ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2024, том 515, № 1, с. 164–174

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.468

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОД ЮЖНО-КУРИЛЬСКОЙ РЫБОЛОВНОЙ ЗОНЫ РОССИИ РАДИОАКТИВНЫМИ ВОДАМИ АЭС “ФУКУСИМА-1” НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2024 г. М. В. Будянский[1], А. А. Удалов[1], М. А. Лебедева[1,2], Т. В. Белоненко[2,*]

Представлено академиком РАН Н.С. Бортниковым 17.10.2023 г.
Поступило 17.10.2023 г.
После доработки 02.11.2023 г.
Принято к публикации 07.11.2023 г.

В работе изучается потенциальная опасность, исходящая от мероприятий, проводимых правительством Японии по сбросу технической радиоактивной воды из хранилищ АЭС “Фукусима-1”. Рассматривается загрязнение радиоактивными частицами акватории Южно-Курильской рыболовной зоны (ЮКРЗ), которая является одним из наиболее перспективных районов для рыболовного промысла Российской Федерации. На основе моделирования переноса пассивных маркеров, имитирующих радиоактивное загрязнение, анализируются пути и механизмы переноса загрязнения в ЮКРЗ. Исследование проводится по альтиметрическим данным о геострофических скоростях для периода с 24 августа 2022 г. по 24 августа 2023 г. Перенос загрязнения в ЮКРЗ определяется комплексом условий, связанных с текущим режимом развития Первого меандра Куросио, а также локальной системой вихрей разных знаков как вблизи места слива, так и на границе ЮКРЗ. Установлена сезонная зависимость скорости и количества проникновения загрязненных вод к берегам РФ. Обнаружена возможность быстрой адвекции загрязнения в ЮКРЗ: за 13 суток. Такая скорость обусловлена захватом загрязнения меандром Куросио и дальнейшим его переносом системой мезомасштабных вихрей до границ ЮКРЗ. Выявлена порционность в поступлении загрязнения в ЮКРЗ. Построены графики распределения количества “грязных” маркеров по временам их запуска и поступления загрязненных вод к границе ЮКРЗ.

Ключевые слова: Фукусима, радиация, загрязнение, тритий, Южно-Курильская рыболовная зона, ЮКРЗ, промысел рыб, альтиметрия, вихревая адвекция, течения

DOI: 10.31857/S2686739724030212

ВВЕДЕНИЕ

В марте 2011 г., из-за землетрясения и цунами в Японии, произошла авария на атомной электростанции (АЭС) “Фукусима-1”, которая привела к выбросу радиоактивного загрязнения. В океан радионуклиды попали в результате слива зараженной воды, выпадения осадков на поверхность моря и смыва с почвы радиоактивных элементов [1]. К 2023 году вследствие технологических процессов, направленных на ограничение дальнейшего распространения загрязнения в окружающую среду, в больших емкостях вблизи АЭС скопилось более 1.25 млн тонн технической радиоактивной воды, которая ранее использовалась для охлаждения поврежденных реакторов.

24 августа 2023 года Япония начала процесс сброса в Тихий океан накопленной технической воды с АЭС. Сброс осуществляется на расстоянии одного километра от берега через подводный туннель. Планируется, что до конца марта 2024 г. с атомной станции будет слито около 31.2 тыс. тонн жидкости, а сам процесс займет несколько десятилетий. Правительство Японии утверждает, что текущая ситуация находится под контролем и что сброс воды не представляет угрозу окружающей среде и здоровью людей. Для подтверждения этой точки зрения японские власти ссылаются на заключение специалистов Международного агентства по атомной энергии.

Однако 1 сентября 2023 г. международные новостные агентства доложили о первом обнаружении с момента начала сброса воды с атомной

[1] *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
**E-mail: btvlisab@yandex.ru*

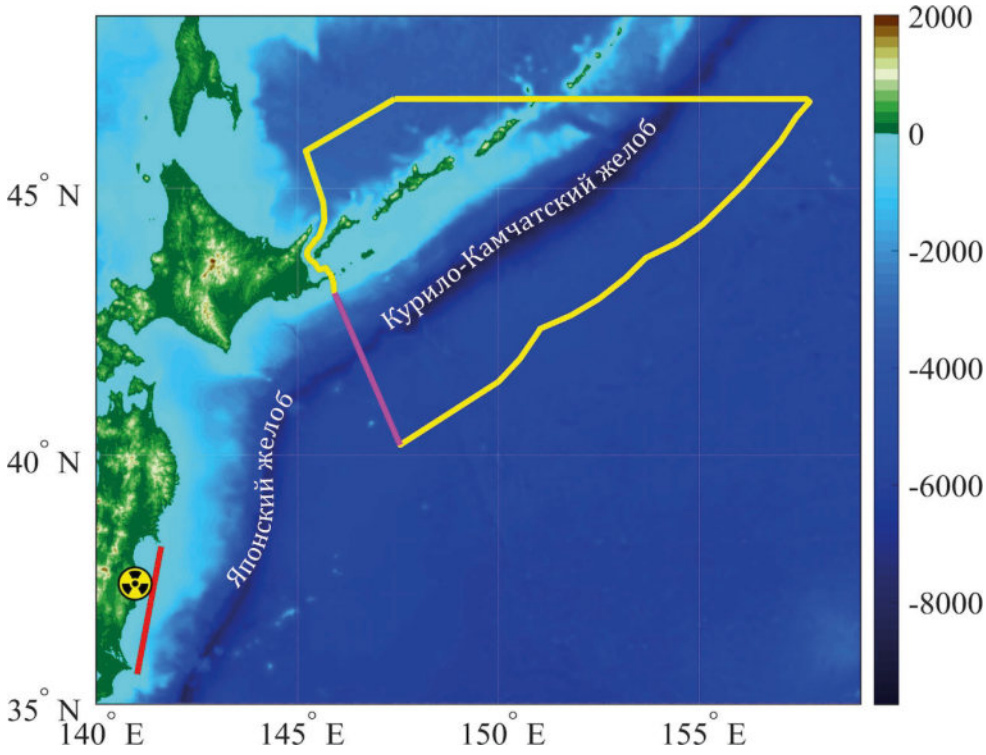

Рис. 1. Район исследования. Расположение АЭС “Фукусима-1” (координаты 37° 25′ 12.0″ с.ш., 141° 2′ 58.0″ в.д.) показано знаком радиационной опасности. Желтая линия обозначает границы ЮКРЗ. Розовый отрезок – юго-западная граница ЮКРЗ. Красный отрезок – область запуска (при лагранжевом анализе в прямом времени) и ловли (при лагранжевом анализе в обратном времени) пассивных маркеров, имитирующих загрязнение. Цветом показана топография. Границы рыбопромысловой зоны 61.04 (Южно-Курильская) построены в соответствии с Приложением № 1 Приказа от 21 октября 2013 года № 385 “Об утверждении правил рыболовства для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна”.

электростанции “Фукусима-1” радиоактивного изотопа трития на северо-восточной границе порта. Концентрация трития составила 10 беккерелей на литр, в то время как нормативное значение составляет 0.1 беккереля на литр. Тритий – тяжелый изотоп водорода, бета-излучатель, который передается через воду рыбам и другим морским организмам и способствует их заражению.

Некоторые специалисты выражают мнение, что сброс радиоактивных вод с АЭС “Фукусима-1” приведет к серьезным последствиям для рыбного промысла РФ, в результате чего Россия может лишиться его на 150 лет[1]. Другие ученые утверждают, что до российских берегов загрязненные воды в любом случае не дойдут, так как существующая в регионе система течений надежно защищает дальневосточное побережье России от проникновения радиоактивных частиц[2]. Однако эти противоположные друг другу мнения основаны на качественной экспертной оценке и не опираются на детальный анализ возможных путей проникновения загрязненных частиц к российским берегам.

Для изучения данного вопроса в настоящей работе применяются методы лагранжева моделирования [2–4]. Подобное исследование уже проводилось непосредственно после аварии 2011 г. (см. [1, 5]). Установлено, что пятно радиоактивной воды распространяется от АЭС в восточном направлении и подхватывается струями Продолжения Куросио, однако опасность для живых организмов может представлять обнаруженный эффект захвата радионуклидов мезомасштабными вихрями, которыми радиоактивные частицы адвектируются в российские прибрежные воды.

В настоящей работе мы изучаем возможность загрязнения техническими водами,

[1] https://www.gazeta.ru/social/news/2023/09/02/21201482.shtml?updated

[2] https://www.pnp.ru/in-world/uchenyy-rasskazal-o-posledstviyakh-dlya-rossii-sbrosa-vody-s-fukusimy.html

сбрасываемыми из хранилищ АЭС “Фукусима-1”, Южно-Курильской рыболовной зоны (ЮКРЗ), что составляет цель данного исследования. Актуальность этой работы трудно переоценить: акватория ЮКРЗ находится в пределах исключительной экономической зоны России и считается одним из наиболее перспективных районов для рыболовного промысла Российской Федерации (рис. 1). Данный регион богат разнообразными видами морской живности, среди которых сайра, сардина, скумбрия, тресковые рыбы, камбала, тихоокеанские лососи, а также крабы, моллюски, иглокожие и другие морские организмы [6]. Так как попадание радиоактивных частиц с АЭС “Фукусима-1” в район промысла происходит не мгновенно и имеет отложенный эффект, в настоящей работе упор делается на информацию о системе течений в регионе за предыдущий год от момента начала сброса, т.е. рассматривается период с 24 августа 2022 г. до 24 августа 2023 г. Предлагаемый подход позволит получить оценки, которые в целом будут актуальны и для последующих лет. Хотя циркуляция в регионе исследования имеет межгодовую изменчивость, основные системы течений остаются неизменными.

МЕТОДЫ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования переноса радиоактивного загрязнения применяется арсенал методов, развитых в работах [1–5, 7–9]. Лагранжево моделирование позволяет изучить пути и время распространения радиоактивных веществ с высокой степенью точности и произвести количественную оценку загрязнения радиоактивными частицами акватории ЮКРЗ, близко расположенной к месту слива радиоактивной воды АЭС “Фукусима-1”. Для изучения адвекции радиоактивного загрязнения планируется использование метода трекинга маркеров, при котором рассчитывается большое количество траекторий пассивных трассеров, имитирующих загрязнение.

В качестве информации о течениях мы используем геострофические скорости, рассчитанные по данным спутниковой альтиметрии AVISO (с пространственным разрешением 1/4°). Эти данные являются результатом объединения измерений всех альтиметрических миссий: Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2 за период 1993 г. по настоящее время. Данные доступны на портале Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) (http://marine.copernicus.eu).

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Зона исследования к востоку от Японии ограничена с юга и севера меандрирующей струей мощного теплого течения Куросио и холодного Ойясио. С этими течениями совпадают и соответствующие гидрологические фронты. Участок системы Куросио от о-ва Хонсю до Императорских гор называют Продолжением Куросио. В полосе приблизительно 42–43° с.ш. Ойясио поворачивает на восток (так называемая, Вторая ветвь Ойясио). Район взаимодействия Куросио и Ойясио является одним из самых динамически активных районов Мирового океана, где происходит изменчивость океанологических полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов [10]. Наблюдения показывают, что в отдельные промежутки времени Куросио и Ойясио местами расщепляются на отдельные ветви, т.е. происходит бифуркация течений [11]. Наличие квазистационарных меандров Куросио приводит к образованию с его северной стороны теплых антициклонических вихрей, дальнейшая эволюция которых подвержена влиянию топографии. Антициклонические вихри масштаба около 100 км распространяются вдоль Курильского желоба на северо-восток [12, 13] и взаимодействуют с другими динамическими структурами. На рис. 2 видны меандрирующая струя Куросио, поток Ойясио, распространяющийся на юго-запад вдоль Курильской гряды, и система мезомасштабных вихрей, образовавшаяся вследствие неустойчивости Куросио. В зависимости от сезона существуют различные режимы развития Куросио: с развитым Первым меандром, простирающимся вдоль японского побережья далеко на север (рис. 2 б) и без него (рис. 2 а). Скорости в стрежне Куросио достигают 2.5 м/с. Скорости Ойясио значительно меньше и в феврале достигают 0.5–1.0 м/с, но летом Ойясио существенно ослабевает: скорости не превышают 0.25–0.35 м/с, что способствует проникновению вод с юга, перемешиванию вод разного происхождения, отрыву филаментов от вихрей и в итоге попаданию радиоактивных частиц воды в ЮКРЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Чтобы оценить возможность загрязнения радиоактивными частицами акватории ЮКРЗ, мы провели серию численных экспериментов при помощи лагранжева моделирования.

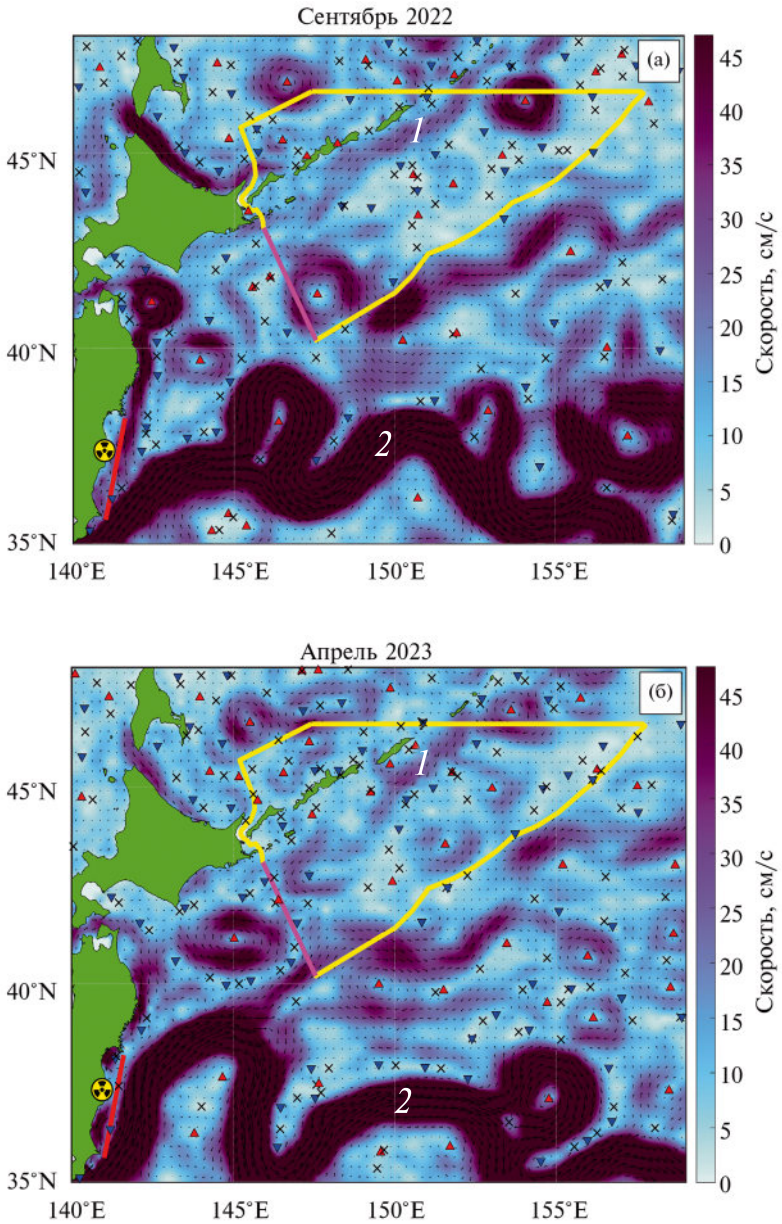

Рис. 2. Геострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным AVISO и усредненные за сентябрь 2022 г и апрель 2023 г. Течения: *1* – Ойясио, *2* – Куросио. Стрелками показаны векторы течений, цветовая шкала соответствует модулю скорости. Красный отрезок (35.6° с.ш., 141° в.д. – 38.3° с.ш., 141.6° в.д.) расположен вблизи АЭС “Фукусима-1”, от него рассчитываются траектории маркеров. Красные треугольники ▲ соответствуют центрам антициклонов, синие ▼ – циклонов. Черными крестиками показаны гиперболические точки.

Оценка адвекции пассивных маркеров по данным AVISO

Каждые сутки в период с 24 августа 2022 г. по 24 августа 2023 г. прямоугольная область с координатами 40°–48,5° с.ш., 145°–159° в.д., включающая ЮКРЗ, засевалась пятном маркеров на равномерной сетке 500×500 узлов. Всего 25×10^4 маркеров. Далее для каждого маркера решались уравнения адвекции в обратном времени на интервале 365 суток и рассчитывались траектории. Те маркеры, траектории которых в прошлом пересекли отрезок 35,6° с.ш., 141° в.д. – 38,2° с.ш., 141,6° в.д., расположенный параллельно береговой линии вблизи АЭС “Фукусима-1” (рис. 1), окрашивались красным цветом. Такие маркеры соответствуют потенциально загрязненным водам АЭС “Фукусима-1”. Хотя, как и утверждается многими экспертами, основная часть загрязненных вод действительно

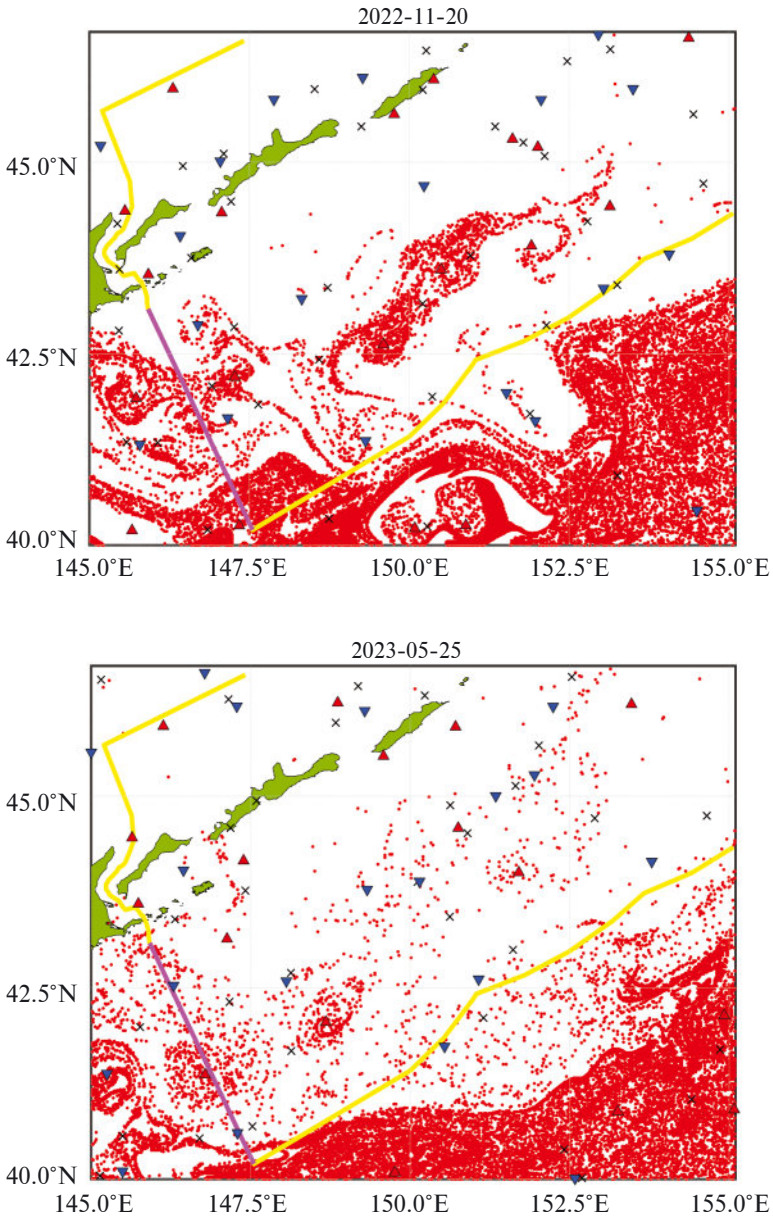

Рис. 3. Пространственное распределение “грязных” маркеров на 20 ноября 2022 г., 25 мая 2023 г. Треугольники и крестики означают то же, что и на рис. 2.

подхватывается потоком Куросио и уносится от берегов Японии в Тихий океан на восток, однако потенциально загрязненные частицы можно обнаружить вблизи Курильских берегов. На рис. 3 видно, что потенциально “грязные” маркеры достигают границ ЮКРЗ и переносятся далеко на север, а также через курильские проливы попадают в Охотское море. Отметим, что эти маркеры, как правило, часто концентрируются на периферии мезомасштабных вихрей или вдоль меандров, из чего следует, что вихревая адвекция является одним из механизмов, благодаря которому потенциально “грязные” маркеры могут достичь региона российского рыбного промысла.

На рис. 4 приведена временная изменчивость числа “грязных” маркеров в ЮКРЗ. Рассматривался период с 24 августа 2022 г. по 24 августа 2023 г., для которого ежесуточно проводился расчет траекторий маркеров в обратном времени длительностью один год. Видно, что наибольшее число “грязных” маркеров, попадающих в ЮКРЗ различными путями, относится к промежутку времени с конца августа до конца

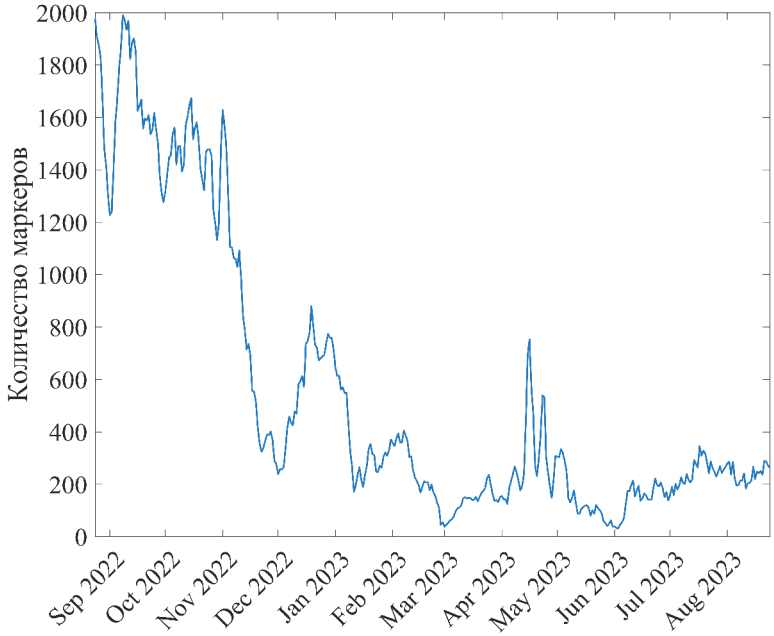

Рис. 4. Временная изменчивость количества “грязных” маркеров внутри ЮКРЗ. Счет проводился ежесуточно с 24 августа 2022 г. по 24 августа 2023 г. Траектория каждого маркера считалась в обратном отсчете времени на 1 год.

октября. Это означает, что именно этот промежуток является наиболее потенциально опасным для промысла в ЮКРЗ.

Количество “грязных” маркеров в ЮКРЗ (рис. 4) меняется в течение года скачкообразно. Экстремумы на графике (в частности, в декабре, в феврале и мае) показывают, что “грязные” частицы попадают в ЮКРЗ порциями. Очевидно, такая закономерность обусловлена особенностями циркуляции в регионе в рассматриваемый период.

Оценка времени адвекции “грязных” маркеров от АЭС “Фукусима-1” до юго-западной границы ЮКРЗ

Следующий эксперимент позволяет оценить время, за которое потенциальное загрязнение с АЭС “Фукусима-1” распространяется до юго-западной границы ЮКРЗ (отрезок 40.2° с.ш., 147.55° в.д. – 43.084° с.ш., 145.917° в.д., на рис. 1 показан розовым цветом). Каждые сутки в период с 24 августа 2022 г. по 6 июня 2023 г. на отрезке (35.6° с.ш., 141° в.д. – 38.2° с.ш., 141.6° в.д., на рис. 1 показан красным цветом), расположенном вдоль береговой линии вблизи АЭС “Фукусима-1”, запускались 50000 пассивных трассеров и рассчитывалось время, за которое частицы достигают юго-западной границы ЮКРЗ. Все траектории рассчитывалась в прямом времени на период 90 суток. На рис. 5 видно, что уже спустя 13 сут. после запуска первые “грязные” маркеры пересекают южную границу ЮКРЗ, после чего число “грязных” маркеров резко растет. Максимальное их число, превышающее 4.4×10^4, отмечается на 25 сут., после чего число маркеров в несколько раз снижается, но даже на 90-й день после слива радиоактивной воды их число все еще велико (около 0.7×10^4). Отметим, что в данном эксперименте оценка общего числа маркеров относится не к одной конкретной дате запуска, а ко всем датам рассматриваемого периода.

Нам удалось поймать время запуска пятна загрязнения, частицы которого за минимальное время достигают юго-западной границы ЮКРЗ, – это дата 25 мая 2023 г. Всего за 13 сут. загрязненные воды подходят к границе ЮКРЗ. На рис. 6 показаны фрагменты эволюции такого пятна, наложенные на поле скорости AVISO. Быстрая адвекция загрязнения (с 25 мая по 7 июня) обусловлена подхватом пятна зарождающимся меандром Куросио и последующей адвекцией мезомасштабными антициклонами (рис. 6). При прохождении вблизи гиперболических точек на периферии указанных вихрей пятно значительно деформируется с появлением складок, характерных для хаотической адвекции [2–4]. Еще через неделю, 15 июня (рис. 6), рассматриваемое пятно “грязных” маркеров, уносится на восток ветвью Северо-Курильского течения, пересекая южную часть ЮКРЗ.

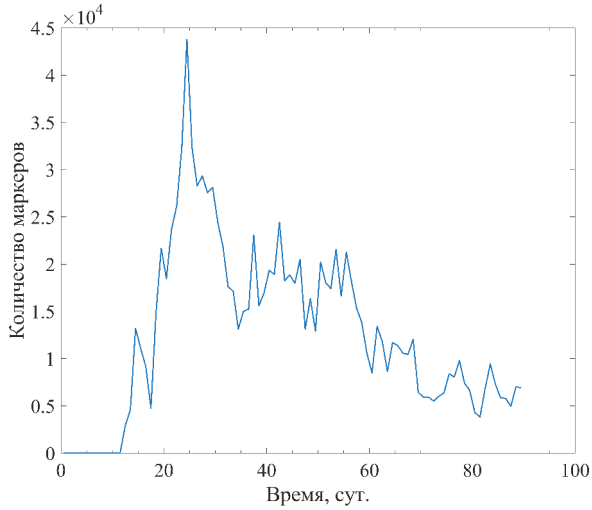

Рис. 5. Распределение количества “грязных” маркеров по времени достижения границы ЮКРЗ по данным поля AVISO. Рассматриваются только те маркеры, которые пересекли южную границу ЮКРЗ (розовый отрезок на рис. 1).

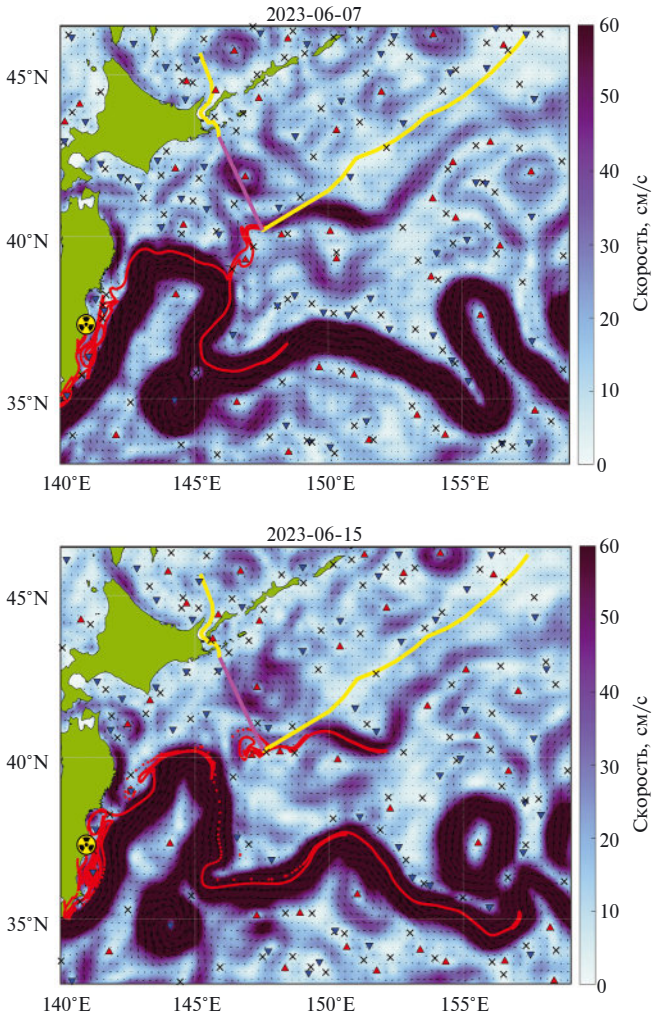

Рис. 6. Поле скорости по данным AVISO с фрагментами эволюции пятна загрязнения от японского берега у АЭС “Фукусима-1” (отрезок, как и пятно, показаны красным цветом, см. также рис. 1). Дата запуска 25 мая 2023 года. Маркеры достигли границы юго-западной границы ЮКРЗ (показана розовым цветом) спустя 13 суток после запуска.

Дазиметрические карты (плотность трассеров)

На рис. 7 представлена оценка количества “грязных” маркеров, достигших юго-западной границы ЮКРЗ в зависимости от даты запуска трассеров на отрезке вблизи восточного берега Японии. В отличие от рис. 4, где рассчитывалось общее число маркеров в акватории ЮКРЗ, на рис. 7 анализируется поступление маркеров только через юго-западную границу. Выделяются пики в октябре 2022 г., апреле и мае 2023 г., указывающие на то, что если сброс загрязненных вод с АЭС производился бы в эти периоды времени, то это будет способствовать большей степени загрязнения ЮКРЗ.

На рис. 8 представлены дазиметрические карты для сентября, ноября 2022 г. и апреля 2023 г., т.е. карты плотности следов (траекторий) “грязных” маркеров, сброшенных с АЭС в различные моменты времени. При построении траекторий исследуемый район 35–44° с.ш., 140–150° в.д. сперва разбивается на равномерную сетку 400×400 прямоугольных ячеек, затем в каждой ячейке считается количество ежесуточных следов, оставленных траекториями загрязненных маркеров, запущенных в определенный период времени у берега Японии (см. красный отрезок на рис. 1) и достигших юго-западной границы ЮКРЗ. Этот метод иллюстрирует транспортные коридоры для “грязных” маркеров (запуск в октябре 2022 г., апреле и мае 2023 г.) Видно, что формы этих транспортных коридоров не похожи друг на друга, так как они зависят от поля течений, которые изменяются во времени. Однако во всех случаях “грязные” маркеры достигают границы ЮКРЗ и впоследствии попадают в район активного рыбного промысла.

На рис. 9 показано распределение по датам количества “грязных” маркеров, достигших юго-западной границы ЮКРЗ. Выделяется пик в ноябре 2022 г., когда их число составляет 15×10^4, а также небольшие пики в ноябре 2022 г., январе, мае 2023 г. Этот результат означает следующее: если бы промысел гидробионтов производился в ЮКРЗ в эти периоды, то потребовалось бы повышенное внимание к дозиметрии в этом районе. Один из возможных путей загрязнения обусловлен особенностями циркуляции в этот период: Первый меандр Куросио прижат к береговой черте (рис. 2 б), струя Ойясио ослаблена, и в этом районе присутствуют крупномасштабные вихри, которые подхватывают частицы и, вращаясь, переносят их в ЮКРЗ.

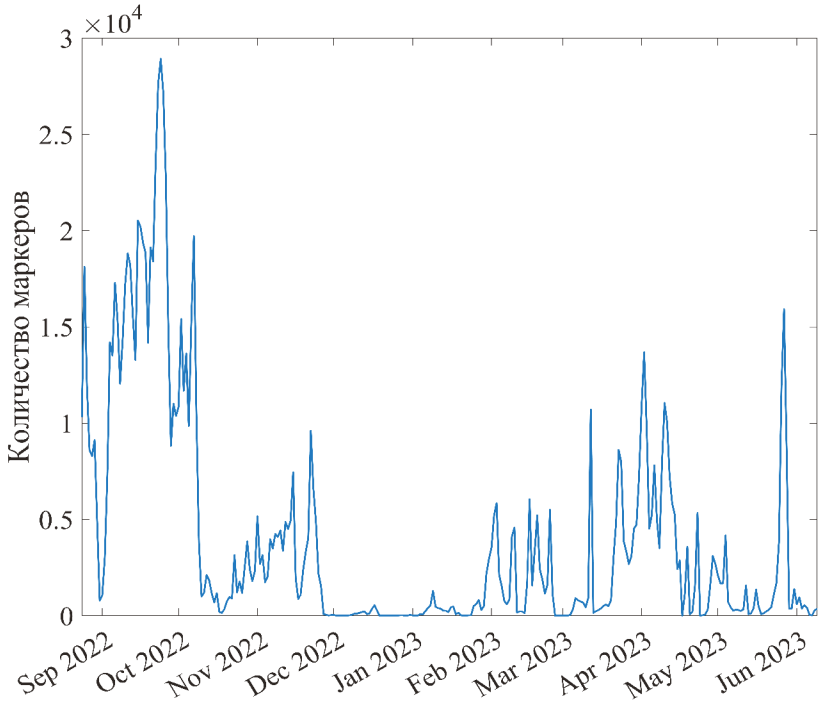

Рис. 7. Распределение количества “грязных” маркеров, достигших границ ЮКРЗ, по датам их запуска от берега Японии.

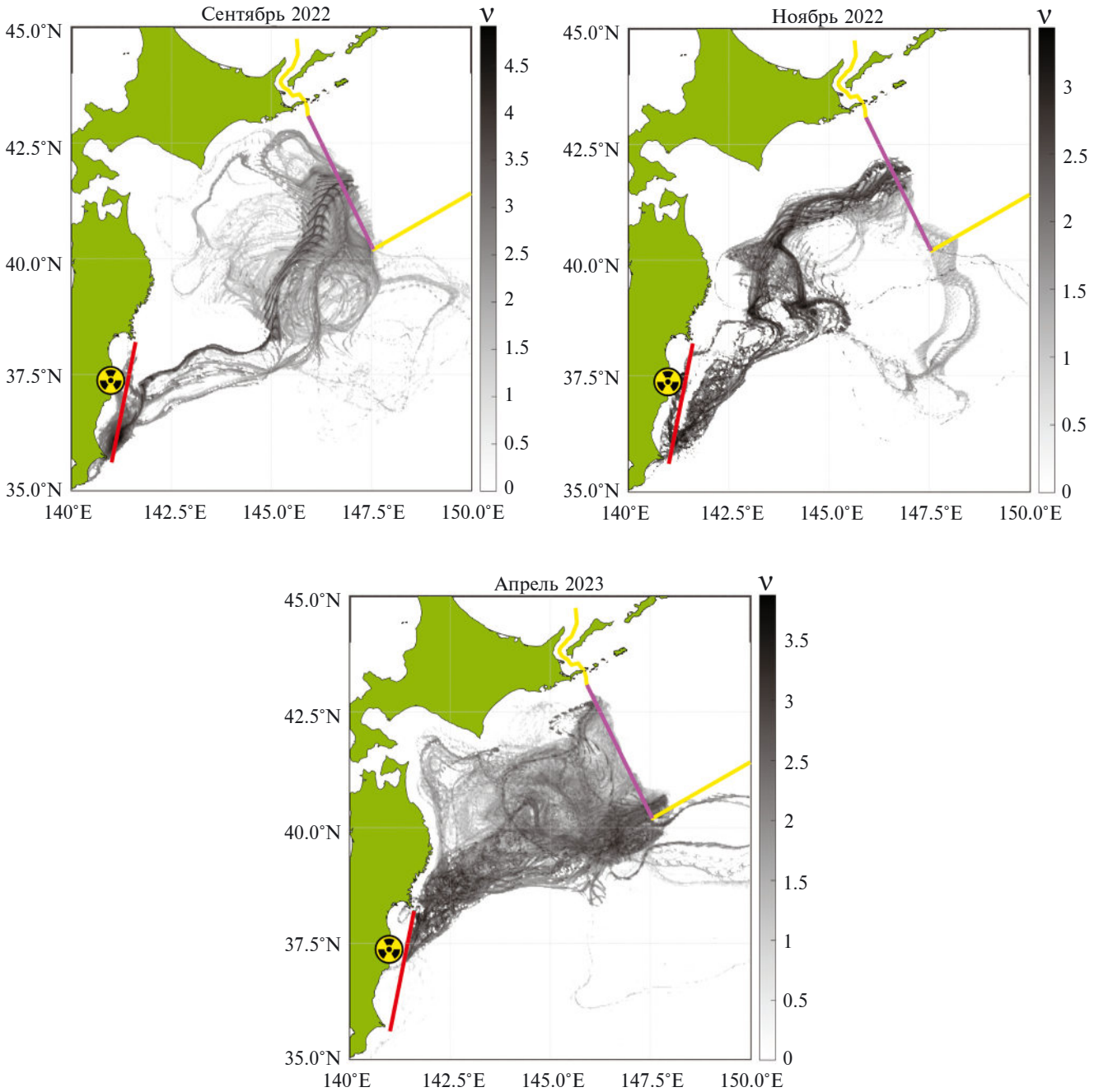

Рис. 8. Дазиметрические карты ежесуточных следов маркеров, запущенных от АЭС “Фукусима-1” в сентябре, ноябре 2022 г. и апреле 2023 г., достигших отрезка юго-западной границы ЮКРЗ. Цвет кодирует значение $\nu = \log \varphi$, где φ – плотность ежесуточных следов маркеров.

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показывает, что реальная опасность заражения районов российских прибрежных вод радиоактивными водами, сбрасываемыми с АЭС “Фукусима-1”, существует. Загрязненные воды могут проникнуть в ЮКРЗ, где ведется коммерческий промысел гидробионтов.

Для получения данного вывода было применено лагранжево моделирование переноса загрязнения, основанное на адвекции пассивных маркеров, помещаемых на поверхности моря. Численный расчет уравнений адвекции проводится на основе поля геострофических скоростей AVISO, рассчитанных по данным

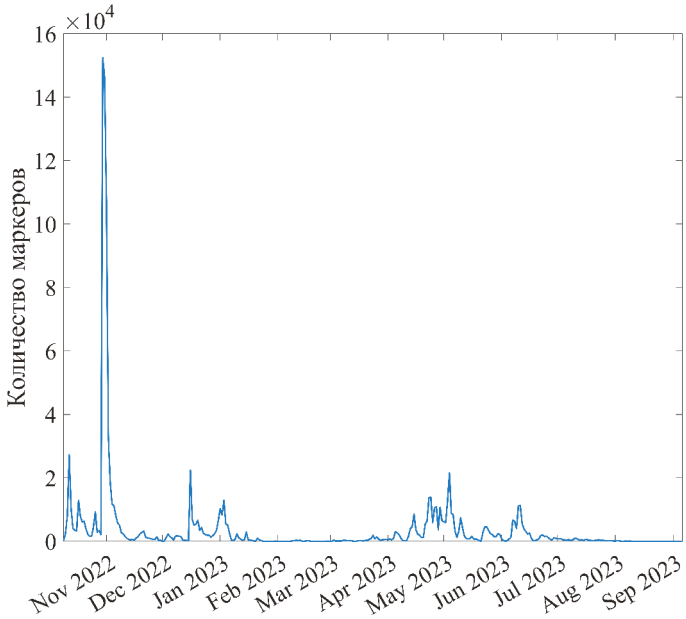

Рис. 9. Распределение количества “грязных” маркеров по датам их прихода к границе ЮКРЗ с 24 августа 2022 г.

альтиметрии. Для моделирования выбран период в один год перед первым сливом технической воды 24 августа 2023 года.

Установлена сезонная зависимость скорости и количества проникновения загрязненных вод к берегам Российской Федерации.

Перенос загрязнения в ЮКРЗ определяется комплексом условий, связанных с текущим режимом развития Первого меандра Куросио, а также локальной системой вихрей разных знаков как вблизи места слива, так и на границе ЮКРЗ.

Обнаружена возможность быстрой (за 13 сут.) адвекции загрязнения в ЮКРЗ. Такая скорость обусловлена захватом загрязненных частиц меандром Куросио и дальнейшим его переносом системой вихрей на границе ЮКРЗ.

Выявлена порционность в приходе загрязнения в ЮКРЗ.

Построены графики распределения количества грязных маркеров по временам их запуска и прихода к границе ЮКРЗ.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа М.Б. и А.У. по лагранжевому анализу адвекции пассивных маркеров поддержана РНФ, грант № 23-17-00068.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В.* Численное моделирование распространения в океане радиоактивного загрязнения от АЭС “Фукусима Дайичи” // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 811–814.

2. *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. V. 38. No. 1–2. P. 114–125.

3. *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. V. 439. No. 2. P. 1179–1182.

4. *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. V. 49. No. 1. P. 82–96.

5. *Budyansky M.V., Goryachev V.A., Kaplunenko D.D., Lobanov V.B., Prants S.V., Sergeev A.F., Shlyk N.V., Uleysky M. Yu.* Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean // Deep-Sea Research I. 2015. V. 96. P. 15–27. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.

6. Промысел биоресурсов в водах Курильской гряды: современная структура, динамика и основные элементы. Под ред. А.В. Буслова. Южно-Сахалинск. 2013. 265 с.

7. *Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В.* Лагранжевы когеретные структуры в океане, благоприятные для рыбного промысла // ДАН. 2012. Т. 447. № 1. С. 93–97.

8. *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. V. 21(1). P. 279–289. DOI: 10.5194/npg-21-279-2014.

9. *Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu.* Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // Ocean Sci. 2017. V. 13. P. 453–463. DOI: 10.5194/os-13-453-2017.

10. *Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О.* Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана. 2009. СПб.: СМИО ПРЕСС, 2009. 309 с.

11. Истоки Ойясио. Ред. В.Р. Фукс, А.Н. Мичурин. 1997. 248 с.

12. *Udalov A., Budyansky M., Prants S.* A census and properties of mesoscale Kuril eddies in the altimetry era // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2023. V. 200. 104129. DOI: 10.1016/j.dsr.2023.104129.

13. *Травкин В.С., Белоненко Т.В., Кочнев А.В.* Топографические волны в Курильском районе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 222–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-222-234.

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

M. V. Budyansky[a], A. A. Udalov[a], M. A. Lebedeva[a,b], T. V. Belonenko[a,#]

Presented by Academician of the RAS N.S. Bortnikov October 17, 2023

[a]*Pacific Oceanological Institute of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*
[b]*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation*
[#]*E-mail: btvlisab@yandex.ru*

The study investigates the potential hazard arising from the actions taken by the Japanese government regarding the discharge of technical radioactive water from the Fukushima-1 nuclear power plant storage facilities. The contamination of the South Kuril Fishing Zone (SKFZ), which is one of the most promising fishing areas for the Russian Federation, with radioactive particles, is considered. Based on the modeling of passive markers simulating radioactive contamination, the study analyzes the pathways and mechanisms of pollution transfer into the SKFZ. The research is conducted using altimetric data on geostrophic currents for the period from August 24, 2022, to August 24, 2023. The pollution transfer into the SKFZ is determined by a set of conditions related to the current development regime of the First Kuril Meander and the local vortex system with varying characteristics, both near the discharge site and at the SKFZ border. A seasonal dependence of the speed and quantity of polluted water infiltration toward the Russian Federation's shores is established. The possibility of rapid pollution advection into the SKFZ within 13 days has been discovered. This speed is due to the entrainment of contamination by the Kuril Meander and its further transport by the mesoscale vortex system to the SKFZ border. The study reveals periodicity in the influx of pollution into the SKFZ. Graphs depicting the distribution of the quantity of "dirty" markers over their release times and the arrival of polluted water at the SKFZ border have been created.

Keywords: Fukushima, radiation, contamination, tritium, South Kuril Fishing Zone, SKFZ, fisheries, altimetry, vortex advection, currents