



Среда обитания водных биологических ресурсов

Анализ пространственно-временной изменчивости распространения тихоокеанских вод в Охотском море на основе лагранжева подхода

К.К. Кивва¹, М.В. Будянский², М.Ю. Улейский², С.В. Пранц²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (ФГБНУ «ТОИ ДВО РАН»), ул. Балтийская, 43, Владивосток, 690041

Email: kivva@vniro.ru.

Цель: описать сезонную и межгодовую изменчивость поступления и распространения вод тихоокеанского происхождения в восточной части Охотского моря на основе лагранжева подхода и пространственного анализа.

Материалы: использованы данные компонент скорости геострофического течения, полученные с помощью спутниковой альтиметрии; разрешение данных $0,25^\circ \times 0,25^\circ \times 1$ сутки. Для каждого суток в интервале с 31 января 1997 г. по 17 апреля 2022 г. прослежены траектории движения ~100000 частиц воды на 400 суток назад во времени.

Для каждой даты определены частицы, пересекающие условный разрез вдоль Курильских островов, а также срок и место пересечения разреза. На основе этих двух параметров для каждой даты выполнен кластерный анализ частиц методом DBSCAN и обнаружены интрузии вод тихоокеанского происхождения. Проанализированы особенности расположения, формы и размеров интрузий.

Результаты: получены ежесуточные значения двух типов индексов распространения тихоокеанских вод в Охотском море. Изменчивость расположения центроида области, занятой водами тихоокеанского происхождения в выбранном районе, показала, что весной-летом эти воды распространяются максимально на север, а осенью-зимой они наблюдаются южнее. Зимой такие воды обычно располагаются ближе к Камчатке, а летом – дальше от побережья. В 1998, 2003, 2010, 2013, 2017 и 2019 гг. тихоокеанские воды проникали наиболее далеко на север. Второй тип индексов связан с анализом расположения и особенностей формы интрузии, сформированной водами тихоокеанского происхождения. Показано, что после достижения максимальной площади интрузии её форма быстро усложняется. Центроиды наиболее крупных интрузий обычно располагаются в полосе $152-154^\circ$ в.д. На основе разработанных индексов показано, что заток вод из океана в море усилился с 2010 г.

Практическое значение: разработанный подход и полученные индексы предложено использовать при описании изменений экосистем и промысловых запасов восточной части Охотского моря.

Ключевые слова: Охотское море, течение, перенос вод, сезонность, интрузия, площадь полигона, фрактальная размерность.

Analysis of spatio-temporal variability of Pacific water distribution in the Sea of Okhotsk based on Lagrangian approach

Kirill K. Kivva¹, Maxim V. Budyansky², Mikhail Y. Uleysky², Sergey V. Prants²

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okružnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

² V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS («POI FEB RAS»), 43, Baltiyskaya St., Vladivostok, 690041, Russia

The aim of this work is characteristic of spatio-temporal variability of Pacific water distribution in the Sea of Okhotsk based on Lagrangian approach and spatial analysis.

Materials and methods. The study is based on geostrophic current data product from satellite altimetry. The dataset has resolution of $0,25^\circ \times 0,25^\circ \times 1$ day. This data is used for calculation of approximately 100000 water parcels trajectories during 400 days back in time for every day from 31st of January 1997 to 17th of April 2022. For each date in this interval, those parcels which intersected the conditional Kuril transect were determined, as well as region and date of transect intersection. Those two parameters were used in cluster analysis with DBSCAN method in order to distinguish individual Pacific intrusions. Position, shape, and size of each intrusion were investigated.

Results allowed to suggest two types of indexes describing distribution of Pacific-origin water in the Sea of Okhotsk. First, centroid of particles of Pacific origin with residence time between 1 and 6 months is calculated. Variability of centroid position showed northward displacement of Pacific waters in spring-summer and southward displacement in autumn-winter. Eastward displacement towards Kamchatka coast usually occurs during winters and opposite westward displacement is usual for summers. In 1998, 2003, 2010, 2013, 2017, and 2019 waters of Pacific origin had the most northern location. Second type of indexes is based on location and shape characteristics of Pacific water intrusions. The fractal dimensionality and convexity measure of intrusions are rapidly decreasing after the intrusion reaches its maximum area. Centroids of the most prominent intrusions follow the path along $152-154^\circ$ E. Both types of indices showed intensification of Pacific inflow since 2010.

Practical value. The time-series of resulted indexes are suggested to be implemented in integrated ecosystem assessments of the eastern Sea of Okhotsk.

Keywords: the Sea of Okhotsk, current, water transport, seasonality, intrusion, area of polygon, fractal dimensionality.

ВВЕДЕНИЕ

Лагранжев подход

Подходы к описанию сплошных сред и, в частности, движения воды в океане разделяют на два класса. Эйлеров подход соответствует привязке математического описания движения жидкости к пространству, в котором происходит наблюдение. Лагранжев подход связан с описанием положения отдельных частиц (парселов) жидкости в пространстве, то есть используется привязка к движущимся частицам. В теоретической термогидродинамике варианты описания движения жидкости с помощью этих двух подходов математически эквивалентны [Архипов и др., 2013; Рулева, Солбаков, 2020; Prants et al., 2017]. То есть при наличии математического описания движения одним способом всегда существует описание движения вторым способом. На практике, особенно при описании динамики в крупных природных водных объектах, в том числе в морях и океанах, использование эйлерова подхода означает разделение исследуемой области пространства на ячейки и вычисление характеристик движения в узлах сетки, соответствующих этим ячейкам. Характеристики движения жидкости даются в фиксированных точках пространства. Обычно используются узлы регулярной сетки в декартовой системе пространственных координат, причём, очень часто – широтно-долготная сетка. Лагранжев подход в большинстве случаев связан с выбором частиц, за которыми необходимо наблюдать, и описанием их движения – положения в исследуемой области пространства в выбранные моменты времени (чаще всего с регулярным шагом). В таком случае характеристики движения жидкости в каждый момент времени даются для разных наборов точек пространства. В инструментальной океанологии в качестве примеров этих подходов с определёнными допущениями можно привести, соответственно, наблюдения за течениями со стационарной платформы (пирса, вышки, заякоренного судна, заякоренной автономной буйковой станции и т.п.) и с помощью дрейфующего поплавка (буйка, дрейфтера).

Накопление измерений, включая спутниковые, развитие гидродинамических моделей океана, а также вычислительных машин в последние несколько десятилетий привели к созданию массивов данных о течениях Мирового океана на сетках с достаточно высоким пространственным и временным разрешением, которое позволяет описывать мелкомасштабные особенности циркуляции. К таким массивам, в частности, можно отнести данные, полученные с помощью спутниковой альтиметрии или математического моде-

лирования [Abdalla et al., 2021]. Эти массивы, изначально создаваемые с использованием эйлерова подхода, всё чаще применяют для изучения особенностей динамики вод в лагранжевом описании.

Использование такого подхода позволяет решать широкий спектр фундаментальных и прикладных задач океанологии. В частности, он применяется для отслеживания переноса в океане вод и взвеси, включая загрязнители и планктонные организмы [Пранц и др., 2013; Prants et al., 2017]. В данной статье лагранжев подход к описанию циркуляции использован для изучения особенностей поступления и распространения вод тихоокеанского происхождения (ВТП) в восточной части Охотского моря. Термином ВТП тут обозначаются воды, поступившие из океана в море и находящиеся в море не более 400 суток. Выбор такого порогового значения времени нахождения вод в море рассмотрен ниже.

Район исследований

Восточная часть Охотского моря – один из наиболее важных промысловых районов в пределах исключительной экономической зоны России. Она характеризуется высокой продуктивностью, связанной, по всей видимости, с его океанологическими особенностями, в том числе с поступлением относительно тёплых и богатых минеральными формами биогенных элементов вод из Тихого океана [Матвеев и др., 2015]. В этом районе наблюдается высокая биомасса nekтона и его высокое видовое разнообразие [Волвенко, 2008]. В 2013–2022 гг. только в пределах двух промысловых подзон, расположенных в этом районе (Камчатско-Курильской и Западно-Камчатской), ежегодно добывалось от 753 до 1163 тыс. т водных биологических ресурсов. Их вклад в суммарный вылов России составлял от 17 до 23%. При этом распространение вод Тихого океана в пределах моря может влиять на распределение промысловых рыб не только через пищевые цепочки, но и напрямую. В недавней работе это было показано для наиболее массового в этом районе вида – минтая *Gadus chalcogrammus* [Будянский и др., 2022].

Актуальность и проработанность темы

Таким образом, заток и распространение ВТП в Охотском море потенциально может служить важным индикатором состояния экосистемы района в целом и промысловой её части в отдельности. Однако только несколько недавних работ были посвящены характеристике поступления вод из Тихого океана в Охотское море и их распространения в море на основе данных высокого разрешения.

В частности, данные глобальной модели Мирового океана позволили показать районы наиболее устойчивых течений в море [Мастрюков, Червякова, 2019]. С помощью альтиметрии дана средняя многолетняя характеристика циркуляции вод и анализ многолетней изменчивости расхода течений в районе вдоль западного побережья Камчатки в зимнее время [Коломейцев, 2020]. В работе [Файман и др., 2021] с использованием вихредопускающей региональной модели показана сезонность интенсивности поступления вод из океана в море и вероятность наблюдения вод, поступающих из Тихого океана, в различных районах моря. В исследовании [Будянский и др., 2022], ориентированном на поиск связи между расположением тралений на промысле минтая и расположением ВТП с временем нахождения в море до 1095 суток, проиллюстрирована сложная структура циркуляции вод в восточной части моря, даны примеры межгодовых отличий.

Известно, что заток вод из океана в море происходит в основном через северные проливы Курильских островов (главным образом, Четвёртый Курильский и Крузенштерна, см. рис. 1), а максимум поступления вод наблюдается в среднем в январе-марте [Файман и др., 2021]. То есть, для залива вод характерна внутригодовая (сезонная) изменчивость. При этом распространение тихоокеанских вод в море происходит постоянно. Это позволяет предположить, что в периоды ослабления залива вод летом-осенью должны наблюдаться условия для их постепенного растекания в море, рассеивания и смешения с окружающими водами, а также для постепенного продвижения на север. Однако остаётся открытым вопрос выделения отдельных событий залива вод, происходящих в периоды его усиления. Логично предположить, что в ходе каждого такого события воды поступают в море в относительно компактном виде (порциями) и по мере движения всё больше рассредоточиваются по исследуемой акватории. Особенности протекания этого процесса до сих пор слабо изучены.

Ежедневные данные лагранжевых параметров, характеризующих происхождение вод, полученные Будянским и др. [2022] для Охотского моря за длительный интервал времени, позволяют дать описание процесса поступления вод из Тихого океана в море, а также выполнить анализ особенностей их распространения. Основная цель этой статьи – дать общее описание сезонной и межгодовой изменчивости поступления и распространения вод тихоокеанского происхождения в восточной части Охотского моря, на основе лагранжева подхода и пространственного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчёт траекторий движения частиц

В основу работы положены те же расчётные данные, что и в [Будянский и др., 2022], но за несколько более длительный интервал времени. С целью определения координат и времени проникновения ВТП в Охотское море для каждого суток в интервале с 31 января 1997 года по 17 апреля 2022 года выполнен расчёт траекторий большого количества частиц. Движение частиц прослеживали назад во времени с помощью данных высокого разрешения о течениях и численного решения уравнений движения.

Виртуальные частицы распределяли в узлы регулярной широтно-долготной сетки размером 300×380 ячеек в области 42–56,5° с.ш., 141–157° в.д. (114000 узлов, разрешение приблизительно 0,038°×0,054° по широте и долготе). Для каждой такой частицы расчёт движения выполняли на 1095 суток назад во времени, однако в этой статье учтены только первые 400 дней расчёта, достаточные для восстановления особенностей сезонного хода исследуемого процесса. Частицы, траектории которых касались берега, были исключены из анализа. В связи с необходимостью проведения очень большого количества вычислений (расчёт более 10⁸ индивидуальных траекторий движения частиц в течении 1095 суток) расчёты выполняли на компьютерном кластере ТОИ ДВО РАН.

В качестве источника информации о течениях использован массив центра данных Copernicus Marine Service Information [Copernicus ..., 2023], содержащий значения компонент скорости геострофического течения. То есть, в работе не учтены короткопериодные ветровые течения, но учтены превалирующие в исследуемом районе установившиеся течения. Преимущество использования этого массива заключается в том, что он основан на обобщении всех доступных на данный момент альтиметрических измерений, полученных с различных искусственных спутников Земли (Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, Topex/Poseidon, ENVISAT, GFO, ERS1/2), а не на результатах моделирования. В то же время учёт ветровых течений возможен только с использованием модельных расчётов, имеющих дополнительные источники ошибок. Горизонтальное разрешение использованного массива составляет 0,25°×0,25° по широте и долготе, шаг по времени – 1 сутки. Для восстановления компонент скорости течения в местах нахождения рассматриваемых частиц на каждом шаге расчёта выполняли бикубическую пространственную интерполяцию данных.

Для всех полученных траекторий частиц проверяли условие пересечения линии (разреза) между о. Хоккайдо и п-овом Камчатка с начальной точкой 43,0° с.ш., 144,5° в.д. и конечной точкой 51,75° с.ш., 157,5° в.д. в цилиндрической равнопромежуточной проекции. Частицы, траектории которых пересекали данную линию со стороны Курильских островов, считали водами тихоокеанского происхождения. Для них дополнительно определена долгота пересечения этой линии (λ_0 , градусы долготы) и рассчитано время путешествия в Охотском море – интервал времени, прошедший между событием пересечения разреза и моментом наблюдения (T , сутки).

Таким образом, в результате расчётов для каждого суток выбранного интервала наблюдений получены сведения о пространственном распределении частиц, пересекших условную границу между Тихим океаном и Охотским морем в течение предыдущих 400 дней. Для каждой такой частицы дополнительно известны два параметра: T и λ_0 .

Упрощённый анализ распространения тихоокеанских вод

Для общей характеристики сезонности распространения тихоокеанских вод в восточной части моря для каждой даты рассчитаны координаты центра масс (центроида) области, занятой частицами ВТП с T в интервале от 30 до 180 суток. Такой интервал T выбран априорно на основе анализа полученных картин распределения вод (см., например, рис. 2). Он позволяет описать сезонность исследуемого процесса, но исключить влияние на результат вод, поступивших в море недавно (менее 30 суток назад) и обычно сосредоточенных вдоль границы выбранной области, а также тех вод, которые относительно давно поступили в море и оказались в значительной степени рассеяны по акватории. Выбор других интервалов T (например, 20–210 суток) изменяет результат незначительно. Однако следует отметить, что увеличение верхней границы интервала до 300 суток и более приводит к учёту частиц воды, совершивших полный оборот по системе течений Охотского моря [Будянский и др., 2022], и поэтому является нежелательным. Координаты центроида рассчитаны с помощью пакета пространственного анализа данных «sf» для языка программирования R [Pedesma, 2018; Pedesma et al., 2023¹]. Для сглаживания полученных временных рядов использована ядерная регрессия Надарая-Уотсона [Nadaraya, 1964;

Watson, 1964]. Этот вариант анализа выполнен для частиц в области 50–56,5° с.ш., 150–157° в.д. (рис. 1), чтобы получить результат, характеризующий распространение тихоокеанских вод именно в восточной части моря и исключить влияние на результат вод южной части моря.

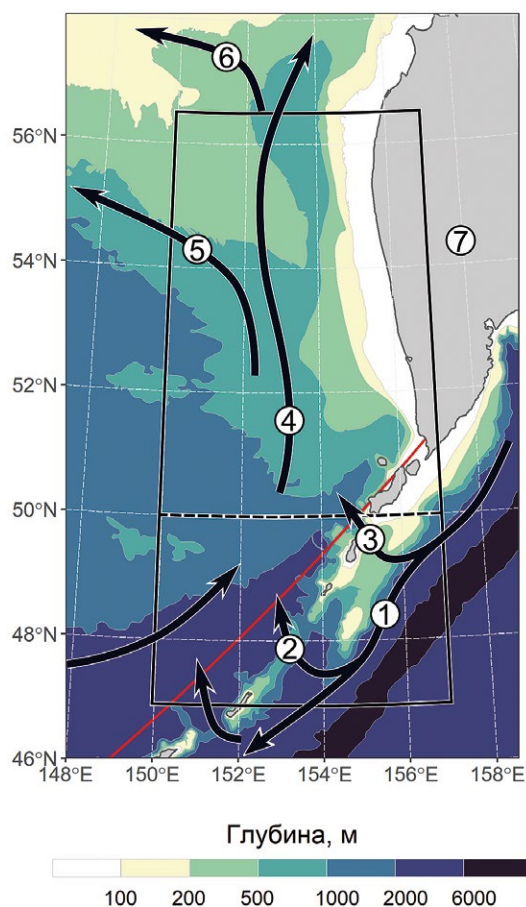


Рис. 1. Батиметрия и общая схема циркуляции в районе исследований. Красная линия – разрез вдоль Курильских о-вов, пересечение которого было условием отнесения частицы воды к водам тихоокеанского происхождения. Чёрной сплошной линией отмечена область, для которой выполнен анализ распространения вод тихоокеанского происхождения. Чёрным пунктиром отмечена южная граница области, использованной для общей характеристики сезонности распространения тихоокеанских вод. Цифрами обозначены течения: 1 – Курильское; 2 – заток тихоокеанских вод в проливе Крузенштерна; 3 – заток тихоокеанских вод в проливе Четвёртом Курильском; 4 – Западно-Камчатское; 5 – Срединное; 6 – Северо-Охотское (склоновая ветвь); 7 – п-ов Камчатка

Обнаружение интрузий вод тихоокеанского происхождения

Для описания особенностей эволюции залива ВТП с течением времени необходимо для каждой даты наблюдений выделить интрузии таких вод. В данной

¹ Pedesma E., Bivand R., Racine E., Sumner M., Cook I., Keitt T., Lovelace R., Wickham H., Ooms J., Müller K., Pedersen T.L., Baston D., Dunnington D. 2023. sf: Simple Features for R. <https://cran.r-project.org/package=sf> 13.04.2023.

работе частицы воды, наблюдавшиеся в каждую отдельную дату, объединялись в группы на основе их значений λ_0 и T с использованием кластерного анализа. Полученные группы и составляют интрузии, возникшие в различные моменты времени или на различных участках разреза, выбранного в качестве условной границы между морем и океаном. На картах они выглядят как «пятна», а их цифровым отражением являются полигоны или мультиполигоны.

Поиск частиц, соответствующих отдельным «пятнам» тихоокеанских вод, характеризующимся различной историей появления и развития, для каждой даты выполнен с помощью кластерного анализа частиц в пространстве координат $\lambda_0 - T$ методом DBSCAN [Ester et al., 1996]. Перед группировкой значения λ_0 и T были нормализованы: сдвинуты на медиану и взвешены на межквартильное расстояние.

Метод DBSCAN основан на выделении групп объектов, формирующих наиболее плотные скопления в терминах выбранной для анализа меры сходства. Для этого необходимо задать два параметра: минимальное число соседей и радиус поиска соседей. При этом некоторые объекты, находящиеся слишком «далеко» от других, могут быть отнесены к категории «шума», то есть могут не попасть ни в один из кластеров. Изменение каждого из этих параметров приводит к изменению количества кластеров и доли объектов, отнесённых к «шуму» [Hahsler et al., 2019]. Следует отметить, что строгих правил выбора значений этих параметров нет, существуют лишь общие рекомендации по их выбору [Schubert et al., 2017]. Основное преимущество метода по сравнению со многими другими связано с отсутствием необходимости определять оптимальное число кластеров. Ещё одно преимущество – возможность отнесения некоторых объектов к категории «шума» и исключения их из дальнейшего анализа.

Минимальное количество частиц в кластере выбрано равным 100, чтобы исключить из анализа мелкие группы частиц. Незначительные изменения этого параметра (например, в диапазоне 80–150) приводят к получению близких результатов. В качестве отправной точки для выбора радиуса поиска соседей при выбранном минимальном их количестве k рекомендуется использовать график изменения расстояния до k -го соседа, построенный по данным для всех группируемых объектов [Schubert et al., 2017; Hahsler et al., 2019]. Такой график был проанализирован для нескольких дат разных сезонов, выбранных случайным образом. В качестве радиуса окрестности поиска соседей выбрано значение 0,05 (поскольку данные нормализованы, это безразмерная величина). Такой

выбор параметров позволил разделить частицы воды на группы, но исключить из анализа результаты, соответствующие коротким эпизодам затока тихоокеанских вод (группы из менее 100 частиц отнесены к «шуму»).

После группировки анализ продолжали в географическом пространстве. Все ячейки, попавшие в одну группу, объединяли в мультиполигон (сложный полигон, состоящий из нескольких, разнесённых в географическом пространстве) и отсекали от него полигоны, состоящие меньше чем из 10 ячеек. Такой шаг позволяет косвенно учесть процесс смешения ВТП с окружающими водами в море и в каждом случае выделить основную часть «пятна» ВТП. Пространственный анализ выполняли для пяти таких мультиполигонов, имеющих наибольшую площадь в географическом пространстве. Такое количество рассматриваемых групп связано с предположением, что в любой момент времени в исследуемой области должны присутствовать максимум две крупных интрузии: более «молодая» и более «старая», сформировавшаяся во время предыдущего холодного сезона. Использование пяти наиболее крупных групп позволяет отследить появление интрузий на ранней стадии их жизни. Такой вариант анализа выполнен для частиц в области $47-56,5^\circ$ с.ш., $150-157^\circ$ в.д. Это позволило отслеживать события затока вод через пролив Крузенштерна.

Для характеристики распространения ВТП для каждого из выделенных «пятен» (мультиполигонов) за каждую дату определена выпуклая оболочка (convex hull, BO) и рассчитаны несколько статистических и пространственных параметров. В частности, определены медианы выборок значений T и λ_0 для частиц, составляющих интрузию, а также набор параметров, характеризующих расположение, размеры и особенности её геометрической формы на поверхности моря. К таким пространственным параметрам относятся координаты её центра масс (центроида), её периметр (P_{intr}), максимальный линейный размер (L_{intr}), а также её площадь (S_{intr}) и площадь её BO (S_{CH}). S_{intr} в первом приближении отражает объём вод, соответствующий каждому событию затока. Отношения S_{intr}/S_{CH} и L_{intr}/P_{intr} служат вариантами оценки выпуклости полигона [Zunic, Rosin, 2004]. Отношение логарифма площади полигона к логарифму его периметра (D_{intr}) – фрактальная характеристика [Ляхов, Каштанов, 2013], один из вариантов аппроксимации фрактальной размерности двумерной фигуры, характеризующей степень изрезанности границы фигуры. В нашем случае эти параметры отражают степень растекания тихоокеанских вод в море. Чем больше времени прошло с момента начала события затока

вод, тем сложнее должна быть геометрия области, занятой этими водами, и тем больше в ней должно быть тонких вытянутых структур (филаментов) или мелких фрагментов, разнесённых в географическом пространстве. То есть, S_{intr}/S_{CH} и L_{intr}/P_{intr} , а также D_{intr} должны для каждого отдельного события залива убывать с течением времени.

Анализ выполнен в языке программирования R [R Core Team, 2023²]. Все варианты пространственного анализа проводились после перевода координат в универсальную поперечную проекцию Меркатора для зоны 56N (EPSG:32656). Данная проекция относится к равноугольным равноплощадным, а выбранная её версия приводит к минимальным искажениям в диапазоне координат 0–84° с.ш., 150–156° в.д. (центральный меридиан проекции – 153° в.д.). Таким образом, в расчётах площадей учтена кривизна земной поверхности. Основные программные пакеты и функции, использованные в анализе, приведены в табл. 1.

Объединение интрузий в длительные события залива вод

Для характеристики развития событий залива вод во времени необходимо проследить соответствие интрузий, наблюдаемых в последовательные даты, друг другу. Рассмотрение результатов кластерного анализа показало, что при использованном подходе к объединению ячеек в группы возможны многократные события распада групп и последующего объединения их частей обратно в одно целое, что осложняет поиск соответствий между «пятнами» вод, выделенными в разные даты. Поэтому поиск выполняли итеративно для интервалов длиной 15 суток с использованием следующих условий отнесения интрузий к одному событию залива вод: площадь интрузий, наблюдавшихся в пределах интервала дат, должна отличаться от площади начальной интрузии не больше чем на 30%, а медиана λ_0 – не больше чем на 0,5° долготы. Такой подход позволил проследивать эволюцию событий залива в тех случаях, когда от «пятен» отделялись небольшие группы ячеек.

Таблица 1. Программные пакеты для языка программирования R и функции, использованные для выполнения расчётов

Пакет	Ссылка	Функция	Описание
sf	[Pebesma, 2018; Pebesma et al., 2023a ³]	st_transform()	Изменение картографической проекции объекта типа sf (точка, линия, полигон, а также их комбинации)
		st_union()	Растворение границ внутри объекта типа sf
		st_centroid()	Определение центра массы объекта типа sf
		st_make_grid()	Создание замощения выбранной области прямоугольными ячейками
		st_filter()	Пространственная фильтрация (нахождение области пересечения объектов и т.п.)
		st_distance()	Расчёт расстояний на поверхности Земли
		st_convex_hull()	Построение выпуклой оболочки вокруг объекта
st_area()	Расчёт площади полигона или мультиполигона		
smoothr	[Strimas-Mackey, 2023 ⁴]	drop_crumbs()	Удаление малых частей мультиполигона (составного полигона)
lwgeom	[Pebesma et al., 2023b ⁵]	st_perimeter()	Расчёт периметра полигона или мультиполигона
robustbase	[Maechler et al., 2023 ⁶]	adjboxStats()	Расчёт квартилей для смещённых распределений по [Hubert, Vandervieren, 2008]
dbscan	[Hahsler et al., 2019]	dbscan()	Быстрая реализация алгоритма кластеризации DBSCAN по [Ester et al., 1996]

² R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> 13.04.2023.

³ Pebesma E., Bivand R., Racine E., Sumner M., Cook I., Keitt T., Lovelace R., Wickham H., Ooms J., Müller K., Pedersen T.L., Baston D., Dunnington D. 2023. sf: Simple Features for R. <https://cran.r-project.org/package=sf> 13.04.2023.

⁴ Strimas-Mackey M. 2023. Smoothr: Smooth and tidy spatial features. R Package Version 0.1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=smoothr> 13.04.2023.

⁵ Pebesma E., Rundel C., Teucher, A., 2023. lwgeom: Bindings to Selected 'liblwgeom' Functions for Simple Features. R package version 0.2-11. <https://CRAN.R-project.org/package=lwgeom> 13.04.2023.

⁶ Maechler M., Rousseeuw P., Croux C., Todorov V., Ruckstuhl A., Salibian-Barrera M., Verbeke T., Koller M., Conceicao E.L., di Palma M.A., 2023. Package 'robustbase'. Basic Robust Statistics. Version 0.95-1. <https://CRAN.R-project.org/package=robustbase> 13.04.2023.

После нахождения продолжительных событий заток вод для сглаживания короткопериодных колебаний и сдвигов в рассматриваемых параметрах, связанных с сокращением или расширением интрузии за счёт отделения фрагментов или слияния более мелких групп ячеек в более крупные с течением времени, использована ядерная регрессия Надарая-Уотсона с шириной полосы сглаживания 15 суток.

Построение карт

Все карты-схемы, приведённые в статье, оформлены в языке программирования R с использованием пакетов «sf» и «ggplot2» [Wickham, 2011] в универсальной поперечной проекции Меркатора для зоны 56N (EPSG:32656). Как уже было сказано, она относится к равноугольным равноплощадным, то есть позволяет показать результаты с минимальными искажениями площадей, что особенно важно для районов высоких широт.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе приведены результаты в следующей последовательности. Вначале даны примеры распределения T и λ_0 в пределах рассматриваемой области для 2012 года. Этот год выбран в связи с тем, что его можно отнести к годам с выраженным сезонным ходом распространения тихоокеанских вод. На примере четырёх дат 2012 года, характеризующих разные сезоны (15 марта, 15 июня, 15 сентября и 15 декабря), описана общая изменчивость процесса поступления и распространения ВТП в Охотском море в течение года. Далее даны результаты анализа изменчивости широты и долготы центроида той части области $50-56,5^\circ$ с.ш., $150-157^\circ$ в.д., которая занята ВТП с T в интервале от 30 до 180 суток. Эти результаты показывают общий характер сезонной изменчивости распространения ВТП в море. Следующий подраздел посвящён описанию изменчивости интрузий на примере тех же четырёх дат 2012 года, которые использованы для общей характеристики заток тихоокеанских вод. Показано формирование «пятен» ВТП на поверхности Охотского моря. В конце даны результаты обобщающего анализа распространения интрузий по акватории моря в пределах анализируемого интервала дат, показана их характерная изменчивость и описаны некоторые особенности межгодовой изменчивости исследуемого процесса.

Поступление и распространение вод в море на примере 2012 года

В сезонном аспекте пространственное распространение ВТП в Охотском море имеет следующие

особенности. Летом и осенью ВТП с T до 30 суток сосредоточены в южной части исследуемой акватории, вдоль рассматриваемого условного курильского разреза (рис. 2, две левых панели). В это же время воды, поступившие в эту часть моря со стороны Тихого океана раньше, то есть перемещающиеся в море более длительное время (1–6 месяцев), распределены в восточной части моря в виде пятна сложной формы, постепенно растекающегося по исследуемой акватории. Зимой и весной заток вод со стороны Тихого океана усиливается, и наиболее «свежие» ВТП могут продвигаться на север на 200–400 км от выбранного разреза (рис. 2, левая и правая панели). В это время «старые» ВТП с T больше 6 месяцев представлены в основном разрозненными группами частиц воды, рассредоточенными по обширной акватории.

Во все сезоны заток вод может происходить на разных участках рассматриваемого разреза: и в широком проливе Крузенштерна, и северо-восточнее (рис. 3). Какой-либо закономерности в сезонном изменении основного района поступления тихоокеанских вод в море визуально выделить не представляется возможным. В целом, воды, поступившие в море ближе к Камчатке, например, через проливы Четвёртый Курильский или Первый Курильский, при продвижении на север закономерно располагаются ближе к Камчатке. Однако Западно-Камчатское течение во все сезоны имеет множество меандров и вихрей, поэтому такая закономерность часто может нарушаться.

Изменчивость распределения тихоокеанских вод

Центроид той части области $50-56,5^\circ$ с.ш., $150-157^\circ$ в.д., которая была занята ячейками ВТП с T от 30 до 180 суток, в течение исследованного интервала дат находился в пределах $50,2-52,9^\circ$ с.ш., $151,4-154,8^\circ$ в.д. Временной ход широты расположения центроида этой области характеризуется максимумом в весенне-летнее время и минимумом в начале зимы (рис. 4). То есть, весной-летом «свежие» ВТП с T 1–6 месяцев распространяются максимально на север, а осенью-зимой они обычно наблюдаются южнее. Наибольшая амплитуда колебания широты центроида наблюдалась в 1998, 2003, 2010, 2013 и 2017 гг. В эти же годы, а также в 2019 году центроид этой области занимал наиболее северное положение, то есть тихоокеанские воды распространялись наиболее далеко на север. Годы с наиболее южным максимальным расположением центроида описываемой области и, соответственно, наименьшим распространением этих вод в северном направлении – 2001, 2002, 2007, 2008, 2018.

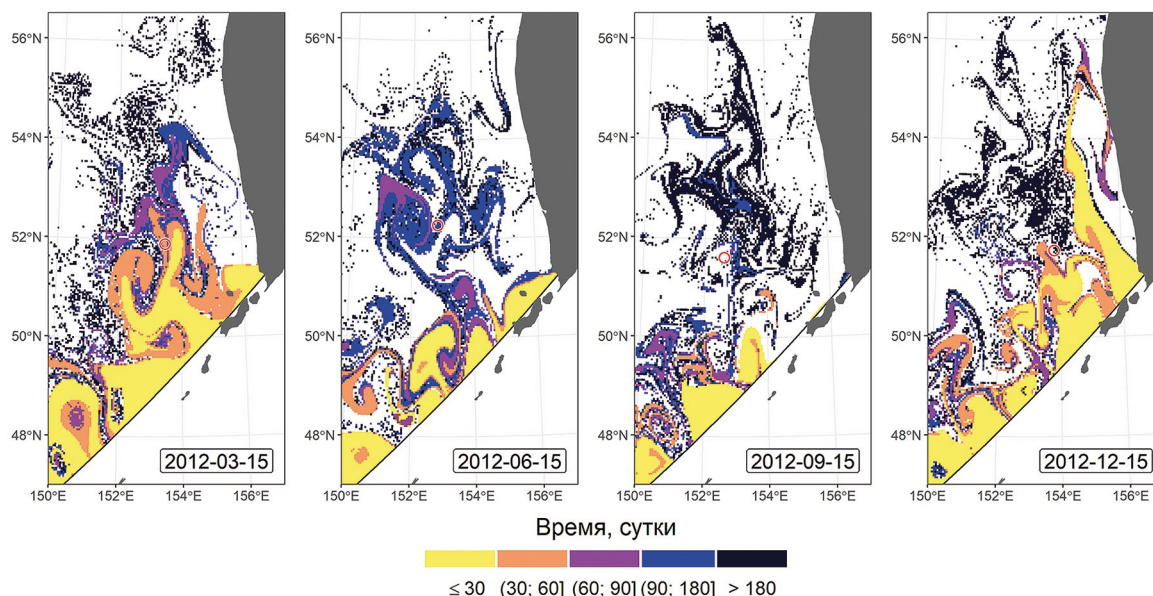


Рис. 2. Примеры распределения частиц, пересекших условный курильский разрез (чёрная линия) в течение 400 суток до даты наблюдения. Карты для 15 марта, 15 июня, 15 сентября и 15 декабря 2012 года. Цвет каждой ячейки соответствует временному интервалу от даты пересечения разреза до даты наблюдения (время путешествия частицы T). Белый цвет – воды, траектории которых не пересекли разрез в течение 400 суток, предшествующих дате наблюдения, в том числе те, которые пересекли берег и были исключены из анализа. Центриод области 50–56.5° с.ш., 150–157° в.д., занятой водами с T от 30 до 180, отмечен красным кружком

Fig. 2. Examples of distribution of water parcels of Pacific origin (trajectories crossed the assumed transect during 400 days prior to the observation date). The maps are for 15th of March, June, September, and December of 2012. The colors of cells represent time interval between crossing of the transect and the observation date (travel time, T). White color stands for parcels whose trajectories did not cross the transect within 400 days, including those which crossed the coast. Red circle marks the centroid of waters within 50–56.5° N, 150–157° E with T between 30 and 180 days

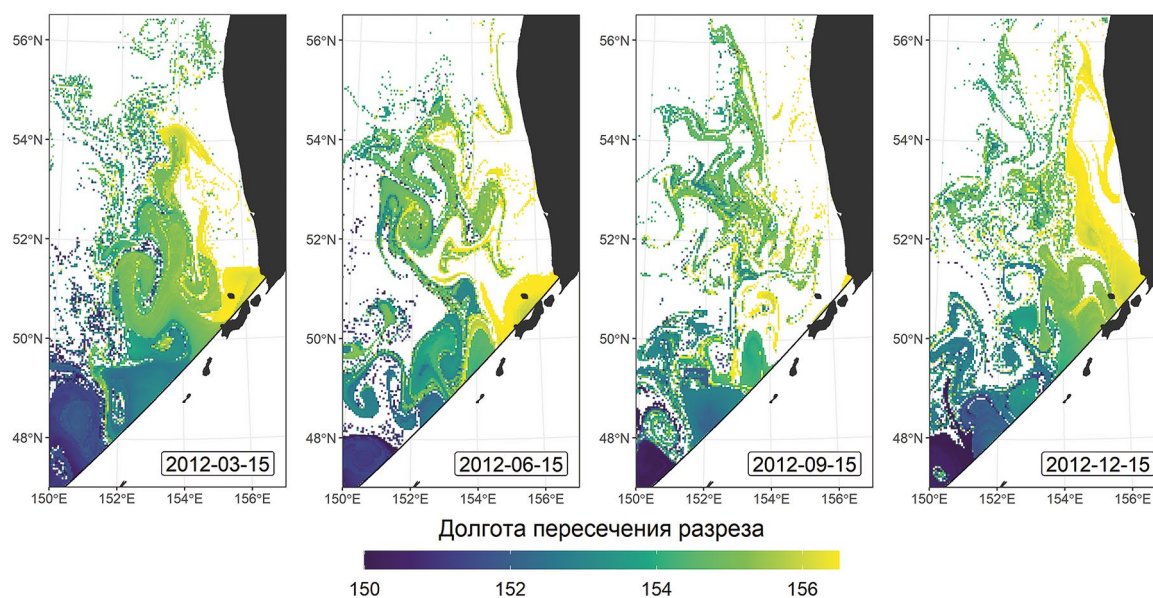


Рис. 3. Примеры распределения частиц, пересекших условный курильский разрез (чёрная линия) в течение 400 суток до даты наблюдения. Карты для 15 марта, 15 июня, 15 сентября и 15 декабря 2012 года (даты те же, что на рис. 2). Цвет заливки соответствует долготе точки пересечения разреза λ_0 . Белый цвет – воды, траектории которых не пересекли разрез в течение 400 суток, предшествующих дате наблюдения, в том числе те, которые пересекли берег и были исключены из анализа

Fig. 3. Examples of distribution of water parcels of Pacific origin (trajectories crossed the transect during 400 days prior to the observation date). The maps are for 15th of March, June, September, and December of 2012 (same dates as in figure 2). The colors of cells represent longitude of crossing of the transect (λ_0). White color stands for parcels whose trajectories did not cross the transect within 400 days, including those which crossed the coast

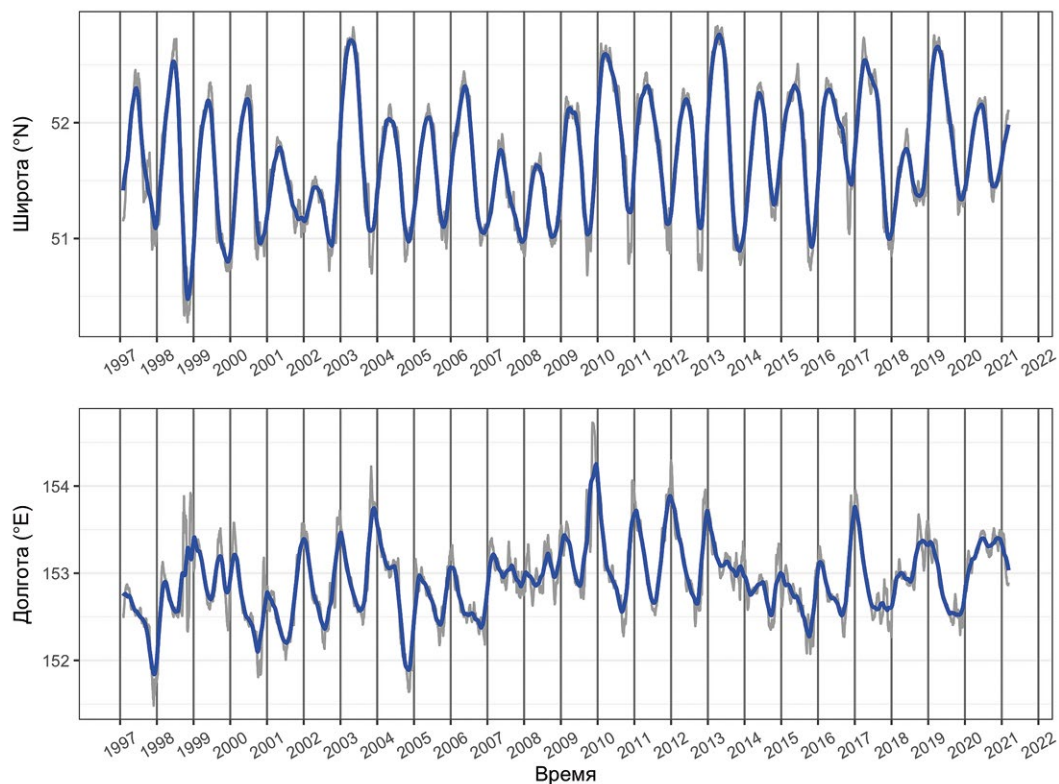


Рис. 4. Широта и долгота центроида вод тихоокеанского происхождения в области 50–56,5° с.ш., 150–157° в.д. со временем путешествия T в пределах Охотского моря от 30 до 180 суток (границы области даны на рис. 1). Серой линией показаны ежедневные значения, жирная синяя линия – сглаживание ежедневных данных ядерной регрессией Надарая-Уотсона

Fig. 4. Latitude (°N) and longitude (°E) of centroid of the intrusions of Pacific origin in area 50–56.5° N, 150–157° E with travel time within the sea (T) between 30 and 180 days. See figure 1 for location of the area of analysis. Grey line represents daily values and bold blue line represents kernel smoothing with Nadaraya-Watson method

Во временном ходе долготы центроида сезонность выражена менее ярко, чем в ходе широты. Большинство исследованных лет имеет максимум долготы центроида в зимнее время. То есть, зимой ВТП с T 1–6 месяцев обычно располагаются ближе к Камчатке, а летом – дальше от побережья (рис. 4 и 5). Такая особенность была слабо выражена в течение нескольких зимних сезонов: 1999/2000, 2007/2008, 2013/2014, 2017/2018, 2019/2020 (рис. 4). Наиболее близко к побережью Камчатки центроид ВТП с T от 30 до 180 суток располагался в зимние сезоны 1998/1999, 2003/2004, с 2009 по 2013, а также в зимний сезон 2016/2017.

Наглядное представление о характере смещения центроида ВТП в юго-восточной части Охотского моря даёт рис. 5. Видно, что в марте–мае центр масс таких вод обычно расположен в районе 51,5–53° с.ш. 152,75–153,5° в.д. К июню–июлю центр масс смещается на запад к 152,25–152,75° в.д. С августа по ноябрь наблюдается наиболее существенная межгодовая изменчивость его расположения: в разные годы центроид находился в интервале широт 50,25–51,25° с.ш. и долгот 151,25–154,25° в.д. В декабре–январе

он наиболее часто наблюдался в районе 51–52,5° с.ш. 153,75–154,5° в.д.

Примеры выделения интрузий

Группировка частиц воды тихоокеанского происхождения в пространстве координат $T - \lambda_0$ методом DBSCAN с выбранными параметрами (минимальное число соседей объекта для объединения в группу или присоединения к группе – 100, радиус поиска соседей – 0,05) позволяет найти отдельные события поступления вод из океана в море. Примеры группировки ячеек за четыре уже рассмотренных ранее даты, условно соответствующие началу весны, лета, осени и зимы 2012 года, приведены на рис. 6. В марте 2012 года наблюдались две основных группы ячеек: более «свежие» воды и более «старые» воды, разделяемые отдельными малыми группами частиц, располагающихся на рисунке посередине и отнесённых к категории «шума». В июне 2012 года наблюдалась одна крупная группа частиц, в пределах которой воды имели широкий диапазон и T , и λ_0 . Более «старые» воды, наблюдавшиеся в марте, оче-

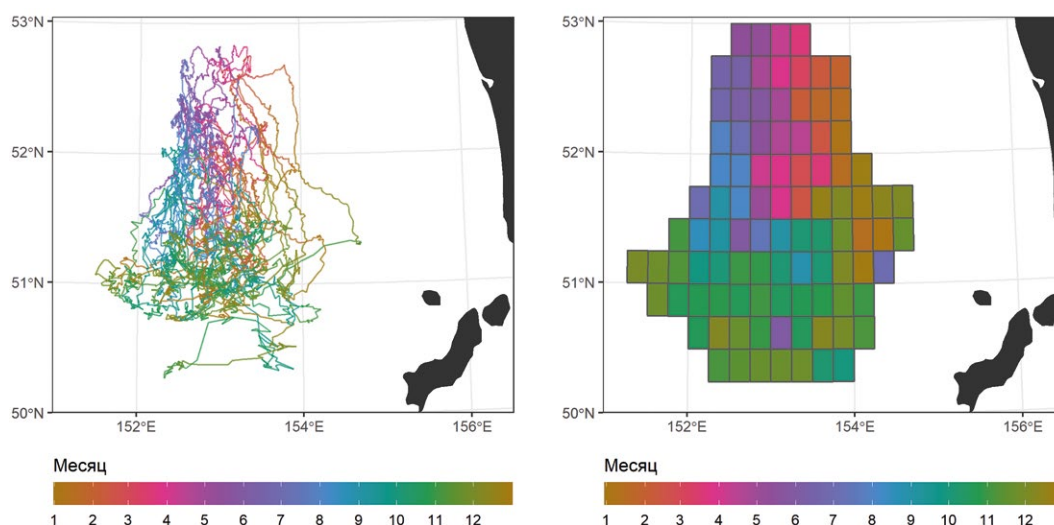


Рис. 5. Временная изменчивость расположения центра области, занятой водами тихоокеанского происхождения с временем путешествия в пределах Охотского моря от 30 до 180 суток. Цветом для каждой точки наблюдения показан порядковый номер дня в году (подписи на шкале соответствуют месяцам). Слева – все наблюдения; справа – медианное значение для широтно-долготных ячеек $0,25^\circ \times 0,25^\circ$

Fig. 5. Seasonal variability of centroid position of Pacific origin waters in area $50-56.5^\circ \text{ N}$, $150-157^\circ \text{ E}$ with travel time within the sea (T) between 30 and 180 days. Color represents the day of year. Left figure shows all locations for studied date interval. Right figure represents median for $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ cells

видно, к июню уже переместились за пределы исследуемой акватории. В сентябре наблюдалось разделение крупной группы частиц, наблюдавшейся в марте и июне, на несколько более мелких групп. Полученная картина вполне согласуется с высказанным ранее предположением о постепенном разрушении интрузий ВТП и имеет физический смысл. В декабре 2012 года наблюдалась ситуация наподобие марта: все наблюдаемые ячейки разделились на две основных группы. Между «свежими» и «старыми» водами

снова наблюдались малые группы частиц, исключаемые из анализа.

Пример распределения групп частиц воды, выделенных с помощью кластерного анализа, в географическом пространстве (на поверхности моря) приведен на рис. 7. Использованы те же четыре даты. Как и в пространстве координат $T - \lambda_0$ (рис. 6), в марте 2012 года наблюдались две относительно крупные группы частиц. Однако более «старые» воды, расположенные в северной части акватории, оказались

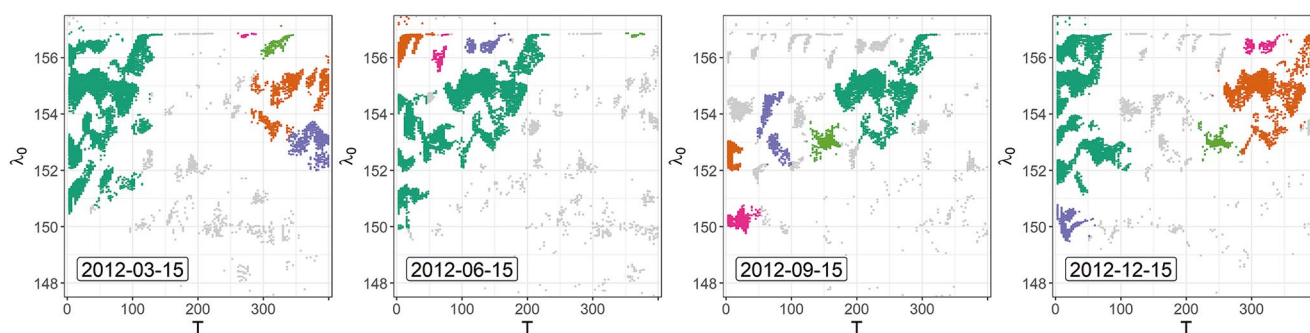


Рис. 6. Группировка частиц воды, пересекших условный курильский разрез в течение 400 суток до даты наблюдения, в пространстве координат значений времени путешествия T и долготы пересечения разреза λ_0 методом DBSCAN. Рисунки даны для 15 марта, 15 июня, 15 сентября и 15 декабря 2012 года (даты те же, что на рис. 2 и 3). Цветом показаны 5 наиболее крупных групп каждой даты наблюдений; серый цвет – малые группы и «шум» (детали в тексте)

Fig. 6. Results of cluster analysis (DBSCAN) of water parcels of Pacific origin (trajectories crossed the transect during 400 days prior to observation) based on normalized values of T and λ_0 . The figures are for 15th of March, June, September, and December of 2012 (same dates as in figures 2 and 3). Colors represent five largest groups for each date. Grey color stands for smaller groups and water parcels attributed to noise

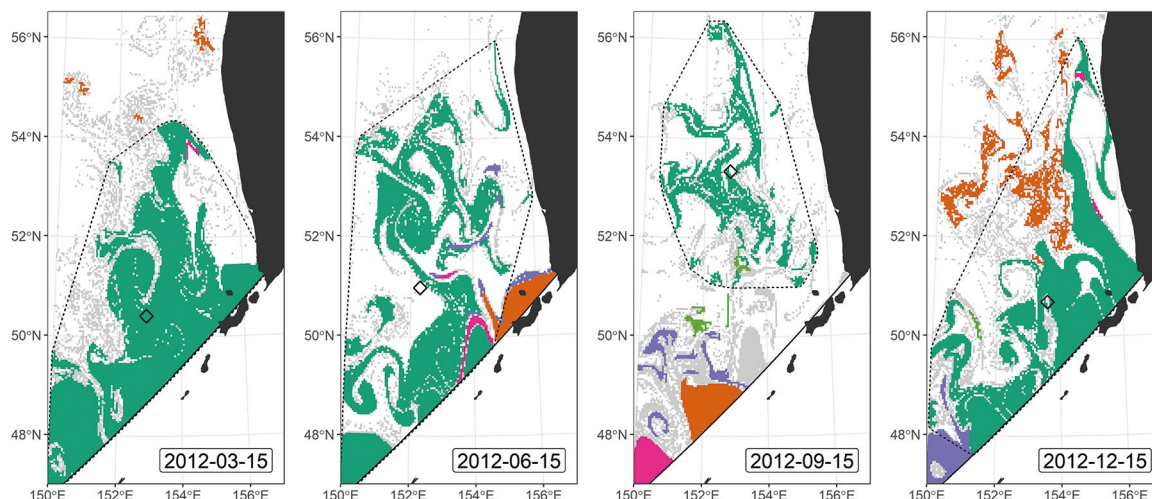


Рис. 7. Примеры группировки частиц, пересекших условный курильский разрез (чёрная линия) в течение 400 суток до даты наблюдения. Карты для 15 марта, 15 июня, 15 сентября и 15 декабря 2012 года (даты те же, что на рис. 2, 3 и 6). Для каждой даты цвет заливки соответствует отдельной группе (группы соответствуют рис. 6, подробности в тексте). Для наиболее крупной по площади интрузии обозначен центроид (ромб) и выпуклая оболочка (пунктирная линия)

Fig. 7. Examples of clusters of water parcels of Pacific origin (trajectories crossed the transect during 400 days prior to observation) in geographic space. The maps are for 15th of March, June, September, and December of 2012 (same dates as in figures 2, 3, and 6). Colors represent five largest groups for each date (colors are same to figure 6). The centroid (diamond symbol) and convex hull (dashed line) is present for the largest intrusion for each date

представлены небольшими пятнами, а интрузия относительно недавно поступивших «свежих» вод имела значительную площадь и распространялась на север до 54° с.ш. В июне наблюдалась одна основная группа частиц, распространившаяся от пролива Круzensхтерна по всей исследуемой акватории до 56° с.ш. Также заметны несколько более мелких групп, некоторые из которых сформировали вытянутые полосы воды вдоль границы наиболее крупной группы ячеек.

В сентябре 2012 года основная группа ячеек обособилась не только в пространстве координат значений T и λ_0 (рис. 6), но и в географическом пространстве (рис. 7). В южной части исследуемого района наблюдались несколько более мелких событий залива тихоокеанских вод. К декабрю группа ячеек, наблюдавшаяся в сентябре на севере рассматриваемого района, потеряла стройность, от неё отделились мелкие группы, которые были исключены из анализа. В то же время сформировалась крупная группа ячеек относительно «свежей» тихоокеанской воды. Эта интрузия объединила в себе две группы, наблюдавшиеся 15 сентября 2012 года, а также частицы воды, поступившие в рассматриваемый район после 15 сентября. Один из филаментов этой интрузии распространился на север вдоль побережья Камчатки до 56° с.ш. То есть, в отдельные интервалы дат, предположительно в основном в периоды интенсификации залива тихоокеанских вод в море, могут наблюдаться длинные языки ВТП, распространяющиеся далеко на север.

Многолетняя изменчивость событий залива вод

Для интрузий тихоокеанских вод, выделенных за каждую дату в интервале с 31 января 1997 года по 17 апреля 2022 года, выполнен анализ их развития. Как видно из рис. 6 и 7, с течением времени полученные группы ячеек, составляющие в географическом пространстве мультиполигональные области ВТП, могут не только смещаться, но и распадаться на менее крупные группы или наоборот объединяться в более крупные. Это обстоятельство приводит к невозможности проследить полную эволюцию событий залива: они обнаруживаются только с того момента, когда происходит формирование основного ядра интрузии, и прослеживаются часто не до полного исчезновения, а до момента распада на мелкие группы. Это хорошо видно на рис. 8: наиболее крупные события залива удалось проследить только с той даты, когда их площадь превысила 50 или даже 80 тыс. км². Тем не менее, почти для всех лет наблюдений удалось объединить наиболее крупные интрузии, наблюдаемые в отдельные даты, в продолжительные события залива вод, и проследить их эволюцию в течение длительного времени до и после момента максимального развития. Исключениями стали 2005, 2014 и 2021 гг.

Все наблюдавшиеся события залива тихоокеанских вод в море достигали максимального развития в первой половине года, а затем постепенно затухали. Исключением стал 2020 год, когда масштабное событие залива вод прослеживалось до конца года,

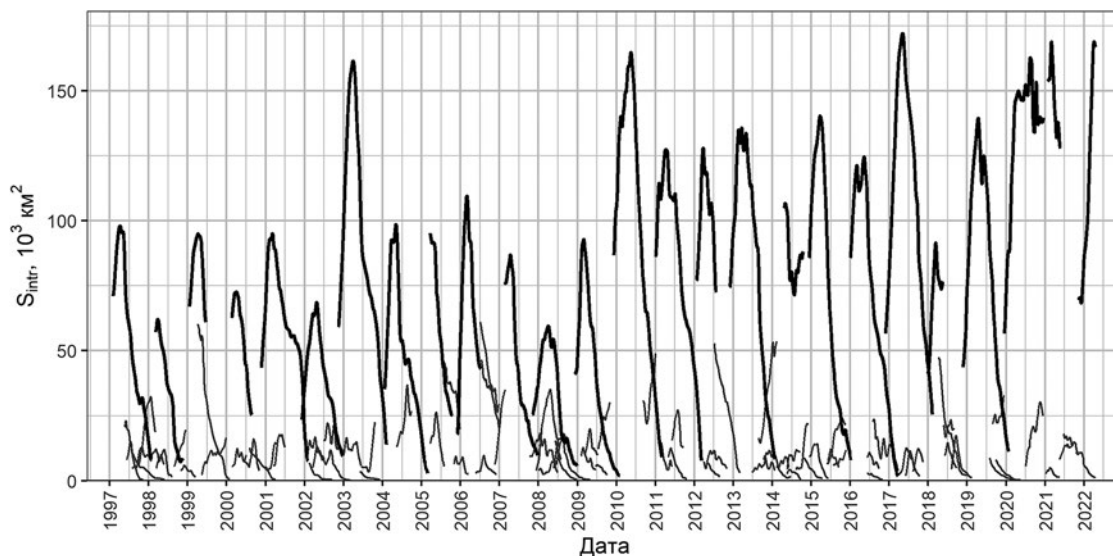


Рис. 8. Изменчивость площади интрузий (S_{intr} , тыс. км²) вод тихоокеанского происхождения с прослеженной длительностью существования более 90 суток. Жирными линиями показаны основные события залива тихоокеанских вод для каждого года
Fig. 8. Temporal variability of Pacific water intrusions area (S_{intr} , 10³ km²). Note only intrusions traced for more than 90 days are displayed. Bold black lines represent the main intrusions of each year

а максимум площади образовавшейся интрузии пришёлся на 14 августа. В остальные годы максимум площади основных интрузий достигался в интервале с конца февраля до середины мая (в среднем на 94 день года – в начале апреля). Наиболее значительные события залива вод наблюдались в 2003, 2010, 2017 и 2020 гг. Максимальная площадь основных «пятен» тихоокеанских вод выросла в 2010 году. Среднее максимальной площади прослеженных интрузий ВТП в 1997–2010 гг. составило 97 тыс. км², а в 2010–2022 гг. – 141 тыс. км². Таким образом, можно сделать предположение об усилении залива вод из Тихого океана в Охотское море после 2010 года.

Характеристика эволюции формы интрузий

На начальном этапе развития события залива тихоокеанских вод в море, то есть до момента достижения максимальной площади, медиана времени путешествия частиц T_i , составляющих интрузию ($med(T_i)$), остаётся почти неизменной (рис. 9, а). То есть, происходит постоянная подпитка интрузии новыми частицами, за счёт чего и растёт площадь. Причём, скорость роста площади составляет часто больше 1000 км²/сут. После достижения максимума площади начинается линейный рост $med(T_i)$ с течением времени, угловой коэффициент линейной зависимости близок к единице. Площадь интрузии на этом этапе сокращается со скоростью 500–1000 км²/сут. Спустя 50–200 суток в зависимости от конкретного случая скорость со-

кращения площади интрузии замедляется до 100–200 км²/сут. (рис. 9, б).

На начальном этапе развития для интрузий характерна близкая к линейной зависимость площади от периметра (рис. 9, в). На этапе разрушения площадь интрузии сокращается быстрее, чем периметр. Это говорит о постепенном усложнении формы: начинают формироваться вытянутые филаменты и «пятно» ВТП распадается на отдельные области.

Такой вывод подтверждается анализом изменения фрактальной размерности D_{intr} и меры выпуклости S_{intr}/S_{CH} геометрических областей, соответствующих интрузиям на поверхности моря (рис. 10). На начальном этапе развития интрузии размерность D_{intr} колеблется в интервале 1,2–1,3. На этапе разрушения D_{intr} резко убывает в течение 80–120 суток, достигая значения около 1,12, и затем практически не меняется. Значение фрактальной размерности D_{intr} близкое к единице говорит о близости формы полигона к одномерному объекту (линии). Это объясняется вытянутостью формы интрузии.

На этапе развития интрузии мера её выпуклости S_{intr}/S_{CH} колеблется в пределах 0,3–0,6. То есть, полигон занимает всего порядка 30–60% от площади описанной вокруг него выпуклой оболочки. После достижения максимума площади интрузии наблюдается резкое уменьшение данного параметра с достижением значения около 0,05–0,15 к моменту её разрушения.

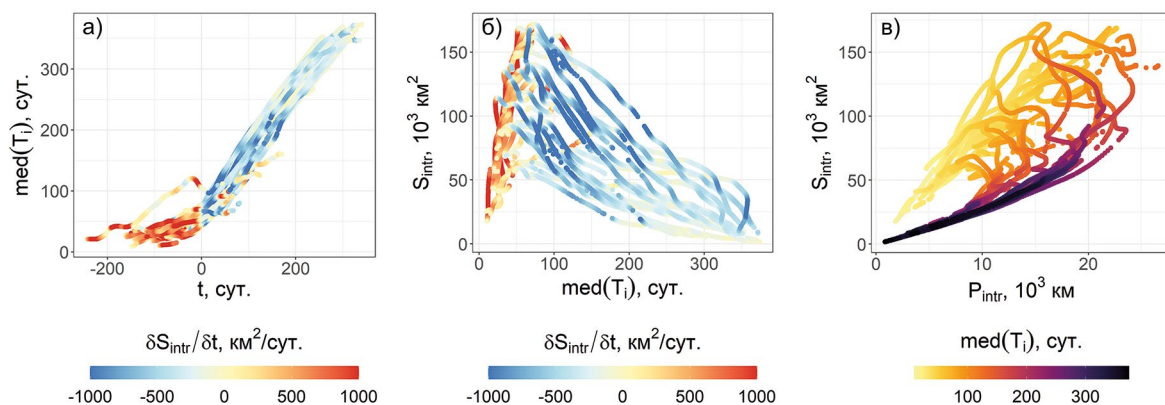


Рис. 9. Изменчивость параметров основных событий затока тихоокеанских вод, выделенных по последовательным образом интрузий. Изменение медианы значений T_i частиц, составляющих интрузию в каждый отдельный момент, в зависимости от времени t (сут.) относительно даты достижения максимума площади интрузии; цветом показано значение производной по времени площади вод, составляющих единое событие затока вод $\delta S_{intr}/\delta t$, км²/сут. (а). Изменение площади интрузий S_{intr} (тыс. км²) в зависимости от медианы значений T_i (сут.); цветом показано значение производной по времени площади вод, составляющих единое событие затока вод $\delta S_{intr}/\delta t$, км²/сут. (б). Изменение зависимости площади интрузии S_{intr} (тыс. км²) от периметра P_{intr} (тыс. км); цветом показана медиана значений T_i частиц, составляющих интрузию в каждый отдельный момент, сут. (в)

Fig. 9. Property-property plots describing evolution of the main Pacific water intrusions. Left panel; variability of median of T_i values (days) within individual intrusion at each date relative to time before or after the intrusion reached the maximum area (t , days). Color represents the rate of area change ($\delta S_{intr}/\delta t$, km²/day). Middle panel; variability of area of intrusion (S_{intr} , 10³ km²) relative to median T_i value (days). Color represents the rate of area change ($\delta S_{intr}/\delta t$, km²/day). Right panel; variability of area of intrusion (S_{intr} , 10³ km²) relative to perimeter of intrusion (P_{intr} , 10³ km). Color represents median T_i value (days)

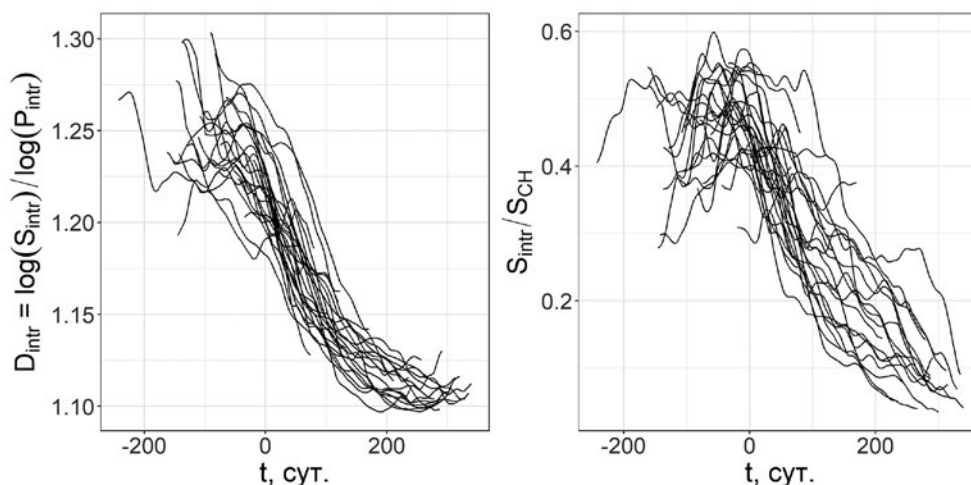


Рис. 10. Характеристики усложнения формы основных интрузий с течением времени t (сут.) относительно даты достижения максимальной площади. Слева – изменение фрактальной размерности D_{intr} (безразмерная величина). Справа – изменение отношения площади интрузии к площади её выпуклой оболочки S_{intr}/S_{CH} (безразмерная величина)

Fig. 10. Characteristics of main Pacific water intrusions shape complication with time before or after the date of area maximum (t , days). Left panel; fractal dimensionality of the shape ($D_{intr} = \log(S_{intr})/\log(P_{intr})$, dimensionless). Right panel; the ratio of intrusion area to its convex hull area, e.g. convexity measure (S_{intr}/S_{CH} , dimensionless)

Пространственная характеристика развития интрузий

Предложенный подход позволил проследить смещение интрузий в пространстве. В качестве главного пространственного параметра выбрано распо-

ложение центра масс (центроида) интрузии. Траектории смещения центров «пятен», связанных с основными ежегодными событиями затока вод, находились в основном в полосе 152–154° в.д. (рис. 11, а). Большая часть интрузий, составляющих основные события затока вод, прослежена с того момента, ког-

да их центр располагался в районе 50° с.ш. Центроиды таких «пятен» в большинстве случаев достигали $53-54,5^\circ$ с.ш. Пространственный анализ изменчивости других параметров интрузий выполнен с распределением их центроидов по ячейкам $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ и расчётом медианных значений каждого параметра в пределах ячейки.

Область, в которой проходили центры основных интрузий в момент достижения наибольшей площади, располагалась в районе $51-52^\circ$ с.ш., $152,5-154^\circ$ в.д., в наиболее восточной части района (рис. 11, б). То есть, можно сделать вывод, что воды, соответствующие наиболее крупным событиям залива ВТП, тяготеют к побережью Камчатки. Это подтверждается информацией, представленной на рис. 4. Интрузии со скоростью роста площади выше $500 \text{ км}^2/\text{сут.}$ находились в области к северо-западу от о. Парамушир (рис. 11, в). Вероятно, наиболее быстрорастущие интрузии формируются одновременным затокком вод через проливы Четвёртый Курильский и Крузенштерна. При дальнейшем продвижении на север после достижения $51-51,5^\circ$ с.ш. наблюдается вытянутая в широтном направлении обширная область убывания площади «пятен» ВТП. Область с наибольшими значениями меры выпуклости $S_{\text{intr}}/S_{\text{CH}}$ (медианы при расчёте по ячейкам $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ превышают 0,4) соответствует

районам расположения области максимальной скорости роста площади и достижения максимальной площади (рис. 11, г). При смещении центроида интрузии севернее 52° с.ш. отношение $S_{\text{intr}}/S_{\text{CH}}$ снижается до 0,2, а затем и до 0,1.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение предложенных методов анализа залива тихоокеанских вод

В работе использованы два подхода работы с лагранжевыми параметрами частиц в области исследования. Более простой и быстрый из них связан с выбором частиц воды с временем путешествия после поступления в море в определённом диапазоне и последующим определением центра масс географической области, занятой этими частицами. Несмотря на простоту этого подхода, он позволил охарактеризовать сезонность процесса поступления и распространения ВТП в Охотском море. Второй способ, связанный с выполнением для каждой даты группировки частиц с помощью кластерного анализа в пространстве нормированных значений λ_0 – Т методом DBSCAN, объединения частиц воды в полигоны, удаления малых отдельных фрагментов, и последующего расчёта нескольких геометрических параметров полученных полигонов – требует гораздо больше ма-

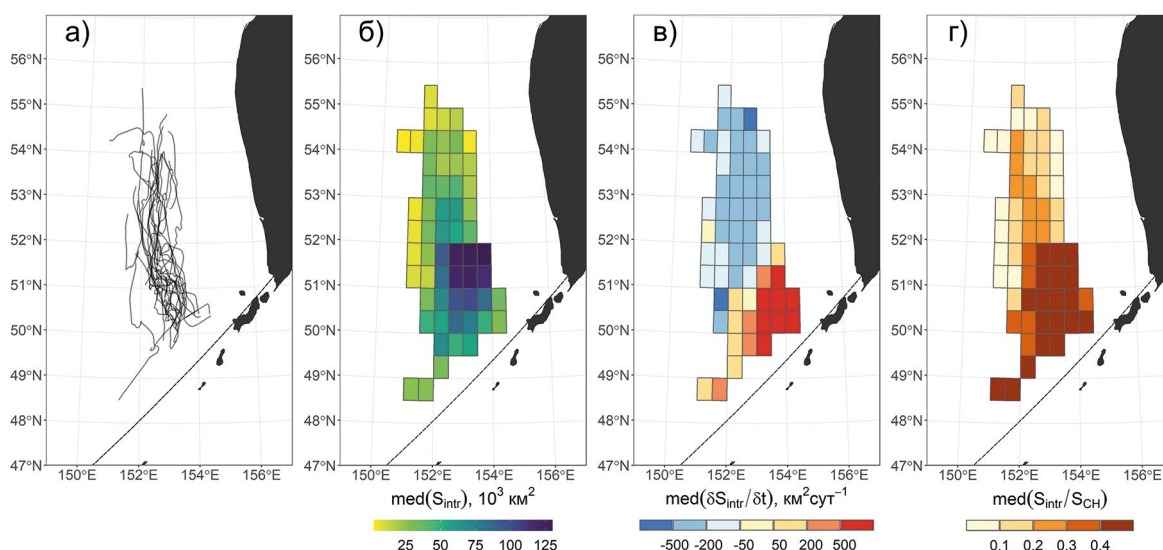


Рис. 11. Пространственная характеристика развития основных интрузий тихоокеанских вод в Охотском море. Траектории центроидов интрузий (а). Распределение медианы площади интрузий ($\text{med}(S_{\text{intr}})$, 10^3 км^2 , б), производной площади интрузии по времени ($\text{med}(\delta S_{\text{intr}}/\delta t_{\text{intr}})$, $\text{км}^2/\text{сут.}$, в) и отношения площади интрузии к площади её выпуклой оболочки ($\text{med}(S_{\text{intr}}/S_{\text{CH}})$, г), соответствующих положению центроидов в отдельные моменты времени в ячейках $0,5^\circ \times 0,5^\circ$

Fig. 11. Spatial characteristics of the major Pacific water intrusions development. Left panel; centroid trajectories of the major intrusions. Left middle panel; median of intrusion area ($\text{med}(S_{\text{intr}})$, 10^3 км^2). Right middle panel; median of temporal rate of area change ($\text{med}(\delta S_{\text{intr}}/\delta t_{\text{intr}})$, $\text{км}^2/\text{day}$). Right panel; median of intrusion area to convex hull area ratio, e.g. convexity measure ($S_{\text{intr}}/S_{\text{CH}}$, dimensionless). Medians are calculated based on individual values binned into $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ cells

шинного времени. Однако он позволяет дать более детальное описание развития событий залива. При этом результаты, полученные двумя этими методами, отчасти сопоставимы. Например, оба метода позволили заключить, что залив тихоокеанских вод был максимальным в 2003, 2010 и 2017 гг., и в целом был более развит в 2010–2022 гг., чем в 1997–2010. Таким образом, для задач, не требующих детального отслеживания изменения формы и расположения области, занятой ВТП, с течением времени больше подходит первый вариант анализа.

Недостатки метода выделения интрузий

Второй вариант анализа позволяет детально описать развитие интрузий, сформированных ВТП, однако в предложенном здесь виде он обладает рядом недостатков. Основной из них — невозможность проследить историю «пятна» ВТП от момента его появления у южной границы исследуемой области. Связано это с тем, что кластеризация методом DBSCAN в использованном варианте может приводить к распаду крупных групп частиц на более мелкие или объединению нескольких мелких групп в более крупные в последовательные даты. Виною тому отчасти использование фиксированных значений параметров DBSCAN при постоянном изменении особенностей распределения частиц в пространстве $\lambda_0 - T$. Одним из возможных путей развития предложенного алгоритма может стать динамический выбор радиуса поиска и минимального числа соседей, зависящий от особенностей распределения λ_0 и T за каждую исследуемую дату.

Сравнение результатов с предыдущими исследованиями

Результаты по сезонному смещению центроида области, занятой ВТП, в районе западного побережья Камчатки хорошо согласуются с полученными ранее результатами. Например, в работе [Фигуркин, 2002] по данным двух лет показано, что стрежень Западно-Камчатского течения (ЗКТ) прижимается к материковому склону в холодную половину года и удаляется от склона летом. Преимущество полученного результата в том, что он характеризует положение ВТП за каждый день в течение более чем 24 лет.

Результаты по межгодовой изменчивости залива тихоокеанских вод в море в целом хорошо согласуются с ходом переноса вод ЗКТ в зимний сезон, оцененным в работе [Коломейцев, 2020]. В годы с повышенной интенсивностью ЗКТ (2010, 2013, 2015 и 2017) мы наблюдали более северное расположение центроида ВТП с T от 30 до 180 суток и интрузии с большей максимальной площадью. Однако есть и расхождения

между нашими результатами и данными Коломейцева [2020]. Например, представленные в этой статье результаты показывают, что в 2003 году наблюдалась обширная интрузия ВТП, которая не находит подтверждения в представленных ранее значениях интенсивности переноса вод ЗКТ. Это может быть связано с тем, что анализ данных в работе [Коломейцев, 2020] ограничен 153° в.д.

Влияние интенсивности залива тихоокеанских вод на биоту

Несмотря на общие представления о значительной роли течений исследуемого района в переносе тепла, химических соединений и зоопланктона [Волков, 2015], а также связи между интенсивностью ЗКТ и выживаемостью молоди основных промысловых видов [Овсянников и др., 2013; Шейбак и др., 2022], детально этот вопрос не исследован. В публикациях, касающихся изменений в экосистемах исследуемого района и Охотского моря в целом, влияние течений на состояние сообществ планктона и нектона упоминается вскользь [Зуенко и др., 2019; Шунтов и др., 2019]. Это связано, в частности, с фрагментарностью натуральных наблюдений за течениями [Зуенко и др., 2019]. Поэтому спутниковые данные по изменчивости течений приобретают исключительное значение, а представленный в данной статье подход к описанию изменчивости залива тихоокеанских вод в Охотское море потенциально может быть использован в будущих исследованиях изменений экосистем восточной части Охотского моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследуется изменчивость залива и распространения ВТП в Охотском море. Ежегодные события залива вод формируют ограниченные в пространстве области ВТП (интрузии). На картах эти области представляют собой «пятна» ВТП, а их цифровым отражением служат полигональные объекты. Основные задачи данной работы связаны с выделением этих полигонов, определением их характеристик и описанием их эволюции.

Работа основана на спутниковых данных о географической компоненте течения, с помощью которых за каждую дату в интервале с 31 января 1997 года по 17 апреля 2022 года выполнен расчёт траекторий движения большого количества виртуальных частиц в течение 400 суток до даты наблюдения. Предложены два подхода к оценке изменчивости переноса ВТП в восточной части Охотского моря. Проанализированы полученные с их помощью индексы изменчивости залива и распространения тихоокеан-

ских вод в море. Показано, что распространение ВТП в меридиональном направлении имеет более ярко выраженную сезонную составляющую, чем в зональном направлении. «Свежие» тихоокеанские воды распространялись дальше всего на север в 1998, 2003, 2010, 2013, 2017 и 2019 гг. То есть, с 2010 года наблюдается тенденция к продвижению вод, поступающих из Тихого океана, в более северные районы моря, чем до 2010 года.

Для каждой даты из исследованного интервала частицы были сгруппированы с помощью кластерного анализа на основе данных о районе поступления в море (месте пересечения выбранного разреза) и интервала времени между поступлением в море и наблюдением. Эти группы на карте представляют собой полигональные области, «пятна» ВТП, различающиеся по району и времени поступления в море основной части составляющих их частиц. Для каждого такого полигона за каждую дату наблюдений рассчитаны параметры, характеризующие его расположение, размеры и особенности формы. Показано, что на начальном этапе развития каждого крупного события затока площадь области, занятой ВТП, быстро растёт, но показатели, описывающие изменчивость её формы (фрактальная размерность и отношение площади к площади выпуклой оболочки), хоть и показывают тенденцию к убыванию, но часто могут и расти. При этом медиана времени путешествия частиц, составляющих интрузию ВТП, почти не меняется, так как вместе с переносом на север и «старением» одних частиц к «пятну» добавляются всё новые и новые. Форма области, занятой ВТП, начинает быстро усложняться после достижения ею максимальной площади, то есть после потери связи с тихоокеанскими водами. Усложнение формы происходит за счёт увеличения количества составных частей интрузии и удлинения филаментов. Затем наблюдается постепенное смещение центра «пятна» в северном направлении, сопровождаемое дальнейшим, но менее быстрым усложнением его формы. Основной район перемещения интрузий лежит в интервале $152-154^\circ$ в.д. Наиболее крупные области, занятые ВТП, наблюдались в 2003, 2010, 2017 и 2019 гг. В целом, в 2010–2022 гг. наблюдались более крупные события затока ВТП, чем в 1997–2010 гг. Это позволяет предположить, что интенсивность поступления вод из Тихого океана в море была выше в 2010–2022 гг., по сравнению с 1997–2010 гг. Этот результат хорошо согласуется с продвижением ВТП дальше на север с 2010 года.

В рассматриваемом районе распространение вод, поступающих из Тихого океана, играет ключевую роль в изменении экосистемы и потенциально может

определять состояние промысловых запасов. Однако походы к описанию распространения ВТП до настоящего момента отсутствовали. В данной работе получены методы описания особенностей распространения ВТП в море, позволяющие отслеживать изменения процесса поступления и распространения вод с высокой временной дискретностью. Таким образом, полученные количественные индексы распространения тихоокеанских вод в Охотское море имеют высокий потенциал для описания изменчивости экосистем и причин флуктуации промысловых запасов восточной части моря.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов при подготовке данной статьи.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа К.К. Киввы выполнена в рамках части II раздела 8 государственного задания ФГБНУ «ВНИРО» № 076–00004–23–01. Работа С.В. Пранца, М.В. Будянского и М.Ю. Улейского по лагранжеву моделированию движения частиц воды выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 23–17–00068). Расчеты движения частиц выполнены на вычислительном кластере ТОИ ДВО РАН в рамках темы государственного задания ТОИ ДВО РАН № 121021700341–2.

ЛИТЕРАТУРА

- Архипов Б.В., Солбаков В.В., Соловьев М.Б., Шапочкин Д.А. 2013. Экологическое моделирование и лагранжевый подход // Математическое моделирование. Т. 25. № 3. С. 47–61.
- Будянский М.В., Кулик В.В., Кивва К.К., Улейский М.Ю., Пранц С.В. 2022. Лагранжевый анализ тихоокеанских вод в Охотском море на основе спутниковых данных в приложении к промыслу минтая // Исследование Земли из космоса. № 5. С. 47–59.
- Волвенко И.В. 2008. Видовое разнообразие биомассы макрофауны пелагиали северо-западной Пацифики // Известия ТИНРО. Т. 153. С. 27–48.
- Волков А.Ф. 2015. Интегральные значения биомассы и запаса зоопланктона в эпипелагиали 71 района севера Тихого океана, включая Берингово и Охотское моря, и схемы распределения массовых видов // Известия ТИНРО. Т. 180. С. 140–160. DOI: 10.26428/1606–9919–2015–180–140–160.
- Зуенко Ю.И., Асеева Н.Л., Глебова С.Ю., Гостренко Л.М., Дубинина А.Ю., Дулепова Е.П., Золотов А.О., Лобода С.В., Лысенко А.В., Матвеев В.И., Муктепавел Л.С., Овсянников Е.Е., Фигуркин А.Л., Шатилина Т.А. 2019. Современ-

- ные изменения в экосистеме Охотского моря (2008–2018 гг.) // Известия ТИНРО. Т. 197. № 2. С. 35–61. DOI: 10.26428/1606–9919–2019–197–35–61.
- Коломейцев В.В. 2020. Изменчивость Западно-Камчатского течения зимой 1994–2019 гг. по альтиметрическим данным // Известия ТИНРО. Т. 200. Вып. 2. С. 412–426. DOI: 10.26428/1606–9919–2020–200–412–426.
- Ляхов А.Ф., Каштанов Н.В. 2013. Фрактальная размерность визуального образа математической матрицы // Компьютерные инструменты в образовании. № 2. С. 59–66.
- Матвеев В.И., Тихомирова Е.А., Лучин В.А. 2015. Первичная продукция Охотского моря в годы с различными термическими условиями // Биология моря. Т. 41. № 3. С. 179–187. DOI 10.1134/S1063074015030062.
- Мастрюков С.И., Червякова Н.В. 2019. К вопросу о сезонной изменчивости полей постоянных течений в Охотском море // Навигация и гидрография. № 58. С. 71–75.
- Овсянников Е.Е., Овсянникова С.Л., Шейбак А.Ю. 2013. Динамика и структура запасов минтая в северной части Охотского моря в 2000-е гг // Известия ТИНРО. Т. 172. С. 133–148.
- Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Файман П.А. 2013. Лагранжев анализ перемешивания и переноса вод в морских заливах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 49. № 1. С. 91–106. DOI 10.1134/S0001433813010088.
- Рулева Н.Ю., Солбаков В.В. 2020. Экологическое моделирование и эйлеров подход, примеры расчетов // Исследование операций (модели, системы, решения). Т. 6. С. 70–82.
- Файман П.А., Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. 2021. Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 57. № 3. С. 372–384. DOI 10.1134/S000143382103004X.
- Фигуркин А.Л. 2002. Развитие океанологических условий Западной Камчатки по данным мониторинговых наблюдений 1997 и 2000 гг. // Известия ТИНРО. Т. 130. С. 103–116.
- Шейбак А.Ю., Антонов Н.П., Кузнецова Е.Н. 2022. Состояние и структура запаса минтая в Охотском море в 2011–2020 гг. // Труды ВНИРО. Т. 187. С. 71–86.
- Шунтов В.П., Иванов О.А., Горбатенко К.М. 2019. Что же произошло в экосистеме Охотского моря в 2008–2018 гг.? // Известия ТИНРО. Т. 197. № 2. С. 62–82. DOI 10.26428/1606–9919–2019–197–62–82.
- Abdalla S., Kolahchi A.A., Ablain M. et al. 2021. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // Advances in Space Research. V. 68(2). P. 319–363.
- Copernicus Marine Service. 2023. Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing. DOI 10.48670/moi-00148
- Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise // Institute for Computer Science, University of Munich. Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). P. 226–231. DOI 10.5555/3001460.3001507.
- Hahsler M., Piekenbrock M., Doran D. 2019. dbscan: Fast density-based clustering with R // Journal of Statistical Software. V. 91. P. 1–30.
- Hubert M., Vandervieren E. 2008. An adjusted boxplot for skewed distributions // Computational statistics & data analysis. V. 52(12). P. 5186–5201.
- Nadaraya E.A. 1964. On estimating regression // Theory of Probability & Its Applications. 9(1). P. 141–142.
- Pebesma E. 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data // The R Journal. V. 10:1. P. 439–446.
- Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V. 2017. Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. Springer. 273 p.
- Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H.P., Xu X. 2017. DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems (TODS). V. 42(3). P. 1–21.
- Watson G.S. 1964. Smooth regression analysis // Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A.P. 359–372.
- Wickham H. 2011. ggplot2 // Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. V. 3(2). P. 180–185.
- Zunic J., Rosin P.L. 2004. A new convexity measure for polygons // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 26(7). P. 923–934.

REFERENCES

- Arhipov B.V., Solbakov V.V., Soloviev M.B., Shapochkin D.A. 2013. Ecological modelling and Lagrangian approach // Mathematical modelling. V. 25. No. 3. P. 47–61. (In Russ.).
- Budyansky M.V., Kulik V.V., Kivva K.K., Uleysky M.Y., Prants S.V. 2022. Lagrangian Analysis of Pacific Waters in the Sea of Okhotsk Based on Satellite Data in Application to the Walleye Pollock Fishery // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Vol. 58. No. 12. P. 1427–1437. DOI 10.1134/S0001433822120088.
- Volvenko I.V. 2008. Species diversity of macrofauna biomass in the pelagic northwest Pacific // Izvestiya TINRO. V. 153. P. 27–48. (In Russ.).
- Volkov A.F. 2015. Integral values of biomass and stock of zooplankton in the epipelagic layer of the area 71 in the North Pacific, including the Bering and Okhotsk Seas, and patterns of distribution for mass species // Izvestiya TINRO. V. 180. No. 1. P. 140–160. DOI: 10.26428/1606–9919–2015–180–140–160 (In Russ.).
- Zuenko Yu.I., Aseeva N.L., Glebova S. Yu., Gostrenko L.M., Dubinina A. Yu., Dulepova E.P., Zolotov A.O., Loboda S.V., Lysenko A.V., Matveev V.I., Muktepavel L.S., Ovsyannikov E.E., Figurkin A.L., Shatilina T.A. 2019. Recent changes in the Okhotsk Sea ecosystem (2008–2018) // Izvestiya TINRO. V. 197. No. 2. P. 35–61. DOI: 10.26428/1606–9919–2019–197–35–61. (In Russ.).
- Kolomeyts V.V. 2020. Variability of the West Kamchatka Current in winters of 1994–2019, by altimetry data // Izvestiya TINRO. V. 200. No. 2. P. 412–426. (In Russ.) DOI: 10.26428/1606–9919–2020–200–412–426.
- Lyakhov A.F., Kashtanov N.V. 2013. Fractal dimensionality of virtual image of mathematical matrix // Kompjuterneye instrumenty v obrazovanii. No. 2. P. 59–66. (In Russ.).
- Matveev V.I., Tikhomirova E.A., Luchin V.A. 2015. Primary production of the Sea of Okhotsk in the years of different temperature conditions // Russian Journal of Marine Biology. V. 41. No. 3. P. 176–185. DOI 10.1134/S1063074015030062.

- Mastryukov S.I., Chervyakova N.V.* 2019. To the question of seasonal variability of the fields of constant currents in the Sea of Okhotsk // Navigation and Hydrography. No. 58. P. 71–75. (In Russ.).
- Ovsyannikov E.E., Ovsyannikova S.L., Sheibak A. Yu.* 2013. Dynamics and structure of pollock stocks in the northern part of the Sea of Okhotsk in the 2000s // Izvestia TINRO. V. 172. P. 133–148. (In Russ.).
- Prants S.V., Ponomarev V.I., Budyansky M.V., Uleysky M.Y., Fayman P.A.* 2013. Lagrangian analysis of mixing and transport of water masses in the marine bays // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. V. 49. No. 1. P. 82–96. DOI 10.1134/S0001433813010088. (In Russ.).
- Ruleva N. Yu., Solbakov V.V.* 2020. Ecological modelling and Eulerian approach, examples of calculations // Issledovanie operatsiy (modeli, sistemy, resheniya). V. 6. P. 70–82. (In Russ.).
- Fayman P.A., Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Y.* 2021. Simulated Pathways of the Northwestern Pacific Water in the Okhotsk Sea // Izvestiya RAS. Atmospheric and Oceanic Physics. V. 57. No. 3. P. 329–340. DOI 10.1134/S000143382103004X. (In Russ.).
- Figurkin A.L.* 2002. Development of oceanographic conditions along Western Kamchatka based on monitoring data of 1997 and 2000 // Izvestia TINRO. V. 130. P. 103–116. (In Russ.).
- Sheibak A. Yu., Antonov N.P., Kuznetsova E.N.* 2022. Condition and structure of pollock stock in the Sea of Okhotsk in 2011–2020 // Trudy VNIRO. V. 187. P. 71–86. (In Russ.) DOI 10.36038/2307–3497–2022–187–71–86. (In Russ.).
- Shuntov V.P., Ivanov O.A., Gorbatenko K.M.* 2019. What happened in the ecosystem of the Okhotsk Sea in 2008–2018? // Izvestiya TINRO. V. 197. No. 2. P. 62–82. (In Russ.) DOI 10.26428/1606–9919–2019–197–62–82. (In Russ.).
- Abdalla S., Kolahchi A.A., Ablain M. et al.* 2021. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // Advances in Space Research. V. 68(2). P. 319–363.
- Copernicus Marine Service.* 2023. Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing. DOI 10.48670/moi-00148
- Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X.* 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise // Institute for Computer Science, University of Munich. Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). P. 226–231. DOI 10.5555/3001460.3001507.
- Hahsler M., Piekenbrock M., Doran D.* 2019. dbscan: Fast density-based clustering with R // Journal of Statistical Software. V. 91. P. 1–30.
- Hubert M., Vandervieren E.* 2008. An adjusted boxplot for skewed distributions // Computational statistics & data analysis. V. 52(12). P. 5186–5201.
- Nadaraya E.A.* 1964. On estimating regression // Theory of Probability & Its Applications. 9(1). P. 141–142.
- Pebesma E.* 2018. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data // The R Journal. V. 10:1. P. 439–446.
- Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* 2017. Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean. Springer. 273 p.
- Schubert E., Sander J., Ester M., Kriegel H.P., Xu X.* 2017. DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems (TODS). V. 42(3). P. 1–21.
- Watson G.S.* 1964. Smooth regression analysis // Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A.P. 359–372.
- Wickham H.* 2011. ggplot2 // Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. V. 3(2). P. 180–185.
- Zunic J., Rosin P.L.* 2004. A new convexity measure for polygons // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 26(7). P. 923–934.

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.
Принята после рецензии 14.08.2023 г.