.

В условиях дефицита детальных измерений распределения концентраций и высокой турбулентности прибрежных вод Японского моря, где процессы адвекции и перемешивания накладываются друг на друга, единственным надёжным способом восстановления картины переноса и ретроспективной оценки масштабов экологического ущерба стало численное моделирование. Именно лагранжев подход, оперирующий траекториями движения пассивных маркеров (имитирующих реальное или потенциальное загрязнение) в поле гидродинамической модели высокого разрешения, позволил реконструировать не только траектории перемещения загрязнённых вод, но и объяснить пространственное распределение остаточных концентраций радионуклидов, зафиксированное спустя десятилетия в донных отложениях.

На рис. 1 представлены дазиметрические карты, показывающие плотность ежесуточных следов траекторий маркеров (имитирующих радиоактивное загрязнение, попавшее в море в результате аварии в бухте Чажма) на поверхности. В работе использовался лагранжев подход, основанный на отслеживании большого числа пассивных маркеров. Поле скоростей задавалось с помощью высокоразрешающей региональной модели океанической циркуляции (ROMS), после чего решалась задача адвекции частиц. Это позволило перейти от неопределённого распределения концентраций к конкретным траекториям переноса загрязнённых водных масс.

Результаты моделирования показали, что распространение загрязнения определяется не средним течением, а совокупностью динамических факторов различного масштаба. В первые дни (и последующий месяц) после аварии ключевую роль сыграли тайфуны, которые существенно усилили перемешивание и деформацию загрязнённого пятна. Под действием ветра и связанной с ним циркуляции поверхностные течения достигали значений до 50 см/с, что приводило к быстрому перераспределению радионуклидов в пределах залива.

Принципиально важным результатом стало выявление роли мезомасштабных вихрей и лагранжевых когерентных структур. Было показано, что антициклонические вихри выступают в роли “ловушек”, аккумулируя загрязнение и обеспечивая его длительное удержание в определённых районах; гиперболические точки и связанные с ними неустойчивые многообразия формируют узкие транспортные коридоры, вдоль которых происходит вытягивание и филаментация загрязнённого пятна; структура этих многообразий определяет геометрию распространения загрязнения (S-образные и нитевидные структуры), которая принципиально не может быть описана эйлеровыми методами.

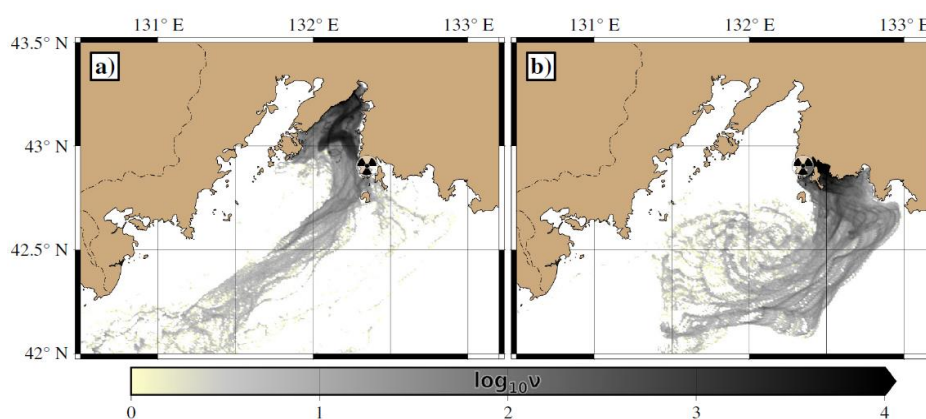


Рис. 1. Дазиметрические карты аварии в заливе Чажма, показывающие плотность ежесуточных следов траекторий маркеров (имитирующих радиоактивное загрязнение, попавшее в море в результате аварии в бухте Чажма) на поверхности (в логарифмическом масштабе): а) от шлейфа в Уссурийском заливе и б) от всего залива Стрелок. Данные накапливаются в течение месяца после аварии [13]

Особенно важно, что поведение загрязнения существенно различалось по глубине. Если на поверхности динамика определялась преимущественно ветровым воздействием, то в подповерхностных слоях (10–20 м) ключевую роль играли вихревые структуры и устойчивые элементы циркуляции. Это приводило к расслоению пятен по вертикали и формированию различных сценариев переноса в зависимости от глубины.

Моделирование также выявило явление порционности переноса. Загрязнение не распространялось непрерывно, а разделялось на отдельные “пакеты”, которые переносились в разные части акватории с различными скоростями и по различным траекториям (рис. 2). Часть загрязнения задерживалась в заливах, часть выносилась в открытое море, где далее вовлекалась в крупномасштабную циркуляцию.

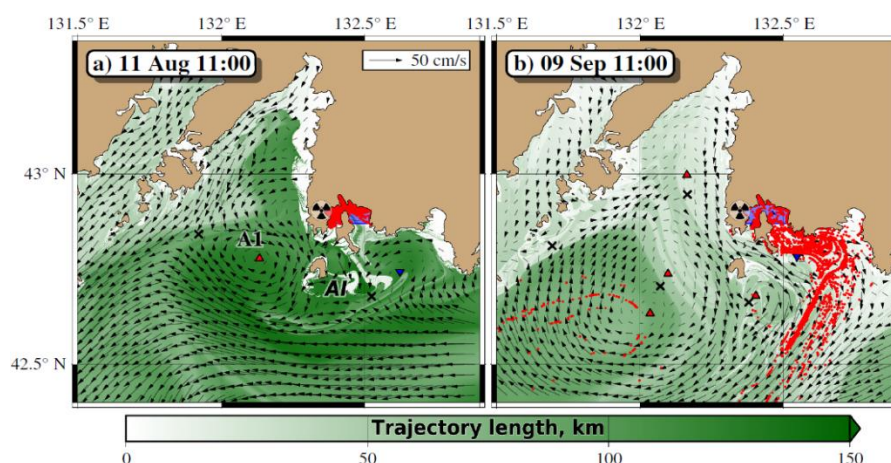


Рис. 2. Распределение пассивных маркеров (красные точки), имитирующих радиоактивное загрязнение, на поверхности моря, исходно покрывавших всю акваторию бухты Стрелок: а) на следующий день после аварии в бухте Чажма 10 августа 1985 года и б) через месяц. Красные маркеры нанесены на карты длин траекторий, где градацией зелёного цвета показано расстояние, пройденное маркерами за 15 дней, предшествующих указанной дате. Стрелками показано направление скоростей течений. На рисунке а) показано местоположение антициклона А1. А1 – остров Аскольд [13]

Прогнозирование распространения нефтяных загрязнений

Аварийные разливы нефти традиционно рассматриваются как одна из наиболее сложных и социально значимых задач, стоящих перед МЧС России в морской среде. В отличие от идеализированных пассивных примесей, нефть представляет собой многокомпонентную смесь с существенно различающимися физико-химическими свойствами, что принципиально усложняет как наблюдение, так и моделирование её поведения. Тем не менее, именно лагранжев подход в настоящее время остаётся ключевым инструментом для прогноза пространственно-временной эволюции нефтяных загрязнений.

В реальном океане нефтяное пятно не является сплошной и однородной структурой. Уже в первые часы после разлива оно подвергается интенсивной деформации под действием течений и ветра: растягивается в узкие филаменты, разрывается на фрагменты, захватывается вихрями и вовлекается в сложную систему транспортных коридоров. В результате формируется мозаичная структура загрязнения, в которой соседние участки могут иметь принципиально различную судьбу – от быстрого выноса в открытое море до длительного удержания в прибрежной зоне.

Лагранжево моделирование позволяет воспроизвести именно эту динамику, переходя от усреднённого описания поля концентрации к анализу индивидуальных траекторий. В рамках такого подхода нефтяное загрязнение представляется ансамблем маркеров, переносимых полем течений с учётом ветрового дрейфа и турбулентной диффузии. Это даёт возможность определять вероятные направления распространения загрязнения в первые часы и сутки после аварии; выявлять зоны потенциального выноса нефти к берегу; прогнозировать формирование локальных зон накопления; оценивать временные окна, в течение которых возможны эффективные защитные мероприятия.

В то же время принципиально важно подчеркнуть ограниченность такого представления. В отличие от пассивных трассеров, нефть не является консервативной примесью: она испаряется, эмульгируется, диспергируется, взаимодействует с поверхностным слоем и донными осадками. Различные фракции нефти обладают разной плотностью, вязкостью и скоростью трансформации, что приводит к расслоению и изменению её динамики во времени. Поэтому лагранжевы маркеры в данном контексте следует рассматривать не как прямое моделирование нефти, а как приближённое описание переноса её отдельных компонентов или “эффективного” загрязнённого пятна.

С учётом этого ограничения лагранжев подход наиболее надёжен на начальных стадиях аварии, когда динамика загрязнения определяется прежде всего гидродинамическими процессами. Именно в этот период принимаются ключевые решения по локализации разлива, защите береговой линии и распределению ресурсов, и именно здесь точность прогноза траекторий имеет максимальную ценность.

Численные эксперименты и анализ реальных событий показывают, что распространение нефтяного загрязнения в значительной степени контролируется мезомасштабной и субмезомасштабной динамикой. Установлено, что антициклонические вихри океана могут эффективно удерживать нефть, формируя устойчивые зоны накопления; струйные течения обеспечивают быстрый перенос загрязнения на значительные расстояния; лагранжевы когерентные структуры формируют границы между областями различного сценария эволюции пятна.

Эти особенности приводят к тому, что даже при относительно простых начальных условиях дальнейшая эволюция нефтяного загрязнения носит резко неоднородный и часто неожиданно быстрый характер. В частности, возможны ситуации, когда отдельные фрагменты пятна достигают берега значительно раньше, чем это следует из оценок на основе средних течений.

Для задач МЧС России это имеет принципиальное значение. Лагранжев анализ позволяет заранее выделить так называемые “зоны наибольшей угрозы” – участки побережья, в которые с наибольшей вероятностью будет вынесено загрязнение в заданный временной интервал. Это, в свою очередь, даёт возможность оптимизировать размещение боновых

заграждений; устанавливать очередность защиты наиболее уязвимых участков; минимизировать время реагирования; снизить экологический и экономический ущерб.

Кроме того, лагранжев подход позволяет решать и обратную задачу – реконструкцию источника загрязнения по наблюдаемому положению пятна. Это особенно важно в ситуациях, когда факт разлива был зафиксирован с задержкой или источник загрязнения неизвестен.

Таким образом, несмотря на физическую сложность и многокомпонентность нефти, лагранжево моделирование остаётся базовым инструментом прогноза её переноса в океане. Его сила заключается не в полном описании всех процессов трансформации нефти, а в точном воспроизведении геометрии и кинематики переноса, которые и определяют пространственно-временную структуру риска. В сочетании с моделями трансформации нефтяных фракций этот подход формирует основу современной системы прогноза и реагирования на аварийные разливы, позволяя МЧС России действовать не реактивно, а на опережение.

Приведем два характерных примера применения лагранжева моделирования для переноса нефтяных загрязнений.

Нефтеналивной порт Козьмино (Приморский край)

Нефтеналивной порт Козьмино, являющийся конечной точкой трубопроводной системы Восточная Сибирь – Тихий океан, представляет собой один из ключевых узлов экспорта углеводородов России в Азиатско-Тихоокеанский регион (рис. 3). Интенсивность судоходства и высокая концентрация нефтеналивной инфраструктуры объективно формируют повышенный уровень потенциального техногенного риска, связанного с возможными аварийными разливами нефти.

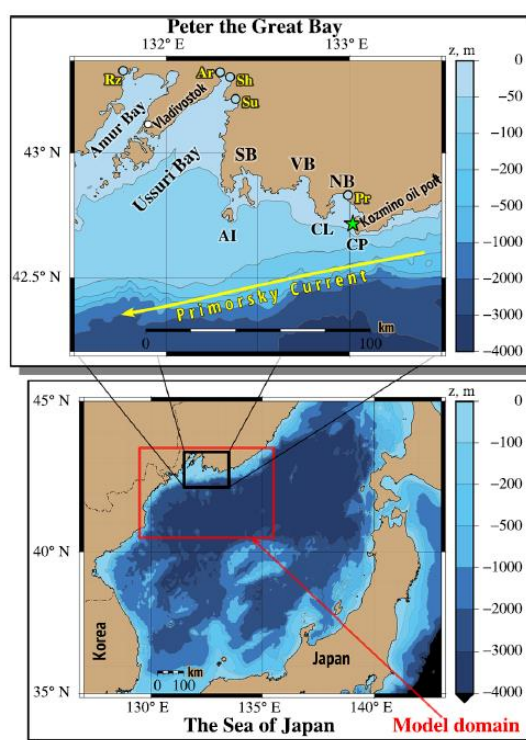


Рис. 3. Батиметрические карты залива Петра Великого (вверху) и Японского моря (внизу) с некоторыми географическими объектами. Расчетная область показана на верхней панели с изобатами 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 и 3000 м. Обозначения: SB – бухта Стрелок; VB – бухта Восток; NB – бухта Находка, CL – мыс Лихачева, CP – мыс Поворотный, AI – остров Аскольд. Положение нефтеналивного порта Козьмино показано звездочкой зеленого цвета. Rz, Ar, Sh, Su и Pr – устья рек Раздольная, Артемовка, Шкотовка, Суходол и Партизанская [4]

Ещё на этапе проектирования нефтяного терминала рассматривались сценарии аварийных разливов (в частности, для альтернативной площадки в бухте Перевозная). Численные оценки показали, что при неблагоприятных условиях загрязнение могло бы распространяться на значительные расстояния, достигая побережья Владивостока и прилегающих особо охраняемых природных территорий. Эти результаты стали одним из факторов переноса терминала в район Козьмино, что уже само по себе демонстрирует роль моделирования в принятии инженерных решений.

С точки зрения лагранжева подхода, акватория Козьмино представляет собой типичную прибрежную систему с выраженным влиянием ветрового дрейфа, приливных и прибрежных течений, мезомасштабной вихревой динамики Японского моря. В случае гипотетической аварии (например, повреждения танкера или утечки при погрузке) начальная стадия эволюции нефтяного пятна определяется именно этими процессами. Лагранжево моделирование позволяет рассматривать множество возможных реализаций переноса, задавая ансамбль маркеров, соответствующих различным фракциям загрязнения.

При этом принципиально важно сделать оговорку: нефть не является пассивной примесью, и её представление в виде лагранжевых маркеров носит приближённый характер. Различные фракции нефти обладают разной плавучестью и скоростью трансформации (испарение, эмульгирование, дисперсия), поэтому лагранжевы расчёты корректнее интерпретировать как моделирование переноса “эффективного пятна” или отдельных его компонентов, а не нефти как единой субстанции.

Тем не менее, даже в таком приближении моделирование позволяет выявить принципиально важные закономерности (рис. 4). Во-первых, перенос потенциального загрязнения носит резко неоднородный характер. В зависимости от текущей синоптической ситуации возможны принципиально различные сценарии: вынос загрязнения в открытое море, захват в прибрежные циркуляции, быстрый перенос вдоль берега. Во-вторых, существенную роль играют мезомасштабные структуры. Вихри и фронты формируют так называемые лагранжевы когерентные структуры, которые разделяют области с различной судьбой загрязнения, задают транспортные коридоры, определяют зоны накопления. В-третьих, для акватории Козьмино характерна высокая чувствительность к ветровым условиям. Даже кратковременные штормовые события способны радикально изменить сценарий распространения, что приводит к эффекту “переключения режимов” переноса.

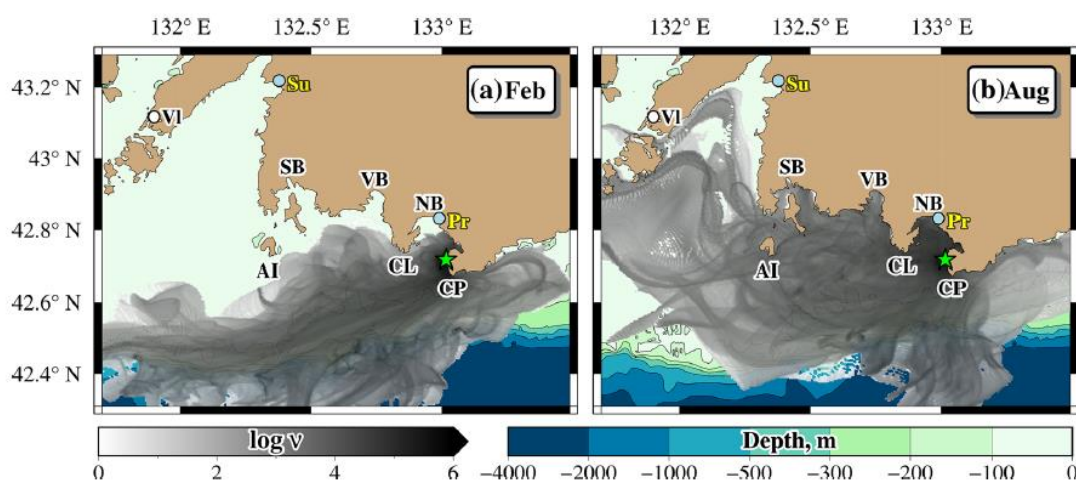


Рис. 4. Дазиметрические карты, показывающие накопленную на поверхности моря плотность ежесуточных следов траекторий маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение, выпущенных с нефтяного терминала Козьмино (зеленая звездочка) в (а) феврале и (б) августе месяцы с преобладающими ветрами с континента и с моря, соответственно. Данные собирались в течение шести дней после запуска маркеров и отображаются в логарифмической шкале [4]

С практической точки зрения для МЧС России это означает следующее. Даже при отсутствии реальной аварии лагранжево моделирование позволяет заранее выделить зоны наибольшего риска загрязнения побережья; определить временные окна, в течение которых загрязнение может достигнуть критических объектов; оценить эффективность различных сценариев реагирования; сформировать карты приоритетной защиты.

Таким образом, пример порта Козьмино демонстрирует принципиально важный переход: от анализа уже произошедших катастроф к системному прогнозированию потенциальных аварий. В этом контексте лагранжево моделирование выступает не просто как инструмент расчёта, а как основа превентивного управления рисками, позволяющая МЧС России действовать до наступления чрезвычайной ситуации, а не после неё.

Однако задачи прогноза нефтяных загрязнений не ограничиваются акваториями отдельных портов. В ряде случаев существенно более сложной является ситуация в полузамкнутых морях, где циркуляция определяется взаимодействием ветрового воздействия, прибрежных течений и мезомасштабных вихревых структур. В таких условиях даже относительно небольшие изменения атмосферной обстановки способны радикально изменить направление переноса загрязнения.

Распространение загрязняющих веществ в Юго-Восточной Балтике

Юго-восточная часть Балтийского моря (рис. 5) является не только зоной интенсивного судоходства, но и районом добычи углеводородов: на шельфе эксплуатируется месторождение Кравцовское (D-6), где ООО «ЛУКОЙЛ-КМН» осуществляет добычу нефти с использованием морской ледостойкой стационарной платформы. При этом многолетний спутниковый мониторинг (2004–2015 гг.) не выявил загрязнений, связанных с эксплуатацией платформы, что указывает на высокую эффективность экологических мер и подтверждает, что основной риск нефтяных разливов в регионе связан не с добычей, а с транспортировкой нефти и ростом судоходства.

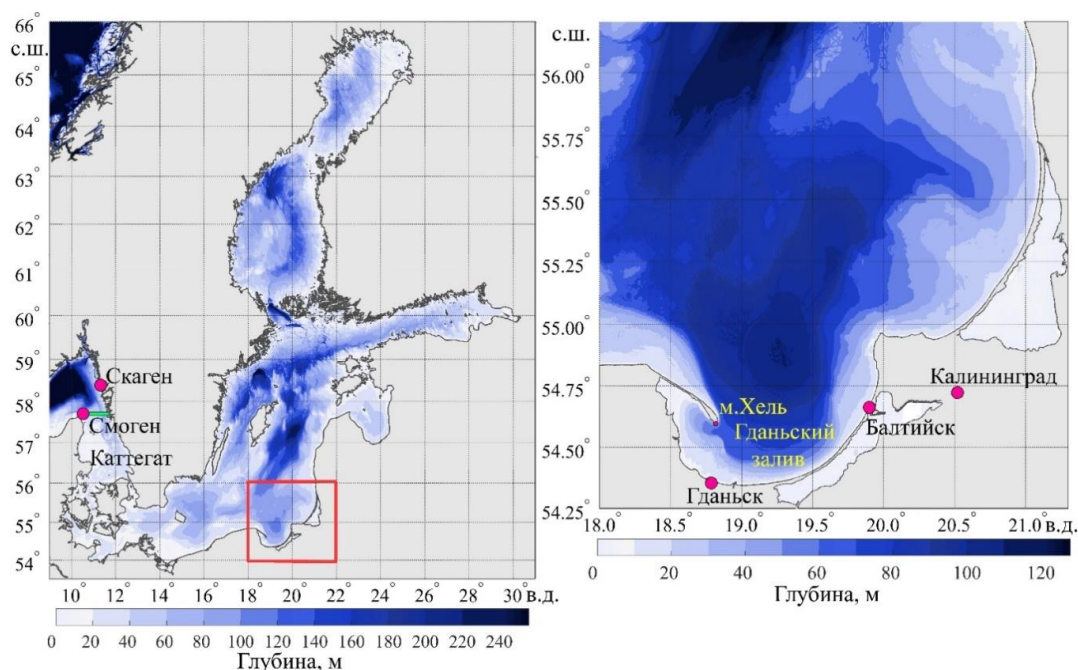


Рис. 5. Донная топография Балтийского моря. Красной линией обозначена жидкая граница модели INMOM. Красным прямоугольником показана область исследования (показана справа). Зеленой линией показана жидкая граница между Балтийским и Северным морями [5]

Исследование, выполненное с использованием гидродинамической модели циркуляции моря и лагранжева отслеживания маркеров, было направлено на анализ путей распространения поверхностных загрязнений и выявление факторов, определяющих их пространственную структуру. Численные эксперименты показали, что динамика переноса в Балтийском море во многом определяется ветровым воздействием на поверхностный слой, который реагирует на изменения атмосферных условий значительно быстрее, чем глубинные воды. В результате траектории пассивных маркеров, имитирующих загрязнение, выделяют сложную систему вдольбереговых и офшорных потоков, способных переносить загрязняющее вещество как вдоль побережья, так и в центральную часть акватории.

Особенно важным результатом стало выявление зон накопления загрязнения, формирующихся не только вблизи береговой линии, но и в открытом море. Дазиметрические карты плотности ежесуточных следов траекторий показали существование компактных областей повышенной концентрации маркеров, удалённых от побережья. Это свидетельствует о том, что перенос загрязнения в Балтике контролируется не только средним течением, но и локальными вихревыми структурами и изменчивостью ветрового режима.

Полученные результаты имеют прямое прикладное значение для систем мониторинга и реагирования на аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. Они демонстрируют, что сочетание гидродинамических моделей, метеорологических данных и лагранжева анализа позволяет заранее определить вероятные направления распространения загрязнения и зоны потенциального риска. Такие оценки могут использоваться при разработке планов предупреждения и ликвидации аварийных разливов нефти (ПЛАРН), а также при планировании защитных мероприятий в прибрежных районах.

Таким образом, пример Юго-Восточной Балтики показывает, что лагранжево моделирование эффективно работает не только в локальных портовых акваториях, но и в масштабах целого моря, где перенос загрязнения определяется взаимодействием ветровых процессов, циркуляции и мезомасштабной динамики. Для задач МЧС России это особенно важно, поскольку именно такие сложные условия чаще всего определяют реальное развитие чрезвычайных ситуаций в морской среде.

Антропогенное загрязнение Таганрогского залива Азовского моря

Таганрогский залив Азовского моря представляет собой одну из наиболее уязвимых и одновременно наиболее нагруженных антропогенными воздействиями акваторий региона. Являясь устьевой областью реки Дон, залив аккумулирует значительные объёмы речного стока, содержащего как взвешенные, так и растворённые вещества природного и техногенного происхождения. В сочетании с интенсивной хозяйственной деятельностью в прибрежной зоне это формирует устойчиво высокий уровень загрязнения, что подтверждается многочисленными наблюдениями и оценками экологического состояния региона.

Ключевыми источниками антропогенного загрязнения являются речной сток Дона, несущий сельскохозяйственные, промышленные и бытовые загрязнения; портово-промышленные зоны Таганрога и Мариуполя; прибрежные сбросы и диффузное загрязнение водосборного бассейна. В результате в акваторию залива поступают тяжёлые металлы, нефтепродукты, биогенные вещества и органические загрязнители, которые накапливаются как в водной толще, так и в донных отложениях, создавая длительную экологическую нагрузку.

С гидродинамической точки зрения Таганрогский залив представляет собой мелководную (средние глубины порядка 4–5 м) и высокодинамичную систему, в которой перенос загрязняющих веществ определяется сложным взаимодействием ветрового воздействия, речного стока и локальной циркуляции. Важнейшую роль играет водообмен с Азовским морем через Должанский пролив. При этом характерной особенностью является

высокая кратность обновления вод: годовой объём водообмена в несколько раз превышает объём самого залива.

Однако принципиально важно, что экологические последствия определяются не столько интегральными объёмами водообмена, сколько пространственно-временной структурой переноса загрязнения. Даже при интенсивном обмене вод загрязняющие вещества могут длительно удерживаться в отдельных зонах, формировать локальные области повышенной концентрации, выноситься в открытое море по определённым направлениям. Именно эта задача – выявление реальных путей переноса и зон накопления – требует применения лагранжева подхода.

В рамках лагранжева моделирования загрязнение представляется ансамблем пассивных маркеров, запускаемых в районах основных источников (устье Дона, портовые зоны). Расчёт их траекторий в поле течений позволяет восстановить пространственную организацию переноса, которая принципиально не видна в эйлеровых характеристиках.

Результаты таких расчётов показывают, что Таганрогский залив функционирует как своеобразный “донор загрязнения” для Азовского моря [21]. Показано, что при определённых ветровых условиях происходит вынос загрязнённых вод из залива в открытое море, что, с одной стороны, способствует частичному “самоочищению” прибрежной зоны, а с другой – приводит к распространению загрязнения на более широкие акватории (рис.6).

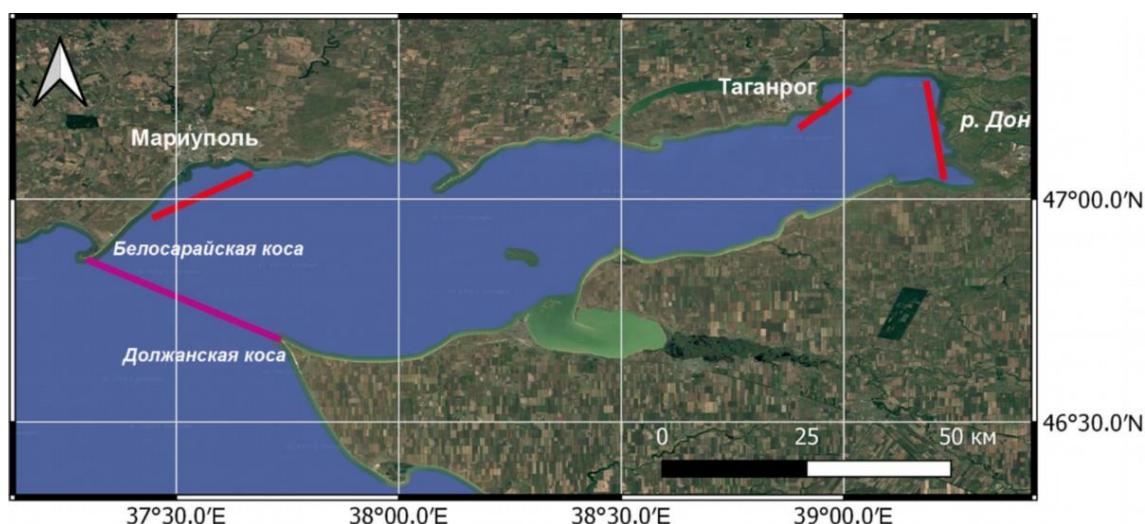


Рис. 6. Таганрогский залив Азовского моря. Красными линиями показаны области запуска при лагранжевом анализе пассивных маркеров, имитирующих загрязнение. Фиолетовой линией обозначена условная граница, разделяющая Таганрогский залив и Азовское море, проходящая между Белосарайской и Должанской косами [21]

Ключевым фактором, определяющим направление и интенсивность переноса, являются ветровые сгонно-нагонные явления. Именно они, а не только речной сток, контролируют водообмен через Должанский пролив и, соответственно, экспорт загрязнения из залива. В зависимости от метеорологических условий возможны принципиально различные сценарии: накопление загрязнения в восточной части залива; вынос загрязнённых вод в центральную часть Азовского моря; формирование вдольбереговых транспортных потоков.

Лагранжев анализ также выявляет наличие зон повышенной устойчивости (аналогов лагранжевых когерентных структур), в которых происходит задержка и аккумуляция загрязнения. Эти зоны представляют особую опасность, поскольку именно здесь формируются долговременные “очаги” экологической нагрузки.

Дополнительным фактором, существенно влияющим на перенос, является ледовый режим. В зимний период значительная часть залива покрывается льдом, что изменяет

структуру циркуляции, ограничивает перемешивание и может способствовать локальному накоплению загрязняющих веществ с последующим их резким перераспределением в период вскрытия.

С практической точки зрения для МЧС России данный регион представляет собой сложную систему с высокой чувствительностью к внешним воздействиям. Лагранжево моделирование позволяет прогнозировать вынос загрязнения из залива в Азовское море; выявлять зоны потенциального накопления загрязняющих веществ; оценивать влияние экстремальных гидрометеорологических условий; планировать мероприятия по экологическому мониторингу и реагированию.

Таким образом, пример Таганрогского залива наглядно демонстрирует, что даже в условиях интенсивного водообмена загрязнение не исчезает, а перераспределяется в пространстве в соответствии с динамикой течений [21]. Для задач МЧС России это означает необходимость перехода от оценки “уровня загрязнения” к анализу его переноса, где лагранжево моделирование выступает как ключевой инструмент выявления реальных путей распространения антропогенной нагрузки и управления экологическими рисками.

Прогнозирование последствий аварий на морских АЭС и прибрежных ядерных объектах методами лагранжева моделирования

Строительство и эксплуатация атомных электростанций (АЭС) в регионах с высокой сейсмической активностью представляет собой одну из наиболее острых проблем современной экологической безопасности. Особую угрозу для мирового океана несут прибрежные ядерные объекты, где разрушение инфраструктуры в результате природных катаклизмов может привести к неконтролируемому выбросу радионуклидов в морскую среду.

Случаи на АЭС «Касивадзаки-Карива» и катастрофа на АЭС «Фукусима-1» демонстрируют, что даже современные инженерные системы защиты не могут полностью исключить риск попадания радионуклидов в морскую среду при сильных сейсмических воздействиях. Прямые утечки из бассейнов охлаждения, повреждение резервуаров хранения и вторичный смыв загрязнений с промплощадок формируют комплексную угрозу для трансграничных морских экосистем.

В данных условиях критически важным становится использование методов оперативного лагранжева моделирования. Это позволяет МЧС и экологическим службам заблаговременно прогнозировать траектории дрейфа возможных пятен загрязнения и оценивать время их достижения береговых линий сопредельных государств, обеспечивая необходимый уровень региональной экологической безопасности.

Авария на АЭС “Касивадзаки-Карива”

Крупнейшая в мире АЭС “Касивадзаки-Карива”, расположенная на западном побережье острова Хонсю (префектура Ниигата, Япония), находится в зоне экстремального сейсмического риска (рис. 7). Станция включает 7 энергоблоков суммарной мощностью 8,212 ГВт. Расположение объекта непосредственно на берегу Японского моря делает его критически уязвимым перед лицом подземных толчков и угроз, связанных с разрушительным воздействием цунами.

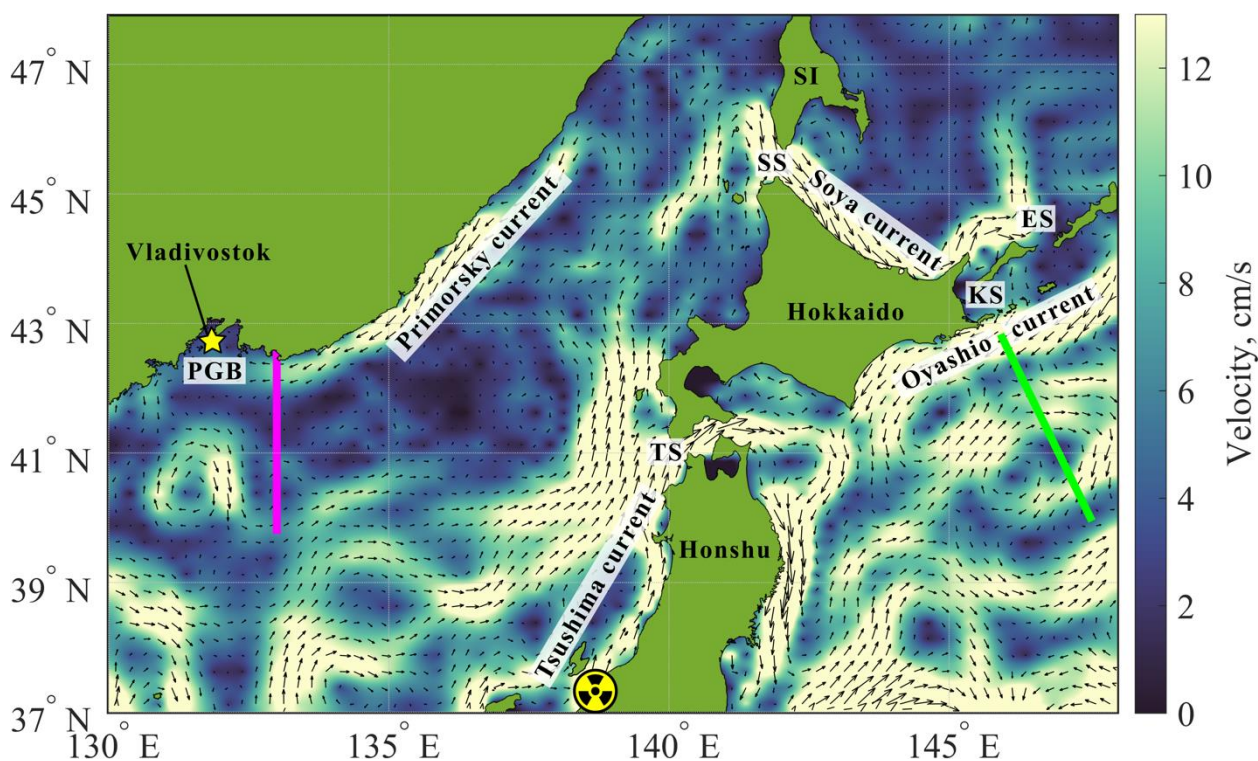


Рис. 7. Поле течений по данным AVISO (осреднение за период 01.01.2013 по 31.12.2023). Меридиональный отрезок сиреневого цвета (I, 40,0°–43,0° с.ш., 133° в.д.) пересекает стрежень Приморского течения; отрезок зеленого цвета (II, 40,2°–43,084° с.ш., 145,917°–147,55° в.д.) соответствует юго-западной границе Южно-Курильской рыболовной зоны. Обозначения: SI – Сахалин, KS – Кунаширский пролив, ES – пролив Екатерины, SS – пролив Лаперуза (Soya strait), TS – Сангарский пролив (Tsugaru strait), PGB – залив Петра Великого (Peter the Great Bay). Символ ☢ показывает расположение АЭС “Касивадзаки-Карива” в Японском море [15, 16]

История эксплуатации станции АЭС “Касивадзаки-Карива” подтверждает реальность угроз, связанных с геологической нестабильностью региона:

- Инцидент 2007 года. Землетрясение магнитудой 6,8 с эпицентром в 19 км от станции привело к серьезным структурным повреждениям. Подвижки почвы под реакторами вызвали утечку радиоактивной воды из резервуаров хранения отработанного топлива в зону общего доступа под шестым блоком. Было зафиксировано опрокидывание более 400 емкостей с низкоактивными отходами, пожар на трансформаторе и повреждение фильтрационных систем, что привело к выходу радиоактивной пыли в атмосферу.

- События 2024 года. Несмотря на длительную приостановку работы станции для антисейсмической модернизации (2021–2023 гг.), первый же день после возобновления эксплуатации ознаменовался серией мощных толчков магнитудой 7,6. Проверка бассейнов выдержки топлива выявила разлив радиоактивной воды из реакторов №2 и №7. Хотя объемы утечек (около 10 и 4 литров соответственно) были признаны локальными, сам факт нарушения целостности систем в первый день работы после ревизии указывает на сохраняющуюся уязвимость инфраструктуры.

Применение лагранжевых методов позволяет МЧС строить вероятностные карты распространения “пятен” радиоактивного загрязнения. Моделирование показывает, что динамика адвекции в Японском море крайне изменчива. Загрязненные водные массы могут подхватываться основными течениями (такими как Цусимское течение) и переноситься вдоль побережья. Исследования, представленные в работах [15, 16], показывают, что при определенных условиях частицы могут достигать удаленных районов за относительно короткие промежутки времени (от нескольких недель до месяцев). Лагранжевы карты

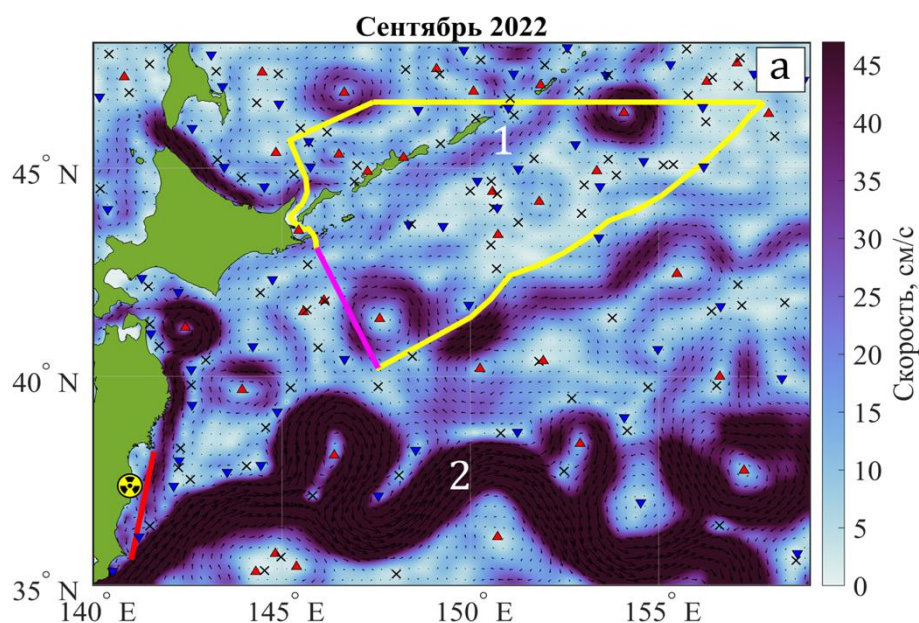
позволяют заранее определить, какие участки акватории и прибрежной зоны РФ находятся в зоне первоочередного риска. Это критически важно для своевременного введения ограничений на рыболовство и водопользование.

Для МЧС использование лагранжева подхода дает ряд стратегических преимуществ. Во-первых, модели позволяют выявить “коридоры” наиболее вероятного прохождения загрязненных вод, где целесообразно размещать буи-анализаторы. Во-вторых, расчет концентрации виртуальных лагранжевых частиц помогает оценить потенциальную дозу облучения морских экосистем, что позволяет оценить экологический ущерб.

Следует особо подчеркнуть, что в условиях неопределенности (например, при выходе из строя датчиков контроля на самой АЭС) расчетные методы остаются единственным источником данных для прогнозирования движения радиационного облака или пятна. Таким образом, интеграция лагранжева моделирования в систему мониторинга МЧС позволяет перейти от констатации факта загрязнения к превентивному планированию защитных мероприятий, минимизируя риски для населения и экологии Дальнего Востока.

Авария на АЭС «Фукусима-1»

Ядерная катастрофа на АЭС «Фукусима-1», произошедшая в марте 2011 года, стала крупнейшим радиационным инцидентом современности, оказавшим трансграничное воздействие на экосистему Тихого океана (рис. 8). Станция, расположенная на восточном побережье острова Хонсю, подверглась воздействию мощного землетрясения и последовавшего за ним цунами, что привело к расплавлению активных зон реакторов и масштабному выбросу радионуклидов. Основными путями попадания радиоактивных элементов в океан стали прямой слив технической воды с промышленной площадки, атмосферные осадки на поверхность моря и последующий смыв радионуклидов с почвы. Этот опыт подчеркнул необходимость внедрения жестких протоколов контроля и превентивного моделирования последствий для аналогичных объектов.



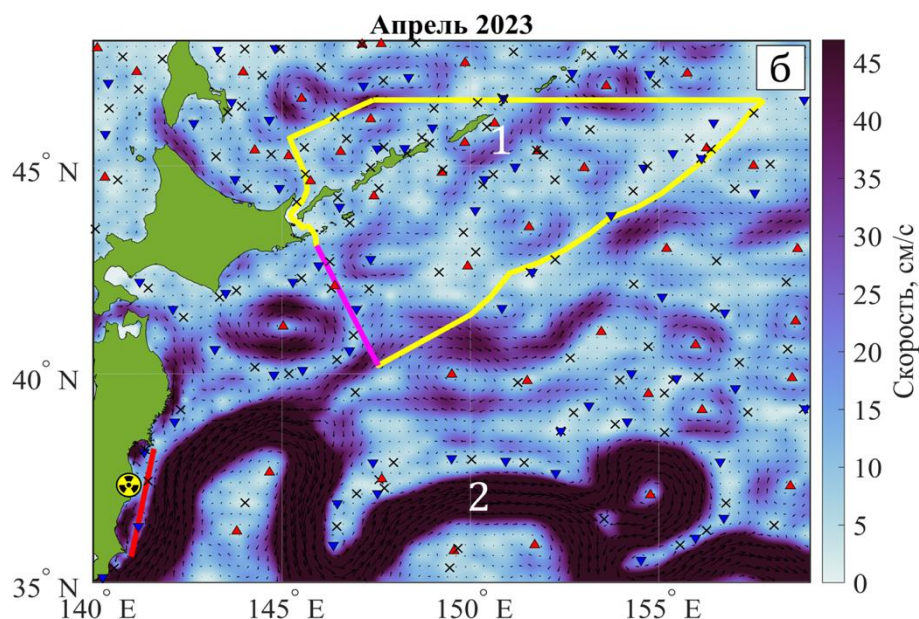


Рис. 8. Расположение АЭС «Фукусима-1» (координаты $37^{\circ}25'12.0''$ с. ш., $141^{\circ}2'58.0''$ в. д.) показано знаком радиационной опасности ☢. Желтая линия обозначает границы Южно-Курильской рыболовной зоны РФ. Розовый отрезок – юго-западная ее граница. Красный отрезок – область запуска (при лагранжевом анализе в прямом времени) и ловли (при лагранжевом анализе в обратном времени) пассивных маркеров, имитирующих загрязнение. Цветом показана топография. Геострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным AVISO и усредненные за сентябрь 2022 г. а) и апрель 2023 г. б). Течения: 1 – Ойясио, 2 – Куроисио. Стрелками показаны вектора течений, цветовая шкала соответствует модулю скорости. Красный отрезок (35.6° с. ш., 141° в. д. – 38.3° с. ш., 141.6° в. д.) расположен вблизи АЭС «Фукусима-1» от него рассчитываются траектории маркеров. Красные треугольники ▲ соответствуют центрам антициклонов, синие ▼ – циклонов. Черными крестиками показаны гиперболические точки [23]

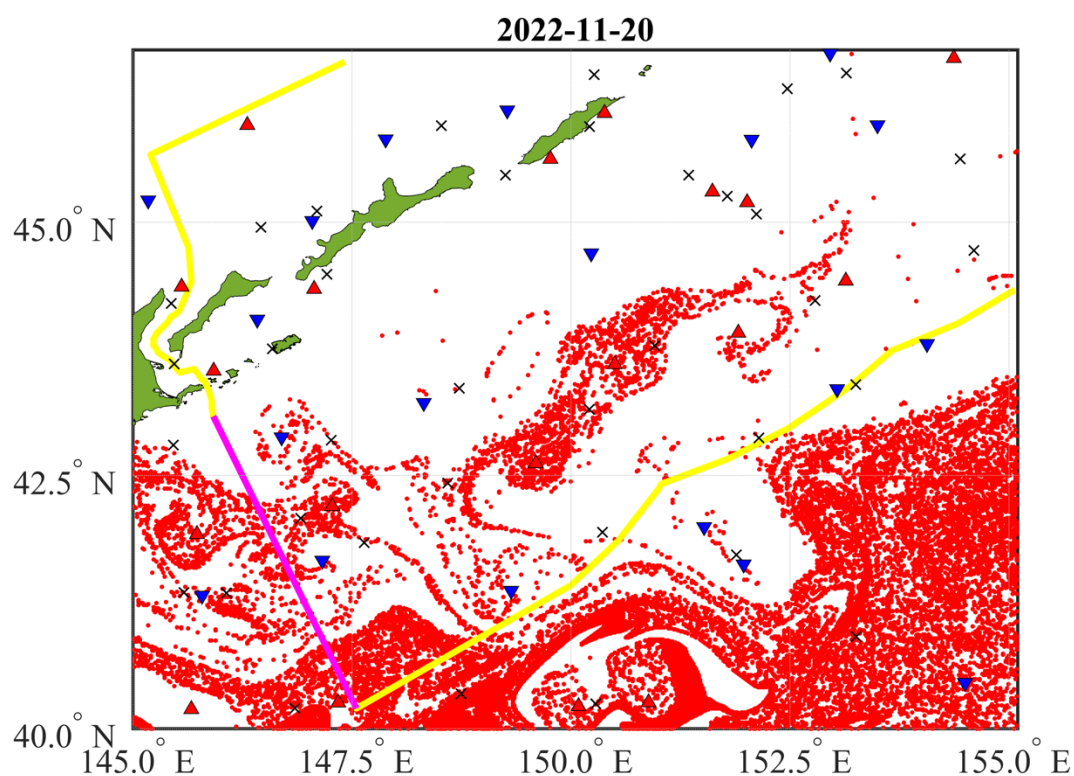
Особую актуальность проблема приобрела в последние годы в связи с санкционированным сливом очищенной технической воды, накопленной в резервуарах станции. Для оценки рисков распространения этих вод в северо-западной части Тихого океана критически важным является использование лагранжева моделирования. Согласно исследованиям [22–24], перенос загрязненных водных масс определяется сложной динамикой системы течений Куроисио и Ойясио. Лагранжево моделирование выявило ключевые механизмы адвекции:

- Роль течения Куроисио. Основной поток течения выступает в роли динамического барьера, препятствующего быстрому распространению загрязнений на юг, однако меандрирование (изгибы) Куроисио и формирование мезомасштабных вихрей способствуют захвату и переносу “пятен” загрязнения в открытый океан.

- Вихревая адвекция. Было установлено, что антициклонические вихри способны перемещать изолированные объемы загрязненной воды на значительные расстояния, сохраняя в них концентрацию примеси выше фоновых значений.

- Сезонная изменчивость. Моделирование показало, что пути дрейфа частиц существенно зависят от сезона. В определенные периоды (особенно при усилении северных ветров и соответствующей динамике течений) формируются условия для выноса водных масс в сторону Южно-Курильской рыболовной зоны.

Результаты лагранжева моделирования, представленные в работах [22–24], вносят критические коррективы в существовавшие ранее представления о безопасности последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» для российских акваторий. Вопреки распространенному мнению о том, что система региональных течений надежно изолирует побережье России от радиоактивных частиц, перенося их строго на восток в открытый океан, детальный анализ траекторий пассивных маркеров подтвердил реальный риск трансграничного загрязнения Южно-Курильской рыболовной зоны (ЮКРЗ) (рис. 9). Исследования показали, что потенциально “грязные” маркеры не только достигают границ ЮКРЗ, но и способны проникать через Курильские проливы в Охотское море, причем в определенных гидродинамических условиях была зафиксирована возможность аномально быстрой адвекции загрязнения – всего за 13 суток от момента сброса. Такой стремительный перенос обусловлен захватом радиоактивных масс первым меандром Куроисио и их последующей транспортировкой системой мезомасштабных антициклонических вихрей непосредственно к границам российского рыбопромыслового района. ЮКРЗ является стратегически важным регионом для экономики РФ, где ведется активная добыча ценных биоресурсов, включая сайру, сардину, скумбрию, тресковые виды, камбалу, тихоокеанских лососей, а также крабов, моллюсков и иглокожих. Учитывая способность трития и изотопов цезия накапливаться в морских организмах и передаваться по пищевым цепям, обнаруженная порционность и сезонная зависимость поступления загрязнения (с пиками в осенний и весенний периоды) требуют пересмотра старых оценок безопасности и внедрения системы непрерывного лагранжева мониторинга для защиты побережья. Дополнительное подтверждение долгосрочных рисков приводится в работе [25], где на основе численного моделирования на период 2023–2025 гг. показано, что при сохранении темпов сброса очищенной воды активность трития в морской воде Дальневосточного региона будет иметь тенденцию к росту. В частности, авторы указывают на формирование зон потенциального накопления радионуклидов в районах активного рыболовства, что в сочетании со способностью изотопов встраиваться в трофические цепи требует внедрения системы непрерывного лагранжева мониторинга для обеспечения радиационной безопасности прибрежных регионов России и строгого контроля качества поставляемой на рынок продукции и обеспечения радиационной чистоты вылавливаемой продукции.



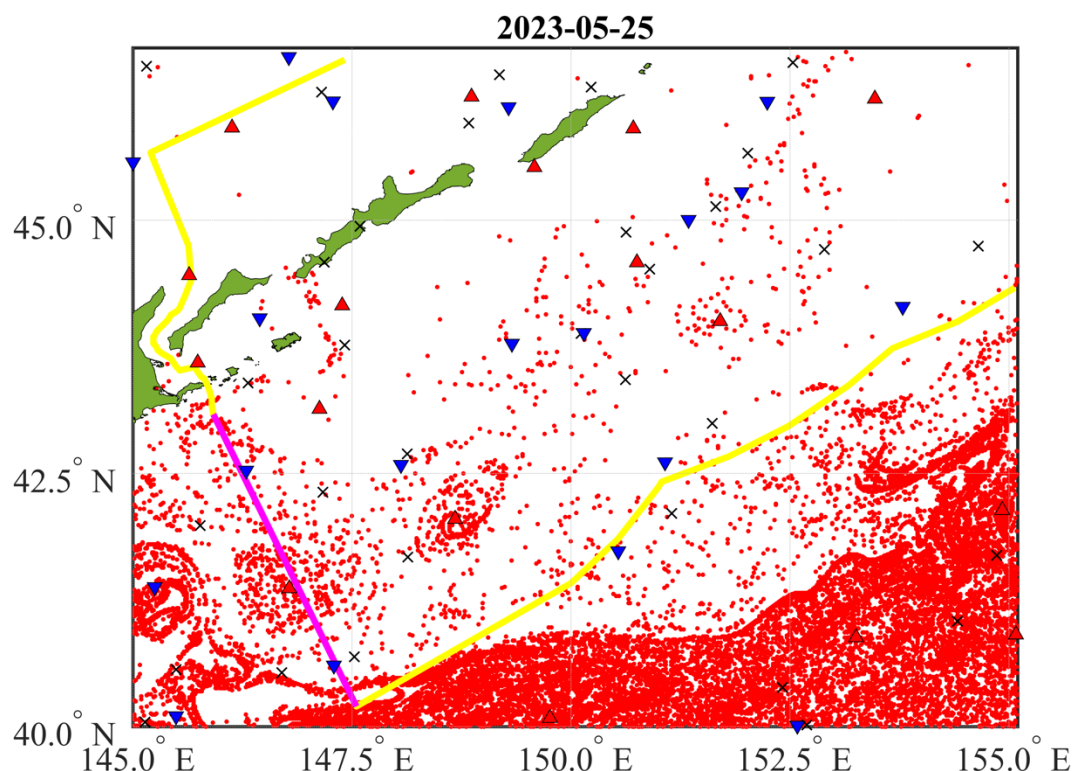


Рис. 9. Пространственное распределение “грязных” маркеров, ассоциируемых с потенциальным радиоактивным загрязнением после первого слива технической воды с АЭС «Фукусима-1» в августе 2024 года, на 20 ноября 2022 г. и 25 мая 2023 г. Треугольники и крестики означают то же, что и на рис. 8 [23]

Для МЧС России результаты лагранжева анализа имеют фундаментальное стратегическое значение, выступая научной основой для оперативного планирования и развертывания мониторинговых миссий в исключительной экономической зоне Российской Федерации. Практическое применение расчетных методов позволяет решать комплекс критических задач по обеспечению радиационной и продовольственной безопасности в Дальневосточном регионе: точная оценка “времени транзита” виртуальных лагранжевых частиц к акваториям Южных Курил дает ведомству необходимый временной резерв для заблаговременной корректировки графиков работы рыболовного флота и вывода судов из зон потенциального прохождения пятен загрязнения. На основе прогнозных траекторий дрейфа могут быть сформированы планы адресного радиологического контроля в ключевых районах промысла, что позволяет гарантировать экологическую чистоту изымаемых биоресурсов и предотвратить масштабный экономический ущерб. Кроме того, использование лагранжева моделирования оптимизирует распределение сил и средств ведомства, позволяя с высокой точностью определять районы для постановки специализированных гидрофизических буев и проведения судовых экспресс-анализов проб воды в наиболее опасных “коридорах” переноса, избавляя от необходимости сплошного и ресурсозатратного мониторинга всей акватории.

Таким образом, на примере катастрофы на АЭС «Фукусима-1» окончательно подтверждается, что лагранжевы методы являются безальтернативным инструментом оперативного прогнозирования экологических рисков в масштабах целых океанических бассейнов, переводя систему поддержки принятия решений МЧС России на качественно новый уровень – от пассивной констатации фактов к активному стратегическому управлению рисками в условиях высокой неопределенности.

Заключение

Проведённые исследования показали, что ключевым ограничением традиционных подходов МЧС России к работе в морской среде является их эйлерова основа: они описывают поля, но не судьбу конкретного вещества, человека или загрязняющего пятна. В условиях сложной многомасштабной циркуляции океана, наличия струй, фронтов и мезомасштабных вихрей именно траектории частиц определяют реальные сценарии развития чрезвычайных ситуаций, “временные окна” их эволюции и зоны наибольшего риска.

На конкретных примерах – от Таганрогского залива до потенциальных аварий на прибрежных АЭС – показано, что загрязнение в море не исчезает, а перераспределяется, формируя устойчивые зоны аккумуляции и направленные потоки выноса, которые невозможно корректно описать без расчёта лагранжевых траекторий. Именно лагранжево моделирование позволяет перейти от констатации “уровня загрязнения” к анализу его реального переноса и последствий для прибрежных социально-экономических систем.

В таком контексте лагранжевы методы перестают быть вспомогательным инструментом и становятся инфраструктурой современной системы реагирования МЧС России в океане. Без интеграции лагранжева моделирования в оперативную практику невозможно ни достоверно прогнозировать распространение опасных веществ, ни планировать эффективные поисково-спасательные операции, ни оценивать реальные временные рамки и географию риска. Это означает, что отказ от лагранжева подхода де-факто лишает МЧС прогностической компоненты и переводит работу в морской среде в режим хронически запаздывающей реакции “по факту произошедшего” – с прямыми последствиями для экологической, экономической и национальной безопасности России.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования Санкт-Петербургскому государственному университету (грант № 129659573) и Российскому научному фонду (РНФ, грант № 25-17-00021), а также ТОИ ДВО РАН (госзадание № 124022100072–5 “Фундаментальные основы адаптационных стратегий развития экосистем в условиях глобальных климатических изменений”). Лагранжевы вычисления были выполнены при поддержке программы Инжинирингового центра развития технологий исследования и освоения ресурсов Мирового океана ТОИ ДВО РАН.

Список источников

1. Анализ законодательства в области организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на объектах Арктической зоны Российской Федерации / Р.Ю. Шестаков [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2024. № 9. С. 147–152. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-9-147-152.
2. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 1. Методология / С.Н. Зацепя [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 26–38.
3. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 2. Особенности реализации прикладных задач / С.Н. Зацепя [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 5–18.
4. Lagrangian Oil Spill Simulation in Peter the Great Bay (Sea of Japan) with a High-Resolution ROMS Model / S.V. Prants [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2023. Vol. 180. P. 551–568. DOI: 10.1007/s00024-022-03222-6.
5. Лагранжево моделирование путей переноса загрязнения на морской поверхности в Юго-Восточной Балтике на основе INMOM / М.В. Будянский [и др.] // Метеорология и гидрология. № 4. 2026. С. 121–142.

6. Пугачева П.В., Гончар А.Э., Шестаков Р.Ю. Анализ нового законодательства, регламентирующего разработку и утверждение планов предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на объектах магистральных трубопроводов // Нефтяное хозяйство. 2021. № 9. С. 122–128. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-9-122-128.
7. Совершенствование законодательства в области разработки и утверждения планов по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на объектах магистральных трубопроводов / А.В. Захарченко [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т. 10. № 6. С. 654–662. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-654-662.
8. Шабас И.Н. Моделирование на высокопроизводительных вычислительных системах процессов распространения многокомпонентных примесей в водоеме // «Вестник Южно-Уральского государственного университета». Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3. № 1. С. 89–96.
9. Математическое моделирование эволюции примеси в Азовском море / В.А. Иванов [и др.]. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2006. № 14. С. 230–239.
10. Белова Ю.В., Чистяков А.Е. Моделирование динамики концентрации вредоносных видов фитопланктона в Таганрогском заливе Азовского моря // Безопасность техногенных и природных систем. 2025. Т. 9. № 4. С. 284–293. DOI: 10.23947/2541-9129-2025-9-4-284-293.
11. Чистяков А.Е., Кузнецова И.Ю. Оценка экологических рисков мелководного водоема при проведении дноуглубительных работ // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. Т. 8. № 2. С. 37–46. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46.
12. Белова Ю.В., Никитина А.В. Применение методов усвоения данных наблюдений для моделирования распространения загрязняющих веществ в водоеме и управления устойчивым развитием // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. Т. 8. № 3. С. 39–48. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48.
13. The impact of circulation features on the dispersion of radionuclides after the nuclear submarine accident in Chazhma Bay (Japan Sea) in 1985: A retrospective Lagrangian simulation / M.V. Budyansky [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 177. 113483. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113483.
14. Search and rescue at sea aided by hidden flow structures / M. Serra [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 2525. DOI: 10.1038/s41467-020-16281-x.
15. Потенциальная опасность радиационного загрязнения морской среды из-за возможных землетрясений вблизи АЭС «Касивадзаки-КАРИВА» / М.В. Будянский [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 520. № 2. С. 348–358. DOI: 10.31857/S2686739725020204.
16. Potential Hazard of Radioactive Contamination of the Marine Environment Due to Possible Earthquakes near the Kashiwazaki–Kariwa Nuclear Power Plant / M.V. Budyansky [et al.] // Doklady Earth Sciences. 2025. Vol. 520. No. 5. DOI: 10.1134/S1028334X24604358.
17. Бокатов А.Ю., Лабузов А.Г. Проблемы при ликвидации аварийных разливов нефти на арктическом шельфе // Судостроение. 2021. № 6(859). С. 56–58.
18. Пример сопоставления вихревых структур в полях эйлеровых и лагранжевых характеристик для Северо-западной части Тихого океана / Е.В. Новоселова [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2024. Т. 69. № 2. С. 372–388. DOI: 10.21638/spbu07.2024.209.
19. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean / M.V. Budyansky [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 96. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
20. Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean // Cham: Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-53022-2.
21. Dynamics of anthropogenic pollutant spread from Taganrog Bay into the Sea of Azov / M.V. Budyansky [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2026.

22. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone / M.V. Budyansky [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24. ES4002. DOI: 10.2205/2024es000934.

23. Оценка загрязнения вод Южно-Курильской рыболовной зоны радиоактивными водами АЭС «Фукусима-1» на основе лагранжева моделирования / М.В. Будянский [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 515. № 1. С. 164–174. DOI: 10.31857/S2686739724030212.

24. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea. / M.V. Budyansky [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2025. Vol. 182. P. 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.

25. Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1» / А.Ю. Попова [и др.] // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19. № 1. С. 7–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-22.

References

1. Analiz zakonodatel'stva v oblasti organizacii meropriyatij po preduprezhdeniyu i likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov na ob'ektax Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii / R.Yu. Shestakov [i dr.] // Neftyanoe khozyajstvo. 2024. № 9. S. 147–152. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-9-147-152.

2. Modelirovanie razlivov nefi v more dlya planirovaniya meropriyatij po obespecheniyu ekologicheskoy bezopasnosti pri realizacii neftegazovyx proektov. Chast' 1. Metodologiya / S.N. Zacepa [i dr.] // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2015. № 4(106). S. 26–38.

3. Modelirovanie razlivov nefi v more dlya planirovaniya meropriyatij po obespecheniyu ekologicheskoy bezopasnosti pri realizacii neftegazovyx proektov. Chast' 2. Osobennosti realizacii prikladnyx zadach / S.N. Zacepa [i dr.] // Problemy Arktiki i Antarktiki. 2016. № 1(107). S. 5–18.

4. Lagrangian Oil Spill Simulation in Peter the Great Bay (Sea of Japan) with a High-Resolution ROMS Model / S.V. Prants [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2023. Vol. 180. P. 551–568. DOI: 10.1007/s00024-022-03222-6.

5. Lagranzhevo modelirovanie putej perenosa zagryazneniya na morskoy poverxnosti v Yugo-Vostochnoj Baltike na osnove INMOM / M.V. Budyanskij [i dr.] // Meteorologiya i gidrologiya. 2026. № 4. 2026. S. 121–142.

6. Pugacheva P.V., Gonchar A.E., Shestakov R.Yu. Analiz novogo zakonodatel'stva, reglamentiruyushhego razrabotku i utverzhdenie planov preduprezhdeniya i likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov na obektax magistral'nyx truboprovodov // Neftyanoe khozyajstvo. 2021. № 9. S. 122–128. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-9-122-128.

7. Sovershenstvovanie zakonodatel'stva v oblasti razrabotki i utverzhdeniya planov po preduprezhdeniyu i likvidacii razlivov nefi i nefteproduktov na obektax magistral'nyx truboprovodov / A.V. Zaxarchenko [i dr.] // Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov. 2020. T. 10. № 6. S. 654–662. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-6-654-662.

8. Shabas I.N. Modelirovanie na vysokoproizvoditel'nyx vychislitel'nyx sistemax processov rasprostraneniya mnogokomponentnyx primesej v vodoeme // «Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta». Seriya: Vychislitel'naya matematika i informatika. 2014. T. 3. № 1. S. 89–96.

9. Matematicheskoe modelirovanie e'volyucii primesi v Azovskom more / V.A. Ivanov [i dr.] // E'kologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shel'fovoj zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa. 2006. № 14. S. 230–239.

10. Belova Yu.V., Chistyakov A.E. Modelirovanie dinamiki koncentracii vredonosnyx vidov fitoplanktona v Taganrogskom zalive Azovskogo morya // Bezopasnost' tehnogennyx i prirodnnyx sistem. 2025. T. 9. № 4. S. 284–293. DOI: 10.23947/2541-9129-2025-9-4-284-293.

11. Chistyakov A.E., Kuzneczova I.Yu. Ocenka ekologicheskix riskov melkovodnogo vodoema pri provedenii dnouglubitel'ny`x rabot // Bezopasnost' texnogennyx i prirodnyx sistem. 2024. T. 8. № 2. S. 37–46. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-37-46.
12. Belova Yu.V., Nikitina A.V. Primenenie metodov usvoeniya dannyx nablyudenij dlya modelirovaniya rasprostraneniya zagryaznyayushhix veshhestv v vodoeme i upravleniya ustojchivym razvitiem // Bezopasnost' texnogennyx i prirodnyx sistem. 2024. T. 8. № 3. S. 39–48. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-3-39-48.
13. The impact of circulation features on the dispersion of radionuclides after the nuclear submarine accident in Chazhma Bay (Japan Sea) in 1985: A retrospective Lagrangian simulation / M.V. Budyansky [et al.] // Marine Pollution Bulletin. 2022. Vol. 177. 113483. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.113483.
14. Search and rescue at sea aided by hidden flow structures / M. Serra [et al.] // Nature Communications. 2020. Vol. 11. 2525. DOI: 10.1038/s41467-020-16281-x.
15. Potencial'naya opasnost' radiacionnogo zagryazneniya morskoy sredy iz-za vozmozhnyx zemletryasenij vblizi AES «Kasivadzaki-KARIVA» / M.V. Budyanskij [i dr.] // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle. 2025. T. 520. № 2. S. 348–358. DOI: 10.31857/S2686739725020204.
16. Potential Hazard of Radioactive Contamination of the Marine Environment Due to Possible Earthquakes near the Kashiwazaki–Kariwa Nuclear Power Plant / M.V. Budyansky [et al.] // Doklady Earth Sciences. 2025. Vol. 520. No. 5. DOI: 10.1134/S1028334X24604358.
17. Bokatov A.Yu., Labuzov A.G. Problemy pri likvidacii avarijnyx razlivov nefi na arkticheskom shel'fe // Sudostroenie. 2021. № 6(859). S. 56–58.
18. Primer sopostavleniya vixrevy`x struktur v polyax ejlerovyx i lagranzhevyyx xarakteristik dlya Severo-zapadnoj chasti Tixogo okeana / Novoselova E.V. [i dr.] // «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta». Nauki o Zemle. 2024. T. 69. № 2. S. 372–388. DOI: 10.21638/spbu07.2024.209.
19. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean / M.V. Budyansky [et al.] // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. Vol. 96. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
20. Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. Cham: Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-53022-2.
21. Dynamics of anthropogenic pollutant spread from Taganrog Bay into the Sea of Azov / M.V. Budyansky [et al.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2026.
22. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone / M.V. Budyansky [i dr.] // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24. ES4002. DOI: 10.2205/2024es000934.
23. Ocenka zagryazneniya vod Yuzhno-Kuril'skoj rybolovnoj zony radioaktivnymi vodami AE'S «Fukusima-1» na osnove lagranzheva modelirovaniya / M.V. Budyanskij [i dr.] // Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle. 2024. T. 515. № 1. S. 164–174. DOI: 10.31857/S2686739724030212.
24. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea / M.V. Budyanskij [et al.] // Pure and Applied Geophysics. 2025. Vol. 182. P. 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.
25. Obespechenie radiacionnoj bezopasnosti naseleniya dal'nevostochny`x regionov Rossijskoj Federacii v usloviyax dolgovremennogo sbrosa vody` s AE'S «Fukusima-1» / A.Yu. Popova [i dr.] // Radiacionnaya gigiena. 2026. T. 19. № 1. S. 7–22. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-22.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 21.03.2026; одобрена после рецензирования: 17.05.2026; принята к публикации: 27.05.2026

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 21.03.2026; approved after review: 17.05.2026; accepted for publication: 27.05.2026

Информация об авторах:

Будянский Максим Васильевич, ведущий научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, e-mail: plaztic@poi.dvo.ru, SPIN-код: 4301-2220

Улейский Михаил Юрьевич, ведущий научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, e-mail: uleysky@poi.dvo.ru, SPIN-код: 6373-0580

Лебедева Мария Алексеевна, старший инженер Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), e-mail: lebedevamasha671@gmail.com, SPIN-код: 7877-9778

Файман Павел Аркадьевич, ведущий научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, e-mail: pavel.fayman@yandex.ru, SPIN-код: 8880-4600

Белоненко Татьяна Васильевна, профессор кафедры океанологии СПбГУ (199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д. 7–9), доктор географических наук, e-mail: btvlisab@yandex.ru, SPIN-код: 1978-1620

Information about the authors:

Budyansky M. V., Head Scientist Researcher at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43), PhD in Physics and Mathematics, e-mail: plaztic@poi.dvo.ru, SPIN: 4301-2220

Uleysky M. Yu., Head Scientist Researcher at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43), PhD in Physics and Mathematics, e-mail: uleysky@poi.dvo.ru, SPIN: 6373-0580

Lebedeva M. A., senior engineer at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43), PhD in Physics and Mathematics, e-mail: lebedevamasha671@gmail.com, SPIN: 7877-9778

Fayman P. A., Head Scientist Researcher at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (690041, Vladivostok, Baltiyskaya str., 43), PhD in Physics and Mathematics, e-mail: pavel.fayman@yandex.ru, SPIN: 8880-4600

Belonenko T. V., Full Professor of the Department of Oceanology, St. Petersburg State University (199034, St. Petersburg, Universitetskaya emb., 7–9), PhD in Geography, e-mail: btvlisab@yandex.ru, SPIN: 1978-1620