

УДК 504.4

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МОРСКОЙ СРЕДЫ ИЗ-ЗА ВОЗМОЖНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ АЭС “КАСИВАДЗАКИ-КАРИВА”

© 2025 г. М. В. Будянский<sup>1,2,\*</sup>, М. Ю. Улейский<sup>2</sup>, М. А. Лебедева<sup>1,2</sup>, П. А. Файман<sup>2</sup>,  
Т. В. Белоненко<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Г.И. Долгих 12.09.2024 г.

Поступило 12.09.2024 г.

После доработки 25.09.2024 г.

Принято к публикации 30.09.2024 г.

На основе полей геострофических течений, рассчитанных по альтиметрическим данным за период с 01.01.2013 по 31.12.2023, с помощью лагранжева подхода проведено численное моделирование адвекции потенциально загрязнённой воды от АЭС “Касивадзаки-Карива” к берегам Приморского края и в зону рыбного промысла в районе Южных Курил. Построены дазиметрические карты, представляющие вероятные пути переноса загрязнения на поверхности океана. Для района южного Приморья показаны пути и три транспортных коридора, связанные с локальной структурой течений и мезомасштабными вихрями. Минимальное время адвекции к берегам Приморского края, которое требуется лагранжевым маркерам, имитирующими потенциально загрязненные воды, составляет 138–140 суток. Выявлены два возможных транспортных маршрута в Южно-Курильскую рыболовную зону. Обнаружена вероятность быстрой адвекции загрязненных маркеров в указанную зону за 58–60 суток. Показано что адвекция лагранжевых маркеров носит порционный характер и происходит в определенные временные окна.

**Ключевые слова:** лагранжево моделирование, альтиметрия, АЭС “Касивадзаки-Карива”, адвекция, транспортные коридоры, Южные Курилы, залив Петра Великого, Приморский край

**DOI:** 10.31857/S2686739725020204, **EDN:** GCBCIQ

### ВВЕДЕНИЕ

Крупнейшая АЭС в мире “Касивадзаки-Карива” (37°25,70' с.ш. 138°36,10' в.д.) расположена на берегу Японского моря в японском городе Касивадзаки префектуры Ниигата. В её эксплуатации находятся 7 блоков, суммарная мощность которых составляет 8.212 ГВт. Строительство ядерных электростанций (АЭС) в зонах с повышенным риском землетрясений представляет серьёзную угрозу для окружающей среды в океане. Проблема заключается в том, что при возможном разрушении таких сооружений может произойти выброс загрязнённой воды в морскую среду. Один из ярчайших примеров – недавняя авария на АЭС “Фукусима-1” [1].

В марте 2011 г. Япония столкнулась с катастрофой на ядерной электростанции “Фукусима-1” из-за мощного землетрясения и цунами. Эта авария вызвала серьёзный выброс радиоактивного загрязнения в окружающую среду, в результате чего образовались загрязнённые территории за пределами 20-километровой зоны отчуждения, которая протянулась в северо-западном направлении вдоль следа выброса, сформировавшегося в результате осаждения дождями радиоактивных веществ на поверхность земли. Одним из возможных путей попадания радионуклидов в океан являлся слив технической воды с территории электростанции. Кроме того, осадки, выпавшие на поверхность моря в результате аварии, а также смыв радиоактивных элементов с почвы могут способствовать загрязнению морской среды. Эти процессы требуют необходимости строгого контроля и безопасности в эксплуатации атомных электростанций, особенно в зонах, подверженных природным катаклизмам.

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт

им. В.И. Ильчева, Владивосток, Россия

\*E-mail: plaztic@poi.dvo.ru

Японская АЭС “Касивадзаки-Карива” расположена на западном побережье острова Хонсю. Эта станция также находится в зоне, подверженной возможным землетрясениям и другим природным бедствиям. В случае серьёзного сейсмического события, структурные повреждения могут привести к нарушению целостности реакторов и систем охлаждения. Из-за землетрясения 16 июля 2007 г. с магнитудой 6.8 и эпицентром в 19 км от “Касивадзаки-Карива” на станции возникли нештатные ситуации. В результате подземных толчков произошли подвижки почвы под реакторами АЭС, станция получила более 50 различных повреждений, но самым тяжёлым последствием оказалась утечка радиоактивной воды из резервуара хранения отработанного топлива в зону общего доступа под шестым реактором. Помимо этого, опрокинулись 438 емкостей с отходами низкой радиоактивности, у некоторых из них сорвало крышки. Также возник пожар на трансформаторе 3-го блока. Оказались повреждены фильтры, что привело к выходу радиоактивной пыли за пределы АЭС [2].

В апреле 2021 г. работа АЭС “Касивадзаки-Карива” была приостановлена для ревизии, ремонта и дополнительных антисейсмических мероприятий, однако 27 декабря 2023 г. ТЕРСО (Tokyo Electric Power Company, Комитет по контролю за атомной энергетикой Японии) отменил этот запрет, и работа АЭС возобновилась. В первый же день 2024 г. в центральной части Японии вблизи АЭС “Касивадзаки-Карива” произошла череда мощных землетрясений с магнитудой 7.6, вызвавшая волну цунами. Специалисты Токийской энергетической компании, ТЕРСО, проверили бассейны с топливом семи реакторов, обнаружили, что из бассейнов вылилась вода, содержащая радиоактивные материалы. Из бассейна реактора №2 вылилось около 10 л, из бассейна реактора №7 – около 4 л, о чём сообщили “Рейтер” (англ. Reuters) и другие крупнейшие международные агентства новостей: <https://www.reuters.com/world/japan/magnitude-74-earthquake-strikes-japan-tsunami-warning-issued-2024-01-01/>, <https://japannews.yomiuri.co.jp/society/noto-peninsula-earthquake/20240101-159141/>, <https://www.chinadailyhk.com/article/369433>.

Приведённые выше примеры подчёркивают важность тщательного обеспечения безопасности при строительстве и эксплуатации атомных электростанций в сейсмически активных регионах и необходимость разработки строгих мер по предотвращению потенциальных экологических катастроф в океане. ТЕРСО осуществляет

постоянный мониторинг и измеряет уровень радиации, и в настоящее время угроза экологии региона отсутствует, так как разрушений энергоблоков на АЭС “Касивадзаки-Карива” в 2024 г. не зафиксировано. Однако не следует забывать о возможности в будущем возникновения этой опасности, сопровождаемой серьёзными экологическими последствиями.

Целью настоящей работы является исследование возможных путей переноса течениями потенциально загрязнённых вод от АЭС “Касивадзаки-Карива” к берегам Приморского края и в зону рыбного промысла в районе Южных Курил методами лагранжева моделирования. Важнейшей задачей в данном исследовании является оценка минимального времени, за которое потенциально загрязнённые воды могут достичь указанных районов.

## КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИРКУЛЯЦИИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Циркуляция вод исследуемого района, а именно восточной, северной и северо-восточной частей Японского моря, определяется, соответственно, Цусимским течением, сложной вихревой циркуляцией Татарского пролива и Приморским течением [3]. Цусимское тёплое течение является ответвлением Куросио, которое входит в Японское море через Корейский пролив (Цусимский пролив в японской научной литературе) и протекает по континентальному шельфу Японских островов до середины Татарского пролива на севере. Согласно данным спутниковой альtimетрии, Цусимское тёплое течение состоит из четырёх ветвей – прибрежной ветви, южного склонового течения, северного склонового течения и течения Субполярного фронта и представляет собой сложную картину поверхностных течений в Японском море [4]. Три ветви Цусимского тёплого течения, за исключением течения Субполярного фронта, сливаются в районе островов Оки, расположенных в 50 км к северу от юго-западной оконечности острова Хонсю. Северное склоновое течение является самым сильным среди четырёх ветвей и в течение года интенсивно меандрирует. Течение Субполярного фронта направлено на восток вдоль 40° с.ш. и характеризуется незначительными сезонными колебаниями. Большая часть течения Субполярного фронта направляется на север вдоль острова Хоккайдо и выходит через пролив Лаперуз, тогда как оставшаяся вода присоединяется к субарктическому круговороту в северной части Японского моря. Южное склоновое течение

демонстрирует устойчивый маршрут вдоль склона шельфа, достигая островов Оки [4]. Цусимское тёплое течение имеет хорошо выраженную сезонную изменчивость [5], которая определяется транспортом через Корейский пролив [6], вихревой активностью [7], потоком тепла на поверхности Японского моря [8] и влиянием ветра [9].

Северо-восточное бароклинное течение, которое формируется у берегов полуострова Ното в центральной части японского острова Хонсю имеет явно выраженную межгодовую изменчивость [10–12]. Множество антициклонических вихрей в прибрежной ветви Цусимского течения формируется вследствие влияния батиметрии и береговой черты Ното [13]. Транспорт прибрежной ветви к востоку от полуострова Ното оценивается примерно в 1.0 Св [13–15], и прослеживается до полуострова Ога, расположенного в северной части о-ва Хонсю. К северу от полуострова Ога все четыре ветви Цусимского теплого течения объединяются, и общий объём переноса увеличивается до 1.9 Св. Большая часть этой тёплой и малосолёной воды распространяется в Тихий океан в виде Сангарского тёплого течения. Севернее Сангарского пролива вдоль западного побережья острова Хоккайдо наблюдается поток северного направления с расходом около 1 Св.

Циркуляция вод южной части Татарского пролива представлена Западно-Сахалинским и Сахалинским течениями. Западно-Сахалинское течение является продолжением северной ветви Цусимского течения в юго-восточной части Татарского пролива. Сахалинское течение распространяется вдоль западного побережья Сахалина на юг. Это течение холодных, но малосолёных вод Татарского пролива. Оба течения выходят в Охотское море через пролив Лаперуз [16]. На направление и интенсивность Сахалинского и Приморского течений влияет разность уровней моря в Корейском проливе и около северной оконечности о. Хоккайдо [17]. Циркуляция в северной части Татарского пролива имеет сложную вихревую структуру [18].

Приморское течение является основным в северной части Японского моря; оно хорошо перемешано зимой и имеет относительно глубокую структуру с максимальной скоростью около 20 см/с. Летом оно имеет более сильную бароклинную структуру скорости, чем зимой [19].

Область холодной воды простирается от южной части Татарского пролива до залива Петра Великого и чётко отделена от Амурского лимана. Перемещение этих вод редко выглядит как

вдольбереговое течение, а чаще как цепочка вихрей или струй [20]. Зимой Приморское течение обычно представляет собой широкую непрерывную прибрежную полосу с многочисленными интрузиями в более тёплые воды. Весной этот пояс деформируется мезомасштабными вихрями. Летом между 43° и 45° с.ш. зона вод с низкой температурой сужается, а иногда и прерывается; холодные воды взаимодействуют с большими антициклоническими вихрями, которые переносят тёплую субтропическую воду близко к берегу. В осенний сезон зона холодных вод вновь начинает расширяться: в море распространяются крупные вихри и холодные вторжения, у побережья появляются апвеллинги.

## ДАННЫЕ

Для анализа циркуляции в исследуемом районе использовались геострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным. Геострофические течения, предоставляемые AVISO, получены объединением измерений с различных альтиметрических миссий, охватывающих период с 1993 г. по настоящее время. В процессе объединения данных используется метод оптимальной интерполяции. Пространственное разрешение данных 1/4° широты и долготы, временная дискретность 1 сут. Данные доступны на сайте Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service – CMEMS, <http://marine.copernicus.eu>).

## МЕТОДЫ

Основным методом анализа в данной работе является лагранжево моделирование. Этот метод позволяет определить транспортные коридоры и изучить перемешивание вод в пределах исследуемой области расчётом траекторий для большого количества искусственных пассивных частиц, называемых лагранжевыми маркерами, имитирующих загрязнение. Расчёт траекторий производится в альтиметрическом поле скорости AVISO. Такой подход ранее успешно применялся для моделирования путей переноса загрязнения в океане от АЭС “Фукусима-1”, а также при интерпретации натурных измерений концентрации радиоактивного цезия.

Лагранжевы траектории рассчитываются путём 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 геострофических течений

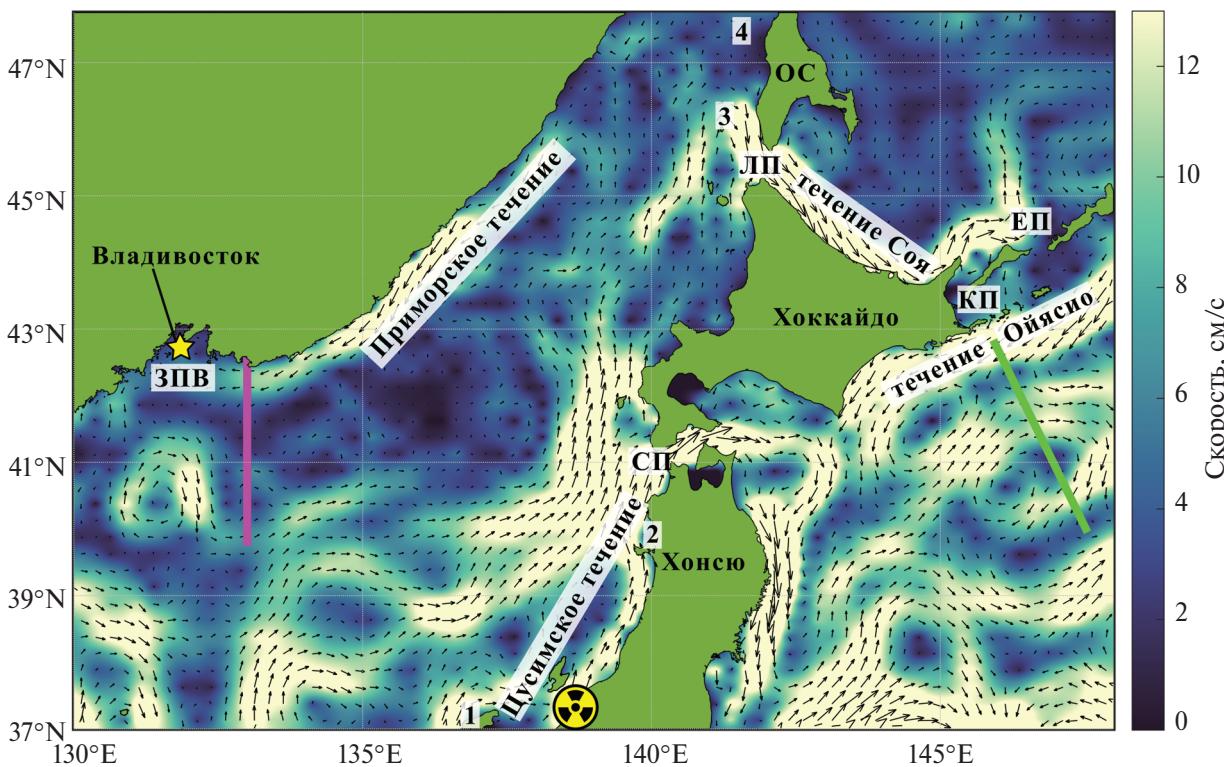
по данным AVISO;  $\phi$  и  $\lambda$  – широта и долгота. Угловые скорости используются для упрощения уравнений движения на сфере. Значения скорости внутри ячеек пространственно-временной сетки получаются путём бикубической интерполяции в пространстве и интерполяцией по времени полиномами Лагранжа третьей степени. Расчёты лагранжевых траекторий включают интегрирование уравнений (1) с использованием схемы Рунге–Кутта четвёртого порядка с постоянным временным шагом 0.001 сут. Каждая траектория рассчитывалась на 360 сут.

Лагранжев анализ в Японском море использовался ранее для решения задач, связанных с моделированием нефтяных разливов, для моделирования красных приливов, миграции кальмара, а также для выделения различных ветвей Цусимского течения.

В настоящей работе мы определяем возможные пути и оцениваем время переноса лагранжевых маркеров, имитирующих потенциально загрязнённые воды, от АЭС “Касивадзаки–Карива” к берегам Приморского края и в акваторию Южно-Курильской рыболовной зоны, где

ведётся промысел рыб и кальмаров (см. рис. 1). Рассматриваются два сценария попадания возможного загрязнения в Японское море в случае технологической аварии на АЭС “Касивадзаки–Карива”: разовый сброс технической воды, содержащей радионуклиды, и повторяющиеся в течение длительного времени мероприятия по сливу технической воды.

Суть применяемого подхода заключается в следующем: ежесуточно в период с 1 января 2014 г. по 31 декабря 2022 г. в прямоугольной области  $37.4126^\circ$ – $37.4629^\circ$  с.ш.,  $138.544^\circ$ – $138.616^\circ$  в.д. вблизи АЭС “Касивадзаки–Карива” на сетке  $100 \times 100$  точек запускалось пятно пассивных маркеров (размером примерно  $5.5 \times 8$  км). Для каждого маркера численно рассчитывалась его траектория на 360 суток вперед во времени. Все траектории анализировались на пересечение с одним из двух отрезков: I – меридионального отрезка между городами Владивосток и Находка,  $40.0^\circ$ – $43.0^\circ$  с.ш.,  $133^\circ$  в.д. (см. сиреневый отрезок на рис. 1); II – южной границы Южно-Курильской рыболовной зоны,  $43.084^\circ$ – $40.2^\circ$  с.ш.,  $145.917^\circ$ – $147.55^\circ$  в.д. (см. зелёный отрезок



**Рис. 1.** Поле скорости по данным AVISO, усреднённое за период 01.01.2013 по 31.12.2023. Меридиональный отрезок сиреневого цвета (I,  $40.0^\circ$ – $43.0^\circ$  с.ш.,  $133^\circ$  в.д.) пересекает стрежень Приморского течения; отрезок зелёного цвета (II,  $43.084^\circ$ – $40.2^\circ$  с.ш.,  $145.917^\circ$ – $147.55^\circ$  в.д.) соответствует юго-западной границе Южно-Курильской рыболовной зоны. ОС – Сахалин, КП – Кунаширский пролив, ЕП – пролив Екатерины, ЛП – пролив Лаперуза (Soya strait), СП – Сангарский пролив (Tsugaru strait), ЗПВ – залив Петра Великого (Peter the Great Bay), 1 – полуостров Ното, 2 – полуостров Ога, 3 – Западно-Сахалинское течение, 4 – Сахалинское течение

на рис. 1). Пересечение первого отрезка будет означать попадание маркеров в стрежень Приморского течения и в дальнейшем перенос этих лагранжевых частиц к берегам залива Петра Великого. В качестве второго отрезка выбрана граница Южно-Курильской рыболовной зоны, пересечение которой означает попадание лагранжевых маркеров непосредственно в этот район.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Дизиметрические карты*

Для определения возможных путей переноса загрязнения от АЭС “Касивадзаки-Карива” были построены дизиметрические карты, т.е. карты транспортных коридоров лагранжевых маркеров (см. рис. 2). Градацией серого цвета показана плотность ежесуточных следов траекторий маркеров, достигших одного из отрезков I или II.

На рис. 2 а можно выделить три основных пути переноса потенциального загрязнения к берегам южного Приморья и в залив Петра

Великого, связанных (далее по порядку следования стрежней с юга на север) с северной периферией Субарктического круговорота, локальной системой вихрей разной полярности и Западно-Сахалинским течением.

На рис. 2 б видно, что потенциально загрязнённые (далее по тексту “грязные”) маркеры попадают от АЭС “Касивадзаки-Карива” в Южно-Курильскую рыболовную зону двумя путями. Первый связан с выносом япономорских вод в Тихий океан через Сангарский пролив с дальнейшей адвекцией вод к Южным Курилам. Второй связан с адвекцией вод северной ветвью Цусимского течения к проливу Лаперуза, и последующим переносом маркеров течением Соя к Южно-Курильским проливам и далее в Тихий океан. Важно отметить, что попадание через пролив Лаперуза в Южно-Курильскую рыболовную зону “грязных” маркеров происходит не сразу, а после того, как траектории маркеров делают антициклоническую петлю у юго-западного побережья о-ва Сахалин, что дополнительно создает потенциальную угрозу для региональной экологии южного Сахалина.

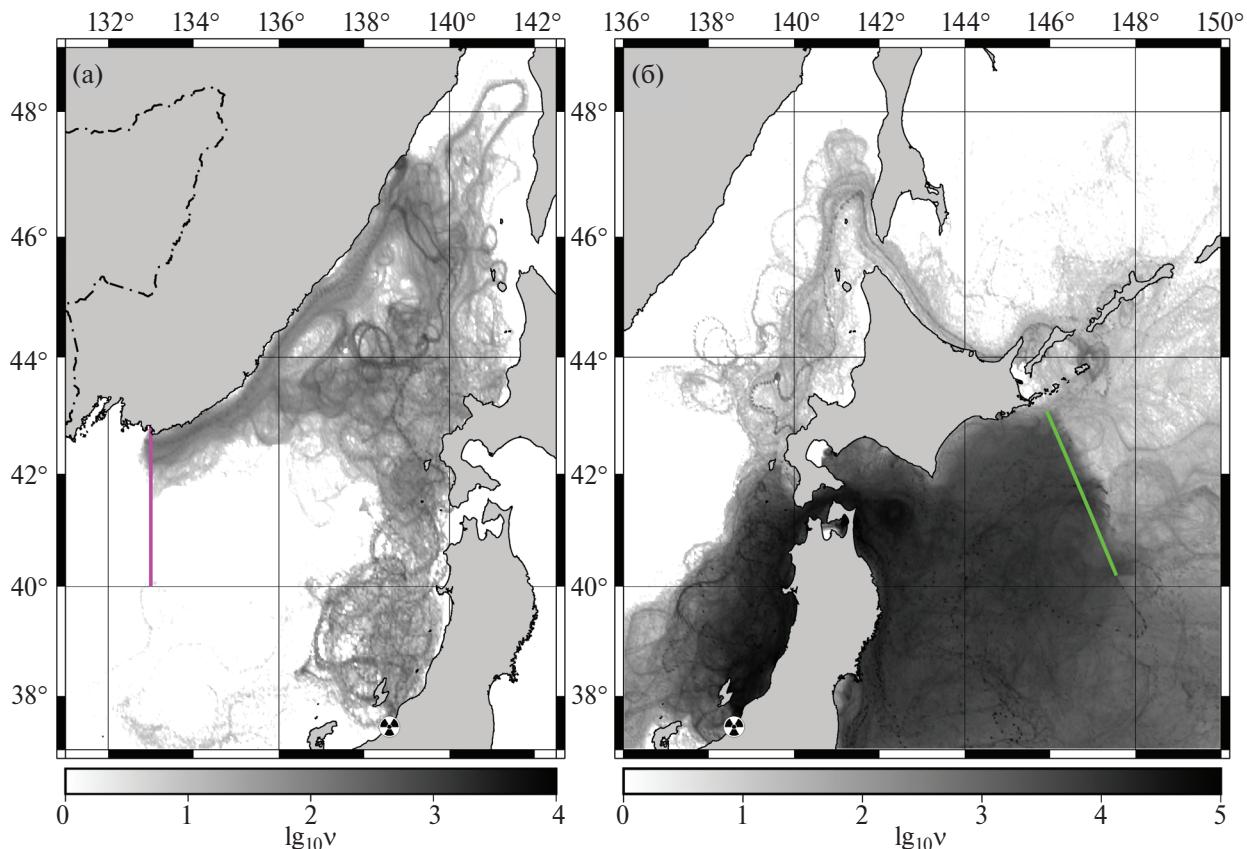


Рис. 2. Дизиметрические карты (транспортные коридоры маркеров, достигших одного из выбранных отрезков) – возможные пути переноса потенциального загрязнения к берегам южного Приморья и залива Петра Великого (а) и в Южно-Курильскую рыболовную зону (б). Плотность трассеров  $v$  представлена в логарифмическом масштабе

На рис. 2 б видно, что на границу Южно-Курильской рыболовной зоны маркеры могут попадать как с юга, так и с севера (в последнем случае “грязные” маркеры уже находятся внутри района), при этом с южной стороны концентрация маркеров значительно больше, чем с северной. Это означает, что второй вариант адвекции “грязных” маркеров северной ветвью Чусимского течения к проливу Лаперузу и последующим их переносом течением Соя менее вероятен.

#### *Время переноса лагранжевых маркеров в указанные районы*

Для оценки скорости переноса маркеров от места потенциальной аварии к Южно-Курильской рыболовной зоне и к берегам южного Приморья и залива Петра Великого были проведены расчёты времени, которое необходимо для прихода трассеров на каждый из выбранных отрезков.

На рис. 3 приведён график распределения количества “грязных” маркеров по времени в пути до момента достижения отрезка I, пересекающем стрежень Приморского течения между городами Владивосток и Находка. Маркеры запускались ежесуточно в период с 1 января 2014 г. по 31 декабря 2022 г. вблизи АЭС “Касивадзаки-Кариба”. Первые маркеры достигают отрезка I через 138–140 суток и соответствуют времени запуска 3–6 января 2022 г. Учитывались все возможные пути попадания частиц к берегам Приморского

края. На рис. 4 приведены фрагменты эволюции пятна маркеров, запущенных 5 января 2022 г. Установлено, что частицы, пересекая Японское море, уже через 140 суток достигают отрезка I. Такая быстрая адвекция связана с самым южным транспортным коридором через северную периферию Субарктического круговорота.

На рис. 5 приведён график – временная зависимость количества “грязных” маркеров, достигших отрезка II – южной границы Южно-Курильской рыболовной зоны. Учитывались оба возможных транспортных коридора: через Сангарский пролив с дальнейшей адвекцией вод к Южным Курилам и через пролив Лаперуз и Курильские проливы в Тихий океан. На графике видно, что первые маркеры достигают отрезка II уже через 58–60 суток после сброса. Первому пику соответствуют маркеры, запущенные 18 октября 2019 г. Все это означает, что в случае неподходящей ситуации, связанной с возможной аварией на АЭС “Касивадзаки-Кариба”, “грязные” маркеры очень быстро достигают Южно-Курильского промыслового района, попадая на границу района менее чем за 2 месяца. Такой быстрый перенос обеспечивается системой антициклонических вихрей, локализованных на выходе из Сангарского пролива, с орбитальными скоростями до 60 см/с, и последующим захватом частиц северной периферии крупного антициклонического вихря, показанного на рис. 6 красным треугольником, обозначающим его центр

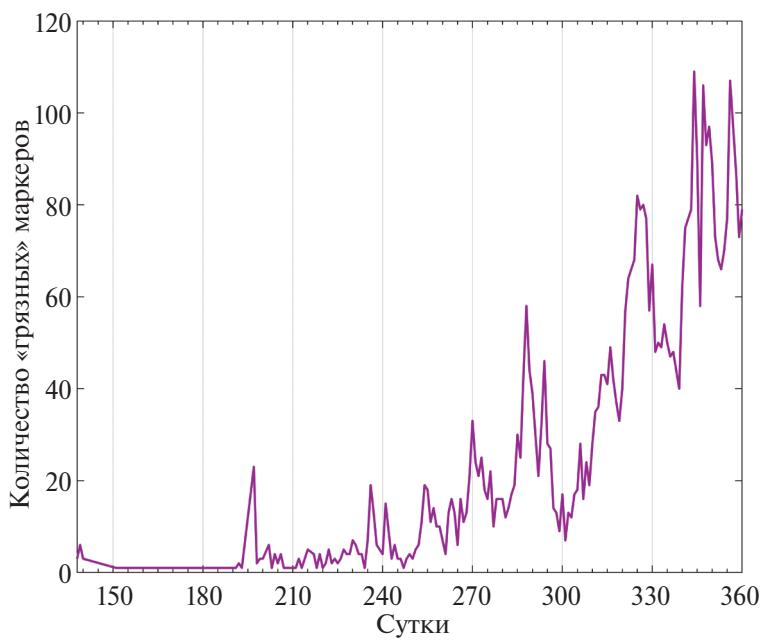
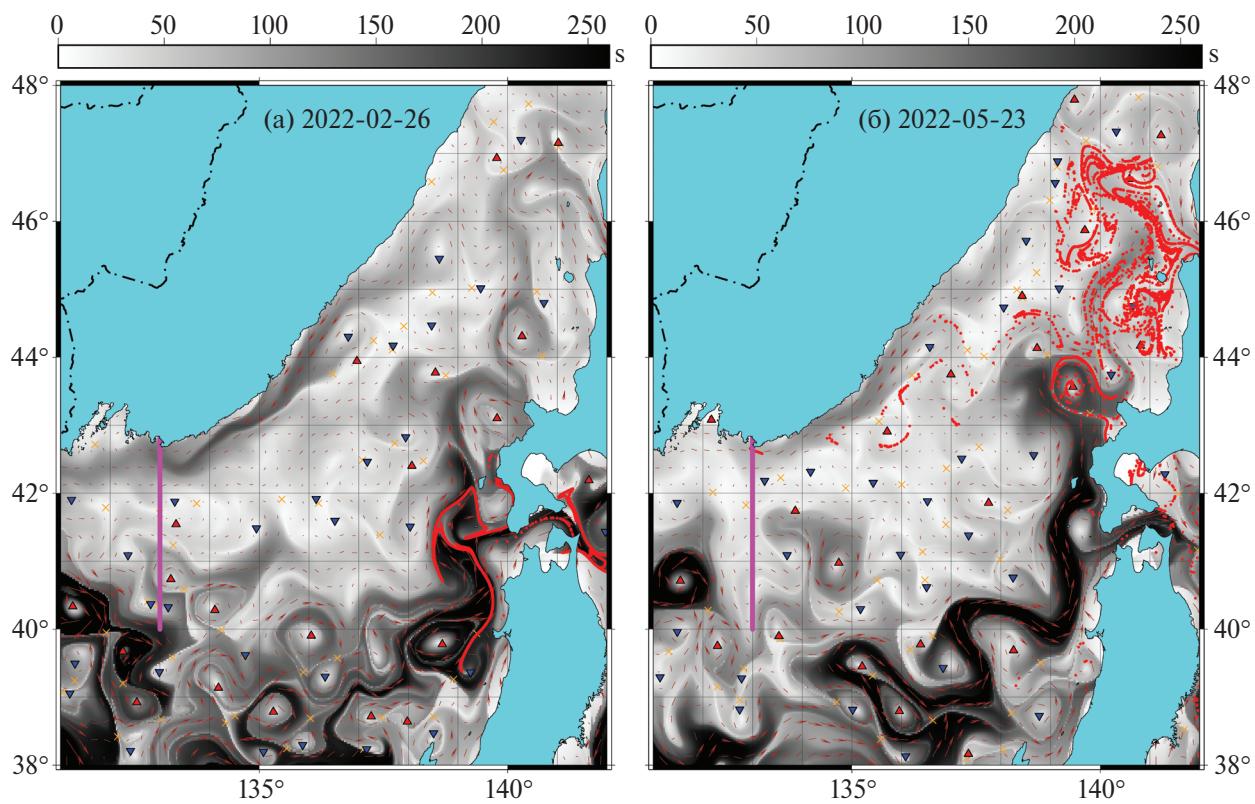
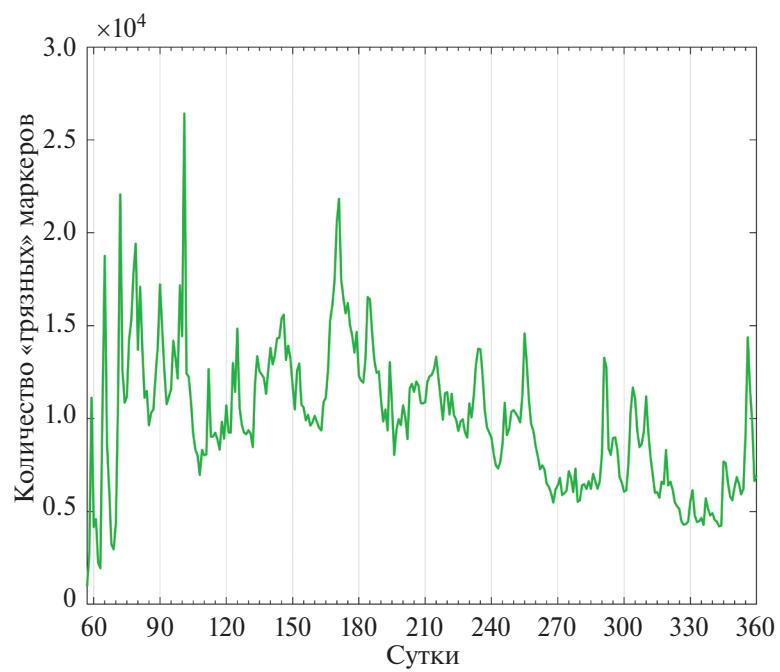


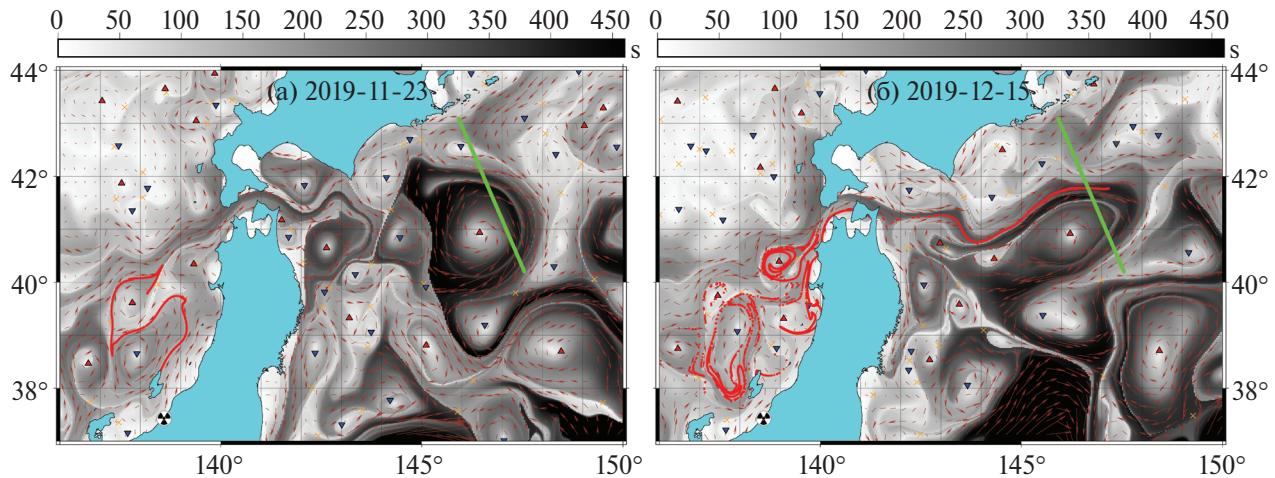
Рис. 3. График распределения количества “грязных” маркеров, запускаемых ежесуточно в период с 1 января 2014 г. по 31 декабря 2022 г. вблизи АЭС “Касивадзаки-Кариба”, по времени в пути до момента достижения отрезка I



**Рис. 4.** Эпизоды эволюции пятна маркеров (показаны красным цветом) на (а) 26 февраля и (б) 23 мая 2022 г., запуск которых производился 5 января 2022 г. Красные треугольники  $\blacktriangle$  соответствуют центрам антициклонов, синие  $\blacktriangledown$  – циклонов. Жёлтыми крестиками показаны гиперболические точки. [18] Серый цвет кодирует значение лагранжева индикатора S – длину траекторий пассивных трассеров



**Рис. 5.** График распределения количества «грязных» маркеров, запускаемых ежесуточно в период с 1 января 2014 г. по 31 декабря 2022 г. вблизи АЭС «Касивадзаки-Карива», по времени в пути до момента достижения отрезка II



**Рис. 6.** Эпизоды эволюции пятна маркеров (маркеры показаны красным цветом), запуск которых производился 18 октября 2019 г. до II отрезка – южная граница Южно-Курильской рыболовной зоны для 23 ноября 2019 г. (а) и 15 декабря 2019 г (б). Красные треугольники  $\blacktriangle$  соответствуют центрам антициклонов, синие  $\blacktriangledown$  – циклонов. Желтыми крестиками показаны гиперболические точки. [18] Серый цвет кодирует значение лагранжева индикатора  $S$  – длину траекторий пассивных трассеров

с координатами  $41^\circ$  с.ш.,  $146^\circ$  в.д. на 15 декабря 2019 г.

На рис. 6 рассматривается эволюция пятна маркеров, запущенных 18 октября 2019 г. Видно, что в течение первого месяца после запуска пятно маркеров активно деформируется локальной системой вихрей с образованием характерных S-образных складок, обусловленных влиянием неустойчивых многообразий гиперболических точек. В этот период маркеры не слишком удаляются от места запуска. Однако уже в течение второго месяца часть пятна маркеров проникает в Тихий океан через Сангарский пролив, где подхватывается северной периферией системы антициклонических вихрей, что обеспечивает быструю адвекцию частиц к отрезку II. Отметим, что подобная композиция вихрей существует не постоянно, поэтому для большинства маркеров реальный промежуток времени адвекции может быть в 2–3 раза больше, чем в описанной ситуации (рис. 6).

#### Зависимость распределений количества маркеров от дат их запуска от АЭС

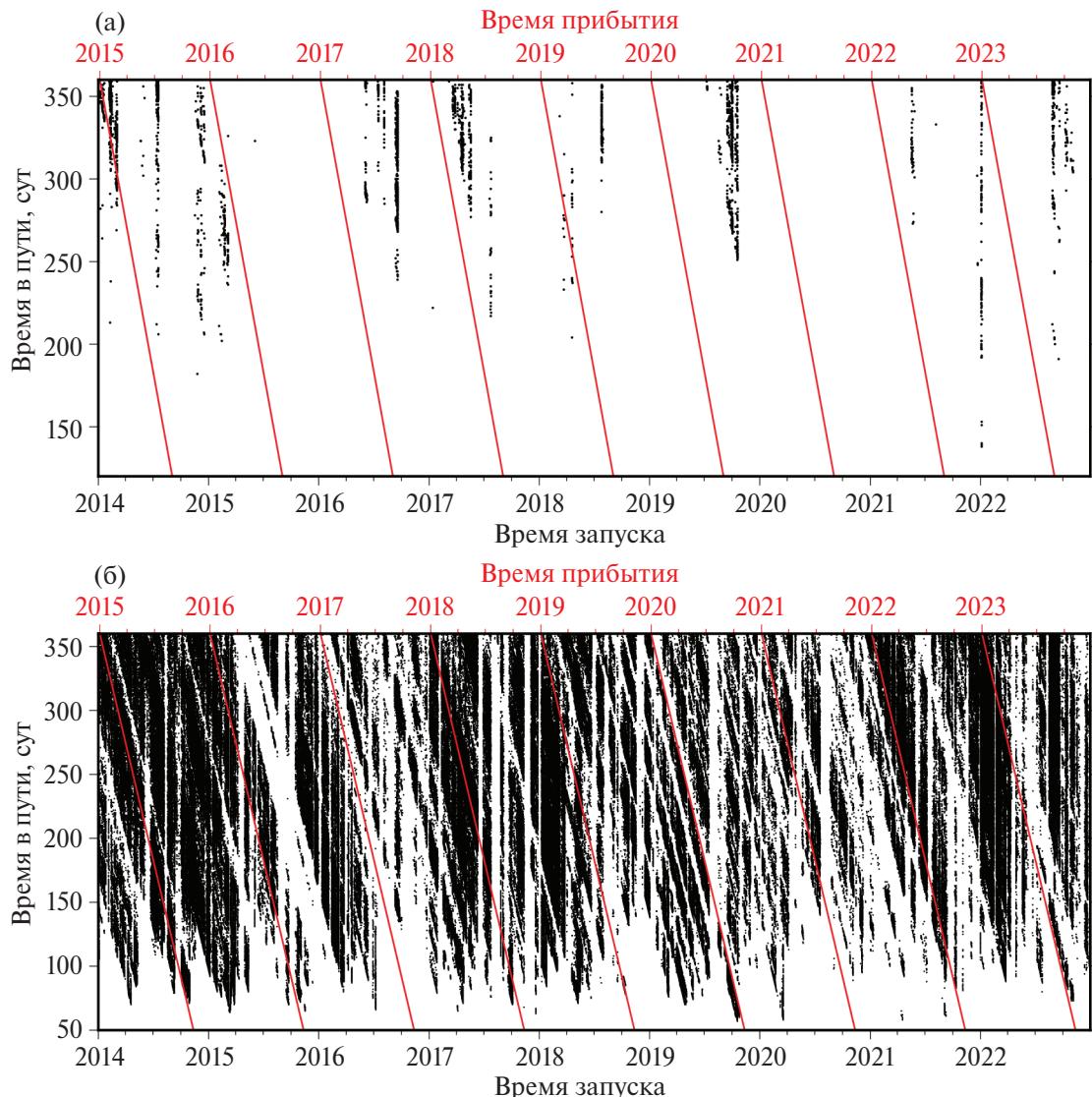
#### “Касивадзаки-Карива” и от времени в пути

Возникает вопрос: непрерывно ли поступают маркеры в указанные районы или порционно? Оказалось, что верно второе – количество “грязных” маркеров, достигающих I или II отрезка, зависит от даты запуска частиц. Это означает, что локальная циркуляция и интенсивность течений в районе исследования очень сильно влияет на перенос маркеров и на время, которое необходимо для этой адвекции. Подчеркнём, что

существенную роль в транспорте “грязных” маркеров играет вихревая динамика, изменчивость которой влияет на порционность поступления частиц к отрезку I или II.

На рис. 7 представлены диаграммы, на которых показана связь дат запуска частиц с датами их прибытия к указанному отрезку. Белые вертикальные полосы на диаграммах указывают на то, что адвекция маркеров от места запуска до выбранных отрезков происходит в определённые временные окна, когда вдоль маршрута складываются оптимальные для транспорта условия. Фиксированным датам прихода соответствуют диагональные полосы, параллельные красным отрезкам. Видно, что приход “грязных” маркеров происходит в отдельные временные окна, при этом маркеры, запущенные в разное время, могут достигать соответствующего отрезка одновременно. Указанные особенности транспорта необходимо учитывать при оценке воздействия на окружающую среду потенциального загрязнения вследствие вероятной аварии на АЭС “Касивадзаки-Карива”.

Диаграмма для отрезка I на рис. 7 а выглядит как набор вертикальных полос, из чего следует, что временные окна, для которых “грязные” маркеры могут достичь берегов южного Приморья, редкие и узкие. Вертикальное расположение полос указывает на то, что маркеры пересекают выбранные отрезки порциями, а в определённые периоды не достигают отрезка I. Однако эти маркеры, будучи запущенными в “благоприятное” для быстрой адвекции окно, достигают



**Рис. 7.** Диаграмма распределения маркеров по датам запуска и времени в пути от АЭС “Касивадзаки-Карива” до отрезка I (а) и отрезка II (б). Нижняя горизонтальная ось соответствует времени запуска. Верхняя горизонтальная ось показывает время прибытия маркеров к выбранному отрезку. Вертикальная ось соответствует промежутку времени, которое частицы затрачивают на перемещение от АЭС “Касивадзаки-Карива” к отрезкам I и II. Чёрными точками показаны “грязные” маркеры. Красные линии соответствуют маркерам, приходящим к выбранным отрезкам в одно и тоже время

отрезка I всего лишь через несколько месяцев, и тогда слив загрязнённых вод в эти временные окна потенциально может представлять экологическую угрозу для региона.

Диаграмма для отрезка II на рис. 7 б указывает на то, что количество маркеров, перемещающихся к южной границе Южно-Курильской рыболовной зоны, значительно больше, чем в предыдущем случае, а время в пути, наоборот, меньше. Будучи запущенными в определённый момент времени, маркеры почти всегда достигают отрезка II. Однако даже в этом случае на диаграмме имеются небольшие “безопасные”

окна, когда маркеры не перемещаются в сторону отрезка.

## ВЫВОДЫ

На основе поля геострофических течений, рассчитанных по альтиметрическим данным, за период с 01.01.2013 по 31.12.2023 проведено численное моделирование адвекции потенциально загрязнённой воды от АЭС “Касивадзаки-Карива” к берегам Приморского края и в зону рыбного промысла в районе Южных Курил. Проведённый анализ показал, что существует

возможность быстрой адвекции загрязнения от АЭС “Касивадзаки-Кариба” в оба района вследствие гипотетической аварии на АЭС.

Построенные дазиметрические карты фиксируют вероятные транспортные коридоры маркеров. Для переноса потенциального загрязнения к берегам южного Приморья и в залив Петра Великого выявлены три основных пути переноса загрязнения, связанных с северной периферией Субарктического круговорота, локальной системой вихрей разной полярности и ветвью Западно-Сахалинского течения. Количество маркеров, достигающих акватории южного Приморья, на порядки меньше, чем района Южных Курил. Времена маркеров в пути при достижении Приморья в среднем от полугода до года и выше. Однако в отдельных случаях “грязные” маркеры уже через 138–140 суток могут достичь берегов Приморья.

Перенос загрязнения в Южно-Курильскую рыболовную зону осуществляется в основном двумя путями: выносом япономорских вод в Тихий океан через Сангарский пролив с дальнейшей адвекцией к Южным Курилам, а также переносом вод северной ветви Цусимского течения к проливу Лаперуза и последующей адвекцией течением Соя в Тихий океан. Обнаружена вероятность быстрой адвекции загрязнённых маркеров в указанную зону за 58–60 суток.

Показано, что в обоих случаях адвекция лагранжевых маркеров носит порционный характер и происходит в определённые временные окна. Время такого переноса зависит от сформировавшейся локальной системы течений и мезомасштабных вихрей на разных участках транспортных коридоров. Перенос маркеров к берегам южного Приморья маловероятен и возможен только в специфических ситуациях, обусловленных “благоприятной” циркуляцией в регионе. Перенос к Южным Курилам осуществляется практически постоянно.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке СПбГУ, шифр проекта № 116442164. Расчёты по лагранжевому анализу адвекции маркеров выполнена при поддержке госзадания ТОИ ДВО РАН “Фундаментальные основы адаптационных стратегий развития экосистем в условиях глобальных климатических изменений”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Боровой А.А., Великов Е.П. Системный анализ причин и последствий аварии на АЭС “Фукусима-1”. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. 2018. 408 с. ISBN 978-5-9907220-5-7.

2. Nishikawa T., Inoue H., Motohashi S., Ebisawa K. Lessons Learned from Kashiwazaki-Kariwa NPP after Niigataken Chuetsu-Oki Earthquake (2007) in View of SSI Effect / In Infra-structure Systems for Nuclear Energy (eds T.T.C. Hsu, C.-L. Wu and J.-L. Li). 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118536254.ch16>
3. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря, Владивосток, 1991. С. 156–165.
4. Yabe I., Kawaguchi Y., Wagawa T. et al. Anatomical study of Tsushima warm current system: determination of principal pathways and its variation // Prog. Oceanogr. 2021. V. 194. P. 102590. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102590>
5. Fukudome K.-I., Yoon J.-H., Ostrovskii A., Takikawa T., Han In-S. Seasonal volume transport variation in the Tsushima Warm Current through the Tsushima Straits from 10 years of ADCP observations // Journal of Oceanography. 2010. V. 66(4). P. 539–551. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0045-5>
6. Shin H.-R., Lee J.-H., Kim C.-H., Yoon J.-H., Hirose N., Takikawa T., Cho K. Long-term variation in volume transport of the Tsushima warm current estimated from ADCP current measurement and sea level differences in the Korea/Tsushima Strait // J. Mar. Syst. 2022. V. 232. P. 103750. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2022.103750>
7. Hirose N., Ostrovskii A.G. Quasi-biennial variability in the Japan Sea // J. Geophys. Res. 2000. V. 105(C6). P. 14011–14027. <https://doi.org/10.1029/2000JC900046>
8. Kim D., Shin H.-R., Kim C.-H., Hirose N. Characteristics of the East Sea (Japan Sea) circulation depending on surface heat flux and its effect on Branching of the Tsushima Warm Current // Continental Shelf Research. 2020. V. 192. P. 104025. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.104025>
9. Takikawa T., Watanabe T., Senju T., Morimoto A. Wind-driven intensification of the Tsushima Warm Current along the Japanese coast detected by sea level difference in the summer monsoon of 2013 // Continental Shelf Research. 2017. V. 143. P. 217–277. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2016.06.004>
10. Wagawa T., Kawaguchi Y., Igeta Y., Honda N., Okunishi T., Yabe I. Observations of oceanic fronts and water-mass properties in the central Japan Sea: Repeated surveys from an underwater glider // Journal of Marine Systems. 2019. V. 201. P. 103242. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103242>
11. Wagawa T., Igeta Y., Ikeda S., Fukudome K., Hasegawa D., Tanaka T. Variation of upper-layer flow

- structures and water masses observed around the Noto Peninsula and Sado Island, Japan // *Continental Shelf Research*. 2022. V. 255. P. 104911. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104911>
12. *Igeta Y., Yankovsky A., Fukudome K., Ikeda S., Okei N., Ayukawa K., Kaneda A., Watanabe T.* Transition of the Tsushima Warm Current Path Observed over Toyama Trough, Japan // *J. Phys. Oceanogr.* 2017. V. 47. P. 2721–2739. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0027.1>
  13. *Kaneda A., Ayukawa K., Hirose N. et al.* Sudden strong current generated by an eddy in the eastern part of Wakasa Bay, Japan // *J. Oceanogr.* 2017. V. 73. P. 181–192. <https://doi.org/10.1007/s10872-016-0395-8>
  14. *Watanabe T., Katoh O., Yamada H.* Structure of the Tsushima warm current in the northeastern Japan Sea // *J. Oceanogr.* 2006. V. 62. P. 527–538. <https://doi.org/10.1007/s10872-006-0073-3>
  15. *Kawamura H., Ito T., Hirose N., Takikawa T., Yoon J.-H.* Modeling of the branches of the Tsushima Warm Current in the Eastern Japan Sea // *J. Oceanogr.* 2009. V. 65. P. 439–454. <https://doi.org/10.1007/s10872-009-0039-3>
  16. *Дьяков Б.С.* Результаты океанологического мониторинга северо-западной части Японского моря в 2018 г. // Труды ВНИРО. 2020. № 180. С. 5–22. <http://dx.doi.org/10.36038/2307-3497-2020-180-5-22>
  17. *Андреев А.Г.* Особенности циркуляции вод в южной части Татарского пролива // Исследование Земли из космоса. 2018. № 1. С. 3–11. <http://dx.doi.org/10.7868/S0205961418010013>
  18. *Ponomarev V., Fayman P., Prants S., Budyansky M., Uleysky M.* Simulation of mesoscale circulation in the Tatar Strait of the Japan Sea // *Ocean Model.* 2018. V. 126. P. 43–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.04.006>
  19. *Kim T., Yoon J.-H.* Seasonal variation of upper layer circulation in the northern part of the East/Japan Sea // *Cont. Shelf Res.* 2010. V. 30. P. 1283–1301. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.04.006>
  20. *Никитин А.А., Дьяков Б.С., Капиштер А.В.* При-морское течение на стандартных разрезах и спутниковых изображениях Японского моря // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0205961420010078>

## POTENTIAL HAZARD OF RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE MARINE ENVIRONMENT DUE TO POSSIBLE EARTHQUAKES NEAR THE KASHIWAZAKI-KARIWA NUCLEAR POWER PLANT

© 2025 M. V. Budyansky<sup>a,b,‡</sup>, M. Yu. Uleysky<sup>b</sup>, M. A. Lebedeva<sup>a,b</sup>,  
P. A. Fayman<sup>b</sup>, T. V. Belonenko<sup>a</sup>

Presented by Academician of the RAS G.I. Dolgikh September 12, 2024

<sup>a</sup>*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok, Russia*

<sup>‡</sup>*E-mail: plaztic@mail.ru*

Based on geostrophic current fields calculated from altimetry data for the period from January 1, 2013, to December 31, 2023, numerical modeling of the advection of potentially contaminated water from the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant to the shores of Primorsky Krai and the fishing zone around Southern Kuril Islands was carried out using a Lagrangian approach. Dasymetric maps representing probable pathways of surface ocean contamination were constructed. For the southern Primorye region, transport pathways and three corridors related to the local current structures and mesoscale eddies were identified. The minimum advection time for Lagrangian markers simulating potentially contaminated waters to reach the Primorsky Krai coast is 138–140 days. Two possible transport routes into the Southern Kuril fishing zone were revealed, with the potential for rapid advection of contaminated markers into this zone within 58–60 days. It was demonstrated that the advection of Lagrangian markers occurs in portions and within specific time windows.

**Keywords:** Lagrangian modeling, altimetry, Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant, advection, transport corridors, Southern Kuril Islands, Peter the Great Bay, Primorsky Krai