

П.А. ФАЙМАН, М.В. БУДЯНСКИЙ, М.Ю. УЛЕЙСКИЙ,
С.В. ПРАНЦ, В.Л. ВЫСОЦКИЙ, Д.А. ПРИПАЧКИН

Моделирование распространения радиоактивного загрязнения в Уссурийском заливе в первые сутки после ядерной аварии в бухте Чажма в августе 1985 г.

Представлены результаты лагранжевого моделирования распространения радиоактивного загрязнения в Уссурийском заливе на различных горизонтах по глубине на основе численной региональной модели циркуляции ROMS с использованием эмпирических данных выпадения радиоактивных осадков из атмосферы на поверхность акватории в день аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма 10 августа 1985 г. Показано, что радиоактивное пятно могло оставаться в Уссурийском заливе в течение первых четырех суток после аварии. Установлено, что эволюция и деформация начального пятна загрязнения на разных горизонтах обусловлены влиянием вихрей разных полярностей и размеров (мезомасштабный циклон в центре залива, субмезомасштабный антициклон на севере и мезомасштабный антициклон на юге) и лагранжевых когерентных структур, связанных с гиперболическими точками в заливе.

Ключевые слова: Уссурийский залив, ядерная авария в бухте Чажма, модель ROMS, адвекция пассивной примеси, вихри и лагранжевы когерентные структуры.

Modeling the transport of radioactive pollution in the Ussuri Gulf during the first days after the nuclear accident in the Chazhma Bay in August 1985. P.A. FAYMAN, M.V. BUDYANSKY, M.Yu. ULEYSKY, S.V. PRANTS (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok), V.L. VYSOTSKY, D.A. PRIPACHKIN (Nuclear Safety Institute, RAS (IBRAE RAN), Moscow).

The results of Lagrangian modeling of the transport of radioactive pollution in the Ussuri Gulf at various depths based on a regional ROMS numerical model of circulation using the empirical data on the radioactive fallout from the atmosphere at the sea surface on the day of the accident at a nuclear submarine in the Chazhma Bay in August 10, 1985. It was shown that the radioactive particles remain in the Ussuri Gulf for the first 4 days after the accident. It has been shown that the evolution and deformation of the initial pollution patch on various horizons was influenced by vortices of different polarity and size in the Ussuri Gulf (a mesoscale cyclone in the center of the Gulf, a sub-mesoscale anticyclone in the north and a mesoscale anticyclone in the south) and by Lagrangian coherent structures connected with hyperbolic points in the Gulf.

Key words: Ussuri Gulf, nuclear accident in the Chazhma Bay, ROMS model, advection of passive particles, eddies and Lagrangian coherent structures.

ФАЙМАН Павел Аркадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, БУДЯНСКИЙ Максим Васильевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, УЛЕЙСКИЙ Михаил Юрьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, *ПРАНЦ Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток), ВЫСОЦКИЙ Валентин Леонидович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, ПРИПАЧКИН Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва). *E-mail: p fayman@poi.dvo.ru

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00124 А).

Введение

После любой радиационной аварии необходимо проводить многочисленные мероприятия, связанные с оценкой воздействий на окружающую среду и ликвидацией последствий. Если при этом происходит загрязнение вод Мирового океана, то для решения вышеупомянутых задач требуется моделирование распространения радиоактивного загрязнения [19, 23–26]. Такие исследования выполнялись после аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. [33, 34, 49].

За год до трагедии на Чернобыльской АЭС в Дальневосточном регионе России на атомной подводной лодке К-431 Тихоокеанского флота, находившейся у пирса № 2 судоремонтного завода ВМФ в бухте Чажма (зал. Петра Великого, Японское море), 10 августа 1985 г. произошла ядерная авария. Она сопровождалась тепловым взрывом, в результате которого радиоактивные вещества были выброшены в приземный слой атмосферы на высоту 20–30 м и попали в бухту Чажма. В открытой печати информация об аварии появилась только в 1993 г. в докладах правительственной комиссии и Ядерного общества России [22, 29]. В 1994 г. последствия аварии были проанализированы в статье [21]. В 1998 г. в результате совместных исследований ИБРАЭ РАН, специалистов США и Тихоокеанского флота с помощью Принстонской модели океана (РОМ) с пространственным разрешением 400×400 м и с учетом натурных данных, полученных из флотских источников, было выполнено моделирование поля течений в зал. Стрелок и прилегающих к нему районах в целях прогноза выноса техногенных радионуклидов из бухты Чажма в зал. Петра Великого [2]. Вынос в северо-западную часть Японского моря был оценен в 2005 г. [1, 20].

Радиоактивное облако пошло в противоположном направлении относительно зал. Стрелок, пересекло п-ов Дунай, вышло на восточный берег Уссурийского залива и выпало на его акваторию, образовав на своем пути радиоактивный след. Прогноз, выполненный сразу после аварии специалистами РНЦ «Курчатовский институт» и Химической службы Тихоокеанского флота, показал, что техногенные радионуклиды с уровнями гамма-излучения выше природного фона углубились на треть или до половины его акватории (допускался наихудший вариант – на две трети), что не представляло опасности для населения г. Владивосток и рекреационной зоны на западном берегу залива. Однако дальнейшее поведение радиоактивной примеси, оказавшейся после аварии на водной поверхности Уссурийского залива, никем не изучалось и ее радиоэкологическая опасность не оценивалась, несмотря на то, что в результате адвекции радиоактивного пятна течениями сформировалась самостоятельная долговременная область радиоактивного загрязнения в заливе.

Цель данной работы – моделирование и лагранжев анализ распространения радионуклидов в Уссурийском заливе на различных горизонтах по глубине на основе данных ROMS с использованием эмпирических данных загрязнения акватории залива в день аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма 10 августа 1985 г. Отдельное внимание уделяется выявлению лагранжевых когерентных структур, оказывающих существенное влияние на адвекцию радионуклидов в Уссурийском заливе в течение первых четырех суток после аварии.

В качестве входных данных в модели распространения радиоактивного загрязнения используются течения в зал. Петра Великого. Результаты работы показали, что четверо суток после аварии радиоактивная примесь практически целиком остается в пределах Уссурийского залива. Поэтому в приведенном ниже литературном обзоре изученности течений остановимся именно на Уссурийском заливе (рис. 1).

Первое комплексное исследование циркуляции вод зал. Петра Великого, результаты которого были опубликованы в работах [3, 6], проводилось в 1936 г. на основе динамического метода, бутылочной почты и инструментальных измерений. На представленных в этих публикациях схемах течений видно, что ответвление от Приморского течения заходит в Уссурийский залив и формирует антициклоническую циркуляцию.

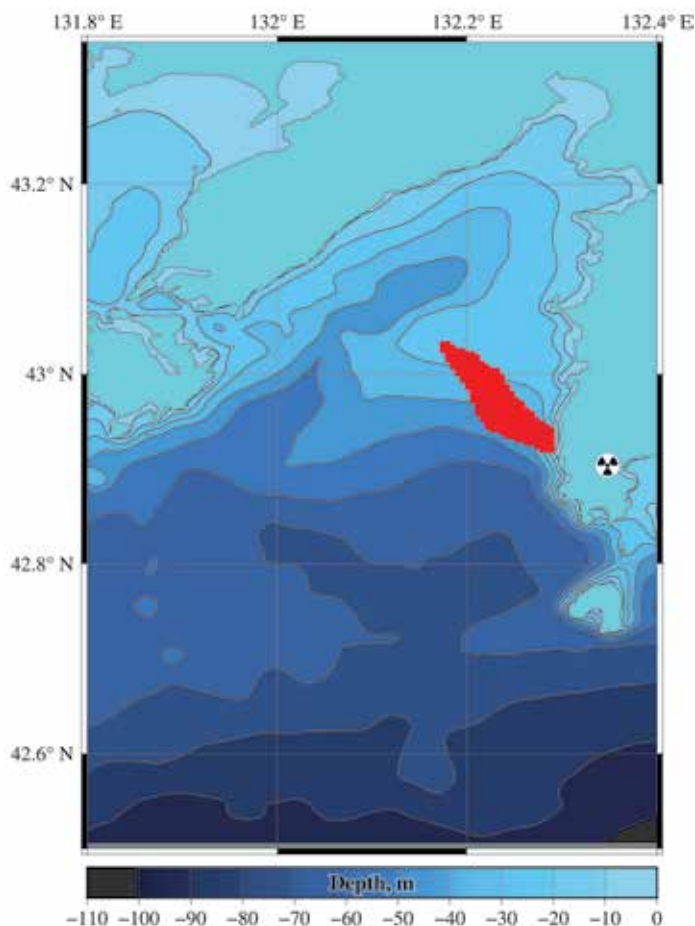


Рис. 1. Батиметрия Уссурийского залива. Красным цветом показано модельное пятно радиоактивного загрязнения на поверхности залива на 13:00 ч местного времени 10 августа 1985 г. Знаком радиоактивности отмечено место аварии в бухте Чажма

За период с 1950 по 2000 г. Гидрографической службой ТОФ, Приморским управлением по гидрометеорологии и мониторингу природной среды и Дальневосточным региональным научно-исследовательским гидрометеорологическим институтом (ДВНИГМИ) в зал. Петра Великого было проведено большое число инструментальных измерений течений. Результаты этих измерений можно найти во внутренних отчетах и публикациях, имеющих гриф ДСП (для служебного пользования). В открытых источниках приводятся только обобщенные схемы течений [5, 8, 10, 32]. Согласно этим схемам, в Уссурийском заливе наблюдается антициклоническая циркуляция, а в период наиболее интенсивного речного стока образуются стоковые течения, направленные в море.

В 1985 г. опубликованы схемы течений Амурского и Уссурийского заливов при типовых ветровых ситуациях [17]. Течения рассчитывались при помощи баротропной модели. В Уссурийском заливе выделены два типа циркуляции: циклоническая при южных и антициклоническая при северных ветрах.

Дальнейшие исследования на основе долговременных прямых измерений течений и гидрологических станций подтвердили антициклоническую циркуляцию в Уссурийском заливе [13, 15]. Дистанционные наблюдения показали также, что циркуляция вод в этом заливе сильно зависит от антициклонических вихрей, расположенных на границе шельфа зал. Петра Великого. Последние способствуют формированию антициклонической

циркуляции в Уссурийском заливе и могут быстро менять структуру его вод [7, 14, 16]. Эти выводы подтверждены численными экспериментами при помощи квазиизопикнической модели океана Морского гидрофизического института РАН (г. Севастополь) [4, 11, 12].

В начале 2000-х годов в ДВНИГМИ была разработана программа океанографических съемок в зал. Петра Великого для различных сезонов года. Всего с 2001 по 2017 г. на акватории залива была проведена 21 океанографическая экспедиция, из них 11 осуществлялись в период с июля по сентябрь. Расчеты течений по данным экспедиций выполнялись при помощи линейной диагностической модели [28]. Результаты показали сложную циркуляцию в Уссурийском заливе, которая может быть как явно выраженной циклонической, так и антициклонической. Кроме того, в заливе могут присутствовать одновременно вихри разной полярности. Сложная структура циркуляции наблюдается и по вертикали: на поверхности могут быть явно выраженные ветровые течения, а на промежуточных и придонных слоях – вихри разной полярности [27, 38].

Таким образом, динамика вод Уссурийского залива определяется сложным взаимодействием особенностей геометрии бассейна, рельефа дна, ветра, водообмена с открытой частью зал. Петра Великого и стока рек. Приливы, как показали инструментальные измерения, не вносят большого вклада в циркуляцию вод Уссурийского залива [31]. По этим причинам для расчета течений в первые четверо суток после аварии была выбрана модель течений северо-западной части Японского моря, основанная на Системе моделирования региональной океанографии (Regional Ocean Modeling System – ROMS (www.myroms.org)). Эта модель хорошо зарекомендовала себя при моделировании различных физических процессов в зал. Петра Великого [9, 37, 39].

Данные и методы

Моделирование переноса радиоактивной примеси состоит из двух этапов. На первом этапе при помощи математической модели океана моделируются течения, на втором – непосредственно перенос радиоактивной примеси на различных горизонтах по глубине. Расчет течений выполнен на базе численной модели циркуляции океана ROMS, основанной на примитивных нелинейных уравнениях со свободной поверхностью, s-системой координат по вертикали [47, 48]. Для параметризации вертикальной турбулентности используется схема GLS [50]. Коэффициент гармонической вязкости – $6 \text{ м}^2/\text{с}$.

Область моделирования лежит в пределах $40,5\text{--}43,5^\circ$ с.ш. и $129,5\text{--}135,5^\circ$ в.д. Шаг сетки по горизонтали 600 м, дискретность сетки по вертикали – 32 s-слоя с улучшенным разрешением в приповерхностных и придонных слоях. Потоки тепла и соли на поверхности рассчитывались при помощи bulk-формулы [36]. Среднесуточные данные для расчета потоков тепла и соли (атмосферное давление на поверхности, поток коротковолновой радиации, относительная влажность, осадки, температура воздуха, облачность и пр.) получены с NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis [41]. Сведения о шестичасовом приповерхностном ветре взяты с Climate Forecast System Reanalysis [46].

Граничные условия на жидкой границе формировались на основе среднесуточных данных реанализа Japan Coastal Ocean Predictability Experiment (JCOPE2) с разрешением $1/12$ градуса по горизонтали [42]. Для трехмерных полей температуры, солёности и скорости течения на всех жидких границах использовалось фиксированное граничное условие, которое предполагает, что граничное значение равно известному внешнему значению. Для нормальных компонент баротропной скорости течения на жидкой границе применяется граничное условие Флэттера [40]. Это условие означает, что излучение отклонения модельного значения от заданного значения уровня моря на границе жидкости распространяется со скоростью внешних гравитационных волн. Граничное условие Чепмена, подразумевающее, что все исходящие сигналы распространяются со скоростью мелководной волны, накладывается на высоту поверхности [35]. Среднесуточные данные расходов

рек, впадающих в зал. Петра Великого (Партизанская, Суходол, Шкотовка, Артемовка, Раздольная), взяты из Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Федерального агентства водных ресурсов (gmvo.skniivh.ru).

Расчет был выполнен для метеорологических условий 1985 г. Граничные условия на жидкой границе (JCOPE2) усреднялись за период с 1993 по 2018 г., а данные расходов рек – за период с 2008 по 2017 г. Результатами расчетов были часовые данные течений. Моделирование течений на основе ROMS проводилось на оборудовании ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН (<https://www.cc.dvo.ru>).

Координаты области поверхностного радиоактивного загрязнения, возникшего на акватории Уссурийского залива к 13:00 ч (здесь и далее указывается местное владивостокское время) 10 августа 1985 г., были выбраны исходя из результатов моделирования атмосферного распространения радиоактивного облака в первый час после аварии с уровнями загрязнения, соответствующими 0,01–1,0 мкЗв/ч, при значении природного гамма-фона в прилегающих районах $0,14 \pm 0,04$ мкЗв/ч [18, 20, 30]. В настоящей работе моделируется эволюция пятна загрязнения на нескольких горизонтах модели – 0, 10 и 20 м. Координаты и время начала адвекции пятен на всех горизонтах одинаковы – 13:00 ч 10 августа 1985 г.

Для каждого из 280 начальных условий, равномерно распределенных в пятне загрязнения, производился расчет траектории на выбранных горизонтах модели, т.е. решались уравнения адвекции для пассивных частиц, лагранжева скорость каждой из которых в месте нахождения частицы равняется эйлеровой скорости. Шаг времени при вычислении траекторий – 1/1000 суток, интервал времени счета – с 13:00 ч 10 августа до 11:00 ч 14 августа 1985 г. После этого из-за влияния тайфуна в Уссурийском заливе происходит усиление циркуляции и интенсивное перемешивание вод и, как следствие, снижение концентрации радиоактивной примеси до безопасного уровня. Моделирование после тайфуна требует специального рассмотрения ввиду сложности и неопределенности гидродинамических процессов на разных горизонтах и поэтому не проводится в данной работе.

Для анализа модельного поля скорости использовалась методология, разработанная ранее [43–45]. В заданном поле скорости численно выявляются точки, где модуль скорости равен 0, а затем производится анализ устойчивости таких точек. В итоге на картах поля скорости на определенную дату отмечаются устойчивые эллиптические и неустойчивые гиперболические точки, вблизи которых движение вод кардинально различается. Эллиптические точки с регулярным движением вод находятся, как правило, в центрах мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей (на рис. 2, 3 и 4 такие точки отмечены направленными вверх и вниз треугольниками для антициклонов и циклонов соответственно). Гиперболические точки указывают на места, где движение вод таково, что пятна примеси испытывают в их окрестности значительные пространственные деформации (на рис. 2, 3 и 4 такие точки отмечены крестиками).

Гидрометеорологическая обстановка в Уссурийском заливе в течение четырех суток после аварии

По данным Climate Forecast System, над акваторией Японского моря в период с 10 по 15 августа 1985 г. проходило два тайфуна. Первый тайфун вышел на акваторию Японского моря в ночь с 10 на 11 августа. Утром 11 августа его центр находился южнее зал. Петра Великого. В течение двух дней циклон двигался над Японским морем вдоль побережья Приморского края, и утром 12 августа его центр достиг Сахалина. Второй циклон прошел над материковой частью (северный Китай–Хабаровский край) в период с 14 по 15 августа (см. таблицу). В момент аварии над исследуемым регионом (Уссурийский залив и зал. Стрелок) наблюдался умеренный ветер восточно-юго-восточного направления. Впоследствии ветер сменился на слабый юго-юго-западный. За время прохождения первого тайфуна ветер над исследуемой областью значительно менялся по силе (от умеренного

до крепкого) и направлению. С утра 12 августа до утра 14 августа ветер был преимущественно умеренный южных направлений. Усиление ветра до 15 м/с над акваторией Уссурийского залива произошло во время прохождения второго тайфуна.

Направление и скорость среднесуточного ветра над акваторией Уссурийского залива в августе 1985 г.

Дата	X-компонента скорости ветра, м/с	Y-компонента скорости ветра, м/с	Скорость ветра, м/с	Направление ветра
10 августа	-0,74	0,31	0,8	Восточно-юго-восточное
11 августа	1,8	0,57	2,0	Западно-юго-западное
12 августа	-0,07	4,82	4,82	Южное
13 августа	-1,34	4,96	5,14	Юго-юго-восточное
14 августа	-3,67	10,75	11,36	Юго-юго-восточное

Рассмотрим структуру течений в Уссурийском заливе по результатам моделирования на горизонтах 0, 10 и 20 м (этого достаточно, чтобы получить полное представление о циркуляции вод в заливе). На поверхности в момент аварии поток был направлен в северном направлении со скоростью до 20 см/с. В ночь с 10 на 11 августа наблюдалась циклоническая циркуляция с явно выраженным потоком, направленным к юго-западу вдоль западного побережья залива. Циклоническая циркуляция в заливе сохранялась до 10:00 ч 11 августа. С этого момента в течение 8 ч поток юго-западного направления занимает весь залив с интенсификацией скоростей течения вдоль западного побережья до 40 см/с. С 18:00 ч 11 августа в залив возвращается циклоническая циркуляция. Центр циклонической циркуляции перемещается в северном направлении и в ночь с 11 на 12 августа оказывается в северной части залива. С 12:00 ч 12 августа на поверхности наблюдается поток северного направления. Интенсификация этого потока отмечается в 18:00 ч 12 августа (до 30 см/с), 12:00 ч 13 августа (до 25 см/с), 13:00 ч 14 августа (до 35 см/с). Вечером 14 августа под влиянием второго тайфуна происходит интенсификация течений на поверхности до 50 см/с.

На глубине 10 м ветровое воздействие значительно слабее. В южной части Уссурийского залива наблюдается циклонический вихрь, расположенный на северной периферии антициклонического вихря, находящегося, в свою очередь, в открытой части зал. Петра Великого. В период с 10 по 14 августа антициклонический вихрь смещается в западном, а периферийный циклонический вихрь – в восточном направлении. В северной части Уссурийского залива прослеживается антициклоническая циркуляция. Вдоль западного побережья залива наблюдается вдольбереговой поток юго-западного направления, образование которого связано с влиянием речного стока. До начала влияния второго тайфуна скорость течения на глубине 10 м не превышала 25 см/с. Течения на глубине 20 м имеют ту же структуру и изменчивость, что и на глубине 10 м.

Результаты и обсуждение

Для моделирования распространения пятна радиоактивного загрязнения в Уссурийском заливе на различные горизонты численной модели в одно и то же время помещаются одинаковые пятна пассивной примеси. Затем для каждого начального условия из выбранных пятен численно решаются уравнения адвекции, т.е. производится расчет траекторий на соответствующем горизонте. В настоящей работе при моделировании адвекции мы не рассматриваем процессы, связанные с вертикальным движением вод. При построении модельного поля скорости данные процессы трехмерного движения вод учитываются путем использования соответствующих уравнений гидродинамики и форсинга. При расчете траекторий пассивной примеси пассивные частицы перемещаются в пределах выбранного горизонта.

При описании эволюции пятна радиоактивного загрязнения в первые несколько суток после аварии удобно выделить несколько этапов, связанных с влиянием на адвекцию различных гидродинамических структур региона – вихрей разной полярности (циклон в центре, субмезомасштабный антициклон на севере и мезомасштабный антициклон на юге) и областей вокруг гиперболических точек в прибрежной и открытой частях залива. На рис. 2 и 3 показано пятно загрязнения в разные моменты времени на различных горизонтах модельного поля скорости течений.

В период с 13:00 ч 10 августа до 14:00 ч 12 августа 1985 г. адвекция пятна определялась главным образом циклоническим вихрем (центр примерно в точке $42,9^\circ$ с.ш., $132,1^\circ$ в.д.), который к моменту выпадения загрязнения на поверхность акватории существовал на всех горизонтах ниже 0 м. Положение центра и размеры этого вихря на разных горизонтах незначительно отличались, что отразилось в разных формах эволюционирующих пятен пассивной примеси. На нулевом горизонте центр циклона образовался спустя 5 ч после выпадения загрязнения, до этого момента на картах мгновенного поля скорости хорошо проявляется система течений, образующих общую циклоническую циркуляцию в центральной части залива. Это обуславливает то, что, несмотря на отсутствие на поверхности в первые часы циклонического вихря, эволюция пятна загрязнения происходила так же, как и на нижних горизонтах, где циклонический вихрь существовал с момента аварии. Важно отметить, что на поверхности эллиптическая точка центра вихря была очень подвижной («мерцающей») и за время моделирования несколько раз исчезала на 2–3 ч.

На протяжении первых двух суток после аварии вблизи берега в районе выпадения радиоактивного пятна с максимальной концентрацией загрязнения на разных горизонтах модельного поля скорости формировались гиперболические точки: одна южнее области выпадения – $42,9^\circ$ с.ш., $132,3^\circ$ в.д. (на рис. 2, *a* она проявляется на поверхности), вторая севернее – 43° с.ш., $132,3^\circ$ в.д. (на рис. 2, *d* она проявляется на горизонте 10 м). Наличие таких гиперболических точек и связанных с ними устойчивых и неустойчивых многообразий (см. монографию [45]) привело к характерной деформации пятна загрязнения, когда один из участков пятна (с максимальной концентрацией радиоактивного загрязнения) долгое время удерживался в гиперболической зоне вблизи берега (подобная адвекция наблюдалась ранее при моделировании распространения примеси вблизи нескольких гиперболических точек [43, 45]). Чем выше горизонт, тем менее устойчивы прибрежные гиперболические точки: на картах мгновенного поля скорости они «мигают», т.е. исчезают на несколько часов и появляются вновь.

Удержание самой загрязненной части пятна вблизи берега и ее относительно малое смещение в первые сутки после аварии можно приблизительно соотнести с V-образной формой отложения загрязнения на дне Уссурийского залива, обнаруженной несколько лет спустя, в 1990 г. [20].

Пятно загрязнения на поверхности к 14:00 ч 12 августа адвектировалось в центральную часть Уссурийского залива, после чего до начала тайфуна 14 августа оно вытягивалось в узкую полосу и смещалось на север параллельно восточному берегу п-ова Муравьева-Амурского. Северная часть пятна растягивалась на север сильнее, чем южная. Такой адвекции способствовали изменившееся после 14:00 ч 12 августа направление течений в центральной части залива, а также образование в период с 02:00 до 04:00 ч 13 августа короткоживущего антициклонического субмезомасштабного вихря с центром $43,2^\circ$ с.ш., $132,2^\circ$ в.д.

На эволюцию пятна загрязнения на нижних горизонтах в период с 14:00 ч 12 августа и до начала тайфуна оказывали влияние две гиперболические точки: одна вблизи о-ва Русский с координатами $42,9^\circ$ с.ш., 132° в.д., вторая в районе с координатами $43,1^\circ$ с.ш., $132,1^\circ$ в.д. (см. рис. 3, *d*) – и связанные с ними неустойчивые многообразия. Деформации пятна загрязнения на горизонте 10 м в виде характерных складок обусловлены наличием этих точек и их многообразий, а также сформировавшимся триполем из двух антициклонов (субмезомасштабный на севере залива с центром в точке $43,15^\circ$ с.ш., $132,25^\circ$ в.д. и

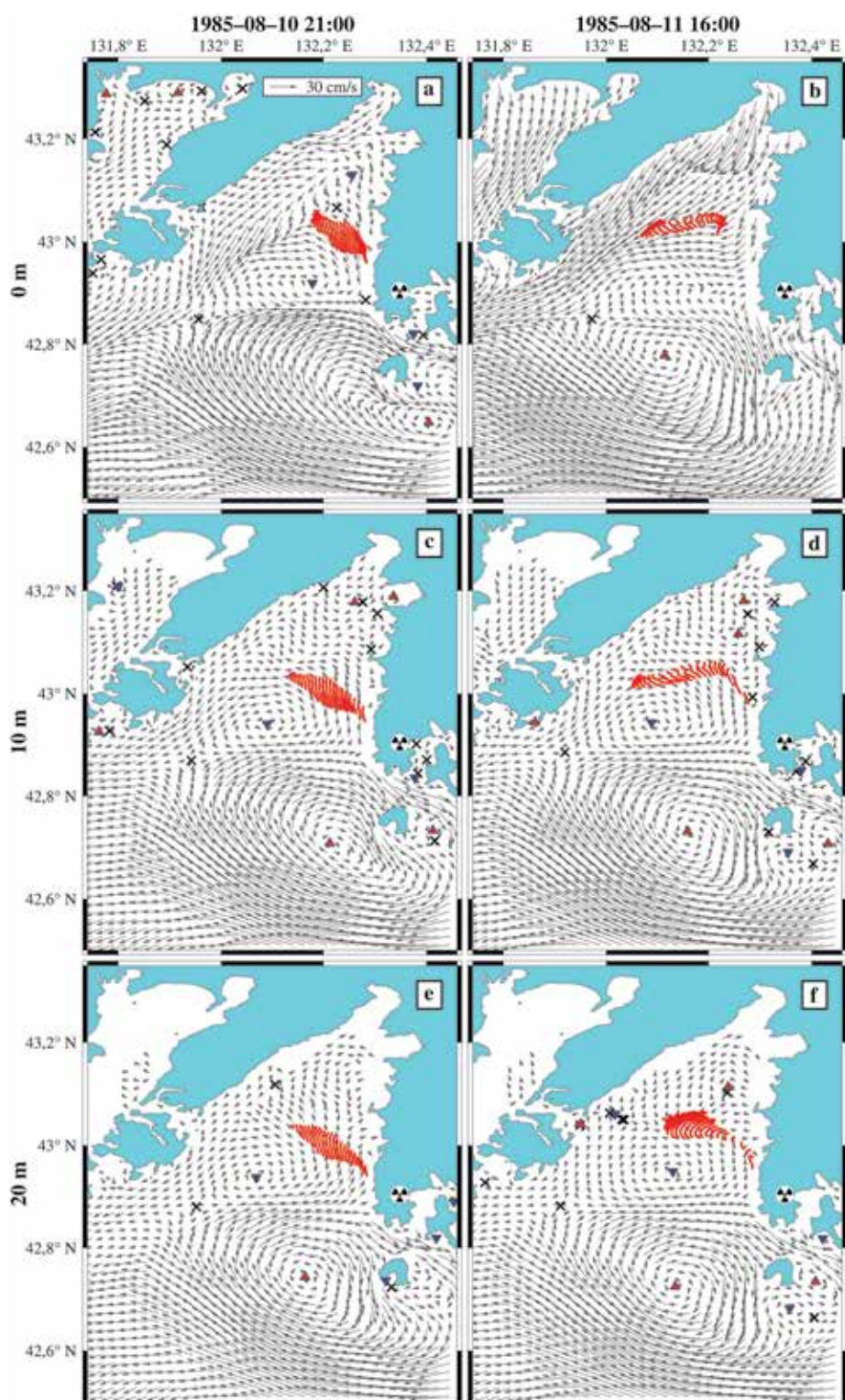


Рис. 2. Фрагменты эволюции пятна радиоактивного загрязнения на горизонтах 0, 10 и 20 м в модельном поле скорости на 10 и 11 августа 1985 г. Здесь и на рис. 3 и 4 стрелками показано направление скорости; направленные вниз и вверх треугольники – центры циклонических и антициклонических вихрей соответственно; крестики – гиперболические точки

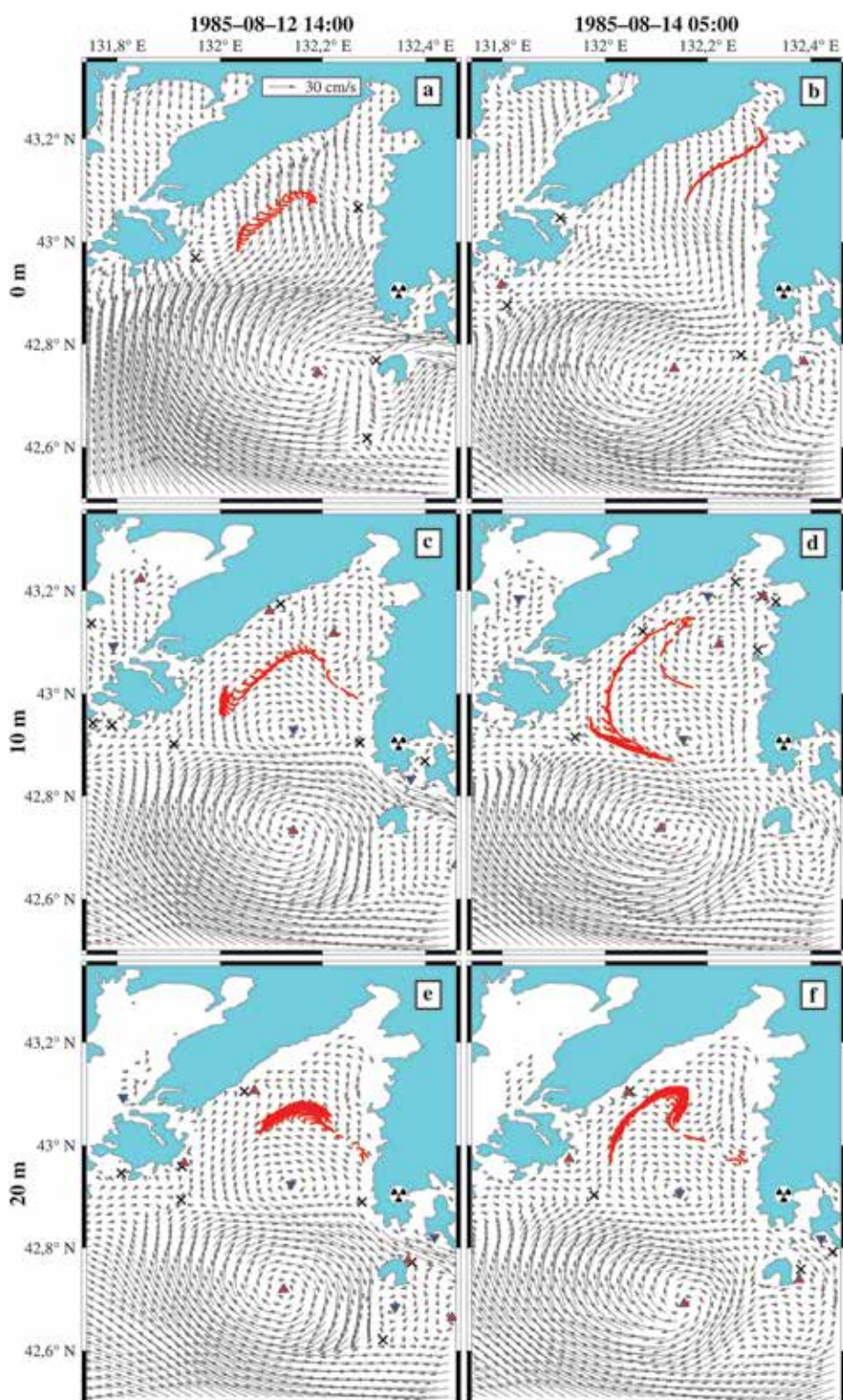


Рис. 3. Фрагменты эволюции пятна радиоактивного загрязнения на горизонтах 0, 10 и 20 м в модельном поле скорости на 12 и 14 августа 1985 г. Усл. обозначения см. в подписи к рис. 2

мезомасштабный на юге с центром в точке $42,7^\circ$ с.ш., $132,2^\circ$ в.д.) с циклоном между ними с координатами центра $42,9^\circ$ с.ш., $132,1^\circ$ в.д.

Мезомасштабный антициклон на юге образовался у западной части о-ва Аскольд в первые несколько часов после аварии. Он оказывал значительное влияние на эволюцию пятна загрязнения на горизонте 10 м перед началом тайфуна. Динамика и положение центра этого вихря проявляются на картах мгновенного поля скорости на выбранных горизонтах по-разному: на поверхности его эллиптическая точка появляется к 02:00 ч 11 августа, на нижних горизонтах – к 21:00 ч 10 августа (до этого момента у западной стороны о-ва Аскольд существует мелкомасштабный антициклон, воды которого захватываются новым вихрем). Вихрь проявляет себя как когерентная структура до самого начала тайфуна, т.е. имеет четко определяемое на картах мгновенного поля скорости вихревое ядро и эллиптическую точку в центре.

Деформация пятна пассивных частиц определяется в конечном итоге полем скорости, поскольку такие частицы по определению принимают скорость потока в том месте, где в данный момент времени находятся. Если поле скорости достаточно гладкое, то эта связь простая. Например, на рис. 3, *b* для нулевого горизонта формирование узкого стримера в поле скорости в северной части залива приводит к тому, что пятно вытягивается в узкую полосу вдоль стримера. Однако в окрестности гиперболических точек деформация пятна гораздо сложнее.

В заключение покажем, каким образом гиперболические точки и связанные с ними неустойчивые многообразия определяют деформацию пятна загрязнения в своей окрестности. Для этого требуется вычислить так называемый максимальный показатель Ляпунова (Λ), накопленный за некоторое конечное время. В работе [45] был предложен общий метод расчета показателей Ляпунова для n -мерной динамической системы, основанный на сингулярном разложении матрицы эволюции линеаризованных уравнений адвекции. Для двумерного потока эта величина имеет вид

$$\Lambda(t, t_0) = \frac{\ln \sigma_1(t, t_0)}{t - t_0},$$

где σ_1 – максимальное сингулярное значение матрицы эволюции потока, а $t - t_0$ – время интегрирования. Для каждой пары двух изначально близких пассивных частиц из большого числа частиц, равномерно покрывающих изучаемый район, численно решают уравнения адвекции в заданном поле скорости и вычисляют среднюю скорость их удаления друг от друга за некоторый конечный промежуток времени $t - t_0$, длительность которого зависит от поставленной задачи. Положительное значение этой величины, называемой максимальным накопленным показателем Ляпунова, служит мерой хаотичности потока. Поле значений Λ на фиксированные сутки наносится на географическую карту. Кривые максимальных (локально) значений Λ на карте («хребты») аппроксимируют «притягивающие» лагранжевы когерентные структуры при интегрировании уравнений адвекции назад во времени. Это и есть неустойчивые многообразия по терминологии теории динамических систем. Их роль заключается в том, что пятно пассивных частиц, попавших в сферу влияния такого многообразия, деформируется, и частицы из пятна адвектируются вдоль многообразия, как бы «притягиваясь к нему» (см. монографию [45]). Если само многообразие имеет сложную форму со складками, то пятно с течением времени примет такую же форму.

В качестве примера на рис. 4 приведена рассчитанная на семь суток назад во времени карта показателя Ляпунова на 5 ч 14 августа на горизонте 10 м с наложенным на нее пятном загрязнения на этот час. К этому моменту пятно деформировалось в S-образную складку вдоль неустойчивых многообразий (аппроксимируемых черными «хребтами» максимальных значений поля Λ), связанных с двумя гиперболическими точками (крестики на карте с координатами $42,9^\circ$ с.ш., $131,9^\circ$ в.д. и $43,1^\circ$ с.ш., $132,1^\circ$ в.д.). Многообразия эволюционируют в потоке и определяют деформацию пятна, попавшего под их влияние (см. рис. 3, *d* и 4).

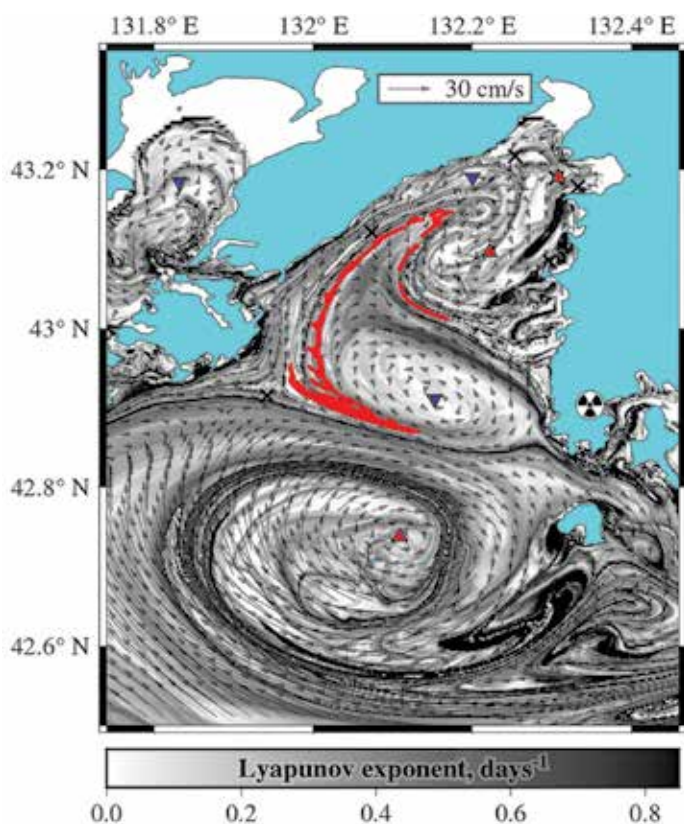


Рис. 4. Карта максимального показателя Ляпунова (Λ) на горизонте 10 м на 5 ч 14 августа 1985 г., накопленного за 7 предыдущих суток, с наложенным пятном радиоактивного загрязнения на этот час. Значения Λ приведены в обратных сутках. Усл. обозначения см. в подписи к рис. 2

Таким образом, пятно загрязнения на 10-метровой глубине «отслеживает» движение неустойчивых многообразий, которые эволюционируют гораздо медленнее поля скорости. Это предоставляет уникальную возможность для краткосрочного прогноза распространения пятна загрязнения и его неустойчивостей, основанного на выявлении предвестников развития неустойчивостей – особых гиперболических точек в поле скорости. По величине максимального сингулярного значения матрицы эволюции потока в заданном районе с пятном загрязнения выделяются наиболее влиятельные гиперболические точки. Такие точки являются предвестниками развития неустойчивостей пятна загрязнения и по ориентации собственных векторов матрицы эволюции потока можно предсказывать на несколько дней вперед (время жизни гиперболических точек) направления распространения этих неустойчивостей, а значит и самого пятна.

Заключение

На основе региональной модели ROMS проведено численное моделирование распространения радиоактивного загрязнения в Уссурийском заливе в первые четверо суток после аварии в бухте Чажма 10 августа 1985 г. Рассмотрена адвекция пятна загрязнения на горизонтах 0, 10 и 20 м. Форма и начальные условия для распределения загрязнения выбраны на основе результатов моделирования распространения радиоактивного облака в атмосфере в первые часы после аварии (по данным работы [20]). Показано, что

эволюция и деформация пятен загрязнения на разных горизонтах обусловлены влиянием различных гидродинамических структур, которые наблюдались в Уссурийском заливе в указанный период времени, а именно: вихрей разной полярности (циклон в центре, субмезомасштабный антициклон на севере и мезомасштабный антициклон на юге) и лагранжевых когерентных структур в прибрежной и открытой частях залива. С помощью карты показателя Ляпунова установлено, что гиперболические точки и связанные с ними неустойчивые многообразия определяют деформацию пятна загрязнения, предоставляя возможность для краткосрочного прогноза распространения радиоактивного или иного антропогенного загрязнения.

Результаты моделирования показали, что радиоактивное пятно оставалось в Уссурийском заливе в течение первых четырех суток после аварии. Впоследствии под влиянием тайфуна, который прошел 14 августа, происходит интенсивное перемешивание вод. Для адекватного моделирования дальнейшего распространения радиоактивного загрязнения в такой сложной ситуации требуется внести изменения в параметры модели и численные схемы, отработать их на сходных ситуациях после прохождения тайфунов над зал. Петра Великого (для 1985 г. нет никаких данных измерений гидрологических параметров). Это предмет другой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов С.В., Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. и др. Радиоэкологические последствия эксплуатации и утилизации объектов атомного флота в Дальневосточном регионе. М.: ИБРАЭ РАН, 2010. 388 с.
2. Арутюнян Р.В., Данилян В.В., Высоцкий В.Л. и др. Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма: препр. № ИБРАЭ-98-09. М., 1998. 43 с.
3. Белинский Н.А., Истошин Ю.В. Приморское течение по материалам экспедиции шхуны «Россинанте». 1936 // Тр. ЦИП. 1950. Т. 17. С. 132–143.
4. Дубина В.А., Файман П.А., Пономарев В.И. Вихревая структура течений в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2013. Т. 173. С. 247–258.
5. Иващенко Э.А. Циркуляция вод залива Петра Великого // Географические исследования шельфа Дальневосточных морей. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1993. С. 31–61.
6. Истошин Ю.В. Течения Японского моря по данным бутылочной почты // Тр. ЦИП. 1950. Т. 17. С. 88–131.
7. Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б. Синоптические вихри в районе залива Петра Великого по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 1–15. DOI: 10.7868/S0205961413030032.
8. Лощия № 1401 северо-западного берега Японского моря от реки Туманная до мыса Белкина / ГУНиО МО СССР. Л., 1984. 319 с.
9. Олейников И.С., Юрасов Г.И., Ищенко М.А. Опыт применения системы численного моделирования ROMS для исследования гидродинамических процессов в заливе Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2011. Т. 166. С. 275–283.
10. Подорванова Н.Ф., Ивашинникова Т.С., Петренко В.С., Хомичук Л.С. Основные черты гидрохимии залива Петра Великого. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 205 с.
11. Пономарев В.И., Файман П.А., Машкина И.В., Дубина В.А. Моделирование циркуляции синоптического масштаба в северо-западной части Японского моря // Морской гидрофиз. журн. 2013. № 5. С. 51–63.
12. Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А. и др. Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений) // Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 2. С. 100–104.
13. Рогачев К.А. Антициклоническая циркуляция Уссурийского залива Японского моря и ее воздействие на биоту // Изв. ТИНРО. 2010. Т. 160. С. 236–244.
14. Рогачев К.А. Динамика антициклонических вихрей и быстрое обновление вод Уссурийского залива (Японское море) по спутниковым и морским наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 42–49. DOI: 10.7868/S0205961413020103.
15. Рогачев К.А., Шлык Н.В. Прямые наблюдения эстуарной циркуляции вод в бухте Суходол и северной части Уссурийского залива (Японское море) // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 170. С. 210–219.
16. Рогачев К.А. Субмезомасштабные струи на континентальном шельфе залива Петра Великого (Японское море) // Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 186–190.
17. Савельева Н.И. Общая схема циркуляции вод Амурского и Уссурийского заливов по результатам численного моделирования. Владивосток, 1989. 29 с. Деп. ВИНТИ № 2268-B89.
18. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А. Восстановление радиоактивного загрязнения окружающей среды в Приморском крае вследствие ядерной аварии на АПЛ в бухте Чажма // Атомная энергия. 2019. Т. 127, вып.3. С. 144–150.

19. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Припачкин Д.А., Драма Д.В., Игнатов Р.Ю., Рубинштейн К.Г. Условия и исходные данные для восстановления радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на население вследствие ядерной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма // *Атомная энергия*. 2019. Т. 127, вып. 2. С. 105–111.
20. Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. Ядерная авария на атомной подводной лодке в бухте Чажма. Реконструкция событий и анализ последствий // *Вестн. РАН*. 2018. Т. 88, № 7. С. 599–618. DOI: 10.31857/S086958730000083-9.
21. Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Данилян В.А. Радиоэкологические последствия тяжелой радиационной аварии на атомной подводной лодке в бухте Чажма в 1985 г. // *Атомная энергия*. 1994. Т. 76, вып. 2. С. 158–160.
22. Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Данилян В.А. Радиоэкологические последствия тяжелой радиационной аварии на атомной подводной лодке в заливе Чажма в 1985 году: докл. 1.1.20 Р // *Ядерная энергия и безопасность человека: материалы IV ежегодной науч.-техн. конф. Ядерного общества России, Нижний Новгород, 28 июня – 2 июля 1993 г. Нижний Новгород, 1993. Т. 1. С. 183.*
23. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря. М.: ИздАТ, 2005. 624 с. (Белая книга-2000).
24. Соيفер В.Н. Радиоэкология северного шельфа Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 2002. 253 с.
25. Соифер В.Н., Горячев В.А., Гуренцов В.И., Макаров В.Г., Сергеев А.Ф. Численные расчеты переноса радионуклидов в атмосфере и морской среде и оценка последствий ядерной аварии в бухте Чажма Японского моря // *Метеорология и гидрология*. 2001. № 4. С. 17–32.
26. Соифер В.Н., Горячев В.А., Сергеев А.Ф. и др. Эволюция радиоактивного загрязнения донных отложений в зоне аварии на атомной подводной лодке в 1985 г. в бухте Чажма Японского моря // *Метеорол. и гидрология*. 1999. № 1. С. 48–63.
27. Файман П.А., Пономарев В.И. Диагностические расчеты циркуляции вод залива Петра Великого по данным экспедиций ДВНИГМИ 2007–2010 гг. // *Вестн. ДВО РАН*. 2018. № 1. С. 60–70.
28. Файман П.А. Опыт использования диагностических моделей для расчета циркуляции вод дальневосточных морей // *Тр. ДВНИГМИ*. 2017. Вып. 155. С. 83–109.
29. Факты и проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов в морях, омывающих территорию Российской Федерации: материалы доклада Правительственной комиссии по вопросам, связанным с захоронением в море радиоактивных отходов, созданной распоряжением Президента Российской Федерации от 24.10.1992 г. N 613-рп / сост. А.В. Яблоков и др. М.: Администрация Президента РФ, 1993. 108 с.
30. Чайковская Э.Л., Высоцкий В.Л., Гичев Д.В. Закономерности формирования радиационной обстановки на территории Приморского края // *Атомная энергия*. 2001. Т. 91, вып. 3. С. 223–237.
31. Шевченко Г.В., Горбунов А.О., Королев П.Ю. Гидродинамические и геоморфологические условия в районе строительства порта «Вера» (Уссурийский залив) // *Фундамент. и прикл. гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 2. С. 49–62. DOI: 10.7868/S2073667317020071.
32. Яричин В.Г. Некоторые особенности горизонтального движения вод в Японском море к северу от 40° с.ш. // *Тр. ДВНИГМИ*. 1982. Вып. 96. С. 111.
33. Behrens E., Schwarzkopf F.U., Lübbecke J.F., Böning C.W. Model simulations on the long-term dispersal of 137Cs released into the Pacific Ocean off Fukushima // *Environ. Res. Lett.* 2012. Vol. 7, N 3. DOI: 10.1088/1748-9326/7/3/034004.
34. 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 Res. Pt I*. 2014. Vol. 96. DOI: 10.1016/j.dsr.2014.09.007.
35. Chapman D.C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model // *J. Phys. Oceanogr.* 1985. Vol. 15. P. 1060–1075.
36. Fairall C.W., Bradley E.F., Rogers D.P., Edson J.B., Young G.S. Bulk parameterization of air-sea fluxes for tropical ocean-global atmosphere coupled-ocean atmosphere response experiment // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 1996. Vol. 101. P. 3747–3764. DOI: 10.1029/95jc03205.
37. Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Coastal summer eddies in the Peter the Great Bay of the Japan Sea: in situ data, numerical modeling and Lagrangian analysis // *Continental Shelf Res.* 2019. Vol. 181. P. 143–155. DOI: 10.1016/j.csr.2019.05.002.
38. Fayman P.A., Ponomarev V.I. Diagnostic simulation of sea currents in the Peter the Great bay based on FERHRI oceanographic surveys // *Pacific Oceanography*. 2008. Vol. 4, N 1/2. P. 56–64.
39. Fayman P., Ostrovskii A., Lobanov V., Park J.H., Park Y.G., Sergeev A. Submesoscale eddies in Peter the Great Bay of the Japan/East Sea in winter // *Ocean Dynamics*. 2019. Vol. 69. P. 443–462. DOI: 10.1007/s10236-019-01252-8.
40. Flather R.A. A tidal model of the northwest European continental shelf // *Memoires de la Societe Royale de Sciences de Liege*. 1976. Vol. 6. P. 141–164.
41. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002. Vol. 83. P. 1631–1643. DOI: 10.1175/bams-83-11-1631.
42. Miyazawa Y., Kuwano-Yoshida A., Doi T., Nishikawa H., Narazaki T., Fukuoka T., Sato K. Temperature profiling measurements by sea turtles improve ocean state estimation in the Kuroshio-Oyashio Confluence region // *Ocean Dynamics*. 2019. Vol. 69. P. 267–282. DOI: 10.1007/s10236-018-1238-5.

43. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Zhang J. Hyperbolicity in the Ocean // *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*. 2015. Vol. 4, N 3. P. 257–270.
44. Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V. *Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean*. N.Y.: Springer Verlag, 2017. 271 p.
45. 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, iss. 1/2. P. 114–125. DOI: 10.1016/j.ocemod.2011.02.008.
46. Saha S., Moorthi S., Pan H. et al. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. Vol. 91. P. 1015–1057. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.
47. Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2003. Vol. 108. P. 3090. DOI: 10.1029/2001JC001047.
48. Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // *Ocean Model.* 2005. Vol. 9. P. 347–404. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
49. Tsumune D., Tsubono T., Aoyama M., Hirose K. Distribution of oceanic ¹³⁷Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model // *J. Environ. Radioactivity*. 2012. Vol. 111. P. 100–108. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2011.10.007.
50. Umlauf L., Burchard H. A generic length-scale equation for geophysical turbulence models // *J. Mar. Res.* 2003. Vol. 61. P. 235–265. DOI: 10.1357/002224003322005087.