

Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1»

Попова А.Ю.¹, Романович И.К.², Репин В.С.², Варфоломеева К.В.², Зеленцова С.А.², Седнев К.А.², Библин А.М.², Будянский М.В.^{3,4}, Лебедева М.А.^{3,4}, Улейский М.Ю.³, Белоненко Т.В.⁴

¹ Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия

² Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия

⁴ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В связи с планируемым длительным сбросом воды, содержащей тритий, из АЭС «Фукусима-1» ожидается постепенное повышение его содержания в прибрежных акваториях дальневосточных регионов Российской Федерации. Целью исследования является совершенствование методов обеспечения радиационной безопасности населения в условиях долговременного сброса радиоактивной воды с АЭС «Фукусима-1» на основе численного моделирования циркуляции морских течений. Материалы и методы: Для анализа содержания трития использованы пробы морской воды из прибрежных акваторий Камчатского, Приморского и Хабаровского края, Магаданской и Сахалинской областей, и Чукотского автономного округа за период 2023-2025 гг. Для описания процессов переноса трития применены лагранжевы модели, учитывающие пространственно-временную структуру океанической циркуляции и течений. Результаты исследования и обсуждение: Показано, что средние значения удельной активности трития в пробах, взятых на расстоянии до 1000 м от берега, варьируют от менее 1,0 Бк/кг до 5,5 Бк/кг. Численное моделирование выявило вероятные зоны накопления трития, сбрасываемого с очищенной водой с АЭС «Фукусима-1»: южные Курилы, остров Сахалин, южная оконечность полуострова Камчатка и остров Беринга. Восточно-Камчатское течение формирует динамический барьер вдоль восточного побережья Камчатки, ограничивая проникновение загрязнённых вод в прибрежные районы. Заключение: Для организации эффективного долгосрочного мониторинга трития в морской воде, а впоследствии в морепродуктах, необходимо уточнение районов наиболее вероятного накопления трития в акваториях Дальнего Востока России.

Ключевые слова: АЭС Фукусима-1, тритий, удельная активность, морская вода, моделирование морских течений, Тихий океан, Дальневосточный федеральный округ.

Введение

В процессе ликвидации последствий аварии, произошедшей в Японии в 2011 году на АЭС «Фукусима-1», компания-оператор Токуо Electric Power Company Holdings (TEPCO), обслуживающая АЭС «Фукусима-1», столкнулась с необходимостью утилизации большого объёма воды (1,37 млн. тонн), очищенной от радионуклидов, за исключением трития (³H) [1–3]. Суммарная активность трития в резервуарах на 2020 год составляла 860 ТБк, а удельная активность – 730 кБк/л [4, 5]. Поскольку тритий, входящий в состав молекул воды, не поддается очистке, правительство Японии по согласованию с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) приняло решение разбавлять высокоактивную воду и поэтапно сбрасывать разбавленную воду в Тихий океан в течение 30 лет [6]. Японским национальным законодательством, во взаимодействии с МАГАТЭ, был установлен норматив для объемной активности трития в разбавленной воде перед сбросом, равный 1500 Бк/л, а годовой лимит сброса трития составил 22 ТБк [7]. Первый

сброс воды с тритием с АЭС «Фукусима-1» был выполнен 24 августа 2023 года, а с 11 по 29 сентября 2025 года был проведен пятнадцатый сброс [8]. Объем каждого сброса составлял примерно 8 000 м³. Таким образом, наблюдение за концентрацией трития в водах Тихого океана в период сброса является актуальным. Наблюдения за концентрацией трития в окружающей среде, включая моря и океаны, регулярно проводятся разными странами. Обобщенные сведения о содержании трития в окружающей среде до аварии на АЭС «Фукусима-1» содержатся в техническом докладе МАГАТЭ [9]. Согласно данным, представленным в докладе, объемная активность трития в водах Тихого океана в период активных атмосферных ядерных испытаний (1950–1960 гг.) варьировала от долей до единиц Бк/л в зависимости от региона и года наблюдений.

По данным национальных программ мониторинга содержания трития в морской воде в территориальных водах Гонконга, Южной Кореи и Тайваня в 2025 году активность трития составляла ≤1,8 Бк/кг [10], ≤6,8 Бк/кг [11] и ≤9,8 Бк/кг [12] соответственно.

Репин Виктор Степанович

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E mail: V.Repin@mail.ru

В результате комплексного анализа проб морской воды, отобранных в 2025 году в акватории АЭС «Фукусима-1», ТЕРСО и органами государственной власти Японии установлено, что максимальная объемная активность трития составила 41 Бк/л [13]. В подавляющем большинстве исследованных образцов объемная активность трития в морской воде не превышала 10 Бк/л [14].

В Российской Федерации после аварии на АЭС «Фукусима-1» были проведены комплексные морские экспедиции в 2011–2012, 2014, 2019, 2022–2025 гг. [15–18].

На государственном уровне мониторинг содержания трития в поверхностных водных объектах и осадках проводится Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Результаты наблюдений регулярно публикуются в ежегоднике «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств», однако программа наблюдений не включает исследование уровня трития в морских водах дальневосточных регионов [19, 20].

В связи с началом сброса очищенной воды с АЭС «Фукусима-1», а также учитывая озабоченность руководства предприятий по добыче морепродуктов и беспокойство населения, в ноябре 2023 года на заседании коллегии Роспотребнадзора было принято решение о регулярном контроле содержания трития в морской воде дальневосточных регионов Российской Федерации с целью усиления радиологического надзора. По решению коллегии в проведении мониторинга участвуют ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева) и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» в Камчатском, Приморском, Хабаровском краях, Магаданской, Сахалинской областях и Чукотском автономном округе.

В рамках организации долговременного мониторинга одной из ключевых задач является определение фоновых уровней трития в морской воде, а также проведение сравнительного анализа его содержания в водах Тихого океана до и после аварии на АЭС «Фукусима-1». Реализация данного подхода обеспечивает научную основу для принятия своевременных мер по обеспечению радиационной безопасности населения.

За весь период контроля удельная активность трития во всех пробах морской воды из мониторинговых точек прибрежных вод акваторий внутренних морей и Тихого океана дальневосточных регионов не превышала 8,4 Бк/кг, что существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, получаемой из морской после опреснения (7 600 Бк/л)¹.

Согласно данным, представленным в работах [21, 22], в 2024 году удельная активность трития в поверхностном слое океана к востоку от Японии (от Южных Курил до субтропических широт) составляла 0,40–0,78 тритиевых единиц (ТЕ) (0,048–0,094 Бк/кг), достигая максимальных значений в основной ветви течения Куроисио – от Южных Курил до субтропических вод.

Длительный сброс радиоактивной воды вызывает беспокойство специалистов многих стран прежде всего в связи со сложностью количественной оценки рисков, обусловленных возможным переносом сбрасываемых вод с АЭС «Фукусима-1» морскими течениями в рыбопромысловые районы и зоны добычи морепродуктов.

Тритий, находящийся в составе молекул воды, может переходить в морепродуктах и в организме человека в формы органически связанного трития [2, 24–26]. При образовании таких форм тритий выводится из организма медленнее [23].

Распространение трития от точки сброса к точкам наблюдения подчиняется сложной динамике океанических течений. Для описания переноса трития применяются различные подходы и модели, учитывающие пространственно-временную структуру океанической циркуляции и течений. В северо-западной части Тихого океана мощные океанические течения, такие как Ойясио, Куроисио, Продолжение Куроисио и Северо-Тихоокеанское течение, играют ключевую роль в транспорте радиоактивных веществ от АЭС «Фукусима-1» к дальневосточным регионам Российской Федерации по протяженным маршрутам с заметной временной задержкой [27–41]. В то же время ряд исследований, основанных на численном моделировании циркуляции тихоокеанских течений, показал существование вероятности относительно быстрого переноса трития в территориальные воды России [32, 33].

Хотя крупные и устойчивые океанические течения, хорошо отслеживаемые по спутниковым данным, дают общее представление о циркуляции вод, они не позволяют адекватно описать динамические пути перемещения и процессы смешивания водных масс. В последние годы всё более широкое применение получает лагранжевый подход, который обеспечивает высокоточное отслеживание траекторий частиц воды, оценку временных масштабов переноса радиоактивных веществ и количественную характеристику загрязнения акватории Южно-Курильской рыболовной зоны, расположенной вблизи района сброса сточных вод с АЭС «Фукусима-1».

Цель исследования – совершенствование методов обеспечения радиационной безопасности населения в условиях долговременного сброса радиоактивной воды с АЭС «Фукусима-1» на основе численного моделирования циркуляции морских течений.

Задачи исследования

1. Проведение отбора проб в мониторинговых точках на расстояниях от 1 до 1500 м от береговой линии на поверхностном слое и на глубине 5 м.
2. Определение уровней удельной активности трития в пробах морской воды дальневосточных регионов (Камчатский край, Магаданская область, Приморский край, Сахалинская область, Хабаровский край, Чукотский автономный округ) за период исследования.
3. Разработка и применение численных моделей миграции трития с использованием лагранжевых траекторий (по данным AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of

¹Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.07.2009 г. № 47. Зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 14 августа 2009 г., регистрационный № 14534. [Sanitary Rules and Regulations SanPIN 2.6.1.2523-09 "Radiation Safety Standards (RSS-99/2009)". Approved by Decree No. 47 of the Chief State Sanitary Physician of the Russian Federation on July 7, 2009. Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on August 14, 2009, Registration No. 14534 (In Russ.)]

Satellite Oceanographic) и GLOFRYS12V1 (Global Ocean Physics Reanalysis)) для количественной оценки переноса радиоактивного вещества течениями и мезомасштабными вихрями с целью обоснования оптимальной схемы размещения мониторинговых точек.

Материалы и методы

С целью оценки фоновых уровней трития в морской воде дальневосточных регионов в 2023 году сотрудниками ФБУН

НИИРГ им. П.В. Рамзаева была разработана схема точек отбора проб (рис. 1А), по которой пробы морской воды собирались в 2023–2024 гг. на прибрежных участках в диапазоне 0–1000 м от береговой линии.

Методика отбора проб, их подготовка и измерение активности трития с использованием радиометра «Quantulus 1220» в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева подробно описана в статье [19]. Минимальная детектируемая активность (МДА) при проведении измерений составляла 1 Бк/кг.

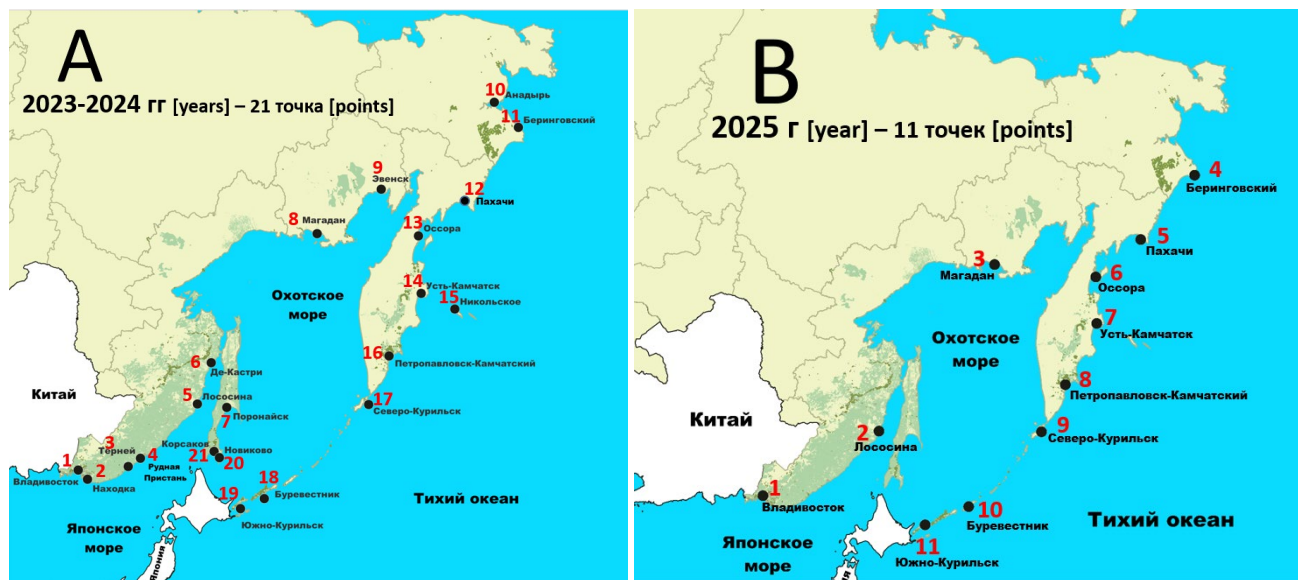


Рис. 1. Карта-схема точек отбора морской воды в дальневосточных регионах в 2023–2024 гг. (А) и 2025 г. (В)
 [Fig. 1. Seawater sampling points in the Russian Far East regions, 2023–2024 (A) and 2025 (B)]

В 2025 году для продолжения мониторинга содержания трития в морской воде с учетом данных, полученных в 2023–2024 гг., была предложена новая схема отбора проб, представленная на рисунке 1В. В новой схеме ряд пунктов (2, 3, 4, 6, 9, 10, 15, 20, 21) были исключены. При разработке новой схемы отбора проб мы исходили из того, что наибольший интерес представляет содержание трития в образцах морской воды вдоль побережья Камчатки и Курильской гряды.

В то же время пробы, взятые в Охотском и Японском морях, рассматриваются как контрольные, поскольку поступление трития из АЭС «Фукусима-1» в эти районы маловероятно.

Всего за период исследования было отобрано и поступило на измерение в испытательный лабораторный центр ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева 557 проб морской воды, из них в 2025 году – 153 пробы. Сведения о поступивших пробах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество проб морской воды, поступивших из Дальневосточного федерального округа с 2023 по 2025 год
 [Table 1. The number of seawater samples received from the Far Eastern Federal District, 2023–2025]

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Год [Year]					
	2023	2024	2025			
	III–IV кв. [Q3–Q4]	I–IV кв. [Q1–Q4]	I кв. [Q1]	II кв. [Q2]	III кв. [Q3]	IV кв. [Q4]
Камчатский край [Kamchatka Krai]	26	94	10	10	10	20
Магаданская область [Magadan Oblast]	2	8	5	1	1	1
Приморский край [Primorsky Krai]	27	120	26	2	2	4
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	0	60	12	4	2	4
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	0	27	3	3	3	6
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	6	36	12	3	6	3
Всего [Total]:	61	345	68	23	24	38

Для организации долговременного мониторинга поступления трития к российскому побережью необходимо было оценить соответствие существующих точек отбора проб зонам наибольшей вероятности поступления радионуклида с морскими течениями. Данное исследование выполнено на основе прогнозного моделирования переноса трития в океанских водах с использованием двух типов моделей: гидродинамических и лагранжевых. Гидродинамические модели обеспечивают описание движения водных масс с учетом таких факторов, как гравитационные силы, трение, вращение Земли и прочие физические воздействия, что позволяет моделировать циркуляцию океанских течений в масштабах океанов и прибрежных зон [27, 34, 36–41]. Лагранжевы модели реализуют численное прогнозирование траекторий отдельных частиц (трассеров), перемещающихся вместе с водной массой с учётом их исходных положений, поля скоростей, граничных условий и взаимодействия с динамикой окружающей среды. В рассматриваемом случае под трассерами подразумевается тритий, что позволяет реконструировать пути переноса радионуклида в океанских течениях и количественно оценивать его распределение в различных районах [40–41].

Лагранжевы траектории рассчитываются путем решения уравнений адвекции (1), (2):

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

$$\frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t) \quad (2)$$

где u и v – угловые зональные и меридиональные компоненты скорости поля AVISO, λ и φ – долгота и широта. Угловые скорости используются для упрощения уравнений движения на сфере.

Расчеты лагранжевых траекторий выполнены посредством интегрирования уравнений (1) и (2) методом Рунге-Кутты четвертого порядка с постоянным временным шагом 0,001 сут. Каждая траектория рассчитывалась на 60 суток в обратном времени.

Для анализа использовались два поля скоростей. В качестве первого поля применяются геострофические скорости (скорости океанических течений), рассчитанные на основе спутниковой альтиметрии AVISO с пространственным разрешением $1/8^\circ$ по широте и долготе. В качестве второго поля скоростей использованы данные глобального повторного анализа (реанализа) исторических наблюдений GLORYS12V1 с пространственным разрешением $1/12^\circ$ на 50-ти уровнях, которые охватывают период альтиметрических наблюдений (спутниковых измерений высоты поверхности океана), начиная с 1993 года по настоящее время.

Оба набора данных доступны на портале CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service)².

Для анализа переноса радиоактивных частиц в океанских течениях применяется метод отслеживания пассивных маркеров, основанный на численном расчёте траекторий большого числа частиц, моделирующих пространственное распределение загрязнения в водной среде.

Результаты и обсуждение

Результаты наблюдений за уровнями трития

Результаты измерений удельной активности трития в пробах морской воды, отобранных в субъектах Дальневосточного федерального округа в период 2023–2025 гг., представлены в таблице 2.

В целом, средние значения удельной активности трития (^3H) в морской воде дальневосточных регионов России колеблются от значений, близких к МДА, до значений порядка 5–6 Бк/кг (табл. 2), что свидетельствует о низком уровне радиоактивного загрязнения в исследуемых районах.

Из представленных в таблице 2 данных следует, что содержание трития в измеренных пробах морской воды субъектов Дальневосточного федерального округа Российской Федерации в первом квартале 2025 года не превышало $4,6 \pm 1,2$ Бк/кг; во втором квартале содержание трития в морской воде варьировало в диапазоне от значений ниже МДА до $6,1 \pm 1,2$ Бк/кг. В третьем квартале содержание трития в измеренных пробах морской воды не превышало $2,4 \pm 1,0$ Бк/кг. В четвертом квартале содержание трития варьировало в диапазоне от значений ниже МДА до $5,6 \pm 1,1$ Бк/кг. Наиболее высокие уровни удельной активности трития в 2025 году наблюдались в Сахалинской области, достигнув значений $6,1 \pm 1,2$ Бк/кг. Наименьшие уровни трития наблюдались в морской воде Камчатского и Приморского краёв и Чукотского автономного округа. В этих субъектах минимальные значения удельной активности трития зачастую находятся на фоновом уровне или ниже МДА, а средние значения по периодам в основном не превышают $1,0 \pm 0,6 - 1,7 \pm 0,8$ Бк/кг.

На основании проведённого анализа можно сформулировать следующие выводы:

1. Во всех пунктах наблюдения выявлены вариации удельной активности трития в морской воде.
2. Уровни трития в прибрежных водах превышают фоновые значения, характерные для центральной части Тихого океана, что свидетельствует о существовании дополнительных источников поступления, наиболее вероятным из которых является вынос трития с материковыми речными и прибрежными водами.
3. Полученные значения удельной активности трития не представляют опасности для купания и потребления опресненной морской воды, уровень вмешательства которой по тритию, в соответствии с НРБ-99/2009, составляет 7 600 Бк/кг.
4. Для организации эффективного долговременного мониторинга удельной активности трития, поступающего с морскими течениями от АЭС «Фукусима-1» в акватории дальневосточных регионов России, необходимо уточнение зон наибольшей вероятности его поступления с учётом особенностей циркуляции океанических течений.

Результаты моделирования переноса трития после аварии на АЭС «Фукусима-1»

Анализ закономерностей переноса радиоактивного загрязнения океанических вод морскими течениями после аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 году послужил основой для выбора и настройки моделей, используемых для прогнозирования распространения трития после начала сброса радиоактивной воды в 2023 году,

²Copernicus Marine Environment Monitoring Service. URL: <http://marine.copernicus.eu>

Таблица 2. Средние уровни удельной активности трития в пробах морской воды, поступивших из субъектов Дальневосточного федерального округа Российской Федерации, Бк/кг
 [Table 2. Mean activity concentration of tritium in seawater samples received from the federal subjects of the Russian Far East Federal District, Bq/kg]

Субъекты Российской Федерации [Subjects of the Russian Federation]	Среднее значение удельной активности ³ H (мин – макс), Бк/кг [Average activity concentration of ³ H (min – max), Bq/kg]												
	2023				2024				2025				
	III – IV [Q3 – Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]	I [Q1]	II [Q2]	III [Q3]	IV [Q4]
Камчатский край [Kamchatka Krai]	< MDA*	1,1 ± 0,3 (< MDA – 2,0)	3,8 ± 0,4 (3,2 – 4,6)	3,5 ± 1,0 (1,0 – 4,8)	**	1,7 ± 0,8 (< MDA – 2,9)	1,4 ± 0,7 (< MDA – 4,3)	1,0 ± 0,6 (< MDA – 2,0)	2,3 ± 0,8 (< MDA – 5,6)				
Магаданская область [Magadan Oblast]	1,2 ± 0,4 (< MDA – 1,4)	**	3,5 ± 0,6 (2,9 – 3,9)	3,3 ± 0,9 (2,8 – 4,2)	4,3 ± 1,5 (2,7 – 5,7)	4,6 ± 1,2	< MDA	< MDA	2,6 ± 0,8				
Приморский край [Primorsky Krai]	0,8 ± 0,6 (< MDA – 3,6)	3,3 ± 0,8 (1,3 – 6,0)	3,7 ± 0,9 (3,0 – 4,4)	2,4 ± 0,7 (< MDA – 4,6)	3,5 ± 0,9 (2,8 – 4,1)	< MDA	1,1 ± 0,7 (< MDA – 1,6)	1,2 ± 0,8 (< MDA – 1,8)	3,4 ± 1,0 (2,1 – 4,6)				
Сахалинская область [Sakhalin Oblast]	**	< MDA	3,1 ± 0,8 (1,1 – 4,1)	4,0 ± 0,9 (2,1 – 5,3)	3,7 ± 1,0 (3,0 – 4,4)	1,5 ± 0,8 (< MDA – 3,4)	2,4 ± 0,8 (< MDA – 6,1)	1,2 ± 0,7 (< MDA – 1,6)	3,4 ± 0,9 (2,9 – 4,0)				
Хабаровский край [Khabarovsk Krai]	**	< MDA	3,5 ± 1,0 (3,0 – 4,2)	3,1 ± 0,8 (1,0 – 4,4)	**	2,3 ± 1,0 (2,0 – 2,8)	0,9 ± 0,7 (< MDA – 2,7)	1,3 ± 0,7 (< MDA – 1,8)	3,0 ± 0,9 (2,6 – 3,4)				
Чукотский автономный округ [Chukotka Autonomous Okrug]	**	< MDA	4,8 ± 1,3 (2,3 – 8,4)	5,5 ± 1,3 (4,8 – 6,8)	3,7 ± 1,0 (3,0 – 4,3)	1,2 ± 0,9 (< MDA – 1,4)	1,3 ± 0,7 (< MDA – 2,6)	< MDA	< MDA				

* MDA – минимально детектируемая активность – 1 Бк/кг [MDA – minimum detectable activity – 1 Bq/kg].

** Пробы морской воды не поступали [The seawater samples were not received].

а также для планирования морских экспедиций в районах южных Курильских островов и в ядре течения Продолжение Куроисио [31, 38]. В ходе морских экспедиционных исследований 2012 года было установлено, что зоны концентрации лагранжевых маркеров, имитирующих загрязнение, совпадают с областями повышенной активности ^{137}Cs и ^{134}Cs [31]. Это позволило идентифицировать мезомасштабные вихревые структуры в океане, которые, как показали последующие анализы, играют ключевую роль в переносе фактического радиоактивного загрязнения.

Таким образом, лагранжевый анализ продемонстрировал высокую эффективность в качестве инструмента для выявления и прогнозирования зон потенциального накопления радиоактивных веществ в океане. Вместе с тем следует иметь в виду, что при использовании альтиметрических полей данный подход не учитывает процессы субдукции, то есть переноса поверхностной воды в глубинные слои. В результате часть загрязнения, зафиксированного по данным радиометрических измерений, концентрируется не на поверхности, а на подповерхностных горизонтах.

С 2023 года лагранжевый подход успешно применяется для моделирования путей переноса потенциального загрязнения, связанного с плановым сбросом технически очищенной воды с АЭС «Фукусима-1» [23, 24, 27, 36]. В рамках численного эксперимента, охватывающего первый этап сброса (24 августа – 11 сентября 2023 г.), в прибрежной зоне, прилегающей к АЭС, ежедневно выпускалось по 15 000 пассивных маркеров. Для каждого маркера рассчитывались траектории движения на интервале до 730 суток, до сентября 2025 г., с целью анализа долгосрочных путей переноса и распределения загрязнения [27, 33]. На основе полученных данных были сформированы композитные карты вероятных траекторий переноса, отражающие пространственное распределение потенциального загрязнения в северо-западной части Тихого океана. Карты, представленные в работе [33], были построены с использованием альтиметрических полей AVISO. Для оценки надежности результатов расчёты были повторены с применением поля скоростей реанализа GLOFRYS12V1 [36]. Сопоставление двух наборов данных показало высокое соответствие как пространственных структур, так и направлений переноса загрязнения, что подтверждает устойчивость выявленных закономерностей и достоверность применяемого метода.

Особый интерес представляют лагранжевы траектории, демонстрирующие возможность относительно быстрого (в пределах 14 суток) переноса загрязнённых вод в Южно-Курильскую промысловую зону [33]. Дальнейшее развитие данного подхода было предусмотрено в рамках серии морских экспедиций и реализовано в рейсе 2024 года, в ходе которого выявленные лагранжевым методом вихревые структуры были дополнительно охарактеризованы с использованием гидрологических и радиометрических измерений [22, 23]. Результаты этих наблюдений находятся на стадии обработки, однако предварительные данные подтверждают ключевую роль мезомасштабных вихрей как ключевого фактора эффективного переноса радиоактивных веществ.

В настоящем исследовании представлены два набора карт. Первый из них (рис. 2) отражает усреднённое поле скоростей, которое традиционно используется в океанологических исследованиях для оценки возможных путей переноса

водных масс, загрязняющих веществ или биологических объектов из одной области в другую. Такой подход, основанный на анализе среднего поля течений за определённый период или сезон, позволяет выявить основные направления циркуляции и крупномасштабные динамические структуры – струи, фронтальные зоны и вихри.

Опыт применения лагранжевых методов продемонстрировал, что непосредственный анализ поля скоростей течений не всегда обеспечивает корректную оценку траекторий и временных масштабов переноса веществ. Поля усреднённых скоростей предоставляют лишь статическое представление циркуляции, тогда как лагранжевый анализ, основанный на численном моделировании движения пассивных маркеров, позволяет выявить реальные транспортные пути и количественно оценить временные характеристики переноса вещества.

Карты распространения радиоактивной воды, представленные на рисунках 3 и 4, демонстрируют пространственное распределение концентраций и траекторий переноса радиоактивных веществ или их модельных аналогов в виде лагранжевых маркеров в поверхностных водах исследуемого региона.

Красный отрезок (35.6° с.ш., 141° в.д. – 38.3° с.ш., 141.6° в.д.), показанный на рисунках 2–4 расположен вблизи АЭС «Фукусима-1», от него рассчитываются траектории маркеров. Плотность трассеров v представлена в логарифмическом масштабе. Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируется исключить.

Для построения второго набора карт область, ограниченная 25° – 57° с.ш., 127° – 178° в.д., разбивалась на сетку ячеек 300×300 . Для каждой ячейки рассчитывалось количество ежедневных следов маркеров, зафиксированных в ней за рассматриваемый период моделирования (24 августа 2023 г. – 10 сентября 2025 г.). Полученные карты характеризуют поля относительной концентрации, отражающие пути вероятностного переноса потенциального загрязнения. Такой подход позволяет выявить основные направления переноса и области аккумуляции радиоактивных веществ, а также оценить степень их проникновения в различные районы северо-западной части Тихого океана.

Построенные карты дают возможность сопоставить распределение потенциально загрязнённых вод с характером поверхностной циркуляции, включая влияние крупных течений (Куроисио, Субарктического фронта) и мезомасштабных вихревых структур. Кроме того, данные карты служат инструментом для определения наиболее уязвимых зон, в которых вероятно накопление загрязнения, и позволяют в дальнейшем обосновать выбор участков для проведения мониторинговых наблюдений.

Такие карты наглядно демонстрирует наиболее вероятные очаги потенциального загрязнения и позволяют проанализировать закономерности его распределения относительно гидрологических условий. В контексте исследования они используются для сопоставления структуры загрязнения с особенностями океанической циркуляции. В отличие от усреднённых полей скоростей, лагранжевы карты фиксируют следы переноса и зоны потенциального воздействия загрязнённых вод.

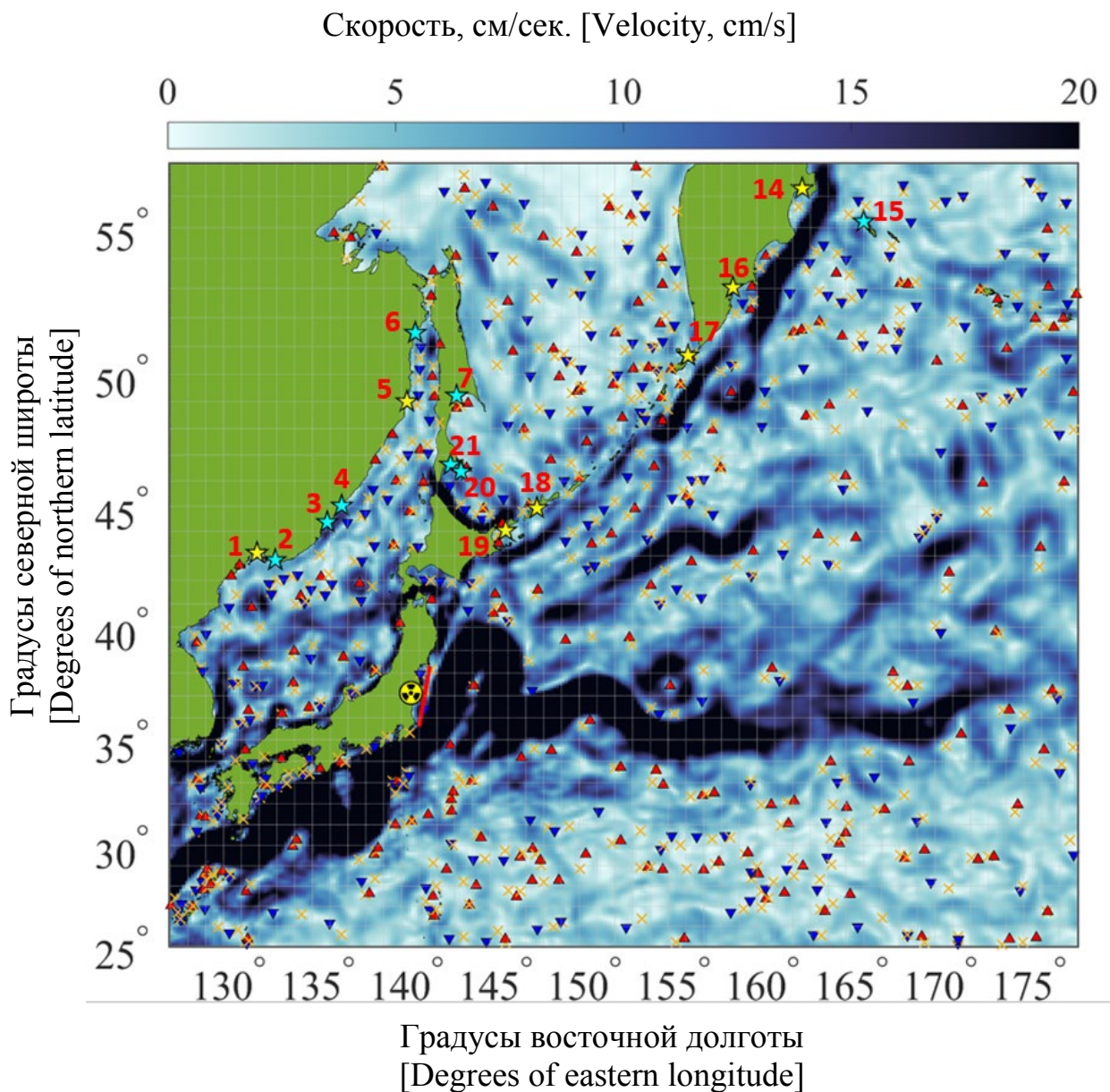


Рис. 2. Геоострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным AVISO и усредненные с 1 января 2023 по 2 октября 2025 года

[Fig. 2. Geostrophic currents calculated from AVISO-altimeter data and averaged from January 1, 2023 to October 2, 2025]

Примечание: 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. Желтыми крестиками × показаны гиперболические точки. Звездочками показано расположение мониторинговых пунктов: желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируется исключить [Note: The color scale corresponds to the modulus of the velocity. The red segment (35.6° N, 141° E – 38.3° N, 141.6° E) is located near the Fukushima-1 NPP, and the marker trajectories are calculated from it. The red triangles ▲ correspond to the centers of anticyclones, and the blue ▼ correspond to cyclones. The yellow crosses × represent hyperbolic points. The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

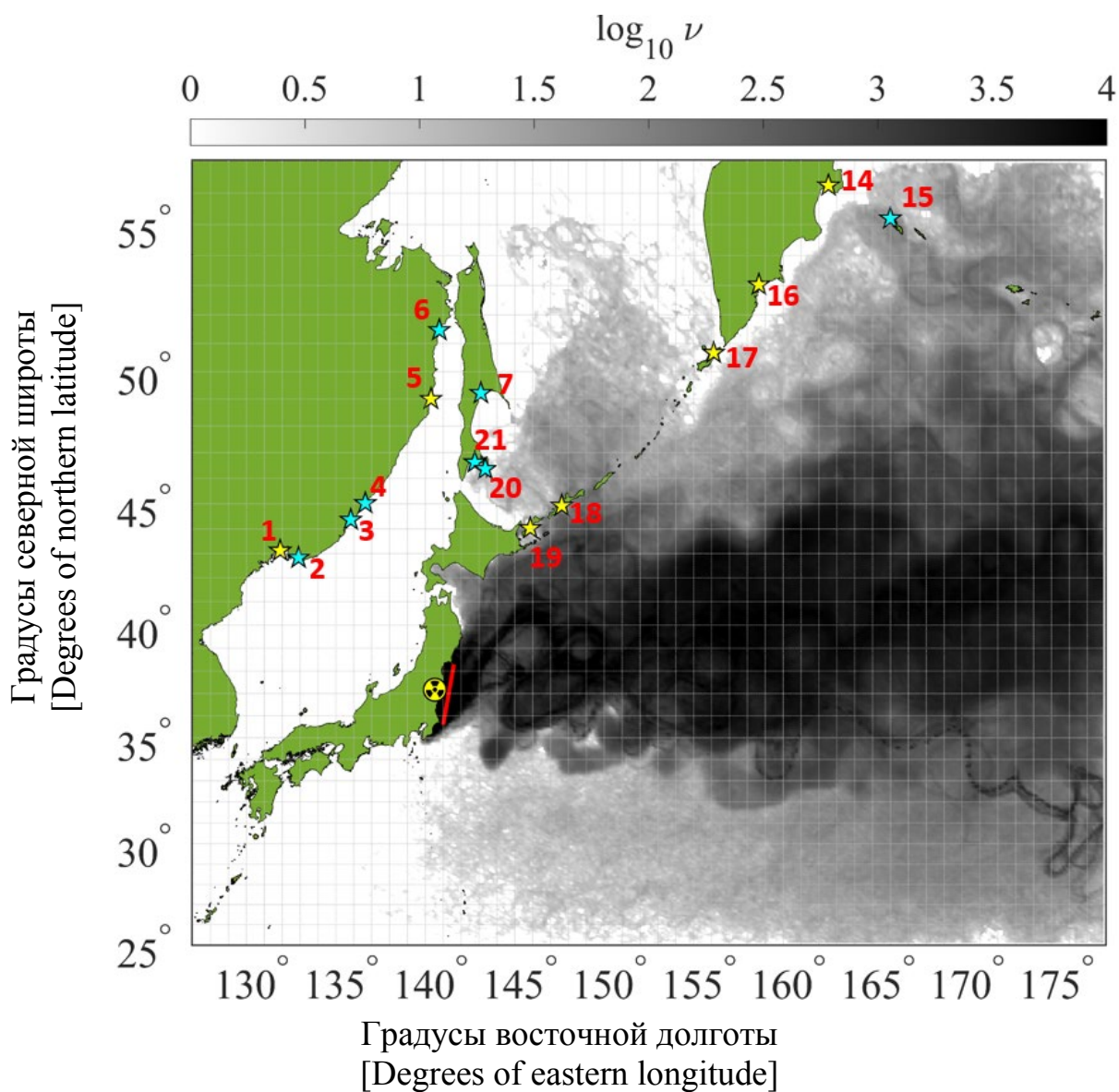


Рис. 3. Лагранжевы карты ежесуточных следов маркеров, запущенных от АЭС «Фукусима-1» по данным AVISO
 [Fig. 3. Lagrangian maps of daily trajectories of markers released from the Fukushima-1 NPP based on AVISO data]

Примечание: Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируется исключить [Note: The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

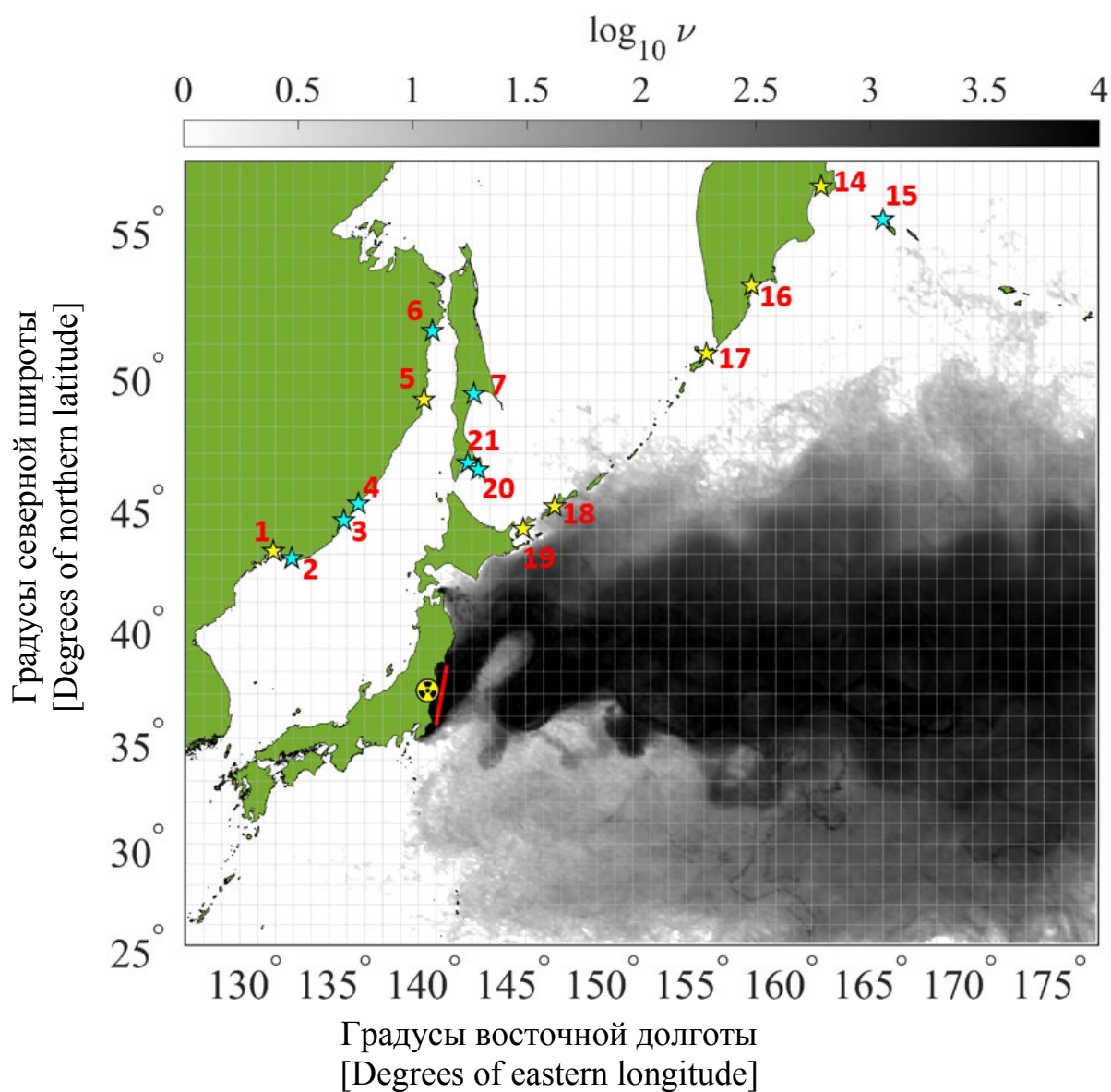


Рис. 4. Лагранжевы карты ежесуточных следов маркеров, запущенных от АЭС «Фукусима-1» по данным GLOFRYS12V1 (NEMO)

[Fig. 4. Lagrangian maps of daily trajectories of markers released from the Fukushima-1 NPP based on data from GLOFRYS12V1 (Nucleus for European Modelling of the Ocean, NEMO)]

Примечание: Звездочками показано расположение мониторинговых точек (пунктов): желтые звездочки соответствуют пунктам, которые планируются сохранить, а синие – тем, которые планируются исключить [Note: The stars indicate the location of the monitoring points: yellow stars indicate points to be retained, while blue stars indicate points to be excluded].

На рисунках 3 и 4 видно, что наибольшая вероятность потенциального загрязнения наблюдается к югу от Курильских островов и восточнее Японских островов (Хонсю, Хоккайдо). Черная зона указывает на высокую концентрацию потенциального загрязнения, охватывая Курильский пролив и часть Японского моря. По направлению к югу и востоку области вероятного загрязнения на картах постепенно размываются (светло-серые оттенки), затрагивая Охотское море и северную часть Тихого океана.

В районе северной части Хоккайдо, западного побережья Сахалина и южного побережья Камчатки (40°–50° с.ш., 140°–155° в.д.) потенциальная возможность загрязнения уменьшается (серые оттенки). Зоны с повышенной концентрацией следов маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение, прослеживаются вдоль побережья Сахалина и вдоль Курильской гряды. Это говорит о влиянии прибрежных течений и мезомасштабных вихрей, способствующих локальному накоплению загрязнения. Южнее Алеутских островов область загрязнения заметно расширяется на восток в открытом Тихом океане. Зона Берингова моря у западного побережья Аляски и Чукотки демонстрирует относительно низкие уровни загрязнения.

В северной части Камчатки и Курильских островов (50°–55° с.ш., 150°–170° в.д.) потенциальная возможность загрязнения заметно снижается (светло-серые оттенки), за исключением отдельных локальных участков вдоль побережья, где плотность следов маркеров выше из-за взаимодействия с континентальными и прибрежными течениями.

В районе южной части острова Сахалина наблюдаются участки умеренной плотности следов маркеров. Для острова Хоккайдо (Япония) имеют место умеренные значения, особенно на восточном побережье, ближе к Курильской гряде. Концентрация следов трития вдоль Курильской островной цепи демонстрирует выраженную пространственную изменчивость с максимальными значениями у южных островов и юго-восточного побережья Камчатки.

Сопоставление обеих групп карт позволяет понять важность вихревых структур и струй в механизмах переноса и распространения потенциального загрязнения, а также уточнить направления и скорость транспортировки потенциально загрязнённых вод в пределах северо-западной части Тихого океана, что крайне важно для выбора мониторинговых точек.

Таким образом, разработанный подход обеспечивает надежную основу для постоянного и системного мониторинга, а также целенаправленного отбора проб в ключевых районах, что значительно повышает эффективность и точность наблюдений.

Проведенный анализ пространственного распределения характеристик потенциального загрязнения в регионе позволил выявить ряд характерных направлений переноса. Полученные данные убедительно свидетельствуют об отсутствии возможности переноса потенциально загрязнённых водных масс в регион Татарского пролива. При этом существует вероятность заноса загрязнения в акваторию Охотского моря и к Южным Курилам, что подчеркивает необходимость продолжения системного мониторинга.

На рисунке 3 зафиксирован существенный перенос в северном направлении. В то же время, как по данным спутниковой альтиметрии AVISO, так и по данным GLORYS12V1, перенос лагранжевых маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение, в прибрежные районы

полуострова Камчатка не выявлен. В частности, установлено, что маркеры не достигают акваторий Авачинской и Кроноцкой бухт, а также Камчатского залива. Для объяснения выявленных особенностей адвекции в этом северном регионе было построено усреднённое поле поверхностных скоростей по данным AVISO за период с 1 января 2023 г. по 1 октября 2025 г. (рис. 2). Анализ полученных полей показал наличие выраженного вихрегенеза вдоль восточного побережья Камчатки и интенсивного Восточно-Камчатского течения, которое формирует динамический барьер, препятствующий возможности проникновения потенциально загрязнённых вод к берегу. Таким образом, гидродинамические условия региона способствуют эффективной изоляции прибрежной зоны от внешнего переноса потенциального загрязнения.

Уточнение мест расположения мониторинговых точек с учетом результатов моделирования

Расположение мониторинговых точек (пунктов), в которых производился отбор проб морской воды в 2023, 2024 и 2025 гг. представлено на рисунке 1. С целью уточнения мест расположения точек отбора проб морской воды для продолжения мониторинга они были нанесены на карты моделирования распространения радиоактивной воды, представленные на рисунках 2–4. Желтым цветом на этих рисунках выделены мониторинговые точки, в которых проводился отбор проб в 2025 году, а синим – те, которые в 2023–2024 гг. участвовали в отборе проб, но были затем исключены. Моделирование показало, что за двухлетний период существует вероятность заноса потенциально загрязнённых вод в район южной части Сахалина и к острову Беринга (точка 15), что является основанием для продолжения наблюдений и для подтверждения или уточнения прогностических оценок.

В Охотском море форма и размеры области потенциального загрязнения хорошо согласуются с системой крупномасштабной циркуляции. Перенос вдоль струи Срединного течения направлен к северо-западу, что соответствует типичной динамике водных масс в этом регионе и подтверждает достоверность проведённого моделирования.

На основании полученных результатов представляется целесообразным пересмотреть решение об исключении отдельных мониторинговых точек из программы мониторинга, особенно в районах, где моделирование указывает на возможные траектории переноса загрязнения. Рекомендуемый набор мониторинговых точек для продолжения наблюдений должен включать пункты отбора проб с номерами 15, 17, 18, 19, 20, 21 и 7, в которых, судя по результатам моделирования, поступление трития является наиболее вероятным. В качестве контрольных точек можно выбрать точки 1–4, а также 10 и 11, в которых поступление трития является маловероятным или исключено. Продолжение наблюдений в этих точках позволит повысить достоверность оценки экологических рисков и уточнить механизмы распространения загрязняющих веществ.

Заключение

Проект по сбросу очищенной воды с АЭС «Фукусима-1», содержащей тритий из-за технологической невозможности его полной фильтрации, рассчитан на реализацию в течение 30 лет. Распространение сбрасываемых вод и их поступление в прибрежные акватории дальневосточных регионов России определяется динамикой морских течений.

С 2023 года Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека осуществляет мониторинг содержания трития в пробах морской воды, обеспечивая информационную основу для поддержания радиационной безопасности населения и принятия своевременных защитных мер.

Программа контроля включает измерение фоновых концентраций трития в прибрежных водах Камчатского, Приморского и Хабаровского краёв, Магаданской и Сахалинской областей, а также Чукотского автономного округа. В Сахалинской области в 2023–2024 гг. было 6 пунктов отбора проб морской воды (7, 17, 18, 19, 20, 21), из которых 3 (7, 20, 21) были на острове Сахалин и три (17, 18, 19) – на островах Курильской гряды (рис. 1А). В 2025 году наблюдения за концентрацией трития проводились только в пунктах, представленных на рисунке 1В. В ходе исследований 2023–2025 гг. установлено, что в акватории на удалении до 1000 м от берега средняя удельная активность трития находилась в интервале от фоновых значений (менее 1 Бк/л) до 5 Бк/л и превышала уровни трития в пробах, отобранных на больших расстояниях от берега. Наиболее вероятным механизмом поступления трития в прибрежные воды является его вынос с материковыми речными и грунтовыми водами. Удельная активность трития ниже допустимых значений вмешательства по НРБ-99/2009 для рекреации и питьевого водопотребления.

Анализ наблюдений за уровнями трития в период 2023–2025 гг. показал, что для организации эффективного долгосрочного мониторинга трития в морской воде, а впоследствии и в морепродуктах, необходимо уточнение районов наиболее вероятного накопления трития в акваториях Дальнего Востока России. В настоящей работе такое уточнение выполнено на основе исследования закономерностей переноса радиоактивного загрязнения океанических вод морскими течениями. Предложен метод прогнозирования распространения радиоактивного загрязнения, основанный на лагранжевой модели, ключевой особенностью которой является использование полей скоростей, полученных из спутниковой альтиметрии и численного моделирования океанической циркуляции. Применяемый подход позволяет не только строить карты пространственного распределения загрязнения, но и выявлять основные транспортные коридоры, оценивать вклад отдельных циркуляционных структур (мезомасштабных вихрей, меандров и фронтов) в перенос загрязнённых вод, а также определять вероятность их поступления в рыболовные районы и прибрежные зоны Российской Федерации.

Результаты численного моделирования показали, что наибольшая вероятность поступления трития с АЭС «Фукусима-1» наблюдается в районах Южных Курильских островов, острова Сахалин, южной оконечности Камчатки и острова Беринга. Сопоставление координат существующих пунктов мониторинга с картами, полученными методом лагранжева моделирования, позволило оптимизировать сеть наблюдений, выделив приоритетные участки для контроля за миграцией трития.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Попова А.Ю. – организация сбора проб морской воды из дальневосточных регионов, разработка концепции, определение цели и формулирование задач исследования.

Романович И.К. – общее научное руководство, редактирование текста статьи, окончательное утверждение публикуемой версии рукописи.

Репин В.С. – разработка концепции исследования, организация отбора проб морской воды из дальневосточных регионов, анализ, обобщение и интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Варфоломеева К.В. – организация сбора проб морской воды из дальневосточных регионов, координация работы участников проекта, сбор и анализ литературных источников, написание текста статьи.

Зеленцова С.А. – организация сбора проб воды из дальневосточных регионов, анализ литературных источников, написание текста статьи.

Седнев К.А. – подготовка проб и проведение измерений на содержание трития, сбор, систематизация и оформление результатов измерений, поиск литературных источников, подготовка картографических материалов.

Библин А.М. – поиск и анализ литературных источников, подготовка картографических материалов, внесении редакционных правок.

Будянский М.В. – общее руководство проектом, обобщение, систематизация и обработка материалов исследования, проведение расчетов, анализ и интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Лебедева М.А. – обработка и систематизация первичных материалов исследования, поиск литературных источников, подготовка картографических материалов, содержательное редактирование текста статьи.

Улейский М.Ю. – разработка алгоритма и численное моделирование адвекции маркеров, имитирующих потенциальное загрязнение от АЭС «Фукусима».

Белоненко Т.В. – общее и научное руководство проектом, разработка концепции изложения материалов исследования.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам ФБУЗ Центр гигиены и эпидемиологии в Приморском, Камчатском и Хабаровском крае, а также в Сахалинской и Магаданской областях и Чукотском автономном округе за их участие в своевременном отборе и отправке проб морской воды в ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. Авторы благодарны рецензентам за рецензирование рукописи и конструктивные замечания, позволившие улучшить ее качество.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при выполнении работы и подготовке данной статьи.

Сведения об источнике финансирования

Исследования выполнены в рамках выполнения НИР «Исследование уровней трития в морской воде дальневосточных регионов Российской Федерации». Численное моделирование в поле AVISO реализовано при поддержке гранта СПбГУ (№ 129659573). Численное моделирование в поле GLORYS12V1 реализовано при поддержке гранта РФФИ (№ 25-17-00021). Лагранжев анализ проведен на высокопроизводительном кластере Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН (Госзадание № 124022100072–5).

Литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Велихов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. М., 2018. 408 с.
2. Боровой А.А., Гаврилов С.Л., Хвошинский В.А. Фукусима. Проблема воды. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2024. 44 с.
3. Yamanishi T., Kakiuchi H., Tauchi H. et al. Discussions on Tritiated Water Treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station // *Fusion Science and Technology*. 2020. Vol. 76, No. 4. P. 430–438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Completion of the Discharge from Measurement. Confirmation Facility Tank Group B (First Discharge). URL: <https://clck.ru/3RY2K8> (Дата обращения: 13.10.2025).
5. Buessler K.O. Opening the floodgates at Fukushima // *Science*. 2020. Vol. 369, No 6504. P. 621–622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
6. IAEA Comprehensive Report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. IAEA, 2023. 129 p. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf (Дата обращения: 13.10.2025).
7. Сообщение постоянного представительства Японии при Агентстве от 20 июля 2022 года: Информационный циркуляр. INFCIRC/1007 от 4 августа 2022 года. Международное агентство по атомной энергии. 20 июля 2022. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications.documents/infcircs/2022/infcirc1007_rus.pdf. (Дата обращения: 20.10.2025).
8. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Сброс очищенной воды на АЭС «Фукусима – Дайити». URL: <https://www.iaea.org/ru/temy/reagirovanie/sbroschishchennoyvodynaesfukusimadayiti/pressrelyz>. 2025 (Дата обращения: 01.10.2025).
9. Tritium in the environment. International Atomic Energy Agency. Description: Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. Technical: reports series (International Atomic Energy Agency), ISSN 0074–1914; no. 495. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC_010_495_web.pdf (Дата обращения: 19.10.2025).
10. Radiation Monitoring in Seawater // Hong Kong Observatory. URL: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> (Дата обращения: 10.10.2025).
11. Marine Environment Radiation Monitoring Data // Nuclear Safety Information Center (NSIC). URL: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> (Дата обращения: 10.10.2025).
12. Monitoring Values. Taiwan Radiation Monitoring Center. URL: <https://tworis.nusc.gov.tw/monitorvalue.php> (Дата обращения: 10.10.2025).
13. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority, Japan. URL: <https://www.monitororbs.jp/en/> (Дата обращения: 10.10.2025).
14. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan. URL: <https://www.monitororbs.jp/en/> (Дата обращения: 20.10.2025).
15. Никитин А.И., Рамзаев В.П., Осокин В.М. и др. Экспедиционные радиологические исследования в Японском море и северо-западной части Тихого океана после аварии на японской АЭС «Фукусима-1»: предварительные результаты // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 3. С. 14–35.
16. Романович И.К., Громов А.В., Гончарова Ю.Н. и др. Предварительный анализ данных первичного обследования радиационной обстановки в юго-восточных районах Сахалинской области после аварии на АЭС «Фукусима-1» // *Радиационная гигиена*. 2011. Т. 4, № 3. С. 36–42.
17. Библин А.М., Иванов С.А., Рамзаев П.В. и др. О некоторых результатах третьей комплексной многопрофильной экспедиции Русского географического общества по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском районе Тихого океана в 2014 г. // *Радиационная гигиена*. 2015. Т. 8, № 1. С. 62–66.
18. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К. и др. О четвертой комплексной научной экспедиции по мониторингу радиационной обстановки в Курило-Камчатском регионе Тихого океана // *Радиационная гигиена*. 2020. Т. 13, № 1. С. 6–15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15.
19. Репин В.С., Варфоломеева К.В., Библин А.М. и др. Содержание трития в прибрежных водах Дальневосточных регионов Российской Федерации в первый год контролируемого сброса воды с АЭС «Фукусима-1» (Предварительные данные) // *Радиационная гигиена*. 2024. Т. 17, № 4. С. 27–34. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34.
20. Ежегодник «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств / ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета». 2024. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodnik_ki/ro/ezhegodnik_ro_2024.pdf. (Дата обращения: 14.10.2025).
21. Булгаков В.Г., Вакуловский С.М., Крышев И.И. и др. Мониторинг радиационной обстановки на территории России. 2018 г. 68 с. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO_2018.pdf (Дата обращения: 14.10.2025).
22. Лобанов В.Б., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Нужно ли бояться «фукусимского трития»? URL: <https://www.roi.dvo.ru/sites/default/files/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-mc.pdf> (Дата обращения: 03.10.2024).
23. Лобанов В.Б., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Оценка радиологического состояния дальневосточных морей России в связи со сливом загрязненной воды на АЭС «Фукусима-1» (рейс №71 НИС «Академик Опарин») // *Океанология*. 2025. Т. 65, № 1. С. 193–196. DOI: 10.31857/S0030157425010175.
24. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. *Annals of the International Commission on Radiological Protection*. 2016. Vol. 45, Issue 3/4. 352 p.
25. Бондарева Л.Г., Чеботина М.Я., Артамонова С.Ю. и др. Тритий. Теория, практика, последствия: монография / Л.Г. Бондарева, М.Я. Чеботина, С.Ю. Артамонова, И.Г. Тананаев. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2024. 359 с.
26. Galeriu D., Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers // *Journal of Radiological Protection*. 2010. Vol. 30, No 3. P. 445–468. DOI: 10.1088/0952-4746/30/3/003.
27. Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Fayman P.A. et al. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea? // *Pure and Applied Geophysics*. 2025. Vol. 182, P. 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.
28. Yu Z., Shen Z., Shi Z. et al. The spatial and temporal variations in tritium in the North Pacific over the past 70 years and their impacts on the marine environment and organisms // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025. Vol. 130. e2024JC022058. DOI: 10.1029/2024JC022058.

29. Wang D., Zhou Q., Yin Y. et al. Implications of Fukushima's Radioactive Water Discharge on Global Environmental Sustainability // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, No 7. P. 3061–3064. DOI: 10.1021/acs.est.4c00955.
30. Wei Y., Zhang J., Cao X. et al. Fukushima's Radioactive Water Threatens Coastal Groundwater // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, No 42. P. 18450–18455. DOI: 10.1021/acs.est.4c10136.
31. Budyansky M.V., Goryachev V.A., Kaplunenko D.D. et al. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean // *Deep-Sea Research I*. 2015. Vol. 96, P. 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
32. Chang Zhao, Gang Wang, Min Zhang et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 169. Article 112515. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515.
33. Budyansky M.V., Udalov A.A., Lebedeva M.A., Belonenko T.V. Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling // *Doklady Earth Sciences*. 2024. Vol. 515, Part 1, P. 458–467. DOI: 10.1134/S1028334X2360305X. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1028334X2360305X> (Дата обращения: 14.10.2025).
34. Garraffo Z.D., Mariano A.J., Griffa A. et al. Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic: I Comparison with in situ drifter data // *Journal of Marine Systems*. 2001. Vol. 29, P. 157–176.
35. Beron-Vera F.J., Olascoaga M.J., Goni G.J. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures // *Geophysical Research Letters*. 2008. Vol. 35. P. L12603. DOI: 10.1029/2008GL033957.
36. Budyansky M.V., Belonenko T.V., Lebedeva M.A., Udalov A.A. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. Vol. 24. P. ES4002. DOI: 10.2205/2024es000934.
37. Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I., Uleysky M.Yu. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // *Ocean Modelling*. 2011. Vol. 38, No 1–2, P. 114–125.
38. Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V. Numerical simulation of propagation of radioactive pollution in the ocean from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant // *Doklady Earth Sciences*. 2011. Vol. 439, No 2, 1179–1182.
39. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // *Ocean Science*. 2017. Vol. 13, P. 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
40. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014. Vol. 21, No 1. P. 279–289. DOI: 10.5194/npg-21-279-2014.
41. Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V. et al. Lagrangian analysis of mixing and transport of water masses in the marine bays // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, No 1. P. 82–96.

Поступила: 14.11.2025

Попова Анна Юрьевна – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, руководитель Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-2567-9032

Романович Иван Константинович – доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, директор Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0003-0668-459X

Репин Виктор Степанович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. E-mail: v.repin@mail.ru
ORCID: 0009-0005-9897-0930

Варфоломеева Ксения Владимировна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0008-3483-806X

Зеленцова Светлана Александровна – научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0005-2244-0028

Седнев Константин Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0009-0006-7906-1106

Библин Артем Михайлович – старший научный сотрудник, руководитель Информационно-аналитического центра Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0001-7165-4923

Будянский Максим Васильевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия
ORCID: 0000-0003-2291-6792

Лебедева Мария Алексеевна – аспирант Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия
ORCID: 0009-0002-2044-9625

Улейский Михаил Юрьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нелинейных динамических систем Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва, Дальневосточное отделение Российской академии наук, Владивосток, Россия
ORCID: 0000-0001-6499-1470

Белоненко Татьяна Васильевна – доктор географических наук, профессор кафедры океанологии Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Россия
ORCID: 0000-0003-4608-7781

Для цитирования: Попова А.Ю., Романович И.К., Репин В.С., Варфоломеева К.В., Зеленцова С.А., Седнев К.А., Библин А.М., Будянский М.В., Лебедева М.А., Улейский М.Ю., Белоненко Т.В. Обеспечение радиационной безопасности населения дальневосточных регионов Российской Федерации в условиях долговременного сброса воды с АЭС «Фукусима-1» // Радиационная гигиена. 2026. Т. 19, № 1. С. 7–23. DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23

Radiation safety assurance for the population of the Far Eastern regions of the Russian Federation under conditions of long-term discharge of water from the Fukushima–1 NPP

Anna Yu. Popova¹, Ivan K. Romanovich², Victor S. Repin², Kseniya V. Varfolomeeva², Svetlana A. Zelentsova², Konstantin A. Sednev², Artem M. Biblin², Maxim V. Budyansky^{3,4}, Maria A. Lebedeva^{3,4}, Mikhail Yu. Uleysky³, Tatyana V. Belonenko³

¹ Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia

² Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

³ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

⁴ Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

In connection with the planned prolonged discharge of tritium-containing water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, a gradual increase in tritium concentrations is expected in the coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation. The aim of this study is to improve the methods for ensuring the radiation safety of the population under conditions of long-term discharge of radioactive water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant based on numerical modeling of ocean current circulation. Materials and Methods: Seawater samples from the coastal areas of Kamchatka, Primorsky, and Khabarovsk Krai, Magadan and Sakhalin Oblasts, and the Chukotka Autonomous Okrug for the period 2023–2025 were used for the analysis of tritium content. Lagrangian models accounting for the spatiotemporal structure of oceanic circulation and currents were employed to describe tritium transport processes. Results and Discussion: The mean values of tritium specific activity in samples collected at distances of up to 1000 m from the shore were shown to range from less than 1.0 Bq/kg to 5.5 Bq/kg. Numerical modeling revealed potential accumulation zones for tritium discharged with treated water from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: the Southern Kuril Islands, Sakhalin Island, the southern tip of the Kamchatka Peninsula, and Bering Island. The East Kamchatka Current forms a dynamic barrier along the eastern coast of Kamchatka, limiting the intrusion of contaminated waters into coastal areas. Conclusion: To organize effective long-term monitoring of tritium in seawater and, subsequently, in seafood, it is necessary to refine the areas of the most likely tritium accumulation in the waters of the Russian Far East.

Key words: Fukushima-1 NPP, tritium, activity concentration, seawater, marine currents modeling, Pacific Ocean, Far Eastern Federal District.

Viktor S. Repin

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru

Authors' personal contribution

Anna Yu. Popova – organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, development of the research concept, definition of the study objectives, and formulation of research tasks.

Ivan K. Romanovich – scientific supervision, editing of the manuscript, final approval of the published version.

Victor S. Repin – development of the research concept, organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, analysis, synthesis, and interpretation of research results, writing of the manuscript.

Kseniya V. Varfolomeeva – organization of seawater sampling in the Far Eastern regions, coordination of project participants, collection and analysis of literature sources, manuscript writing.

Svetlana A. Zelentsova – organization of water sampling in the Far Eastern regions, literature review, manuscript writing.

Konstantin A. Sednev – preparation of samples and tritium measurements, collection, systematization, and documentation of measurement results, literature search, preparation of cartographic materials.

Artem M. Biblin – literature search and analysis, preparation of cartographic materials, editorial corrections.

Maxim V. Budyansky – overall project supervision, compilation, systematization, and processing of research materials; execution of calculations, analysis and interpretation of results, and manuscript writing.

Maria A. Lebedeva – processing and systematization of primary research data, literature review, cartographic visualization, and substantive editing of the manuscript.

Mikhail Yu. Uleysky – algorithm development and numerical modeling of marker advection to simulate potential contamination from the Fukushima NPP.

Tatyana V. Belonenko – conceptualization and scientific supervision of the project, and development of the framework for research presentation.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the specialists of the FBUZ Center for Hygiene and Epidemiology in Primorsky, Kamchatka, and Khabarovsk Krai, as well as in Sakhalin and Magadan Oblasts and the Chukotka Autonomous Okrug for their timely participation in sampling and sending seawater samples to Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia. The authors also thank the reviewers for their review of the manuscript and constructive comments that helped improve its quality.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interest in conducting the work and preparing this article.

Sources of funding

The research was conducted within the framework of the scientific project titled "Investigation of Tritium Levels in the Seawater of the Far Eastern Regions of the Russian Federation". Numerical simulations implemented using the AVISO dataset were performed with support from the grant of Saint Petersburg State University (No. 129659573). Simulations based on the GLO-

RYS12V1 dataset were supported by the Russian Science Foundation grant (No. 25-17-00021). Lagrangian analysis was carried out on the high-performance computing cluster of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (State assignment No. 124022100072–5).

References

1. Arutyunyan RV, Bolshov LA, Borovoy AA, Velikhov EP. System analysis of causes and consequences of the accident at Fukushima-1 NPP. Institute of Safe Development of Nuclear Energy RAS. 2018:408. (In Russian).
2. Borovoy AA, Gavrilov SL, Khvoshchinsky VA. Fukushima: The water problem. Kurchatov Institute; 2024. 44 p. (In Russian).
3. Yamanishi T, Kakiuchi H, Tauchi H, Yamamoto T, Yamamoto I. Discussions on tritiated water treatment for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Fusion science and technology*. 2020;76(4): 430-438. DOI: 10.1080/15361055.2020.1716454.
4. Fukushima Daiichi nuclear power station completion of the discharge from measurement. Confirmation facility tank group B (first discharge). Available from: https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/information/newsrelease/reference/pdf/2023/reference_20230911_01-e.pdf [Accessed 13 Oct 2025].
5. Buesseler KO. Opening the floodgates at Fukushima. *Science*. 2020;369(6504): 621-622. DOI: 10.1126/science.abc1507.
6. IAEA. Comprehensive report on the safety review of the ALPS-treated water at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Vienna: IAEA; 2023. 129 p. Available from: https://www.iaea.org/sites/default/files/iaea_comprehensive_alps_report.pdf [Accessed: October 13, 2025].
7. Communication from the Permanent Mission of Japan to the Agency dated 20 July 2022: Information Circular. INFCIRC/1007 dated 4 August 2022. International Atomic Energy Agency. 20 July 2022. Available from: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/documents/infcircs/2022/infirc1007_rus.pdf [Accessed: October 20, 2025] (In Russian).
8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Discharge of treated water at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. 2025. Available from: <https://www.iaea.org/ru/temy/reagirovanie/sbros-ochishchennoy-vody-na-aes-fukushima-dayiti/press-relizy> [Accessed: October 1, 2025] (In Russian).
9. Tritium in the environment. International Atomic Energy Agency. Description: Vienna: International Atomic Energy Agency. 2025. Technical: reports series. No 495. Available from: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/p15287-DOC_010_495_web.pdf. [Accessed: October 19, 2025].
10. Radiation Monitoring in Seawater. Hong Kong Observatory. Available from: <https://www.hko.gov.hk/en/radiation/monitoring/seawater.html> [Accessed: October 10, 2025].
11. Marine Environment Radiation Monitoring Data. Nuclear Safety Information Center (NSIC). Available from: <https://nsic.nssc.go.kr/marine/marineMonitoring.do> [Accessed: October 10, 2025].
12. Monitor Value. Taiwan Radiation Monitoring Center. Available from: <https://tworis.nusc.gov.tw/monitorvalue.php> [Accessed: October 10, 2025].
13. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority, Japan. Available from: <https://www.monitororbs.jp/en/> [Accessed: October 10, 2025].
14. Environmental Radiation Monitoring. Nuclear Regulation Authority (NRA), Japan. Available from: <https://www.monitororbs.jp/en/> [Accessed: October 10, 2025].
15. Nikitin AI, Ramzaev VP, Osokin VM, Sergeev AS, Sevastyanov AV, Aliev RA, et al. Radioecological investigations in the Sea of Japan

- and the north-west part of the Pacific Ocean after the accident at the NPP "Fukushima-1" in Japan: preliminary results. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2011;4(3): 14-35. (In Russian).
16. Romanovich IK, Gromov AV, Goncharova YN. Preliminary analysis of the primary survey data of the radiation situation in the south-eastern Sakhalin region after the Fukushima-1 NPP accident. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2011;4 (3): 36-42. (In Russian).
 17. Biblin AM, Ivanov SA, Ramzaev PV, Basalaeva LN. Selected results of the third comprehensive multidisciplinary expedition of the Russian Geographical Society monitoring radiation conditions in the Kuril-Kamchatka region of the Pacific Ocean in 2014. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2015;8(1): 62-66. (In Russian).
 18. Onishchenko GG, Popova AY, Romanovich IK, Ivanov SA, Biblin AM, Repin VS, et al. The fourth comprehensive scientific expedition monitoring radiation conditions in the Kuril-Kamchatka region of the Pacific Ocean. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2020;13(1): 6-15. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-1-6-15. (In Russian).
 19. Repin VS, Varfolomeeva KV, Biblin AM, Sednev KA, Zelentsova SA, Arkhangelskaya GV. Tritium content in coastal waters of the Far Eastern regions of the Russian Federation in the first year of controlled water discharge from the Fukushima-1 NPP (preliminary data). *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2024;17(4): 27-34. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-4-27-34. (In Russian).
 20. Report "Radiation situation in Russia and neighboring countries" / FGBU NPO Taifun Rosgidromet. Available from: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/ezhegodniki/ro/ezhegodnik_ro_2024.pdf [Accessed: October 14, 2025] (In Russian).
 21. Bulgakov VG, Vakulovsky SM, Kryshev II, Gnilomedov VD, Katkova MN, Uvarov VD, et al. Radiation monitoring in the territory of Russia. 2018; 68 p. Available from: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/MonitoringRO_2018.pdf [Accessed: October 14, 2025] (In Russian).
 22. Lobanov VB, Goryachev VA, Sergeev AF, Budyansky MV. Should We Be Afraid of "Fukushima Tritium"? Available from: <https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/News/Нужно%20ли%20бояться%20-%20на%20сайт-мс.pdf> [Accessed: October 03, 2024] (In Russian).
 23. Lobanov VB, Goryachev VA, Sergeev AF, Tikhomirov A. A. Assessment of the Radioecological state of the far eastern seas of Russia in connection with polluted water discharge from the Fukushima-1 NPP (Cruise 71 of the R/V Akademik Oparin). *Oceanology*. 2025;65(1): 173–175. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700802>. (In Russian).
 24. ICRP. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 2. ICRP Publication 134. Annals of the International Commission on Radiological Protection. 2016;45(3/4): 352.
 25. Bondareva LG, Chebotina MY, Artamonova SY, Tananaev IG. Tritium: theory, practice, consequences: monograph. Apatity: Kola Science Center Publishing House; 2024. 359 p. (In Russian).
 26. Galeriu D, Melintescu A. Retention of tritium in reference persons: a metabolic model. Derivation of parameters and application of the model to the general public and to workers. *Journal of Radiological Protection*. 2010;30(3): 445-468. DOI: 10.1088/0952-4746/30/3/003.
 27. Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA, Didov AA, Lebedeva MA, Udalov AA, et al. Can contaminated waters from the Fukushima Daiichi NPP penetrate the East China Sea? *Pure and Applied Geophysics*. 2025;182: 1843–1860. DOI: 10.1007/s00024-025-03688-0.
 28. Yu Z, Shen Z, Shi Z, Fang W, Liu X, Yu W, et al. The spatial and temporal variations in tritium in the North Pacific over the past 70 years and their impacts on the marine environment and organisms. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2025;130: e2024JC022058. DOI: 10.1029/2024JC022058.
 29. Wang D, Zhou Q, Yin Y, Lu D, Hu L, Richmond RH, et al. Implications of Fukushima's Radioactive Water Discharge on Global Environmental Sustainability. *Environmental Science & Technology*. 2024;58(7): 3061–3064. DOI: 10.1021/acs.est.4c00955.
 30. Wei Y, Zhang J, Cao X, Yeh T-CJ, Chen Y, Chen C, et al. Fukushima's Radioactive Water Threatens Coastal Groundwater. *Environmental Science & Technology*. 2024;58(42): 18450–18455. DOI: 10.1021/acs.est.4c10136.
 31. Budyansky MV, Goryachev VA, Kaplunenko DD, Lobanov VB, Prants SV, Sergeev AF, et al. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean. *Deep-Sea Research I*. 2015;96: 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
 32. Chang Z, Wang G, Zhang M, Wang G, de With G, Bezhenar R, et al. Transport and dispersion of tritium from the radioactive water of the Fukushima Daiichi nuclear plant. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;169: 112515. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112515.
 33. Budyansky MV, Udalov AA, Lebedeva MA, Belonenko TV. Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2024;515(1): 458–467. DOI: 10.1134/S1028334X2360305X.
 34. Garraffo ZD, Mariano AJ, Griffa A, Veneziani C, Chassignet EP. Lagrangian data in a high-resolution numerical simulation of the North Atlantic: I Comparison with in situ drifter data. *Journal of Marine Systems*. 2001;29: 157–176.
 35. Beron-Vera FJ, Olascoaga MJ, Goni GJ. Oceanic mesoscale eddies as revealed by Lagrangian coherent structures. *Geophysical Research Letters*. 2008;35: L12603. DOI:10.1029/2008GL033957.
 36. Budyansky MV, Belonenko TV, Lebedeva MA, Udalov AA. Surface Transport of Technical Waters from Fukushima NPP to the South Kuril Fishing Zone. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024;24(4): 1-17. DOI: 10.2205/2024ES000934.
 37. Prants SV, Budyansky MV, Ponomarev VI, Uleysky MYu. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street. *Ocean Modelling*. 2011;38(1–2): 114–125.
 38. Prants SV, Uleysky MYu, Budyansky MV. Numerical simulation of propagation of radioactive pollution in the ocean from the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Doklady Earth Sciences*. 2011;439(2): 1179–1182.
 39. Prants SV, Budyansky MV, Uleysky MYu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides. *Ocean Sciences*. 2017;13: 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.
 40. Prants SV, Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of

Fukushima-derived radionuclides. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2014;21(1): 279–289. DOI: 10.5194/npg-21-279-2014.

water masses in the marine bays. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013;49(1): 82–96.

41. Prants SV, Ponomarev VI, Budyansky MV, Uleysky MYu, Fayman PA. Lagrangian analysis of mixing and transport of

Received: November 14, 2025

Anna Yu. Popova – Doctor of Medical Sciences, Professor, Honored Doctor of the Russian Federation, Head of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Moscow, Russia
ORCID: 0000-0003-2567-9032

Ivan K. Romanovich – Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Director of the Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0003-0668-459X

For correspondence: Viktor S. Repin – Doctor of Biological Sciences, Head of Ecology Laboratory of Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: V.Repin@mail.ru)
ORCID: 0009-0005-9897-0930

Kseniya V. Varfolomeeva – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0009-0008-3483-806X

Svetlana A. Zelentsova – Research Fellow, Laboratory of Ecology, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0009-0005-2244-0028

Konstantin A. Sednev – Junior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0009-0006-7906-1106

Artem M. Biblin – Head of the Information and Analytical Center, Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0001-7165-4923

Maxim V. Budyansky – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nonlinear Dynamical Systems, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
ORCID: 0000-0003-2291-6792

Maria A. Lebedeva – Postgraduate Student at V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Russia
ORCID: 0009-0002-2044-9625

Mikhail Yu. Uleysky – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Nonlinear Dynamical Systems, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
ORCID: 0000-0001-6499-1470

Tatyana V. Belonenko – Doctor of Geographical Sciences, Professor at the Department of Oceanology, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
ORCID: 0000-0003-4608-7781

For citation: Popova A.Yu., Romanovich I.K., Repin V.S., Varfolomeeva K.V., Zelentsova S.A., Sednev K.A., Biblin A.M., Budyansky M.V., Lebedeva M.A., Uleysky M.Yu., Belonenko T.V. Radiation safety assurance for the population of the Far Eastern regions of the Russian Federation under conditions of long-term discharge of water from the Fukushima-1 NPP. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2026. Vol. 19, No. 1. P. 7–23. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2026-19-1-7-23