



DOI [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-8)

EDN <https://elibrary.ru/qvqqsg>

УДК 551.456.54:597.56

© Д. А. Романенков^{1*}, Е. В. Софьина^{1,2}, А. Д. Маховиков^{1,3}, И. К. Виноградова⁴, А. И. Варкентин^{1,5},
А. В. Зимин^{1,3}, Д. Я. Мельник^{1,5}, 2025

¹Институт океанологии им. П.П. Ширишова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

²Российский государственный гидрометеорологический университет, 192007, Санкт-Петербург,
Воронежская ул., д. 79

³Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9

⁴Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), 190013,
Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24–26/49, лит. А

⁵Камчатский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 683000, Петропавловск-Камчатский, ул. Набережная, д. 18
*dmromanenkov@yandex.ru

Моделирование переноса икры и личинок восточнокамчатского минтая с учетом приливной динамики¹

Статья поступила в редакцию 18.09.2025, после доработки 22.10.2025, принята в печать 18.11.2025

Аннотация

В работе изучается дрейф икры и личинок минтая в области Тихого океана, прилегающей к юго-восточному побережью полуострова Камчатка и северным Курильским островам. Используется модельный подход, сочетающий расчеты траекторий частиц программным модулем ICNTHYOP, данные океанского реанализа и результаты приливной региональной модели. Икра и личинки рассматриваются как пассивные трассеры, а их перенос из основного района нереста восточнокамчатской популяции минтая, расположенного в глубоководном каньоне Авачинского залива, рассчитывался в течение месяца 2024 и 2025 гг., начиная с наблюдаемой даты нереста в апреле.

Основная цель моделирования заключалась в определении влияния динамических факторов разной природы на транспорт частиц и вероятных мест их скопления, в которых может происходить развитие икры и выклев личинок. Выявление этих мест путем ихтиопланктонных съемок весьма затруднительно. В модельных расчетах не учитывался ряд факторов, связанных со смертностью икры и личинок под воздействием изменений среды и хищничества, активностью личинок по мере их развития и других процессов физико-биологического взаимодействия. Перенос трассеров после их подъема к поверхности в зоне нереста анализировался при использовании поверхностных и средних в верхнем слое моря фоновых течений.

Результаты моделирования показывают, что прогностические горизонтальные траектории частиц зависят не только от различных для двух лет гидродинамических условий, но и от учета приливного дрейфа. Высказано предположение о благоприятных для развития и выживаемости икры и личинок минтая динамических условиях, при которых их дрейф не приводит к выносу с шельфа в открытый океан. Определены потенциальные районы скопления частиц в прибрежных водах.

Ключевые слова: Лагранжева модель, пассивный трассер, дрейф икры и личинок, минтай, приливные течения, FESOM–C, ICNTHYOP, подводный каньон, Авачинский залив, Тихий океан

¹ Перевод статьи на английский язык представлен в электронном формате данного номера на сайте журнала

Ссылка для цитирования: Романенков Д.А., Софьина Е.В., Маховиков А.Д., Виноградова И.К., Варкентин А.И., Зимин А.В., Мельник Д.Я. Моделирование переноса икры и личинок восточнокамчатского минтая с учетом приливной динамики // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2025. Т. 18, № 4. С. 105–119. EDN QVQQSG.
[https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-8)

For citation: Romanenkov D.A., Sofina E.V., Makhovikov A.D., Vinogradova I.K., Varkentin A.I., Zimin A.V., Melnik D. Ja. Modeling the transport of East Kamchatka pollock eggs and larvae taking into account tidal dynamics. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2025;18(4):105–119. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18\(4\)-8](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2025.18(4)-8)

© D. A. Romanenkov^{1*}, E. V. Sofina^{1,2}, A. D. Makhovikov^{1,3}, I. K. Vinogradova⁴, A. I. Varkentin^{1,5},
A. V. Zimin^{1,3}, D. Ja. Melnik^{1,5}, 2025

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, 79 Voronezhskaja Str., St. Petersburg, 192007, Russia

³St. Petersburg State University, 7–9 Universitetskaja Emb., St. Petersburg, 199034, Russia

⁴Saint-Petersburg State Institute of Technology, 24–26/49, lit. A Moskovsky Prosp., St. Petersburg, 190013, Russia

⁵Kamchatka branch of “Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography” (“KamchatNIRO”), 18 Naberezhnaja Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 683000, Russia

*dmromanenkov@yandex.ru

Modeling the transport of East Kamchatka pollock eggs and larvae taking into account tidal dynamics¹

Received 18.09.2025, Revised 22.10.2025, Accepted 18.11.2025

Abstract

The work examines the drift of pollock eggs and larvae in the Pacific Ocean region adjacent to the southeastern coast of the Kamchatka Peninsula and the northern Kuril Islands. A model approach is used, combining particle trajectory calculations using the ICHTHYOP software, ocean reanalysis data, and the results of a regional tidal model. The eggs and larvae are considered as passive tracers, and their transport from the main spawning ground of the East Kamchatka pollock in the deep-water canyon of the Avacha Bay was calculated for one month in 2024 and 2025, starting from the observed spawning date in April.

The main objective of the modelling was to determine the influence of various dynamic factors on particle transport and the likely locations of their accumulation, where egg development and larval hatching may occur. Identifying these locations through ichthyoplankton surveys is very difficult. The model calculations did not take into account a number of factors related to the mortality of eggs and larvae under the influence of environmental changes and predation, larval activity during development, and other processes of physical and biological interaction. The transport of tracers after their ascent to the surface in the spawning area was analyzed using background surface currents and those averaged over the upper sea layer.

The simulation results show that the predicted horizontal particle trajectories depend not only on the different hydrodynamic conditions for the two years, but also on the consideration of tidal drift. A hypothesis has been put forward regarding the dynamic conditions favorable for the development and survival of pollock eggs and larvae, under which their drift does not lead to their transport from the shelf water into the open ocean. Potential areas of particle accumulation in coastal waters have been identified.

Keywords: Lagrange model, passive tracer, eggs and larvae drift, pollock, tidal currents, FESOM–C, ICHTHYOP, submarine canyon, the Avacha Bay, Pacific Ocean

1. Введение

Акватория северо-западной части Тихого океана, прилегающая к полуострову Камчатка и северным Курильским островам, является ареалом нереста, нагула и обитания многих промысловых рыб, среди которых по своим запасам и промысловому значению выделяется минтай *Gadus chalcogrammus*, относящийся к восточнокамчатской популяции этого вида [1–3]. Нерестовую часть ее ареала представляют глубоководные нерестилища, расположенные в каньонах Авачинского и Кроноцкого заливов, и шельфовые — у юго-восточной Камчатки (до южной оконечности о. Парамушир) и северных Курильских островов (до южной оконечности о. Парамушир) [3–5]. В Авачинском и Кроноцком заливах минтай также нерестится на шельфе, но масштабы его по сравнению с глубоководным икрометанием невелики. По информации А.И. Варкентина с соавторами [4], в некоторые годы в глубоководных каньонах учитывалось в среднем около 61 % всей икры, при этом в среднем 44 % икринок регистрировали в так называемом «Северном» каньоне, расположенном в Авачинском заливе. С полным основанием его можно считать условным центром воспроизводства рыб этой популяции.

Икрометание в «Северном» каньоне происходит, как правило, глубже 400 м. Сроки нереста варьируют в межгодовом аспекте: с начала марта по начало мая с пиком в конце марта — начале апреля, при этом среднелетняя дата начала нереста приходится на 13 марта, пика — 01 апреля, завершения — 19 апреля [4].

Исследуемый район отличается специфическими гидрологическими условиями. Характерной чертой акватории является холодное Курило-Камчатское течение (ККТ) (рис. 1). Сложная батиметрия и изменчивый ветровой режим обуславливают наличие меандров и вихрей, которые оказывают существенное влияние на гидрологическую структуру вод региона, которая включает субарктический тип стратификации [6–8]. В среднем в области шельфа и материкового склона полуострова перенос вод в приповерхностном слое направлен на юго-запад. В период нереста минтая скорость течения варьирует от 5 до 45 см/с [9]. При этом мезомасштабные вихри размером 70–150 км хорошо прослеживаются в инфракрасном и видимом

¹ The English translation of the article is available in the electronic format of this issue on the journal's website

диапазонах и по данным спутниковых альтиметров движутся, как правило, в том же направлении [10]. Ближе к берегу, в заливах и на шельфе, преобладают мезомасштабные структуры антициклонического типа, а в глубоководной области к востоку от струи ККТ — мезоциклоны [7, 10–12]. По результатам натурных экспериментов, выполненных в глубоководных каньонах Авачинского залива, обнаружены внутренние волны, вероятно, обусловленные приливным циклом [13, 4].

Как и для других группировок минтая, для восточнокамчатской популяции характерны флуктуации запасов, вызванные чередованием поколений разной численности. В свою очередь, урожайность генераций зависит, прежде всего, от условий выживания на ранних стадиях развития (икры и личинки). Большинство исследователей появление высокочисленных генераций минтая связывают с «теплыми» периодами [14–20], при этом конкретные механизмы формирования урожайности поколений минтая, как правило, неизвестны, хотя попытки обосновать их для разных популяций неоднократно предпринимались. Так, в работе [2] для восточнокамчатского минтая обнаружена положительная корреляция между численностью поколений в возрасте 4 года, количеством оплодотворенной икры и средневзвешенной температурой воды.

Одним из возможных механизмов формирования численности поколений считают направление течений над системой каньонов [4]. Вынос личинок, выклюнувшихся в каньонах, в открытые воды может привести к значительным потерям формирующейся генерации. В развитие этой гипотезы было показано, что скорость и расположение основной струи ККТ может оказывать как негативное, в случае приближения к материковому склону Авачинского залива, так и позитивное воздействие, в противном случае [21]. При ослаблении основной струи ККТ на акватории Авачинского залива устанавливается стационарный антициклонический перенос вод в поверхностном слое, что может приводить к выносу выметанной в каньонах икры далеко за пределы благоприятной для развития акватории. В противном случае, Камчатское течение сильно отклоняется от восточного побережья в океан, и на акватории Авачинского залива господствует циклонический перенос вод. Возможно, что именно такие условия более благоприятны для дальнейшего развития и выживания молоди.

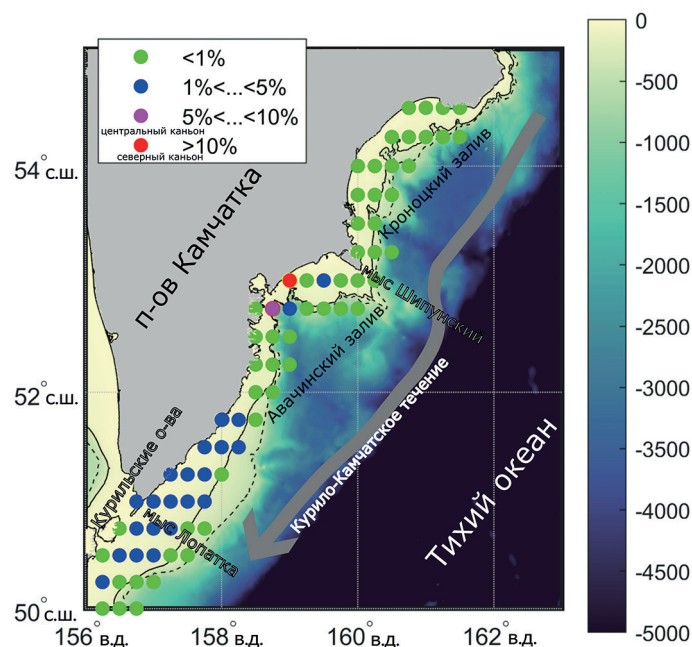


Рис. 1. Батиметрическая карта региона (м), совмещенная со схемой основного потока Курило-Камчатского течения и средним многолетним распределением общего количества выловленной икры в период нереста (%), по данным ихтиопланктонных съемок. Сплошная черная линия — изобата 200 м, пунктирная черная линия — изобата 500 м

Fig. 1. Bathymetric map of the region (m) with a diagram of the main flow of the Kuril-Kamchatka Current and the average long-term distribution of the total amount of eggs caught during the spawning period (%), based on ichthyoplankton survey data. The 200-meter isobath represented by solid black line and the 500-meter isobath represented by dashed black line

Таким образом, сведения о направлении и масштабах дрейфа икры и личинок минтая, динамических процессов океана, его определяющих, важны для понимания механизмов появления поколений разной численности.

Следует отметить, что натурные наблюдения за дрейфом икры, выметанной в глубоководных каньонах Авачинского залива, отсутствуют, а, следовательно, подтвердить или опровергнуть вышеприведенные предположения не представляется возможным. Прямое наблюдение этого процесса в естественных условиях на сегодняшний день невозможно. И здесь на помощь может прийти моделирование.

Для этих целей часто используется Лагранжев подход, который рассматривает перемещение каждой фиксированной частицы жидкости в пространстве с учетом локальной скорости течений [22]. Такие расчеты позволяют восстанавливать точные структуры вихрей, циркуляций, интрузий и другие динамические структуры океана, а также рассчитывать дрейф частиц любого происхождения. В некоторых акваториях дальневосточного региона Тихого океана Лагранжев подход уже использовался [22–26], однако для тихоокеанских вод, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам, аналогичные исследования не выполнялись.

Цель настоящего исследования — оценить с помощью модельного подхода направление и масштабы дрейфа икры и личинок минтая из глубоководного каньона Авачинского залива. Для ее достижения поставлены задачи:

- изучить роль фоновой циркуляции и приливных течений в переносе и рассеивании икры и личинок минтая;
- установить траектории дрейфа икры и личинок из района глубоководного каньона Авачинского залива, используя имеющуюся информацию и модель Лагранжева переноса пассивных частиц, для 2024 и 2025 гг.

2. Материалы и методы

По указанным во Введении причинам, в качестве полигона для моделирования дрейфа икры минтая выбран регион Тихого океана у юго-восточного побережья полуострова Камчатка и северных Курильских островов, а район нереста — «Северный» глубоководный каньон Авачинского залива (см. рис. 1). В период нереста икру можно рассматривать как пассивные трассеры, переносимые течениями различного происхождения. Принято допущение, что они одномоментно выпущены в пик нереста. Это допущение не учитывает особенности естественной убыли икры в период нереста [27], однако может рассматриваться как первое приближение при моделировании.

Согласно [4, 13] икрометание минтая в каньоне в 2024 г. происходило с 8 марта по 2 мая с пиком 4 апреля. Основной нерест протекал в слое 300–400 м, но часть икры начальной стадии располагалась и выше, в слое 200–300 м (таблица). По мере развития выметанная икра всплывает за счет разницы в плотности ее и окружающей воды.

Таблица
Table

Количество икры минтая (шт./м²) по результатам послонных обловов, выполненных в вершине «Северного» каньона 4 апреля 2024 г.

Number of pollock eggs (pcs/m²) based on stratified sampling conducted at the head of the “Northern” canyon on 4 April 2024

Слой, м	Стадия развития икры			
	1–8	9–15	16–19	20–21
0–25	2	0	0	0
25–50	6	0	0	0
50–100	14	2	0	0
100–200	478	0	0	0
200–300	6538	134	0	0
300–400	26916	4386	0	0
400–500	134	4	0	0

Оценки скорости всплытия варьируют в широких пределах. Согласно расчетам [28] при условии равномерного всплытия икры в зоне шельфа и заливах скорость вертикального дрейфа икры минтая составляла от 4,9 м/ч (1,4 мм/с) и 8,6 м/ч (2,4 мм/с), тогда как в мезопелагиали она на порядок ниже.

Однако на вертикальное смещение могут накладываться и внешние факторы. Так, по данным натурального эксперимента [13] величина внутреннего прилива в вершине каньона достигала 100 м. Это означает, что под действием вертикального смещения изопикн икра поднимается на ту же величину за половину суток и после всплытия из слоя 200–300 м может выйти из глубоководной зоны каньона. Из-за отсутствия надежных сведений о скорости всплытия икры минтая в каньоне, мы допустили, что в пик нереста она уже поднялась в слой 0–200 м и попала в зону действия подповерхностных течений.

Для моделирования использовали модельные фоновые и приливные течения в регионе за период с 4 апреля (пик нереста) по 2 мая (окончание нереста) 2024 г. Для сравнения результатов моделирования, в 2025 г. приняты те же сроки. При моделировании мы пренебрегли некоторыми биотическими и абиотическими факторами, влияющими на выживаемость и дисперсию частиц.

2.1. Фоновая циркуляция

Исходные данные представляют собой выборку из продукта оперативной системы анализа и прогнозирования Мирового океана «Mercator» GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024². Продукт доступен с 01.06.2022 г. по настоящий день вместе с прогнозом на 10 дней. Реализация системы — GLO12v4, версия модели океана — NEMO3.6. Пространственное разрешение — $1/12^\circ$ (приблизительно 8 км), 50 вертикальных уровней. Батиметрия системы представлена комбинацией интерполированных баз, данных ETOPO1 и GEBCO8. Первая используется в районах с глубинами более 300 м, а GEBCO8 — менее 200 м. Изобата 200 м приблизительно отделяет глубоководные каньоны от области шельфа. Для моделирования дрейфа были использованы ежеhourные данные о зональной и меридиональной составляющих скорости течения в приповерхностном слое и шестичасовые данные, осредненные в верхнем 200-метровом слое океана, на исходной сетке. Для сравнительного анализа особенностей циркуляции в разные годы были использованы среднемесячные поля течений.

Рассмотрим особенности фоновой циркуляции на период численных экспериментов. На рис. 2 представлены среднемесячные поверхностные течения за апрель 2024 и 2025 гг. В апреле — начале мая 2025 г. хорошо выражена струя ККТ с максимальными скоростями до 0,75 м/с (рис. 2, б). Также отчетливо виден большой антициклонический круговорот в юго-восточной части акватории, однако заметных мезомасштабных вихрей или меандров течения не прослеживается. На большей части шельфа и склона юго-восточной Камчатки, включая Кроноцкий и Авачинский заливы, скорости не превышают 0,10 м/с. Однако на шельфе Авачинского залива, южнее полуострова Шипунский, и в районе его каньонов скорости течения повышаются в два раза.

В этот же период 2024 г. (рис. 2, а) в регионе наблюдалась сложная циркуляция, вызванная перестройкой ККТ и его ослаблением у юго-восточного побережья Камчатки и в Кроноцком заливе восточнее полуострова Шипунский, а также смещением большого антициклонического круговорота на север в зону струи ККТ. В результате взаимодействия вихря и ККТ образовались дочерние круговороты в глубоководной части Авачинского залива, где течения значительно усиливались, достигая предельных значений 0,4 м/с. По мере перестройки циркуляции в отдельные дни месяца скорости фоновых течений в мелководных зонах шельфа обоих заливов достигали 0,25 м/с (не показаны).

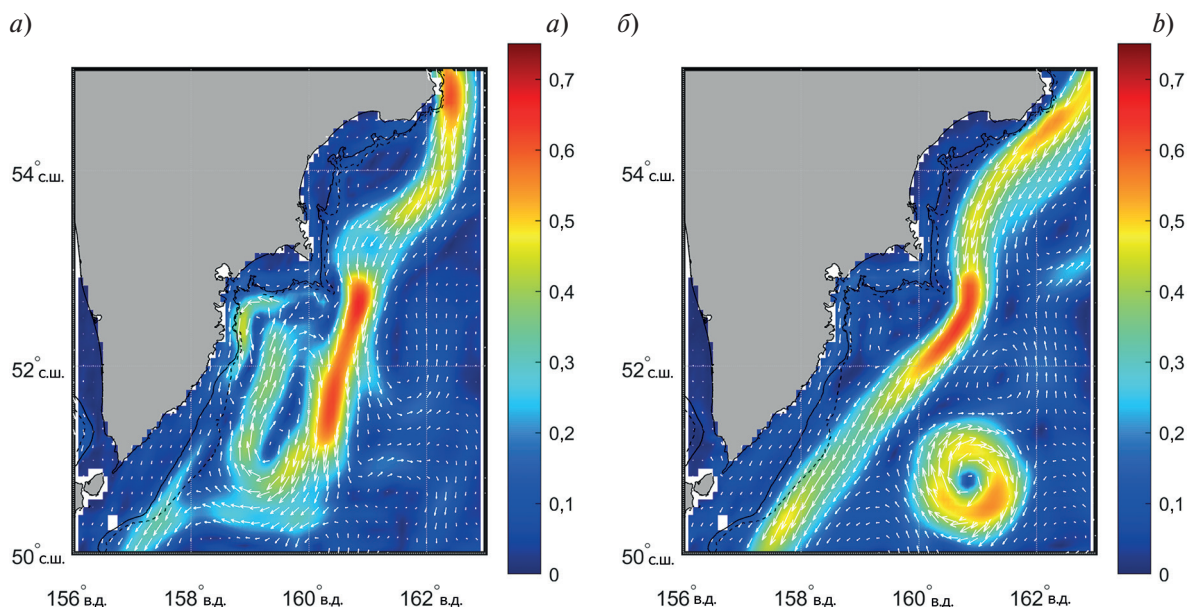


Рис. 2. Среднемесячные поверхностные течения (м/с) за период с 04.04.2024 по 03.05.2024 (а) и за период с 04.04.2025 по 03.05.2025 (б)

Fig. 2. Monthly mean surface currents (m/s) for the periods 4 April–3 May 2024 (a) and 4 April–3 May 2025 (b)

² <https://doi.org/10.48670/moi-00016>

Циркуляция, осредненная в верхнем 200-метровом слое (рис. 3), качественно не отличается от поверхностной циркуляции (рис. 2). В целом течения несколько слабее, а границы переходных зон между струей ККТ или вихрями и окружающими водами более размыты. В мелководных областях за счет осреднения скорости от поверхности до дна течения уменьшаются в два и более раз. Можно отметить также любопытный эффект месячного осреднения течений, при котором некоторые особенности циркуляции могут не проявляться. Хотя большой антициклонический круговорот в юго-восточной части акватории по среднемесячным данным 2024 г. не наблюдается (рис. 2, а и рис. 3, а), однако по среднесуточным данным (не показаны) можно проследить этот вихрь и его смещение к северу. Как видно, система течений значительно различна в два смежных года — 2024 и 2025 гг. Насколько это скажется на переносе пассивных трассеров, будет ясно из результатов моделирования.

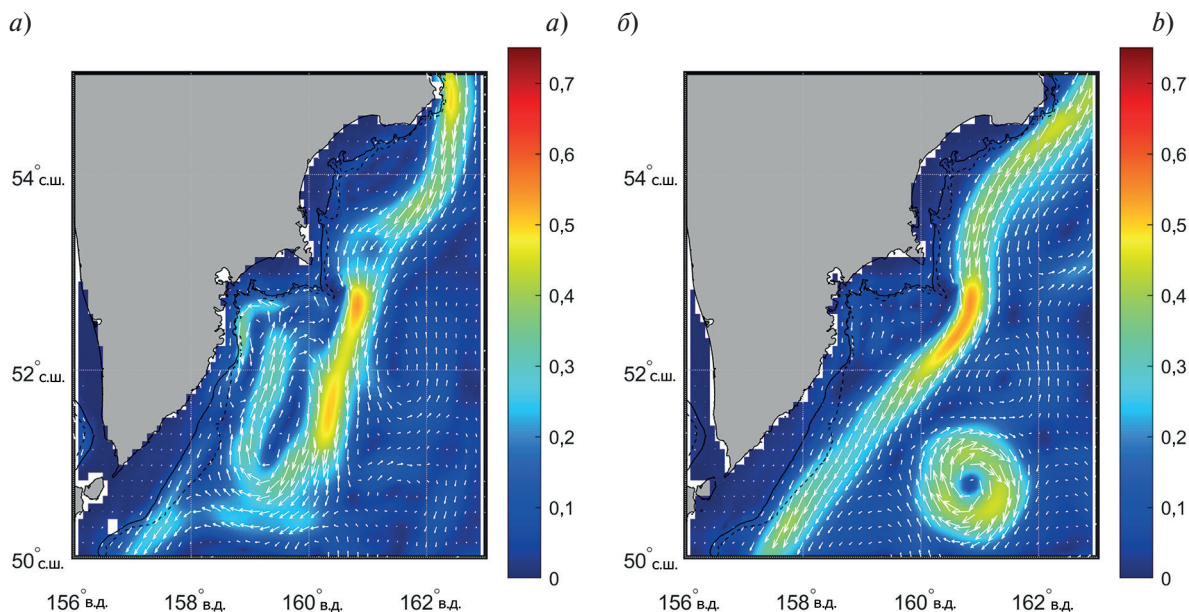


Рис. 3. Среднемесячные течения (м/с) в слое 0–200 за период с 04.04.2024 по 03.05.2024 (а) и за период с 04.04.2025 по 03.05.2025 (б)

Fig. 3. Monthly mean currents (m/s) in the 0–200 m layer for the periods 4 April–3 May 2024 (a) and 4 April–3 May 2025 (b)

2.2. Приливная динамика

Приливные течения были получены в результате регионального моделирования баротропной приливной динамики у юго-восточного побережья полуострова Камчатка с использованием конечно-объемной модели FESOM–C [29, 30]. Региональная модель была реализована на неструктурированной треугольной сетке с пространственным разрешением, адаптированным к локальной батиметрии, и верифицирована на мареографных данных. Баротропные приливные скорости оценивались для всего периода исследования и включали следующие приливные составляющие: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf, Mm, MS4, M4. Примечательно, что приливной режим в исследуемом районе классифицируется как смешанный с преобладанием суточных составляющих над полусуточными. Региональная приливная модель обеспечивает более точное представление приливных течений по сравнению с глобальными приливными моделями FES2014 и TPXO9. Как было показано в [30], приливная динамика в районе каньонов Авачинского залива характеризуется сильными нелинейными эффектами, проявляющимися в устойчивом остаточном приливном переносе со скоростями до 2 см/с, в то время как сами приливные течения могут достигать здесь 35 см/с в зависимости от фазы приливного цикла (рис. 4, а). Эти значения сравнимы со скоростями фоновой циркуляции (рис. 2 и 3) и, следовательно, могут оказывать влияние на дрейф. Остаточная приливная циркуляция (осредненные за синодический месяц 29,53 суток приливные течения) хотя и на порядок слабее значений экстремальных приливных течений, но характеризуется устойчивым переносом вод вдоль континентального склона и вихревыми структурами (рис. 4, б). Приливные скорости были интерполированы на пространственно-временную сетку реанализа GLO12v4 для создания набора данных суммарной циркуляции с учетом приливных течений.

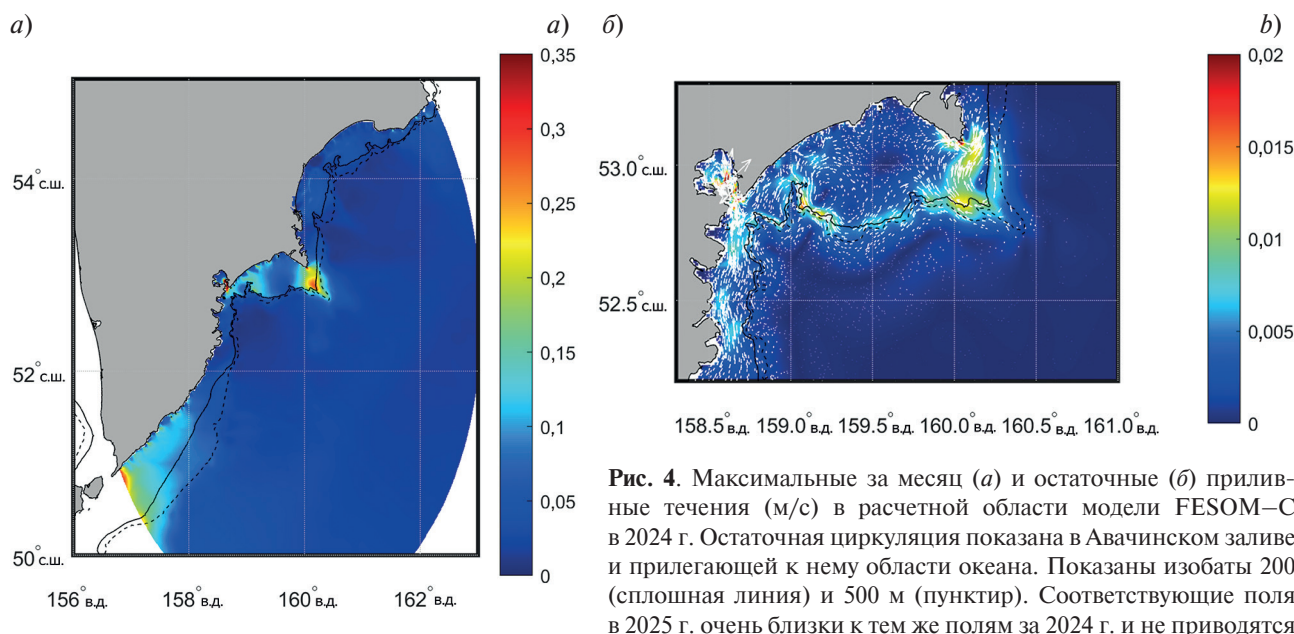


Рис. 4. Максимальные за месяц (а) и остаточные (б) приливные течения (м/с) в расчетной области модели FESOM–C в 2024 г. Остаточная циркуляция показана в Авачинском заливе и прилегающей к нему области океана. Показаны изобаты 200 (сплошная линия) и 500 м (пунктир). Соответствующие поля в 2025 г. очень близки к тем же полям за 2024 г. и не приводятся

Fig. 4. Monthly maximum (a) and residual (b) tidal currents (m s^{-1}) in the FESOM–C computational domain for 2024. Residual circulation is shown for Avacha Bay and the adjacent ocean area. Depth contours of 200 m (solid line) and 500 m (dashed line) are indicated. Corresponding fields for 2025 are very similar to those for 2024 and are not shown

2.3. Модель дрейфа

Для моделирования дрейфа пассивных частиц использовался программный продукт ICHTHYOP³ [31]. Данный программный продукт рассчитывает траектории частиц в Лагранжевой постановке с обновлением параметров расчета на каждом шаге по времени, что позволяет более точно решить поставленную задачу [32]. ICHTHYOP — комплексная модель, разработанная для изучения влияния физических (например, океанические течения, температура) и биологических (например, рост, смертность ихтиопланктона) факторов на дрейф и миграцию икры и личинок рыб. ICHTHYOP использует временные ряды полей скорости, температуры и солёности как входные параметры. В дополнение можно настроить смертность от определенной температуры или солёности, размер икры и ее возраст. Выходными данными служит запись о состоянии каждой частицы и анимированное отслеживание местоположения с отдельной цветовой пометкой свойств частиц (например, возраст, размер и т. п.). Важным преимуществом ICHTHYOP является использование трехмерных полей течений, включая информацию о вертикальных скоростях. На данный момент не существует региональной модели, которая снабдила бы ICHTHYOP такой полной информацией о течениях в регионе интереса. Все предлагаемые реанализы, включая используемый нами GLORYS, не обеспечивают данными о вертикальной циркуляции. Поэтому мы используем только поля горизонтальных течений для достижения задачи исследования, сформулированной во Введении.

Входными данными послужили подготовленные ранее поля горизонтальных течений (разделы 2.1 и 2.2). Параметры расчетов, следующие: шаг по времени 1 ч, скорость диссипации энергии фоновой турбулентности по умолчанию равна $1^{-12} \text{ м}^2/\text{с}^3$. Расчетные пассивные частицы при попадании на сетку берега «отскакивают» назад в воду, более сложные алгоритмы взаимодействия частиц с берегом не рассматривались. Разнообразные виды параметризации физических (за исключением горизонтальной фоновой диффузии) и биологических процессов не используются. Начальное «пятно» пассивных трассеров с центром в точке (52°54'7 с. ш., 159°01' в. д.) располагается в вершине «Северного» каньона Авачинского залива, имеет радиус 2 км и содержит 1000 частиц.

3. Результаты

Было выполнено 6 численных экспериментов по переносу ихтиопланктона: 1) фоновыми поверхностными течениями; 2) фоновой средней циркуляцией в верхнем двухсотметровом слое; 3) суммарной циркуляцией в верхнем двухсотметровом слое с учетом приливных течений для 2024 г. и аналогичные расчеты

³ <https://ichthyop.org/>

для 2025 г. (4–6). Пассивные трассеры, имитирующие икру и личинок, задавались начальным «пятном» в вершине «Северного» каньона Авачинского залива после подъёма в поверхностные слои за счет естественного гравитационного всплытия и внешних факторов. Анализируется горизонтальное перемещение частиц с 04.04.2024 г. (пик нереста) по 03.05.2024 г.; аналогичный период был взят и для 2025 г. Дополнительно были проведены 2 расчета дрейфа частиц под действием только приливных течений для выбранных периодов 2024 и 2025 гг.

На рис. 5 представлены результаты моделирования, относящиеся к концу каждого недельного интервала расчета для случая суммарной циркуляции в слое 0–200 м с учетом приливных течений. Из комбинированного рисунка видно, что в 2024 г. частицы не задерживались над каньонами Авачинского залива — быстро, в течение первых двух недель, транспортировались на широкий шельф юго-восточного побережья,

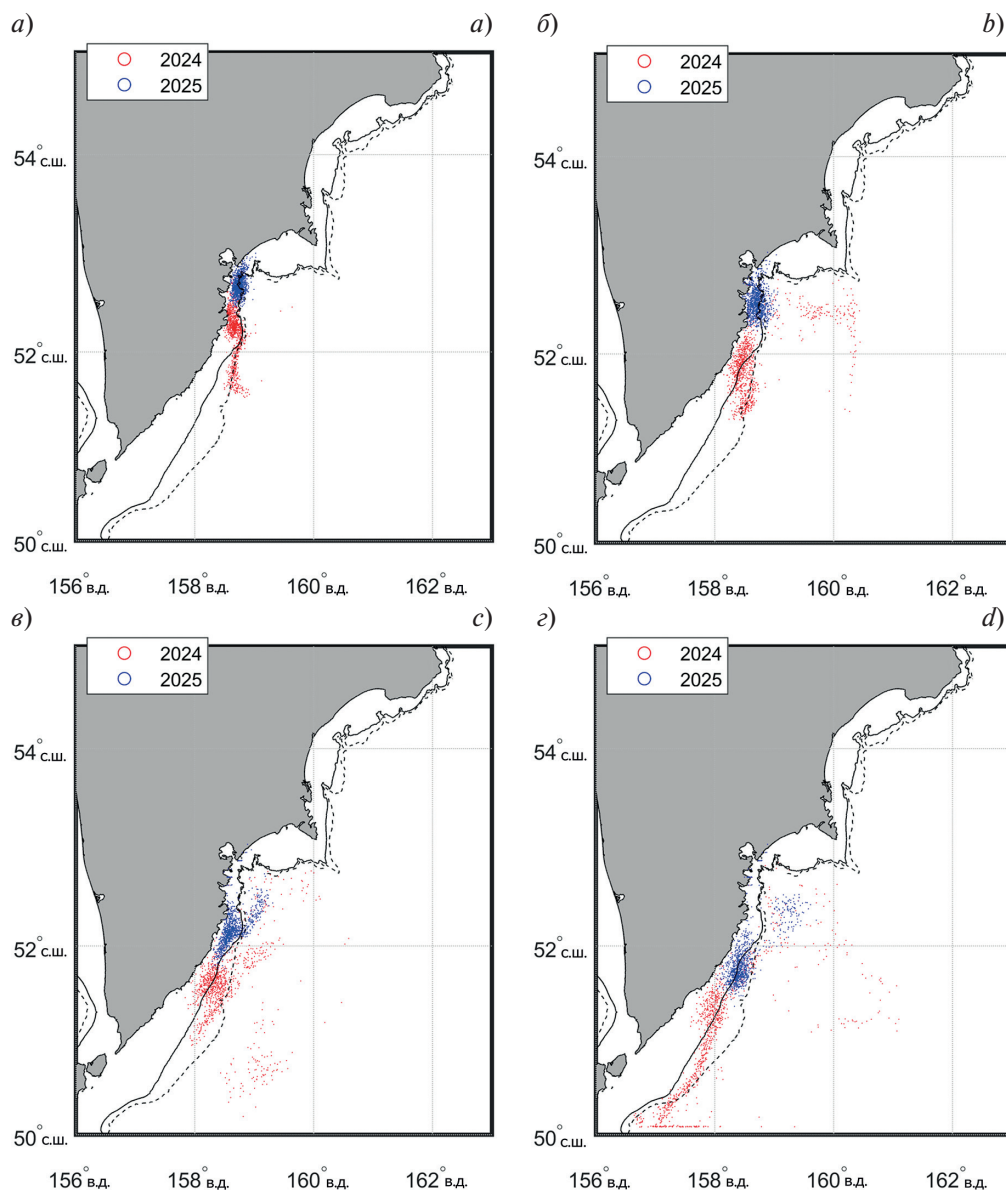


Рис. 5. Положение модельных частиц через 7 дней (а), 14 дней (б), 21 день (в) и 28 дней (г) после начала расчета для суммы фоновых, осредненных в слое 0–200 м, и приливных скоростей. Трассеры в 2024 и 2025 гг. представлены разным цветом. Показаны изобаты 200 (сплошная линия) и 500 м (пунктир)

Fig. 5. Position of modelled particles after 7 days (a), 14 days (b), 21 days (c), and 28 days (d) from the start of the simulation, for total velocities including background currents averaged over the 0–200 m layer and tidal currents. Tracers for 2024 and 2025 are shown in different colors. Depth contours of 200 m (solid line) and 500 m (dashed line) are indicated

частично (около четверти начального количества) переносились в открытый океан. В следующие 2 недели (рис 5, б, в) трассеры рассеивались над шельфом и подхватывались большим антициклоническим круговоротом. Частично трассеры поступали в глубоководные области открытого океана, но большая их часть уносилась к югу остаточной ветвью ККТ над континентальным склоном. Их скопление на южной границе области между 157°в.д. и 158°в.д. (рис. 5, г) вызвано алгоритмическим несовершенством реализации граничных условий в ИСНТНУОР. К концу расчетного периода только небольшое количество трассеров осталось в прибрежной зоне (рис. 5, г).

В отличие от 2024 г. поведение модельных трассеров в 2025 г. существенно иное, особенно в первую половину месяца. Как видно из рис. 5, а, вследствие слабых фоновых течений частицы задерживались в мелководной части Авачинского залива и над верхней частью каньонов, а площадь «пятна» частиц увеличилась за счет рассеивания. Постепенно «пятно» медленно смещалось на юг вдоль побережья (рис. 5, б), и только к концу третьей недели вышло на обширную часть шельфа (рис. 5, в), причем большая часть трассеров осталась в прибрежной области побережья. Постепенно происходило рассеивание частиц, и к концу расчета их большая часть все еще оставалась на шельфе и над континентальным склоном компактным «облаком» (рис. 5, г). Анимированные рисунки, соответствующие расчетам на рис. 5, представлены в дополнительных материалах⁴.

Рассмотрим особенности переноса частиц при использовании в ИСНТНУОР различных типов циркуляции. На рис. 6 показаны результаты моделирования, относящиеся к окончанию месячного интервала расчета при учете/неучете разных факторов. Видно, что выбор течений при моделировании влияет не только на дальность распространения частиц от точки начального посева, но и на характер рассеивания. Дальше всего трассеры распространились при использовании только поверхностных течений (рис. 6, а), причем в 2024 г. все частицы значительно рассеялись либо над шельфом, либо в открытом океане, а в 2025 г. — сохранили свою компактность. Заметим, что приливные течения здесь не были приняты в расчет. Результаты моделирования при использовании средней в поверхностном 200-метровом слое циркуляции (и также без учета прилива) показаны на рис. 6, б. Отметим схожесть итоговой картины для ситуации 2024 г. на рис. 6, б с той, что была получена при использовании суммарной циркуляции 2024 г. (рис. 5, г или рис. 6, г). Здесь вклад поверхностных течений не так заметен. Напротив, в 2025 г. (рис. 5, б) почти все трассеры остались в мелководной части Авачинского залива, где средние в верхнем слое течения очень слабы. Рисунок 6, в, представляющий расчет с одним приливом, проясняет эту ситуацию. Приливные течения непрерывно за весь расчет рассеивают начальное «пятно» частиц на большой площади благодаря, прежде всего, осциллирующему гидрографу скоростей в сочетании с нелинейным приливным остаточным переносом (см. раздел 2.2). Такой процесс способствует попаданию частиц в более глубокую часть шельфа и на континентальный склон, где уже средние в 200-метровом слое скорости достаточно значимы, чтобы унести частицы от места их «посева». Это и иллюстрирует рис. 6, г, а анализ этой ситуации с использованием суммарной циркуляции уже был выполнен ранее при описании рис. 5, г.

Результаты моделирования трассеров, очевидно, зависят от текущей системы течений в регионе (в том числе и от точности реанализа или прогноза фоновой циркуляции), однако реалистичное описание дрейфа требует также и учета приливной компоненты динамики вод. К сожалению, верифицировать результаты моделирования трассеров не представляется возможным ввиду отсутствия надежной натурной информации о площадном распределении икры и личинок минтая и их динамике. Однако будет целесообразно сразу указать причины, которые, вероятно, окажут влияние на результаты и внесут дополнительные различия между расчетными картинами распределения пассивных трассеров и результатами натурных наблюдений. Как уже было отмечено, точность расчета фоновых течений, особенно в прибрежной зоне, безусловно, влияет на модельный результат. Эти причины могут возникнуть также в ходе параметризации в ИСНТНУОР процессов развития (инкубации) икры и личинок, например, таких как смертность от внешних неблагоприятных условий, влияющих на общее количество частиц, или способность личинок на поздних стадиях к самостоятельному перемещению, в том числе вертикальные кормовые миграции, или более сложное поведение частиц у берега и других факторов. Важный момент заключается в следующем: количество нерестилищ в действительности больше, чем использовано в наших модельных расчетах, а интенсивность и пик нереста в них меняется от года к году. Кроме того, в ИСНТНУОР могут быть учтены другие динамические процессы, такие как ветровой и волновой дрейф. Учет вышеперечисленных факторов и процессов требует больше исходной информации и увеличивает число вариантов модельных расчетов. Однако мы этого

⁴ Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2024. URL: <https://rutube.ru/video/95287b1f7a5d1e26244b446defbcece6/> (дата обращения: 23.11.2025); Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2025. URL: <https://rutube.ru/video/4d0d5eadb53a22c9d7ff1987f169f76f/> (дата обращения: 23.11.2025)

не сделали на данном этапе исследования, поскольку ставилась цель оценить влияние циркуляции вод на перенос икры и личинок в разные по динамической ситуации годы, а изучить это влияние в чистом виде возможно, лишь выбрав идентичные нерестовые условия.

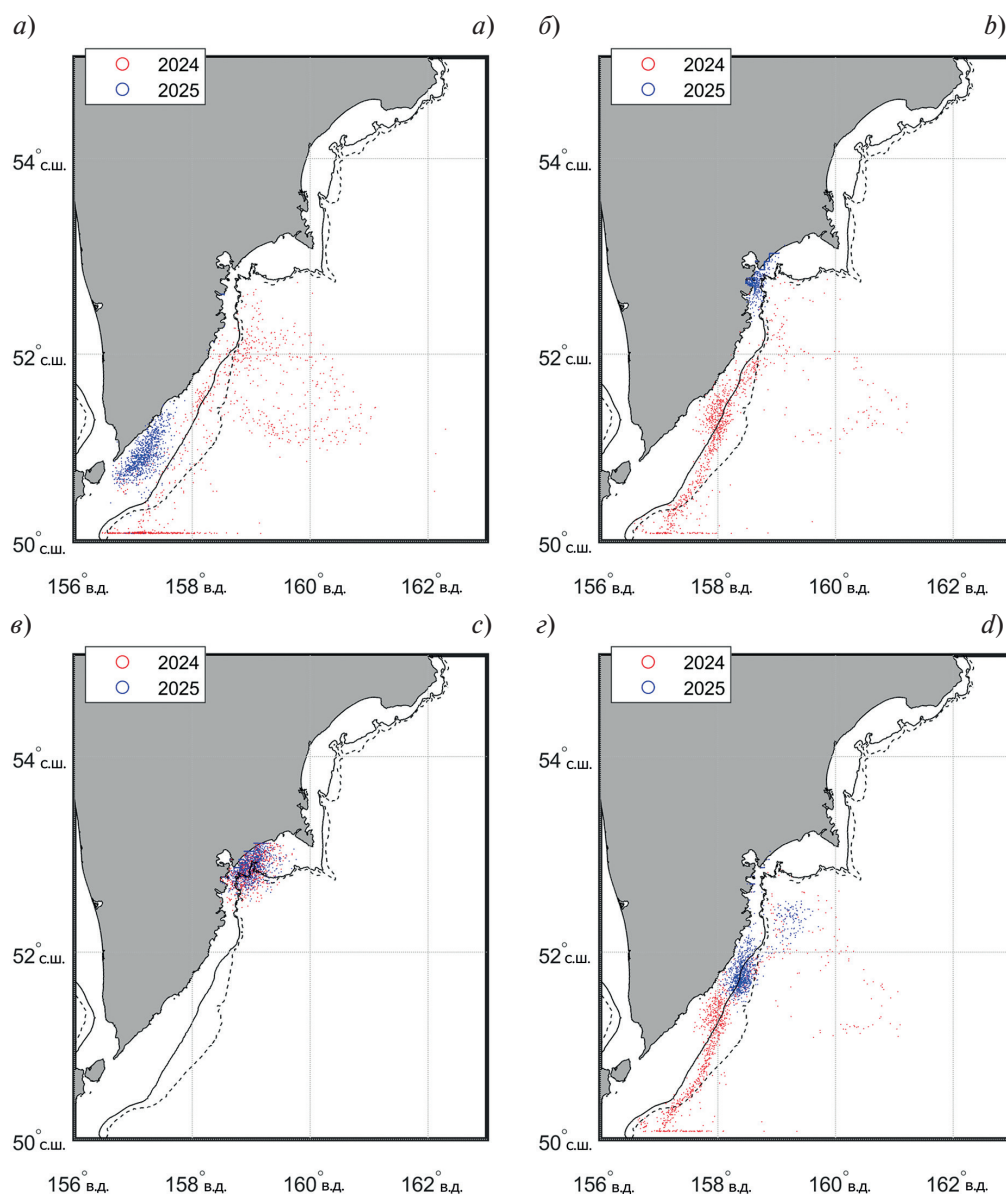


Рис. 6. Положение частиц в конце расчетного интервала, полученное с помощью поверхностных течений (а), течений, осредненных в слое 0–200 м (б), приливных течений (в) и суммарных (приливных и осредненных в слое 0–200) течений (г). Трассеры в 2024 и 2025 гг. представлены разным цветом. Показаны изобаты 200 (сплошная линия) и 500 м (пунктир) (здесь фрагмент г повторяет фрагмент г на рис. 5)

Fig. 6. Particle positions at the end of the simulation interval obtained using surface currents (a), currents averaged over the 0–200 m layer (b), tidal currents (c), and total currents (tidal plus 0–200 m averaged) (d). Tracers for 2024 and 2025 are shown in different colors. Depth contours of 200 m (solid line) and 500 m (dashed line) are indicated (panel d is the same as panel d in Fig. 5)

4. Заключение

На основе подготовленных данных для 2024 и 2025 гг. выполнено моделирование переноса пассивных частиц, имитирующего дрейф икры и личинок минтая, из очага глубоководного нереста, расположенного в вершине «Северного» каньона Авачинского залива. Согласно новым данным, это нерестилище являет-

ся условным центром воспроизводства восточнокамчатской популяции минтая. Считается, что в каньоне существуют благоприятные в динамическом отношении условия для развития икры в апреле-мае. По мере развития икра всплывает и попадает под действие течений в поверхностном слое океана, которые могут переносить ее и выклевавшихся личинок в области с различными термохалинными и кормовыми условиями. На вертикальное перемещение частиц могут оказывать и внешние факторы, например, внутренний прилив, наблюдаемый в вершине каньона.

Дрейф частиц за расчетный период существенно зависит от сформировавшейся в нерестовом периоде циркуляции. Модельные расчеты показали, что по сравнению с ситуацией 2024 г. частицы в 2025 г. перемещались медленнее и оставались ближе к побережью в районах с более теплыми и потенциально богатыми пищей водами, что повышает шансы на выживание ихтиопланктона и развития молоди рыб. В 2024 г. значительное количество частиц рассеивалось на акватории или дрейфовало в воды открытого океана, где условия выживания икры и личинок менее благоприятные.

Использование течений, осредненных в верхнем слое, вместо поверхностных течений является оправданным в предложенной постановке задачи, так как не вся икра или личинки попадают в поверхностные слои моря. Результаты моделирования с набором данных из поверхностной циркуляции указывают на то, что те частицы, которые все же оказываются в поверхностных слоях моря быстро выносятся из районов со спокойными гидродинамическими условиями и в большей степени рассеиваются по обширной акватории. Есть данные, указывающие на то, что личинки минтая в Авачинском заливе развиваются ниже слоя фотосинтеза [27], что подтверждает предпочтительность использования средних в верхнем слое течений.

На примере набора данных 2025 г. показано, что добавление приливных течений в фоновую циркуляцию способствует локальному рассеиванию частиц и может придать дополнительный импульс к их перемещению, препятствуя концентрации частиц в небольшой области. Насколько это важно для выживания икры и личинок минтая, остается неясным и требует новых исследований, в том числе специально спланированных ихтиопланктонных съёмок.

На основании результатов исследования можно сделать два предварительных вывода. Первый вывод заключается в том, что по нашим оценкам 2025 г. был более благоприятным по динамической ситуации для выживания и развития ранних стадий развития минтая, чем 2024 г. Насколько этот «прогноз» оправдается, покажет ближайшее будущее. Второе соображение касается определения места, где можно ожидать скопления ихтиопланктона в результате его дрейфа системой течений. Как следует из рис. 5, в, это — прибрежная область с характерным изменением ширины шельфа в районе, близком к точке 158.5°в.д., 52.25°с.ш., где как фоновые, так и приливные течения ослабевают.

Очевидно, что следующий этап исследований будет связан с получением новых ихтиопланктонных данных и развитием региональной трехмерной модели, учитывающей многообразие динамических процессов и особенности гидрологии региона.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-17-00174, <https://rscf.ru/project/23-17-00174>.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-17-00174, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00174/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Дополнительные материалы

Результаты расчетов, соответствующие рис. 6, представлены в анимации интерфейса ICHTHYOP для ситуации 2024 г.: Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2024 (<https://rutube.ru/video/95287b1f7a5d1e26244b-446defbcece6/>) и 2025 г.: Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2025 (<https://rutube.ru/video/4d0d5ead-b53a22c9d7ff1987f169f76f/>).

Supplementary Materials

Simulation results corresponding to Fig. 6 are presented as animations from the ICHTHYOP interface for 2024: Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2024 (<https://rutube.ru/video/95287b1f7a5d1e26244b446defbcece6/>) and 2025: Mercator-Fesom-200m_ichthyop_Apr2025 (<https://rutube.ru/video/4d0d5eadb53a22c9d7ff1987f169f76f/>).

Литература

1. Золотов О.Г., Антонов Н.П. О популяционной структуре восточнокамчатского минтая // Тресковые дальневосточных морей. Владивосток: ТИНРО, 1986. С. 43–50.
2. Антонов Н.П. Биология и динамика численности восточнокамчатского минтая: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ИБМ ДВО РАН, 1991. 23 с.
3. Буслов А.В. Минтай восточного побережья Камчатки: современное состояние запасов и рекомендации по рациональной эксплуатации // Известия ТИНРО. 2008. Т. 152. С. 3–17. EDN JVUNYX
4. Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Мельник Д.Я. и др. Экология глубоководного нереста восточнокамчатского минтая // Морской биологический журнал. 2026. Т. 11, № 2 (в печати).
5. Буслов А.В., Тепнин О.Б., Дубинина А.Ю. Особенности экологии нереста и эмбриогенеза восточнокамчатского минтая // Известия ТИНРО. 2004. Т. 138. С. 282–298. EDN НРМОУН
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т.Х. Берингово море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1999. 301 с.
7. Рогачев К.А., Шлык Н.В. Характеристики вихрей Камчатского течения // Метеорология и гидрология. 2019. № 6. С. 70–79. EDN TQTLGT
8. Andreev A., Pipko I. Water Circulation, Temperature, Salinity, and pCO₂ Distribution in the Surface Layer of the East Kamchatka Current // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. 10. 1787. EDN KJRDXH.
<https://www.doi.org/10.3390/jmse10111787>
9. Тепнин О.Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточнокамчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. № 66. С. 79–93. EDN WPQKWL. <https://www.doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>
10. Зимин А.В., Романенков Д.А., Коник А.А. и др. Разномасштабная вихревая динамика на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2024. № 3. С. 16–35. EDN VPBEOU
11. Пранц С.В. Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57, № 4. С. 387–400. EDN ESTQDT. <https://www.doi.org/10.31857/S0002351521040106>
12. Вакульская Н.М., Дубина В.А., Плотников В.В. Вихревая структура Восточно-Камчатского течения по спутниковым наблюдениям // Физика геосфер: сборник научных статей по избранным материалам XI Всероссийского симпозиума «Физика геосфер». Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2019. С. 73–81. EDN RFYYTR. <https://www.doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007>
13. Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А. и др. Внутрисуточная изменчивость вертикальной структуры вод и распределения икры минтая в глубоководных каньонах Авачинского залива: натурный эксперимент в период нереста // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 17, № 4. С. 77–89. EDN OZPOOW. [https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
14. Зверькова Л.М. Влияние естественных факторов и промысла на численность минтая северо-восточной части Японского моря // Экология, запасы и промысел минтая. Владивосток: ТИНРО, 1981. С. 28–40.
15. Давыдов И.В. О сопряженности развития океанологических условий в основах рыбопромысловых районах дальневосточных морей // Известия ТИНРО. 1984. Т. 109. С. 3–16.
16. Булатов О.А. Межгодовая изменчивость запасов восточноберинговоморского минтая // Изменчивость состава ихтиофауны, урожайности поколений и методы прогнозирования запасов рыб в северной части Тихого океана: Сборник научных трудов / Министерство рыбного хозяйства СССР Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии. Владивосток: ТИНРО, 1988. С. 4–16. EDN FUPRYA.
17. Балыкин П.А. Биология и состояние запасов минтая западной части Берингова моря: Автореф. дис...канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский: ТИНРО, 1990. 23 с.
18. Науменко Н.И., Балыкин П.А., Науменко Е.А., Шагинян Э.Р. Многолетние изменения в пелагическом ихтиоценозе западной части Берингова моря // Известия ТИНРО. 1990. Т. 111. С. 49–57. EDN QBSUIL
19. Варкентин А.И., Сергеева Н.П. Промысел и размерно-возрастной состав минтая *Theragra chalcogramma* Pallas (*Gadidae*) в промысловых уловах в восточной части Охотского моря // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2002. Вып. 6. С. 75–87. EDN XYSPKX

20. Фигуркин А.Л. Океанологические условия шельфа и склона Охотского моря в холодную половину года и их влияние на нерест минтая: Автореф. ... канд. географ. наук. Владивосток: ТИНРО. 2003, 23 с. EDN NMONJX
21. Варкентин А.И., Тепнин О.Б., Саушкина Д.Я., Зимин А.В., Свергун Е.И. Урожайность поколений восточнокамчатского минтая и некоторые причины ее обуславливающие // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: Материалы XXV Всероссийской научной конференции, посвящённой 130-летию со дня рождения выдающегося российского исследователя ихтиофауны Дальнего Востока, д. б. н. Г.У. Линдберга (Петропавловск-Камчатский, 14–15 ноября 2024 г.). Петропавловск-Камчатский; М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2024. С. 206–212.
22. Prants S.V., Budyansky M.V., Lobanov V.B., Sergeev A.F., Uleysky M.Y. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trench eddies // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. 125. e2020JC016187. EDN EKJHNS. <https://www.doi.org/10.1029/2020JC016187>
23. Кивва К.К., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Пранц С.В. Анализ пространственно-временной изменчивости распространения тихоокеанских вод в Охотском море на основе лагранжева подхода // Труды ВНИРО. 2023. Т. 193. С. 101–118. EDN IGNMDJ. <https://www.doi.org/10.36038/2307-3497-2023-193-101-118>
24. Будянский М.В., Пранц С.В., Самко Е.В., Улейский М.Ю. Выявление и лагранжев анализ океанографических структур перспективных для промысла кальмара Бартрама (*Ommastrephes bartramii*) в районе Южных Курил // Океанология. 2017. № 5. С. 720–730. EDN ZMDPMR. <https://www.doi.org/10.7868/S0030157417050069>
25. Будянский М.В., Кулик В.В., Кивва К.К., Улейский М.Ю., Пранц С.В. Лагранжев анализ тихоокеанских вод в Охотском море на основе спутниковых данных в приложении к промыслу минтая // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 47–59. EDN HFUIDZ. <https://www.doi.org/10.31857/S0205961422050050>
26. Будянский М.В., Удалов А.А., Лебедева М.А., Белоненко Т.В. Оценка загрязнения вод Южно-Курильской рыболовной зоны России радиоактивными водами АЭС «Фукусима-1» на основе лагранжева моделирования // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 515, № 1. С. 164–174. EDN OYZZVY. <https://www.doi.org/10.31857/S2686739724030212>
27. Ильин О.И., Сергеева Н.П. Оценка убыли и продукции икры минтая (*Theragra chalcogramma*) в каньонах Авачинского залива // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. Вып. 34. С. 81–86. EDN STANDH
28. Булатов О.А. Вертикальное распределение икры и личинок минтая // Вопросы рыболовства. 2017. Т. 18, № 3. С. 269–285. EDN ZFTKMN
29. Androsov A., Fofonova V., Kuznetsov I., et al. FESOM—C v.2: coastal dynamics on hybrid unstructured meshes // Geoscientific Model Development. 2019. Vol. 12. P. 1009–1028. EDN: SDGPOH. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1009-2019>
30. Романенков Д.А., Софьина Е.В., Родикова А.Е. Моделирование баротропного прилива у юго-восточного побережья п-ва Камчатка с учетом точности глобальных приливных моделей в северо-западном регионе Тихого океана // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16, № 4. С. 45–62. EDN XTTLBK. [https://www.doi.org/10.5987/2073-6673.2023.16\(4\)-4](https://www.doi.org/10.5987/2073-6673.2023.16(4)-4)
31. Barrier N., Verley P., Lett C., Mullon C. Ichthyop: A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics (3.4.0.6). Zenodo. 2025. <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.4243813>
32. Lett C., Verley P., Mullon C., et al. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics // Environmental Modelling and Software. 2008. 23(9). P. 1210–1214. <https://www.doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.02.005>

References

1. Zolotov OG, Antonov NP. Concerning the population structure of the Eastern Kamchatka walleye pollock. *Treskovyye dalnevostochnykh morey*. Vladivostok: TINRO; 1986:43–50. (In Russ).
2. Antonov NP. Biology and dynamics of abundance of the eastern Kamchatka pollock. Extended Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation. Vladivostok: DVO AN SSSR; 1991. 23 p. (In Russ).
3. Buslov AV. Walleye pollock of the eastern Kamchatka coast: Modern state of stock and recommendations for rational exploitation. *Izvestia TINRO*. 2008;152:3–17. (In Russ).
4. Varkentin AI, Tepnin OB, Melnik DY, et al. Ecology of deep-water spawning of East Kamchatka Pollock. *Marine Biological Journal*. 2026;11(2). (In press).
5. Buslov AV, Tepnin OB, Dubinina AYU. Some features of spawn ecology and embryogenesis of the East Kamchatka walleye pollock. *Izvestia TINRO*. 2004;138:282–297. (In Russ).
6. Hydrometeorology and Hydrochemistry of Seas of the USSR. Edited by Terziev FS. Vol. 10. The Bering Sea, Issue 1. Hydrometeorological Conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 1999. 298 p. (In Russ).
7. Rogachev KA, Shlyk NV. Characteristics of the Kamchatka Current eddies. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019;44:416–423. <https://doi.org/10.3103/S1068373919060062>

8. Andreev A, Pipko I. Water circulation, temperature, salinity, and pCO₂ distribution in the surface layer of the East Kamchatka Current. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;10:1787. <https://doi.org/10.3390/jmse10111787>
9. Tepnin OB. Variability of hydrological conditions at spawning sites of East Kamchatka walleye pollock (*Gadus chalcogrammus*) in 2012–2022. *Issledovaniya Vodnyh Biologicheskikh Resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj Chasti Tihogo Okeana*. 2022;66:79–93. <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93> (In Russ).
10. Zimin AV, Romanenkov DA, Konik AA, et al. Multiscale eddies dynamics in the Pacific Ocean adjacent to the Kamchatka Peninsula and the Northern Kuril Islands. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2024;3:16–35.
11. Prants SV. Trench eddies in the Northwest Pacific: An overview. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57:341–353. <https://doi.org/10.1134/S0001433821040216>
12. Vakulskaya NM, Dubina VA, Plotnikov VV. Eddy structure of the East Kamchatka current according to satellite observations. Conference: Fizika geosfer. Vladivostok: V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute; 2019:73–81. <https://doi.org/10.35976/POI.2019.47.98.007> (In Russ)
13. Konik AA, Zimin AV, Atadzhanova OA, et al. Intra-day variability of vertical water structure and distributions walleye pollock eggs in the deep-sea canyons of Avacha Bay: A field experiment during the spawning period. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;17(4):77–89. [https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17\(4\)-6](https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2024.17(4)-6)
14. Zverkova LM. Impacts of natural factors and fishery on abundance of pollock in the northeastern Japan Sea. *Ekologiya, zapasy i promysel mintaya*. Vladivostok: TINRO; 1981:28–40. (In Russ).
15. Davydov IV. On the conjugacy of the development of oceanographic conditions in the foundations of fishing areas of the Far Eastern seas. *Izvestia TINRO*. 1984;109:3–16. (In Russ).
16. Bulatov OA. Interannual variability of East Bering Sea pollock stocks. In: *Variability of ichthyofauna composition, productivity of generations and methods for forecasting fish stocks in the northern part of the Pacific Ocean*. Vladivostok: TINRO; 1988:4–16. (In Russ).
17. Balykin PA. Biology and status of pollock stocks in the western Bering Sea: Abstract of Cand. Sci. (Biol.). Petropavlovsk-Kamchatsky: TINRO; 1990. 23 p. (In Russ).
18. Naumenko NI, Balykin PA, Naumenko EA, Shaginyan ER. Long-term changes in pelagic ichthyofauna of the western part of Bering Sea. *Izvestia TINRO*. 1990;111:49–57. (In Russ).
19. Varkentin AI, Sergeeva NP. Fisheries and size-age composition of walleye pollock in the catches in the the east part of the Sea of Okhotsk. The researchers of the aquatic biological resources of Kamchatka and of the north-west part of the Pacific Ocean. 2002;6:75–86. (In Russ).
20. Figurkin AL. Oceanological conditions of the shelf and slope of the Sea of Okhotsk in the cold half of the year and their influence on pollock spawning: Abstract of a dissertation for a candidate of geographical sciences. Vladivostok: TINRO; 2003. 23 p. (In Russ).
21. Varkentin AI, Tepnin OB, Saushkina DY, Zimin AV, Svergun EI. Yield of East Kamchatka pollock generations and some of the reasons for it. Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters Materials of XV All-Russian scientific conference Petropavlovsk-Kamchatsky, November 14–15, 2024. (In Russ).
22. Prants SV, Budyansky MV, Lobanov VB, Sergeev AF, Uleysky MY. Observation and Lagrangian analysis of quasi-stationary Kamchatka trench eddies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020;125: e2020JC016187. <https://doi.org/10.1029/2020JC016187>
23. Kivva KK, Budyansky MV, Uleysky MY, Prants SV. Analysis of spatio-temporal variability of Pacific water distribution in the Sea of Okhotsk based on Lagrangian approach. *Trudy VNIRO*. 2023;193:101–118. (In Russ). <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-193-101-118>
24. Budyansky MV, Prants SV, Samko EV, et al. Identification and Lagrangian analysis of oceanographic structures favorable for fishery of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the South Kuril area. *Oceanology*. 2017;57:648–660. <https://doi.org/10.1134/S0001437017050034>
25. Budyansky MV, Kulik VV, Kivva KK, et al. 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*. 2022;58:1427–1437. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120088>
26. Budyansky MV, Udalov AA, Lebedeva MA, Belonenko TV. Assessment of Pollution of the Waters in the South Kuril Fishing Zone of Russia by Radioactive Waters from the Fukushima-1 NPP Based on Lagrangian Modeling. *Doklady Earth Sciences*. 2024;515(1):164–174. (In Russ). <https://doi.org/10.31857/S2686739724030212>
27. Ilin OI, Sergeeva NP. Estimation of egg losses waste and production of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the canyons of the Avachinsky Gulf. The researches of the aquatic biological resources of Kamchatka and the North-West Part of the Pacific Ocean. 2014;34:81–86. (In Russ).
28. Bulatov OA. The vertical distribution of the eggs and larvae of walleye Pollock. *Problems of Fisheries*. 2017;18(3):269–285. (In Russ).

29. Androsov A, Fofonova V, Kuznetsov I, et al. FESOM—C v.2: coastal dynamics on hybrid unstructured meshes. *Geoscientific Model Development*. 2019;12:1009–1028. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-1009-2019>
30. Romanenkov DA, Sofina EV, Rodikova AE. Modeling of Barotropic Tide off the Southeastern Coast of the Kamchatka Peninsula in View of the Accuracy of Global Tidal Models in the Northwest Pacific Ocean. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2023;16(4):45–62. [https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-4](https://www.doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4)
31. Barrier N, Verley P, Lett C, Mullon C. Ichthyop: A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics (3.4.0.6). Zenodo; 2025. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4243813>
32. Lett C, Verley P, Mullon C, et al. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling and Software*. 2008;23(9):1210–1214. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.02.005>

Об авторах

РОМАНЕНКОВ Дмитрий Анатольевич, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат географических наук, ORCID: 0009-0005-0374-486X, WoS ResearcherID: U-8280-2017, Scopus AuthorID: 6506855768, SPIN-код (РИНЦ): 4872-3349, e-mail: dmromanenkov@yandex.ru

СОФЬИНА Екатерина Владимировна, ведущий научный сотрудник СПбФ ИО РАН, кандидат физико-математических наук, ORCID: 0000-0001-9206-8253, WoS ResearcherID: E-3920-2014, Scopus AuthorID: 23111468200, SPIN-код (РИНЦ): 8904-4934, e-mail: sofjina_k@mail.ru

МАХОВИКОВ Алексей Дмитриевич, аспирант СПбГУ, ORCID: 0009-0007-7680-1380, SPIN-код: 5673-7287, e-mail: alexmakhovikov@gmail.com

ВИНОГРАДОВА Ирина Константиновна, студентка СПбГТИ(ТУ), ORCID: 0009-0007-8841-9525, WoS ResearcherID: NQE-6763-2025, SPIN-код: 5889-0010, e-mail: irakvinogradova@gmail.com

ВАРКЕНТИН Александр Иванович, ведущий научный сотрудник КамчатНИРО, кандидат биологических наук, ORCID: 0000-0002-1735-0088, WoS ResearcherID: ADK-2588-2022, SPIN-код (РИНЦ): 6126-6033, e-mail: a.varkentin@kamniro.vniro.ru

ЗИМИН Алексей Вадимович, главный научный сотрудник СПбФ ИО РАН, доктор географических наук, ORCID: 0000-0003-1662-6385, WoS ResearcherID: C-5885-2014, Scopus AuthorID: 55032301400, SPIN-код (РИНЦ): 9833-3460, e-mail: zimin2@mail.ru

МЕЛЬНИК Дарья Ярославовна, старший специалист КамчатНИРО, ORCID: 0000-0001-8913-0386, WoS ResearcherID: AAY-8161-2021, Scopus AuthorID: 57219658866, SPIN-код (РИНЦ): 4059-2130, e-mail: d_melnik@rambler.ru