



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра ПО и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

«Моделирование распространения ранних стадий развития
восточно-камчатской популяции минтая в Лагранжевой постановке»

Исполнитель: Виноградова Ирина Константиновна

Руководитель: к.г.н., Хаймина Ольга Владимировна

Консультант: к. ф.-м. н., Софьина Екатерина Владимировна

«К защите допускаю»

И.о. заведующий кафедрой _____

(подпись)

Кандидат географических наук

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«10» 06 2025.

г. Санкт-Петербург

2025

Содержание:

Введение	3
1. Общее описание исследуемого района	6
1.1 Батиметрия.....	6
1.2 Гидрология акватории.....	7
1.3 Не приливная циркуляция района	9
1.4 Приливы.....	10
1.5 Ледовая обстановка в весенний период	11
2. Восточнокамчатская популяция минтая	13
2.1 Жизненный цикл рыб	13
2.2 Нерест восточнокамчатского минтая	14
3. Исходные данные течений	16
3.1 Не приливная циркуляция (продукт GLORYS).....	16
3.2 Приливная циркуляция	17
3.3 Суммарная циркуляция: приливная и не приливная	18
4. Программное обеспечение «ICHTHYOP»	20
4.1 Лагранжевая постановка	20
4.2. Описание программного продукта	20
5. Результаты работы	23
5.1 Расчет перемещения трассеров течениями в приповерхностном слое в 2024 и 2025 гг.	26
5.2 Расчет перемещения трассеров фоновыми течениями в усредненном 200-метровом слое без учета приливной циркуляции в 2024 и 2025 гг.	32
5.3 Расчет перемещения трассеров фоновыми течениями в усредненном 200-метровом слое с учетом суммарной приливной циркуляции в 2024 и 2025 гг.	39
Заключение	45
Литература.....	49

Введение

Популяция дальневосточного минтая — важный промысловый объект. Россия является одним из основным импортеров минтая, при ежегодном вылове в несколько млн. тонн рыбы. В свою очередь, её вылов сильно зависит от выживаемости ранних стадий развития ихтиопланктона.

Востокакамчатская популяция минтая водится у восточного побережья полуострова Камчатка, а нерестится в глубоководных каньонах Авачинского и Кроноцкого заливов. При особых условиях течений и приливов, икра выносится на шельф у юго-восточного побережья полуострова Камчатка, и у северных Курильских островов. Пик нереста минтая происходит весной, в основном, в третьей декаде апреля [Золотов, Антонов, 1986; Буслов, 2004], но может и в последующие месяцы. На глубоководный нерест приходится около 90%, попадая в сложные гидрологические условия, изрезанный рельеф каньонов в зависимости от динамических воздействий (циркуляции и/или приливных условий) икра может как остаться в каньоне, так и претерпеть влияние динамических условий, и её вынесет в открытый океан, где уже нет пищи для дальнейшего развития следующих стадий. Благоприятными, для развития и выживания считаются условия, когда икра остается внутри глубоководных каньонов — на неё не влияют течения и нет сильных изменений гидрологических характеристик. Одной из задач промысловой океанологии является получение информации о распространении ранних стадий развития промыслового вида.

Для воспроизведения сплошных сред существуют два подхода описания движения воды в океане. Первый подход — Эйлера, подходит для привязки математического описания движения жидкости по пространству. А Лагранжев подход рассматривает перемещение отдельной частицы жидкости в пространстве. Первый подход используют для описания динамики в объемных природных водных объектах определенного исследуемого района из общей интересующей области, разделяя ее на ячейки и вычисляя интересующую величину в узлах сетки. Для отслеживания транспорта трассеров чаще

используют Лагранжев подход, он рассматривает передвижение частицы, в исследуемом районе. Как пример сравнения разных типов наблюдений, можно привести измерения течений со стационарных платформ (пирс, вышки, заякоренные суда/автономные буйковые станции и т.п.) и с помощью дрейфующих поплавков (буи, дрейтеры), соответственно (Кивва, Будянский и др. 2023) [2].

В работах М. В. Будянского и др. приводятся примеры на основе Лагранжева метода оценок перспектив промысла кальмара Бартрама в районе Южных Курил. Целью работы был анализ взаимосвязи океанологических мезомасштабных структур с местами промысла кальмара Бартрама. Расчеты проводились по среднесуточному полю скорости течений, восстановленному по альтиметрическим данным с пространственным разрешением $1/4^\circ$. Полученные результаты имели высокую перспективу на будущее, в том числе и потому, что карты мезомасштабных структур были рассчитаны с помощью лагранжева подхода. Такие карты имели более точную структуру интрузий, вихрей и тому подобное, что не проявляется на “мгновенных” эйлеровых картах, например распределение температуры поверхности океана [3].

Схожие исследовательские задачи на основе моделирования вертикального и горизонтального перемещений в Лагранжевом подходе были выполнены с использованием программного продукта Ichthyor. С помощью Ichthyor рассчитывался транспорт микропластика и беспозвоночных в заливе, и оценивались связи популяции альбулы и динамики океана. Работы основывались на принципе учета некоторых важных океанографических параметров: течения, температура морской воды, соленость и концентрация chl-a, которые влияют на численность пелагических рыб (Apriansyah et al., 2022; Brosset et al., 2017; Ebango Ngando et al., 2020; Hendiarti et al., 2005; Ma'mun et al., 2019). Присутствовал учет и период жизнь личинки [4]. Минимальная функция программного обеспечения Ichthyor — это комплексная модель, включающая модуль плавучести для расчета вертикального смещения частиц в зависимости от плотности частиц, их

малой и большой оси, силы гравитации, плотности морской воды и кинематической вязкости (Parada et al., 2003).

Основная цель настоящей работы — установить траектории икры восточнокамчатской популяции минтая от мест глубоководного нереста под действием не приливных и приливных течений, оценить влияние приливов на перемещение ранних стадий развития ихтиопланктона.

1. Общее описание исследуемого района

Минтай *Gadus chalcogrammus* (до 2014 г. *Theragra chalcogramma* — Pallas, 1814) уже более пятидесяти лет, в мировом рыболовстве занимает первое место по объему добычи. Он обитает в Северо-Западной части Тихого океана, в ареал обитания входит Берингово, Охотское и Японское моря, в дополнение довольно крупные группы встречаются как в водах Восточной Камчатки, так и в океанических водах Курильских островов. В ареал обитания, интересующего вида минтая, входит побережье Восточной Камчатки и прилежащего шельфа у Северных Курильских островов. Сам минтай имеет свойство нереститься в глубоководных Авачинских каньонах и на шельфе (Рисунок 1) [6].

1.1 Батиметрия

Рассмотрим батиметрию Авачинского района и прилегающего к нему шельфа (Рисунок 1). Юго-восточная Камчатка представляется шельфом, континентальным склоном и камчатской ветвью Курило-Камчатского глубоководного желоба, имеет протяженность на северо-восток. Шельфовая зона определяется небольшим уклоном, а ширина достигает от 10 км у Авачинской бухты до 45 км в Авачинском заливе, наибольшая ширина на юге п-ова Камчатка, примерно 65-70 км. Переход к континентальному шельфу прослеживается внешней бровкой шельфа. Максимальные значения глубин данной бровки замечены до 700 метров для южной окантовки п-ова. В заливе проявляются двойные перегибы – появляется вторая бровка, которая разделяет мелководные и глубоководные участки шельфа (примерно на глубинах 130-140 метров). Континентальный склон Восточной Камчатки характеризуется довольно сложным строением и разнообразными типами рельефа. Характерной особенностью можно назвать наличие глубоководных каньонов в заливах, в том числе и в Авачинском – Северный, Средний и Южный. Здесь глубины доходят до 600 метров, а дно имеет неравномерную структуру [7].

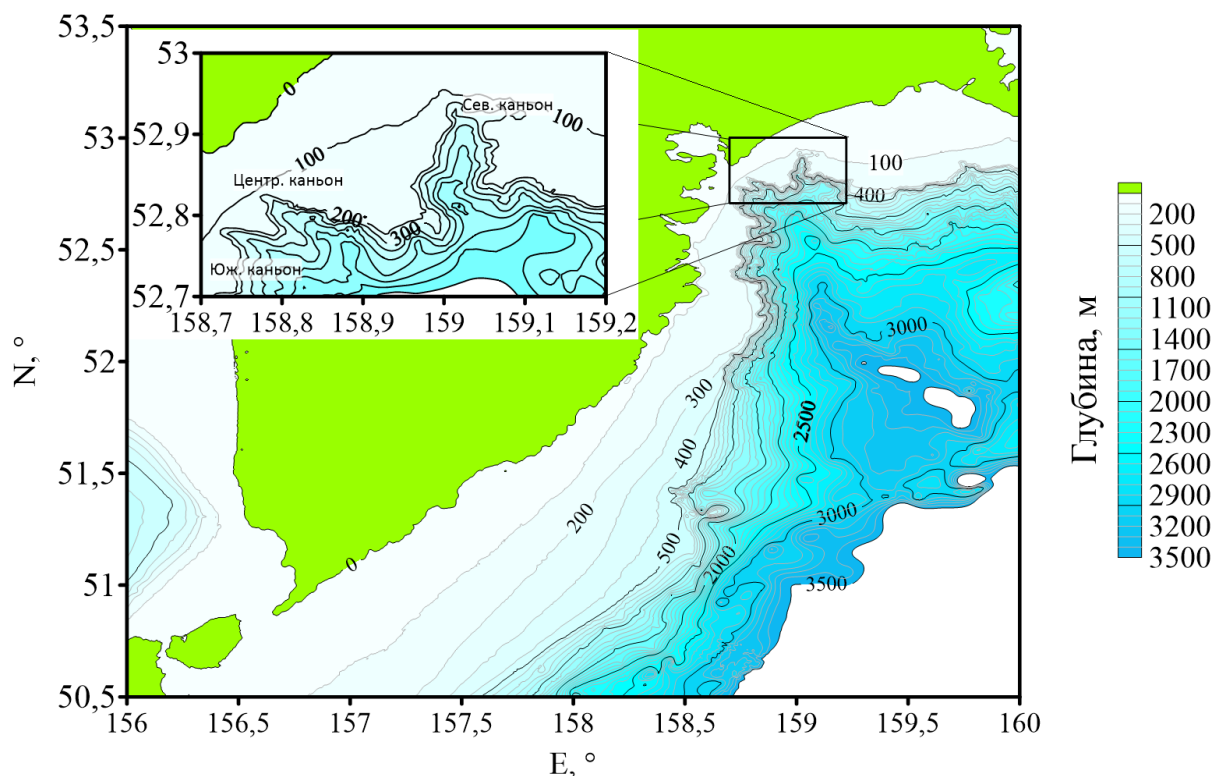


Рисунок 1. Батиметрия Авачинского залива и шельфа тихоокеанских вод у юго-восточного побережья Камчатки. На врезке представлены каньоны Авачинского залива.

1.2 Гидрология акватории

Температурный режим зоны прикамчатского региона формируется под влиянием холодного Берингоморского стока – Камчатское течение – и переноса теплых вод из места смешения течений Куроисио и Ойясио. Исследуемый район представляет собой сложную динамическую структуру и неравномерностью поля ветра. Основное течение у восточного побережья является Камчатское. Течение является северотихоокеанской частью циклонического круговорота (субарктический круговорот) (Рисунок 2). Это холодное течение, которое начинается у Корякского побережья. В дополнение появляются положительные аномалии тепла Курило-Камчатского течения в

холодных поверхностном и промежуточном слоях. Ось течения имеет сильные меандры [9].

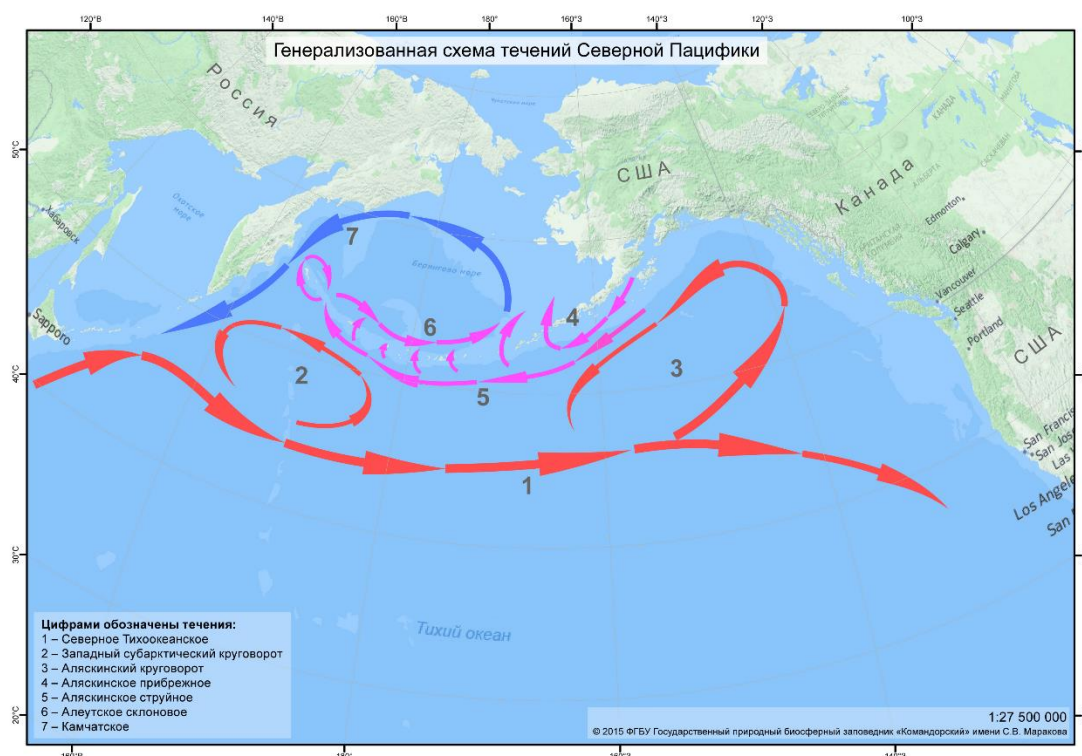


Рисунок 2. Циклонический круговорот Северо-западной Пацифики [8].

Вертикальная структура вод относится к субарктическому типу, она характеризуется наличием поверхностного, подповерхностного промежуточного и глубинного слоёв. Как было выделено выше, здесь смешаются теплое течение Куросио и холодное Камчатское, они создают повышенную термодинамическую структуру вод. Рассмотрим распределение вод на примере гидрологических съемок. Верхний квазиоднородный слой проявляется в слое до 150 метров, он нагревается в теплые месяцы и охлаждается в холодные, с ядром $T = 1,5 - 3,0^{\circ} \text{C}$ на горизонте в 100-200 метров. В подповерхностном слое формируются водные массы, которые прогреваются за счет внутренних динамических процессов. Глубинные слои не подвержены большим изменениям и значения температуры колеблются $\pm 1^{\circ} \text{C}$ (Рисунок 3).

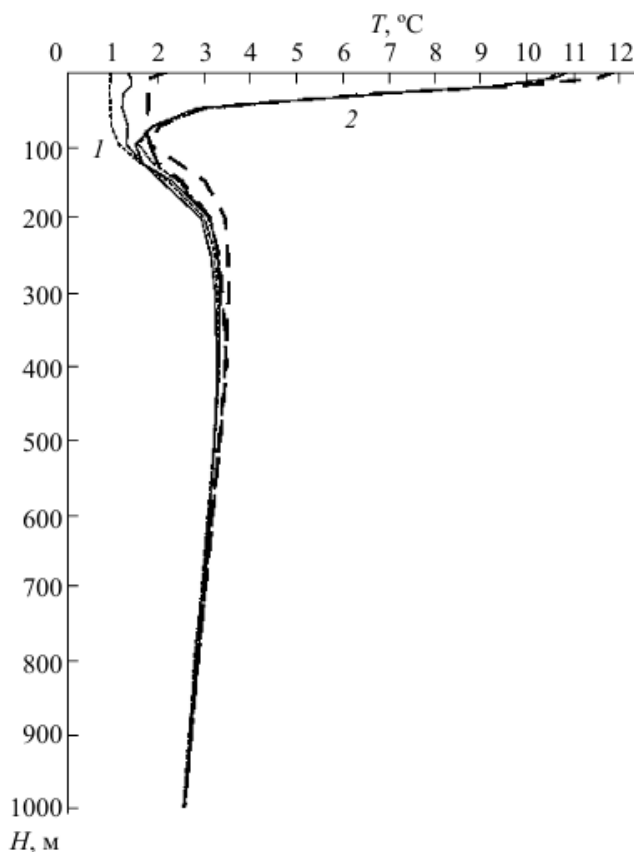


Рисунок 3. Средние вертикальные распределения значения температуры воды для холодного (1) и теплого (2) сезонов в субарктической зоне в различные фазы климата: 1960–1974 (непрерывная), 1975–1999 (штрихпунктирная), 2000–2014 гг. (пунктирная) [9].

1.3 Не приливная циркуляция района

Восточный район Камчатки имеет высокую частоту воспроизведения вихревых структур, они отделяются от основного Камчатского течения, а происходит это за счёт сложного материкового склона, вдоль которого и движется основной сток. Зачастую основная струя отклоняется под действием топографии и неустойчивости потока. Авачинский залив имеет высокую частоту образования мезомасштабных вихрей [10]. Ширина основной струи по разным данным колеблется от 80 до 300 км, а удаление от побережья — от 100 до 120 км (Khen, 1989; Вакульская и др., 2019) [9] [11] [12].

При исследовании среднесуточной карты скорости и направления течений у юго-восточного побережья п-ова Камчатка в районах наибольшего нереста восточнокамчатского минтая преобладают незначительные скорости течений. Скорости вдоль Авачинского залива достигают до 0,4 м/с, а в самом заливе значения иногда не достигают и 0,05 м/с. Вихри, в основном, возникают у мыса Шипунского, имеют масштаб мезо и движутся на юго-запад, вдоль шельфа. В районе глубинных каньонов Авачинского залива также прослеживается слабая циркуляция, и это способствует минимальному разбросу икры и ее заглупления [12].

1.4 Приливы

Одним из интересов к данному региону полуострова Камчатка обусловлен недостаточными знаниями о влиянии приливной динамики на процессы выживания восточнокамчатского минтая на ранних стадиях его развития. Есть предположительные свидетельства того, что приливная динамика акватории может участвовать в транспортировке икры промысловых рыб, в том числе и минтая [13].

Акватория восточной Камчатки находится в северо-западной части Тихого океана. Приливные течения здесь отличаются доминированием суточных составляющих в спектре смешанных колебаний и достаточно высокими приливыми колебаниями в Пенжинской губе, Охотское море [15].

В дополнение, особенностью региона является динамика длинноволновых процессов. Приливы, которые генерируются и распространяются по шельфу восточной Камчатки, являются разновидностью топографических волн Россби. Они, в свою очередь, при определенных условиях, имеют свойство поглощать энергию основного баротропного прилива субинерционных гармоник в момент его рассеивания на сложном рельефе дна у берегов Камчатки. Сложность их исследования состоит в том, что такие волны на порядок короче основных

энергонесущих волн Кельвина, наблюдаемых в мезомасштабной изменчивости характеристик колебания уровня и течений, что может исказить как модель циркуляции, так и сравнения модели с данными наблюдений [15].

Приливы вдоль восточного побережья Камчатки могут быть описаны волной Кельвина. Часть энергии суточной волны Кельвина, что передаётся шельфовым волнам, создает благоприятные условия для преобладания в данном районе суточного прилива. При рассмотрении только суточной гармоник видно, как она увеличивается от открытых вод к восточному побережью Камчатки, а если быть точнее, то к северному побережью Авачинского залива и к центральной части юго-восточного шельфа п-ова Камчатка. Здесь значения высот варьируются от 0,34 до 0,4 м [15]. Рассматривая значения скоростей основных гармоник приливных течений в Авачинском заливе, можно обнаружить локальные максимумы на банке, южнее мыса Шипунский (до 0,4 м/с), над глубоководными каньонами (до 0,2 м/с), и над всем шельфом юго-восточной Камчатки (до 0,25 м/с) [15].

1.5 Ледовая обстановка в весенний период

Начиная с ноября лед нарастает в Охотском, Беринговом морях и в заливах восточной Камчатки (в основном в бухтах и по берегу заливов), и в некоторых северных акваториях продолжается до июня. В Авачинском заливе и на шельфе лед встречается до начала нереста минтая. Но он может переносится незначительным количеством Курило-Камчатским течением и оставаться в заливах у берегов.

При наличии льда на акватории есть два различных исхода поведения икры: перемещение икры в слой воды под лед или транспорт частиц течениями. Известно, что во время эмбрионального развития, плотность икринок уменьшается, благодаря чему они постепенно поднимаются к поверхности. Икринки, что плавали на поверхности акватории свободной ото льда, при наличии льда опускались глубже, под него. Отрицательные температуры имеют

свойство замедления протекания первой и второй стадий развития икры. Так же в сериях искусственных инкубаций [16] отмечается аномальные развития эмбриона и достаточно высокая смертность икры.

2. Восточнокамчатская популяция минтая

Популяция минтая, что имеет ареал нереста у восточного побережья п-ова Камчатка, называется восточнокамчатским минтаем *Gadus chalcogrammus* (до 2014 г. *Theragra chalcogramma* — Pallas, 1814). Рыба принадлежит к семейству тресковых, роду минтаевых и относится к холодолюбивым видам рыб. Вид ведет придонный пелагический образ жизни. Она размножается в холодные времена года, нерест порционный, а икра пелагическая, то есть пребывает во взвешенном состоянии на средних глубинах в свои ранние стадии.

Восточнокамчатская популяция встречается на глубинах в 200-300 метрах. Оптимальная температура воды в ареале минтая изменяется от значений ниже нуля и до 12-14° С. Половая зрелость популяции наступает на 3-4 годах жизни, при этом длина тела рыбы достигает 31-39 см. В промысловых зонах встречаются рыбы длиной от 17 до 75 см. Кормом для минтая являются планктонные организмы и ракообразные, в более старшем возрасте рыба может питаться и nektonом (другие рыбы и кальмары). Каннибализм также свойственен популяции, в самые не кормовые года они поедают икру и молодь [17].

2.1 Жизненный цикл рыб

Жизненный цикл (Рисунок 4) начнем с икрометания. Оно происходит над шельфовой зоной или в каньонах в небольших группах. Выметанные икринки поднимаются в приповерхностный слой, здесь они развиваются и пассивно перемещаются в течениях. Примерный срок инкубации икры в водах п-ова Камчатка 20-25 суток (Григорьева, 2013) и может замедляться за счет уменьшения температуры. В идеале, личинки вылупляются в поверхностных водах с большим содержанием фото- и зоопланктона, что служат временной пищей. Начиная с июля личинки становятся молодь и начиная с августа достигает длину тела от 3 см и начинает опускаться ко дну и ведет придонный образ жизни (Григорьева, 2013). Достигая возраста половой зрелости (3-4 года)

рыба продуцирует икру. Инстинктивно они перемещаются к месту нереста, где самки откладывают икру, а самцы оплодотворяют её.

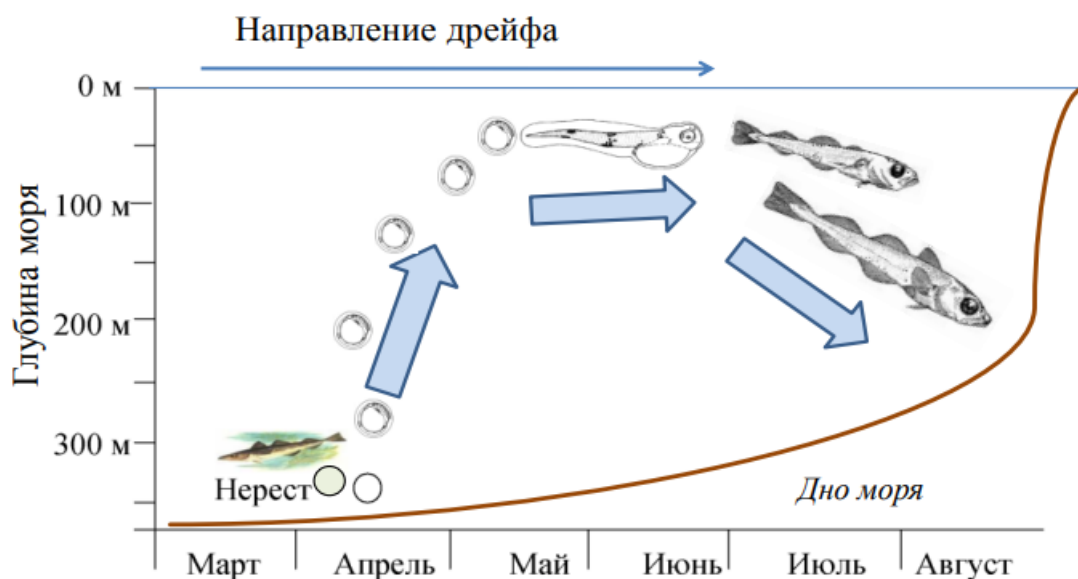


Рисунок 4. Схема раннего развития минтая в северо-западной части Тихого океана [18].

Предельный возраст минтая 16 лет, но рыбы старше восьми лет почти не встречаются. Для восточно-берингоморской популяции естественная годовая смертность колеблется от 32% до 40% — стандартные значения для минтая. На смертность рыбы на стадиях икры влияет перенос их течениями, если личинки попадают в океанические воды, то молодь не сможет найти корм. В дополнение, на смертность повлияет летальная температура воды и/или её солёность [17] [18].

2.2 Нерест восточнокамчатского минтая

Данный вид минтая в основном нерестится в глубоководных каньонах Авачинского и Кроноцкого заливов, не редко нерест происходит и на шельфе начиная от юго-восточного побережья п-ова Камчатка и до южных Курильских островов. Пиковые значения нереста всей популяции регистрируются в третью декаду апреля [Золотов, Антонов, 1986; Буслов, 2004], в зависимости от района

дата может варьироваться ± 1 неделя. При этом температура может доходит до $-1,8^{\circ} \text{C}$, а развитие икры может проходить в около нулевых значениях температуры приповерхностного слоя. Если говорить о количества выметываемой икры, то это до 30 тысяч икринок на один квадратный метр воды [18] [19] [20] [21].

3. Исходные данные течений

Исходные данные представляют собой выборку из продукта GLORYS. Приведенный продукт является реанализом оперативной системы прогнозов Mercator Ocean. Как написано у них на официальной странице в сети Интернет: Mercator Ocean описывает, анализирует и прогнозирует состояния океана.

Сам продукт GLORYS (DOI: <https://doi.org/10.48670/moi-00016>) это действующая система анализа и прогнозирования Mercator Ocean на $1/12^\circ$, которая обеспечивает десятидневные 3D реанализ, что ежедневно обновляется. Для выпускной работы были использованы часовые реанализы зональной и меридиональной составляющих скорости течения в приповерхностном слое и в толще 0-200 метров. Продукт представлен глобальной сеткой с приблизительным шагом в 8 км.

3.1 Не приливная циркуляция (продукт GLORYS)

Продукт использует систему высокого разрешения GLO12v4, что доступна с ноября 2022 года. Система имеет версию 3.6 модели океана NEMO (Madec et al., 2017) и модель с различными уточнениями категорий льда. Конфигурация модели основана на трехполярной сетке типа ORCA12 (Madec and Imbard, 1996) с горизонтальным расширением 9 км на экваторе, 7 км на средних широтах и 2 км в направлении полюса. Батиметрия системы представлена комбинацией интерполированных баз данных ETOPO1 (Amante and Eakins, 2009) и GEBCO8 (Becker et al., 2009). Первая используется в районах с глубинами более 300 м, когда GEBCO8 – менее 200 метров.

Система рассчитана на основе метода Частичных ячеек (Partial cells) (Adcroft et al., 1997) для лучшего представления топографии дна, адвекция импульса вычисляется с использованием схемы сохранения энергии и энтропии (Arakawa and Lamb, 1981). Адвекция температуры и солёности считается путем схемы адвекции с уменьшением общей дисперсии (TVD) (Lévy et al., 2001;

Cravatte et al., 2007). Лапласовский изопланетарный диффузионный оператор применяется для моделирования горизонтального перемещения веществ с помощью диффузии. Для более точного расчета мелких масштабов и быстрых океанических процессов используется явный баротропный режим с помощью подхода split-explicit approach (Shchepetkin and McWilliams, 2005) и схемы Upstream-Biased (Shchepetkin and McWilliams, 2008) для вычисления горизонтальной адвекции импульса без добавления явной диффузии. В вертикальном перемешивании используется двухэквивалентная схема (k-epsilon; Rodi, 1987), а для внутренних приливов используются Lavergne et al. (2016). Явные приливы и отливы не учитываются.

Ошибки модели, такие как осреднение высоты поверхности моря из-за некоторых неопределенностей, исправляются с помощью некоторых шагов: во-первых, поверхность воды принимается за нуль на каждом временном шаге с наложенным сезонным циклом (Chandanpurkar et al., 2021). Во-вторых, к уровню моря добавляется долгосрочный глобальный тренд, оцениваемый ежемесячными спутниковыми миссиями (Dieng et al., 2017) [22].

3.2 Приливная циркуляция

Для исследования перемещения икры минтая из места нереста была взята модель не только циркуляция течений, но и модель суммарной приливной циркуляции, которая в последствие была добавлена к не приливной и рассчитана в вспомогательной программе (глава 5 и 6).

Суммарная приливная циркуляция, применяемая для работы, представляет собой модель FES2014 [23] — глобальный атлас океанских приливов, который позволяет создать динамическое моделирование баротропных приливов с максимальной точностью в ограниченных условиях. Она основана на гидродинамическом моделировании приливов (модель океана с неструктурированной сеткой T-UGOm) и использует точный код ассимиляции данных (спектральная ансамблевая оптимальная интерполяция SpEnOI).

По сравнению с другими открытыми глобальными атласами океанских приливов, модель FES2014 имеет более лучшую производительность в уменьшении ошибок для большинства районов мирового океана. С помощью FES2014 можно вычислить распределение 34-х гармонических составляющих (включая как линейные, так и нелинейные компоненты): 2N2, EPS2, J1, K1, K2, L2, La2, M2, M3, M4, M6, M8, Mf, MKS2, Mm, MN4, MS4, MSf, MSqm, Mtm, Mu2, N2, N4, Nu2, O1, P1, Q1, R2, S1, S2, S4, Sa, Ssa, T2 [24]. Он также обеспечивает точные расчеты приливных условий с открытой границей и для прибрежных районов.

В модели используется глобальная сетка $1/16^\circ$ конечных элементов, что приводит к точному решению задач (независимому от погрешностей данных *in situ* и дистанционного зондирования). Точность решения была повышена за счет ассимиляции данных долговременной альтиметрии (Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, TPN-J1N и ERS-1, ERS-2, ENVISAT) и приливных датчиков через улучшенный метод ассимиляции.

3.3 Суммарная циркуляция: приливная и не приливная

Общая циркуляция водных масс у Юго-восточного побережья полуострова Камчатка была получена путем объединения файлов циркуляции воды различных характеристик. В данном этапе были использованы продукты GLORYS с различной дискретизацией по времени и пространству. Исходные данные были объединены и скорректированы с помощью языка программирования “ Python”. В дополнение были взяты часовые данные составляющих скорости течения в верхнем метровом слое для более углубленного анализа пассивного перемещения икры минтая.

Вспомогательный код для приливной и не приливной циркуляций на языке программирования “ Python” состоял из модулей вызова данных из файла, правки данных файла и регулировки их дискретизации. После этого файлы

складывались и обрабатывались в дополнительном программном обеспечении «ISHTHUP».

Рассмотрим более подробно корректировку данных. Для получения данных по глубинам были использованы шестичасовые данные 0-200 метров. Значения в каждом узле были усреднены до одного горизонта. А для Равной дискретизации данных по времени была произведена интерполяция: переход от шестичасовых данных к часовым. В полученный массив данных были добавлены часовые значения поверхностных составляющих скорости течения и так получился интегральный файл с не приливной динамикой.

Интегральный файл с приливной циркуляцией имел похожую методологию. Сначала файл с шестичасовыми данными усреднялся по глубинам 0 – 200 метров, а затем интерполировался на ежечасные значения составляющих скорости. Путем сложения с приливными скоростями были получены средние скорости течений в поверхностном двухсотметровом слое с учетом баротропной приливной циркуляции.

4. Программное обеспечение «ISHTHUP»

Используемый программный софт рассчитывает передвижение частиц в Лагранжевой постановке. Данная постановка идеально подходит для расчета траектории движения какой-либо частицы в воде с заданными океанологическими параметрами.

4.1 Лагранжевая постановка

Лагранжев подход в используемом программном обеспечении «ISHTHUP» представляет собой метод расчета передвижения частицы в среде при взаимодействии с ней. Для каждой отдельной частицы используется и рассчитываются свои параметры передвижения, то есть изменение места в пространстве в выбранный момент времени и с регулярным шагом. Тогда процесс вычисления движения выглядит следующим образом: в каждом новом временном узле для частицы задается новый набор характеристик движения жидкости. Такой подход к расчёту переноса частицы дает решать различные океанологические задачи. В пример можно привести и отслеживание переноса водных масс, и взвеси, и планктонные организмы [25].

4.2. Описание программного продукта

«ISHTHUP» – это комплексная модель, разработанная для изучения влияния физических (например, океанические течения, температура) и биологических (например, рост, смертность) факторов на динамику икры и личинок рыб. Инструмент 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 в NetCDF состояние переменных каждой частицы да окружающей среды, и анимированное

отслеживание местоположение с отдельной цветовой пометкой свойств частиц (например, возраст, размер и т.п.).

Расчет в программном обеспечении «Ichthyor» производится по следующим моделям: горизонтальная адвекция, вертикальная адвекция, горизонтальная дисперсия, вертикальная дисперсия, плавучесть и вертикальная миграция личинок/икры [26].

В своей работе мы используем интерполирования MARS. У расчетной сетки составляющие скорости располагаются на правых (зональная) и на верхних (меридиональная) сторонах ячеек. Все входные параметры имеют равные значения массива. Если присутствует третий параметр (например, температура воды или соленость), то он располагается внутри ячейки (Рисунок 5).

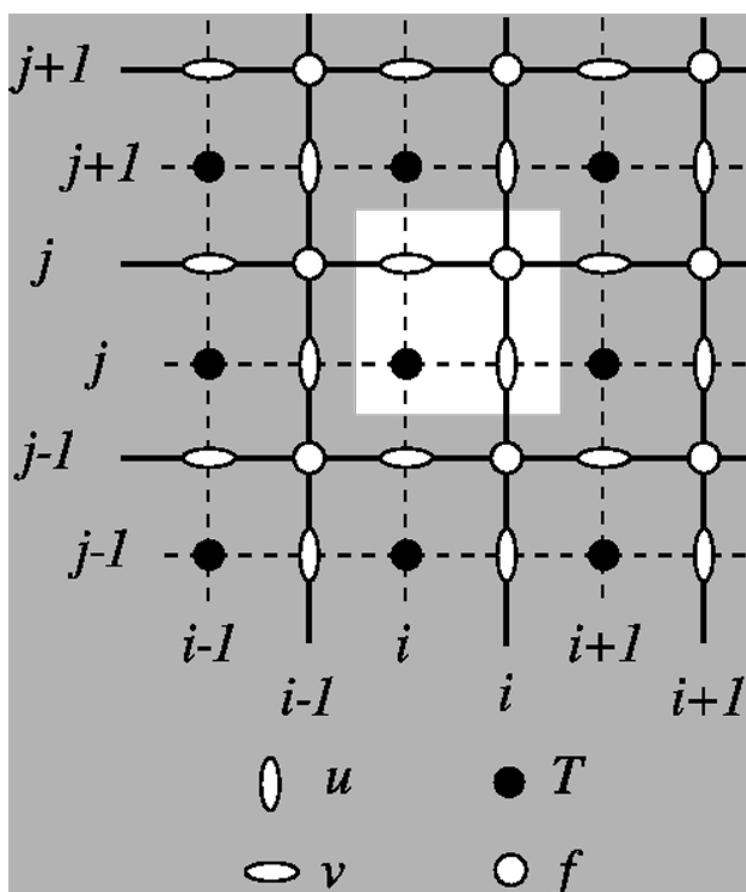


Рисунок 5. Горизонтальное расположение сетки MARS.

Нахождение частицы в пространстве суша-море исследуется путем рассмотрения меридионального и зонального индекса, производится изъятие координат частицы и приравнивание их к значениям граничных ячеек: море, побережье или суша. Маска побережья рассчитывается путем исследования ближайших ячеек. При нахождении в одной из этих ячеек на суше, начальная ячейка и частицы, находящиеся в ней, определяются как частицы вблизи побережья [25] [26].

5. Результаты работы

Метод исследования траекторий движения икры основан на лагранжевой постановке используемой в программном обеспечении «ISHTHYOP». Как было изложено выше, данная программа основана на инструменте java и предназначена для изучения влияния физических и биологических факторов на динамику ихтиопланктона. В общей сложности программа может учитывать не только входные данные составляющих скорости течения, но и дополнительно вводить массивы температуры воды, её солёности. В более углубленных исследованиях можно учесть температуру и солёность летальной смертности, добавлять вертикальные движения трассеров, использовать определенный коэффициент турбулентной вязкости, изменять начальные условия выпуска частиц, устанавливать поведение частиц на границах и многое другое.

В рамках этой работы входными данными служили уже подготовленные файлы составляющих скорости течения: часовые поверхностные скорости; часовые усредненные в верхнем двухсотметровом скорости и часовые усредненные в верхнем двухсотметровом слое скорости с добавлением баротропными суммарными приливными скоростями. Все три варианта циркуляций были рассмотрены для пика нереста восточнокамчатского минтая в каньонах Авачинского залива: 04 апреля 2024 года по 03 мая 2024 года и для того же временного периода за 2025 год. Период выбран в связи с многолетними исследованиями в каньонах Авачинского и Кроноцкого заливов [13]. На рисунках 6 и 7 представлены результаты ихтиопланктонной съемки Камчат НИРО, отношение количества икры к общему количеству в процентах.

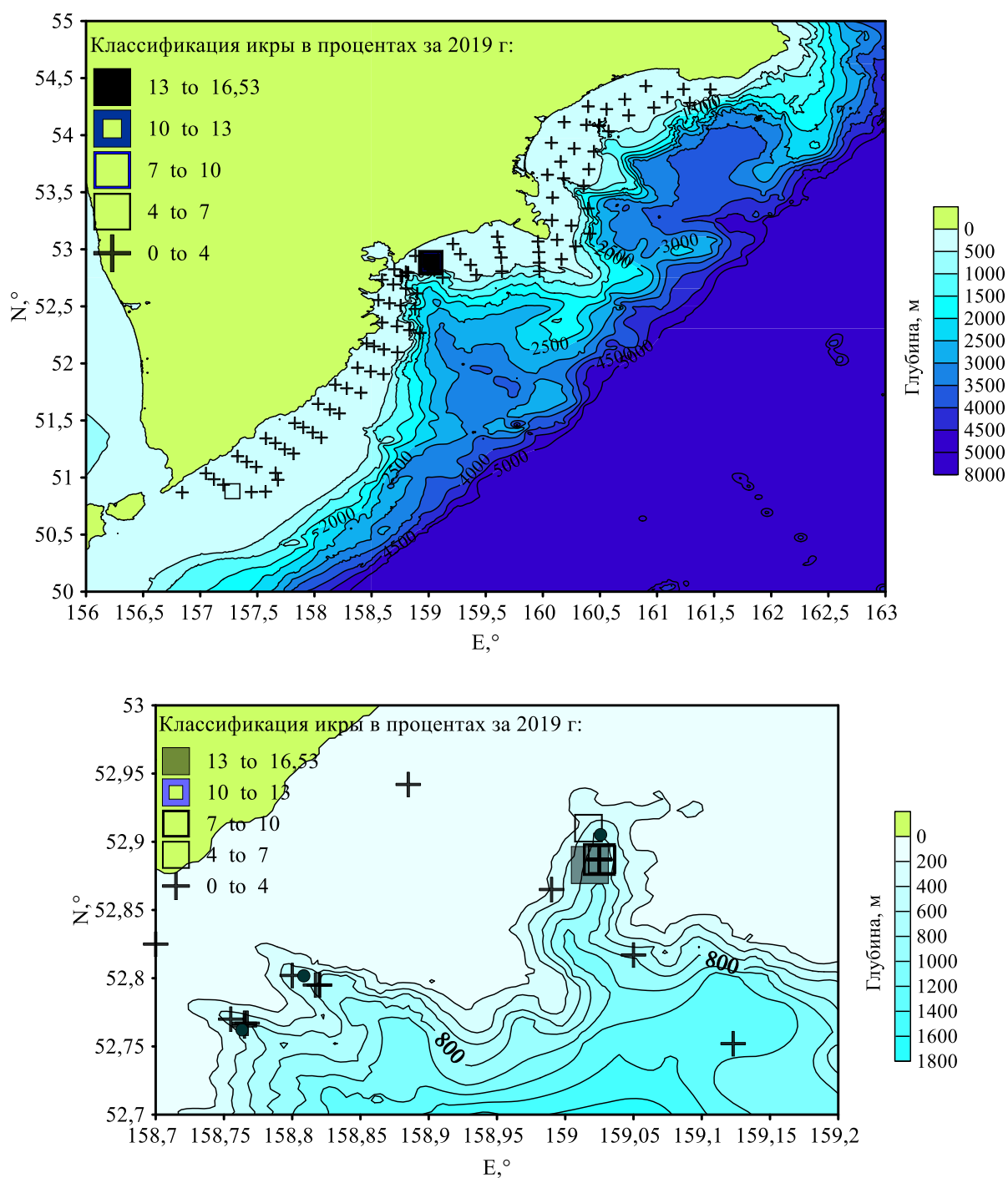


Рисунок 6. Ихтиопланктонная съемка Камчат НИРО за апрель 2019 года: на нижнем изображение представлены, слева направо, Южный, центральный и северный каньоны Авачинского залива.

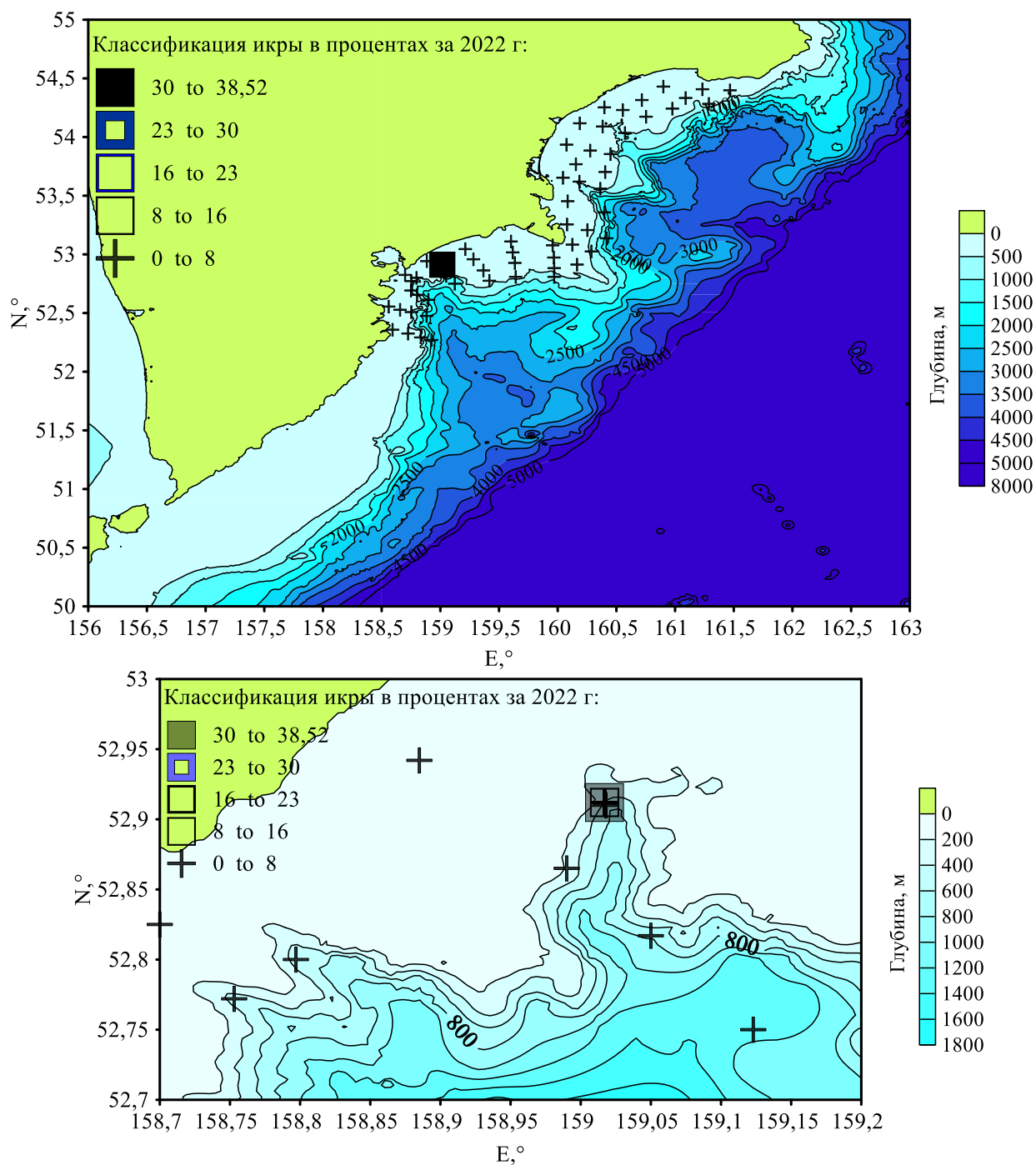


Рисунок 7. Ихтиопланктонная съемка Камчат НИРО за апрель 2022 года: на нижнем изображении представлены, слева направо, Южный, центральный и северный каньоны Авачинского залива.

Как было сказано выше, на рисунках 6 и 7 можно выявить закономерности распределения икры минтая по шельфам Кроноцкого, Авачинского заливов и северных Курил. Хорошо заметно, что в каньонах заливов рыба нерестится

активнее, чем на шельфах. Но при исследовании каньонов, минтай отдает предпочтения более спокойным течениям Авачинского залива, чем Кроноцкого. Здесь преобладают антициклонические циркуляции, что способствуют малому разнесу икры из глубоководных каньонов. Так при попадании икры в центр вихря может произойти заглубление частиц, что положительно скажется на дальнейший рост молоди [12].

После определения места исследования и получению необходимых начальных данных для работы перейдем к программному обеспечению «ICHTHYOP», которое смоделирует течения и перенос пассивных частиц. Как определялось выше входными данными являются составляющие скорости течения: часовые для поверхностного слоя, интегральные часовые для слоя 0-200 метров и интегральные часовые для слоя 0-200 метров с приливной циркуляцией. Данные глубины являются приоритетными, так как икра поднимается к поверхности за счет своего строения и внутреннего течения [18]. Для корректного расчета модели, дополнительными входными параметрами стали значение горизонтальной дисперсии (приравнено к $1e-12 \text{ m}^2 / \text{sec}^2$). При выборе поведения частиц у береговой линии, расчет производился с отскакиванием, так икра не мешала расчету и не появлялись ошибочные выбросы, как при выбрасывании на берег или остановки на границах расчета. Для расчетов был выбран шаг по времени равный 1 часу. Выпуск пятна икры производился в Северном каньоне, так как каньон имеет наилучшую среду обитания для икры – это и маленькие скорости, и глубоководность каньона, и более стабильные гидрологические условия. Пятно частиц представляет собой точку радиусом 2000 метров, с численностью в 1000 икринок и начальными координатами: 159.025° E 52.905° N.

5.1 Расчет перемещения трассеров течениями в приповерхностном слое в 2024 и 2025 гг.

На момент пика нереста, проходящего с 04.04 по 03.05 2024 года, циркуляция поверхности имела множества завихренностей у юго-восточного побережья Камчатки (Рисунок 8А). В этот промежуток времени над каньонами Авачинского залива преобладали антициклонические вихри, что могло способствовать сильному распространению икры у поверхности акватории. Скорости течения варьировались от нуля до 0,6 м/с. В дополнение наблюдаются и меандрирующие потоки от Камчатского течения, скорости изменялись в диапазоне от нуля до 0,9 м/с. Начало периода можно охарактеризовать как очень сложную динамику поверхностных течений.

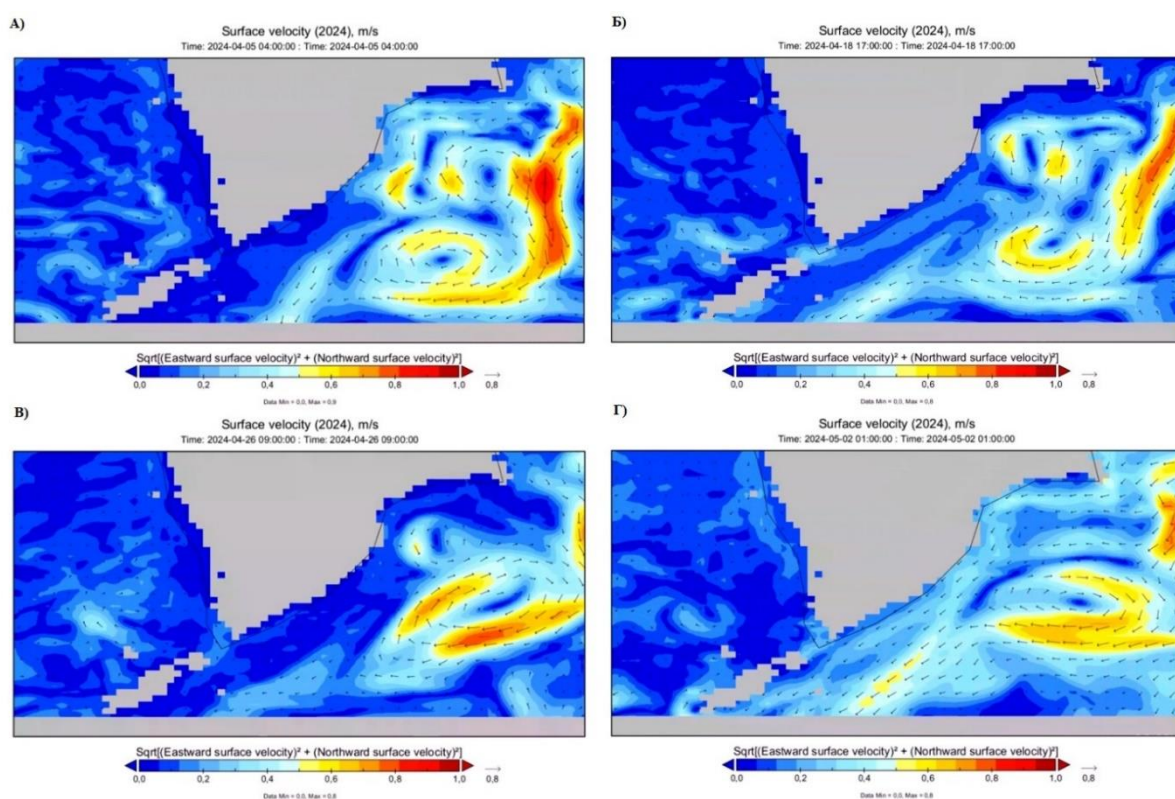


Рисунок 8. Приповерхностная циркуляция в период с 4 апреля по 3 мая 2024 года. А) начало периода – 5 апреля; Б) середина периода – 18 апреля; В) конец апреля – 26 апреля; Г) начало мая – 2 мая 2024 г.

При рассмотрении всего периода пикового нереста, заметно как сложные завихрения ослабевают и трансформируются, но на акватории Авачинского

залива все также присутствует завихрение, но уже циклоническое. В дополнение значения скоростей у побережья ослабли (Рисунок 8).

К концу апреля 2024 (Рисунок 8В) года циркуляция ослабевает и претерпевает сильные изменения, так как к началу мая скорости усиливаются, а границы завихрений становятся более расплывчатыми (Рисунок 8Г).

На основе входных данных, описанных выше, было получено моделирование передвижение пассивных частиц в приповерхностном слое (Рисунок 9).

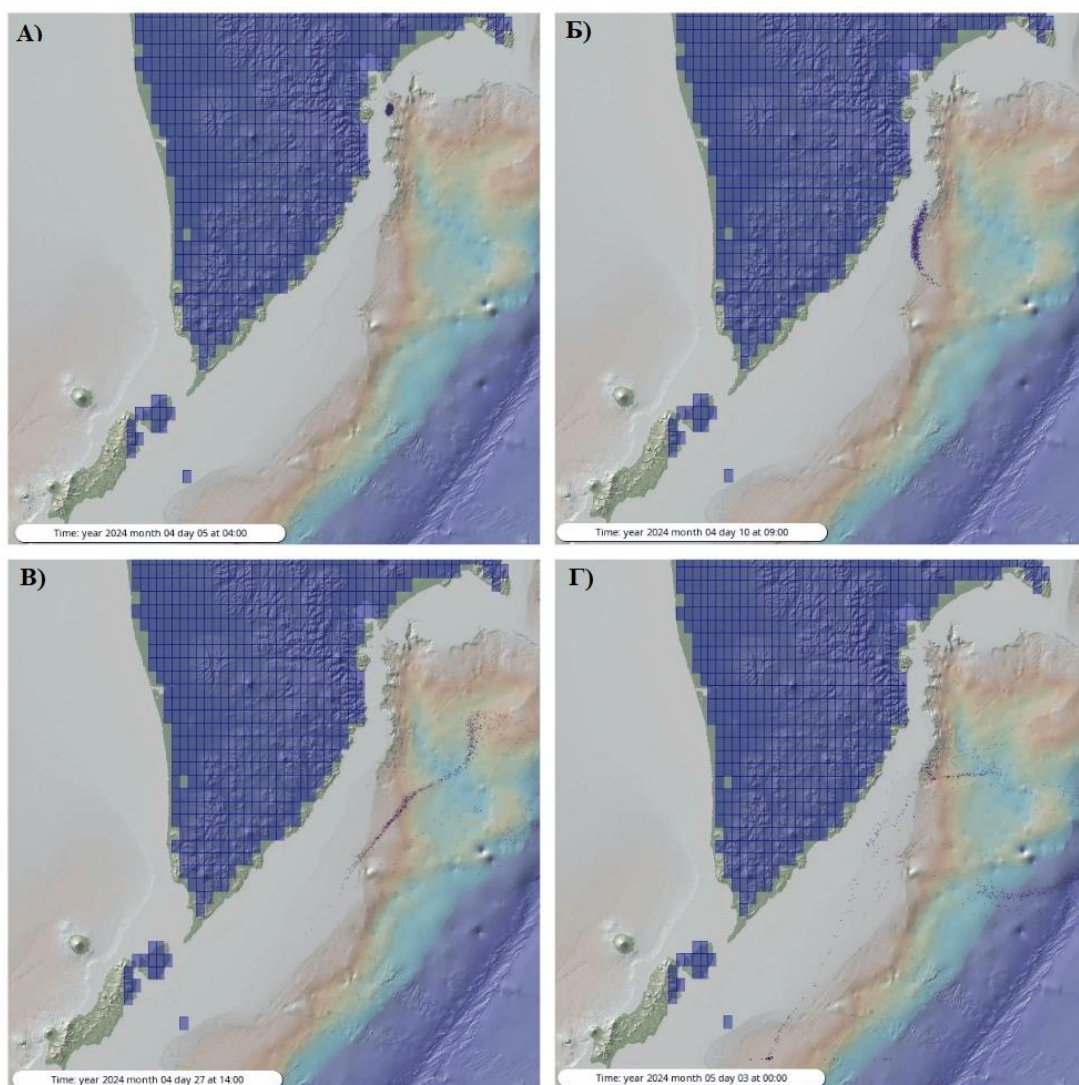


Рисунок 9. Результат моделирования передвижения икры в приповерхностном слое. А) 5 апреля; Б) 10 апреля; В) 27 апреля; Г) 3 мая 2024 г.

Моделирование икры в приповерхностном течение началось в северном каньоне. Войдя в циклоническое завихрение трассеры прошли вдоль побережья Авачинского залива. И к 10 апреля (Рисунок 9Б) вышли на шельфовую зону Юго-восточного побережья Камчатки, где их вынесло циклонической циркуляцией в открытую часть исследуемого района. Ближе к 20 апреля икра перешла в антициклоническую циркуляцию и постепенно растянулась вдоль течения. И к концу эксперимента (Рисунок 9Г) частицы полностью распространились в вихрях Камчатского течения и его продолжения, параллельного юго-восточного берега Камчатки.

Аналогично было проведено моделирование для периода 04.04 по 03.05 2025 года. Циркуляцию за временной диапазон можно увидеть на рисунке 10.

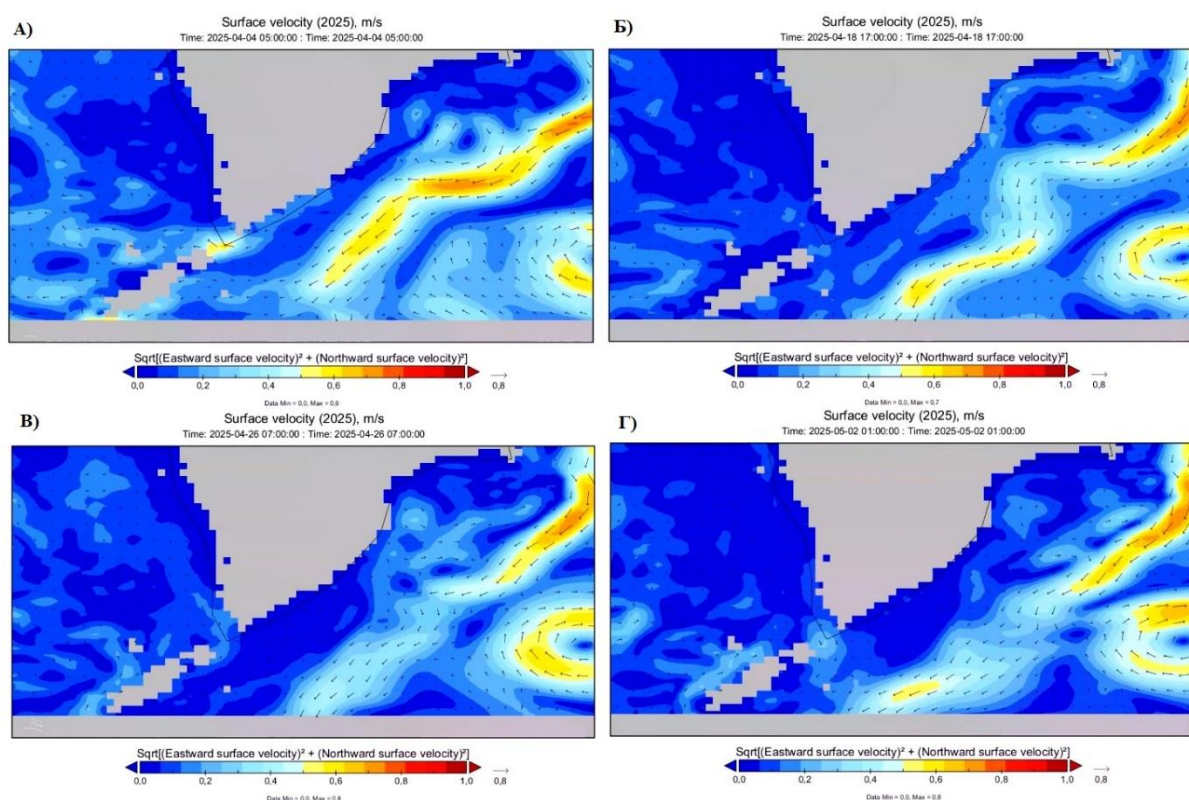


Рисунок 10. Циркуляция в приповерхностных водах в период с 4 апреля по 3 мая 2025 года. А) 5 апреля; Б) 18 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2025 г.

Циркуляция вод в апреле – начало мая 2025 г. явно отличается от того же периода в 2024 году. В первые сутки наблюдения за циркуляцией на акватории Авачинского залива и шельфовой зоны заметны небольшие завихрения малой скорости, а также Камчатское течение лежит ближе к юго-восточному берегу полуострова (Рисунок 10А). Ближе к 20 апреля (Рисунок 10Б) заметно начало образования меандра от Камчатского течения и проявляется небольшая циркуляция в Авачинском заливе: около нулевые скорости над каньонами и вдоль побережья. Циркуляция, наблюдаемая к концу апреля (Рисунок 10В), проявляется более сильным Камчатским течением в глубоководных районах. Проявляется более сильные потоки в центральной части и на севере Авачинского залива. В открытой части океана проявляется антициклонический вихрь, что образовывался ранее. На конец рассматриваемого периода циркуляция Камчатского течения чуть ускорила, но сильных изменений в его границах нет. В Авачинском заливе скорости течений уменьшились. На шельфовой зоне юго-восточного побережья не наблюдается больших скоростей, чем в начале апреля. Значения скоростей течений Авачинского залива изменялись от нуля до 0,5 м/с, а в Камчатском течении не редко они превышали 0,6 м/с.

Моделирование траектории икры для 2025 года представлена на рисунке 11. Полученный результат максимально отличается от сформированного передвижения икры за 2024 год. В первые несколько дней (Рисунок 11А) частицы передвигались в течение вдоль побережья Авачинского залива и у перехода на шельфовую зону продолжила свой путь по ней. Последующие передвижения икра постепенно передвигалась вдоль берега изредка останавливаясь на несколько дне на одном месте (Рисунок 11Б и 11В). В последние даты моделирования икра была замечена у Первого Курильского пролива, где она распространилась вдоль течения (Рисунок 11Г).

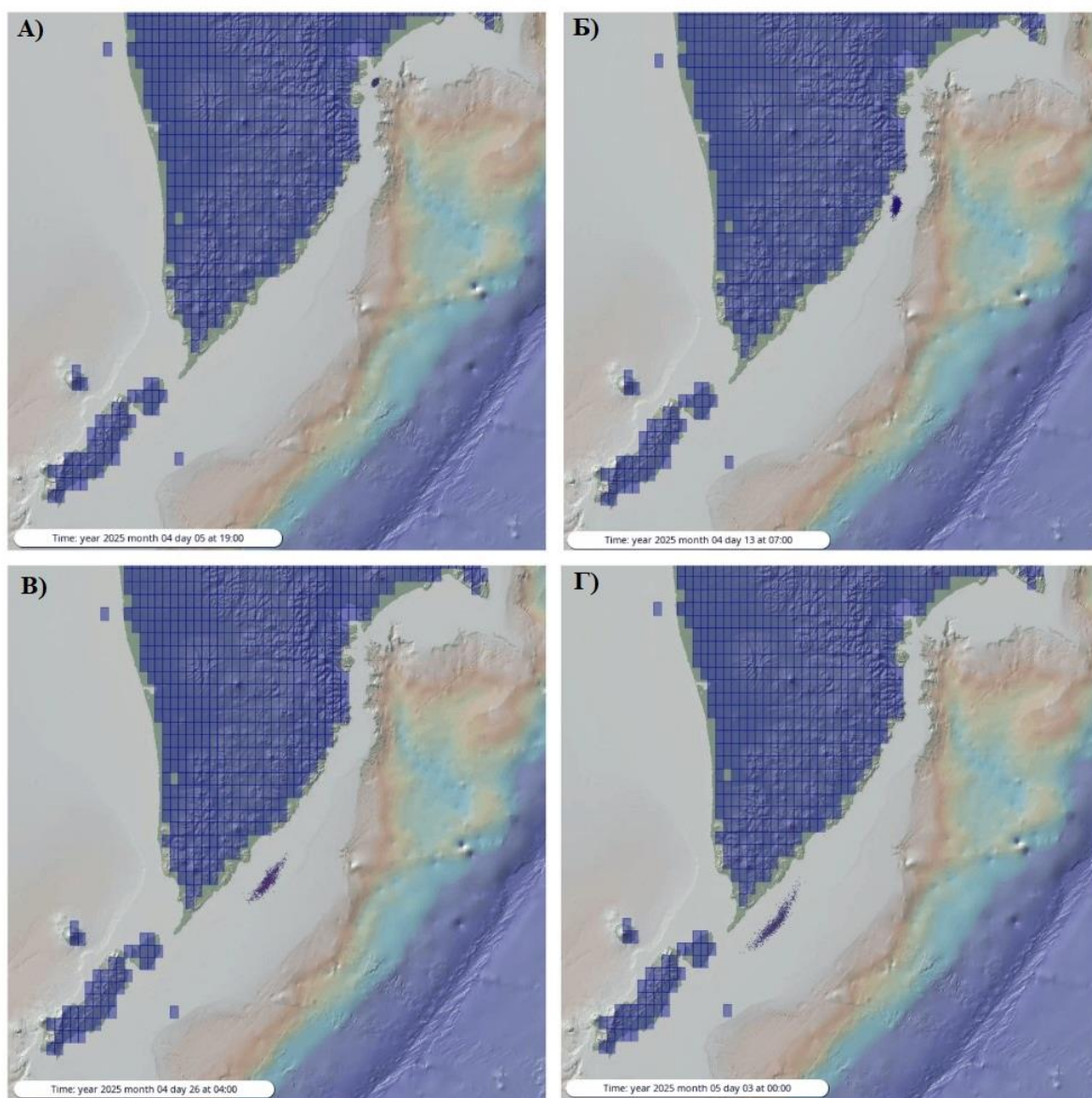


Рисунок 11. Результат моделирования передвижения икры в приповерхностном слое. А) 5 апреля; Б) 18 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2025 г.

Для более точного сравнения двух моделируемых работ для 2024 и 2025 гг. был создан совместный график всех передвижений икры за оба года (Рисунок 12).

Рисунок 12 подтверждает все ранее замеченные передвижения и добавляет траектории, что невозможно было разглядеть. Из данной карты явно видно, как сильно влияет циркуляция на передвижения частиц. С учетом различной

смертности икры на шельфе и в открытом океане, можно сказать, что икра, моделирующая в течениях 2025 года, имеет меньшую смертность, чем в 2024 году. Она сможет выжить за счет большей концентрации фито- и зоопланктона, и меньшей изменчивости гидрологических параметров вод.

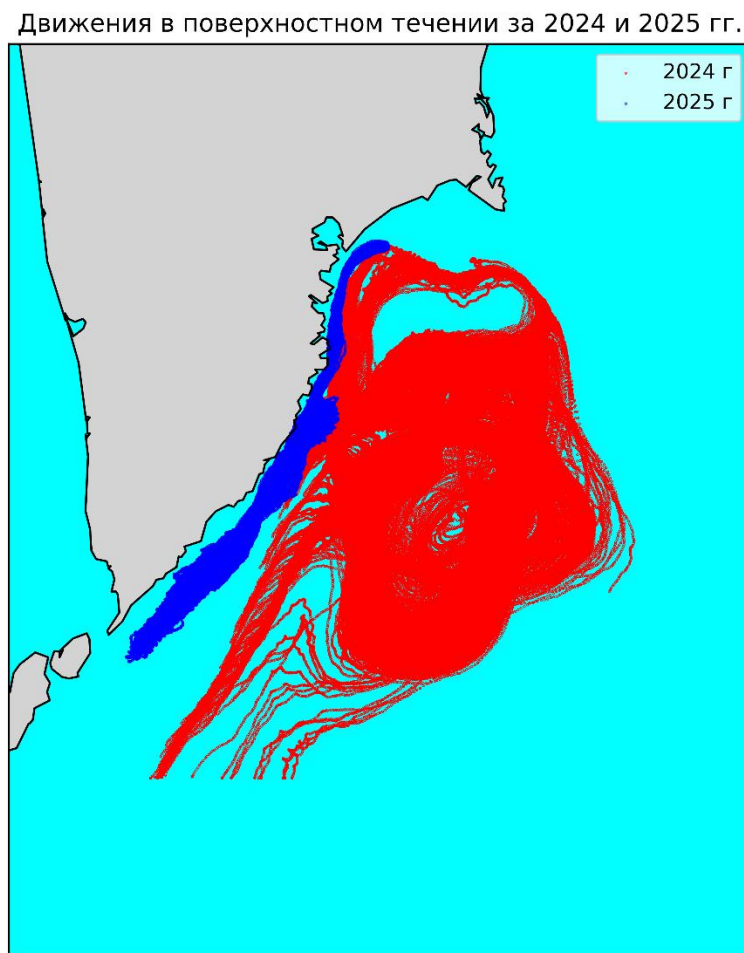


Рисунок 12. Все перемещения моделируемой икры за 2024 (красный) и 2025 (синий) года в приповерхностном слое.

5.2 Расчет перемещения трассеров фоновыми течениями в верхнем усредненном 200-метровом слое без учета приливной циркуляции в 2024 и 2025 гг.

Циркуляция вод при интерполяции течений в слое 0-200 метров (Рисунок 13) имеет схожие черты с приповерхностной циркуляцией 4 апреля – 3 мая 2024

года. С начала периода наблюдаются множество завихрений у Камчатского течения (Рисунок 13А и 13Б), а уже к концу меандры сходятся в единый антициклонический вихрь, что в последствие растягивается в зональном направлении (Рисунок 13В и 13Г). При этом на весь временной период в Авачинском заливе наблюдаются течения вдоль берегов. Шельфовая зона юго-восточной Камчатки лишь иногда имеет скорости выше 0,1 м/с.

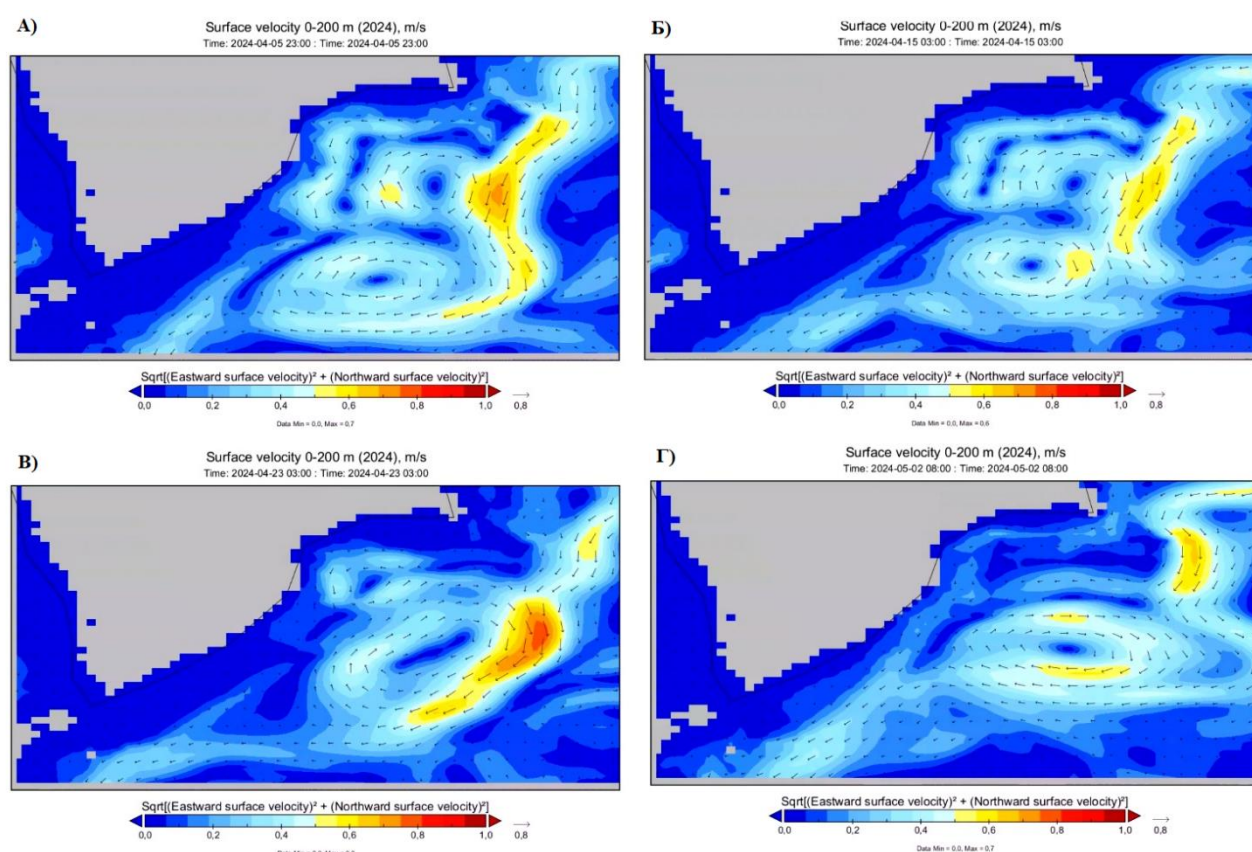


Рисунок 13. Усредненная в верхнем 0-200 метровом слое циркуляция за 04.04.2024 – 03.05.2024г. А) 5 апреля; Б) 15 апреля; В) 23 апреля; Г) 2 мая 2024 г.

При рассмотрении эксперимента со средним течением в слое 0-200 метров полученная траектория значительно отличается от передвижения икры в приповерхностных скоростях того же периода (Рисунок 8). Передвижение икры

в модели также начинается в прибрежном течение Авачинского залива и движется в сторону шельфа на север (Рисунок 14А).

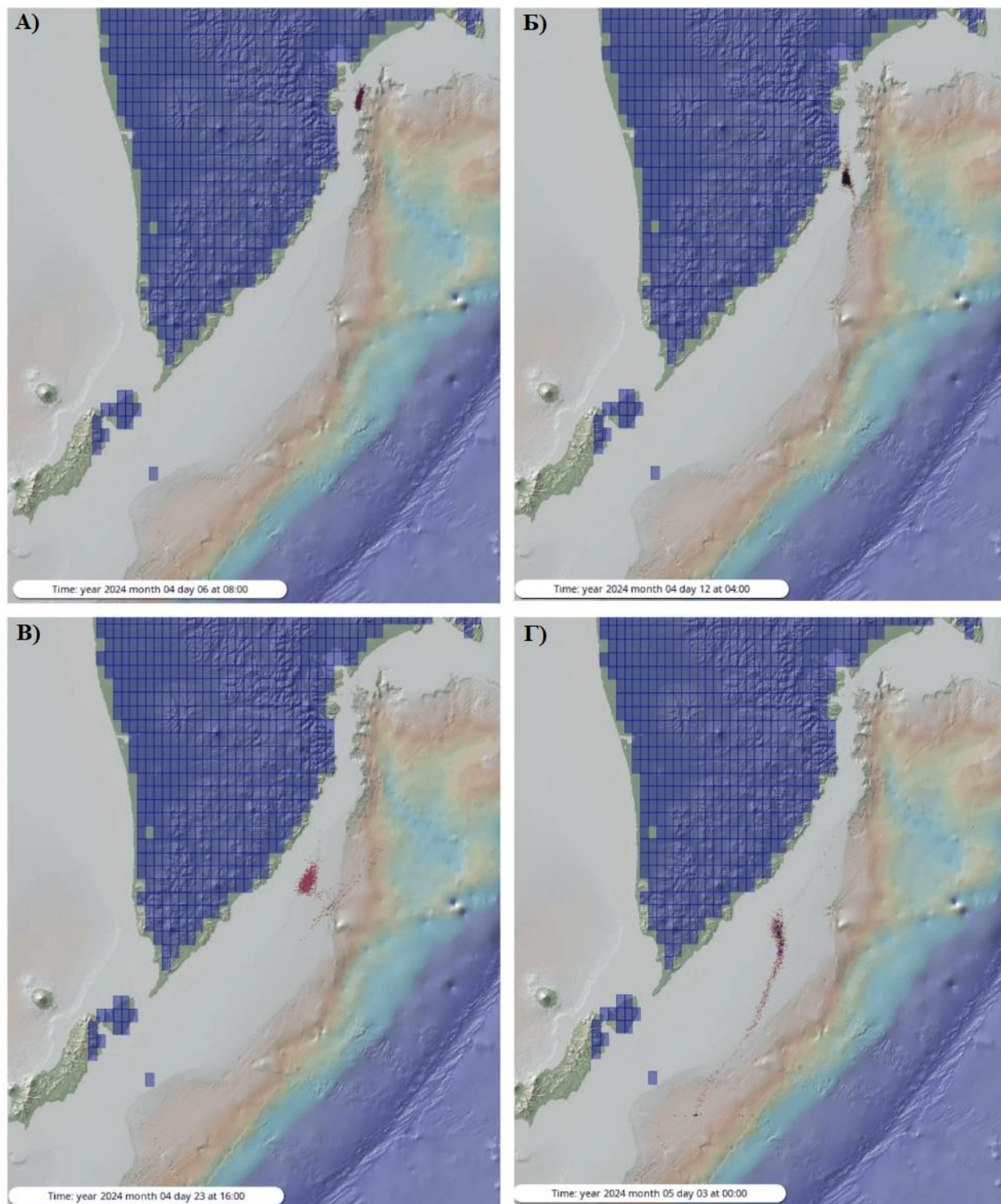


Рисунок 14. Траектория переноса икры в интегральном слое 0-200 метров с 04.04 по 03.05.2024 г. А) 6 апреля; Б) 12 апреля; B) 23 апреля; Г) 3 мая 2024 г.

Перенос частиц начинается аналогично: из координат северного каньона икру вынесло на запад к берегу (Рисунок 14А), и далее она следовала в течение к шельфовой зоне юго-восточной Камчатки (Рисунок 14Б). С 12 апреля и до 3 мая юго-восточное побережье икра прошла с некоторыми задержками и небольшим рассеиванием по образовавшемуся завихренному движению вод. В последние сутки моделирования передвижения икры, преобладающая часть частиц осталась в центре шельфа, когда остальное постепенно распределялось вдоль течения на север и отдельные частицы были вынесены в антициклонический вихрь Камчатского течения.

Следующим рассмотрим циркуляцию для 04.04 – 03.05.2025г. (Рисунок 15) и полученную модель передвижения икры в ней (Рисунок 16).

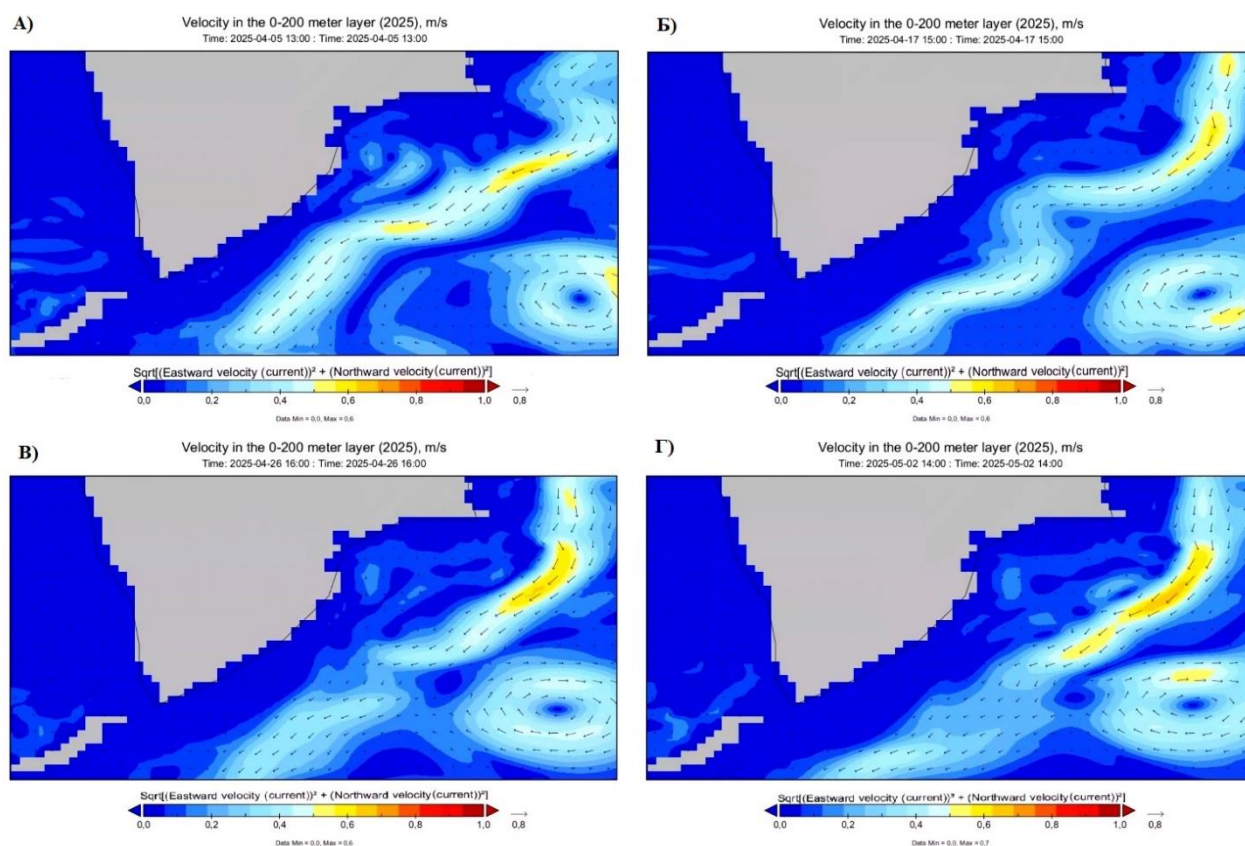


Рисунок 15. Интегральная циркуляция в слое 0-200 метров за 04.04-03.05.2025. А) 5 апреля; Б) 17 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2024 г.

На рисунке 15 представлены интегральные скорости за 2025 год. В сравнение с приповерхностными скоростями (Рисунок 10), они не такие сильные и изменяются в диапазоне от нуля до 0,7 м/с, где максимумы наблюдаются в Камчатском течение. Если сравнивать с циркуляцией 2024 года (Рисунок 13), то в 2025 году она не такая сложная, здесь выделяется только Камчатское течение антициклонический вихрь в открытой части и небольшие завихрения в Авачинском заливе.

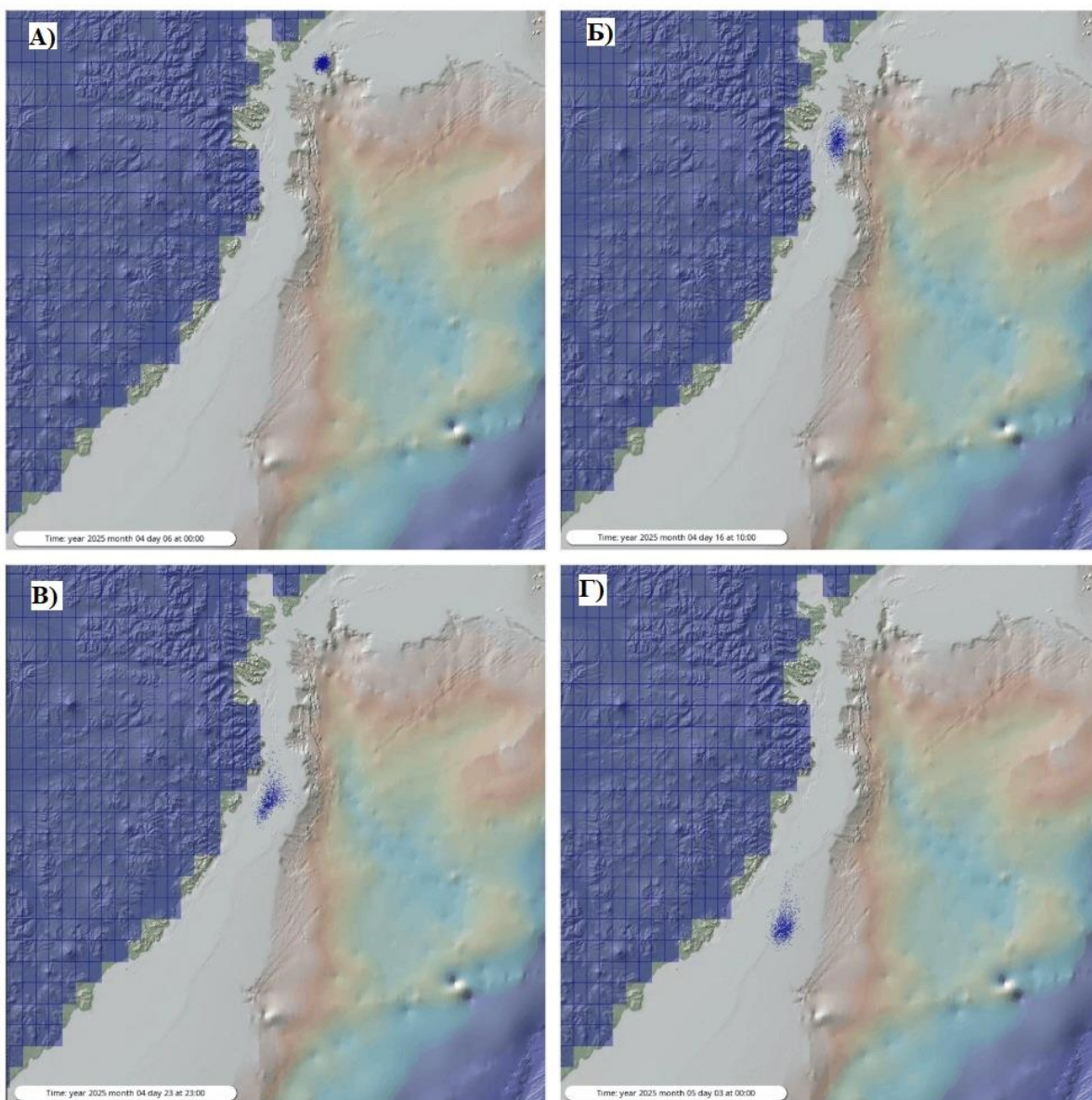


Рисунок 16. Перемещение икры в интегральной циркуляции 0-200 метров за 04.04-03.05.2025. А) 5 апреля; Б) 17 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2024 г.

Рассмотрим модель передвижения икры в интегральной циркуляции 2025 года (Рисунок 16). Полученные расчет достаточно сильно отличаются от расчетов на основе только приповерхностной циркуляции. В интегральной циркуляции передвижение икры так же началось из северного каньона и продолжилось движением вдоль побережья Авачинского залива к шельфовой зоне юго-восточной Камчатки, но все передвижения происходили с меньшей

скоростью. Икра перемещалась группой и не растягивалась в циркуляции. К концу заданного временного периода – 3 мая – частицы продвинулись лишь до середины шельфовой зоны юго-восточной Камчатки.

При общем сравнении перемещения частиц (Рисунок 17) различия заметны сильнее. Так перемещения за 2024 год имеют большую площадь распространения, в отличие от 2025 года. В таком случае у молоди, у которой пик нереста проходил на 04.04-03.05.2025 года шанс выжить больше, чем у молоди 2024 года. Если сравнивать с приповерхностной циркуляцией (Рисунок 12), заметно как недалеко продвинулась икра в интегральной циркуляции, и что в ней икра 2024 года имеет большую вероятность на выживание, так как икра не так сильно вынесена в более глубокие районы, чем в приповерхностной циркуляции.

Движения в циркуляции без приливов за 2024 и 2025 гг.

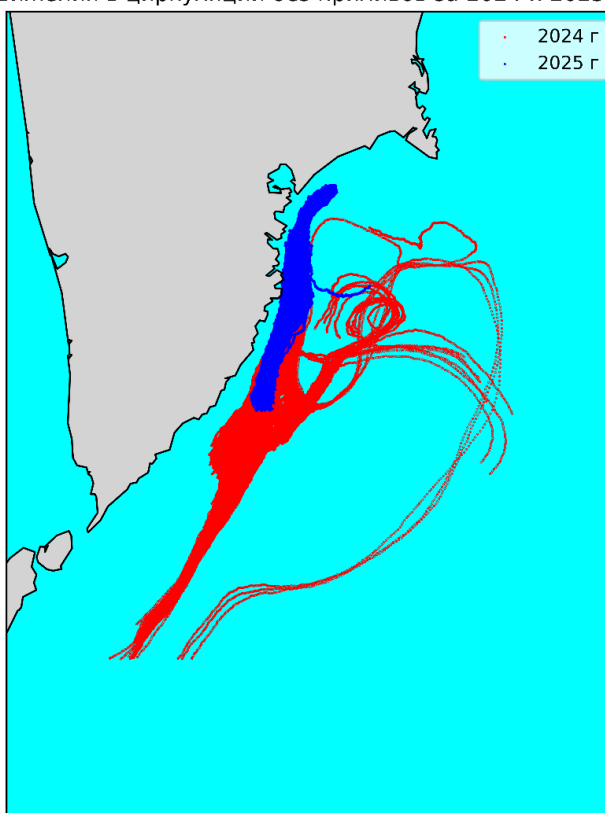


Рисунок 17. Траектория перемещения икры за 2024 (красный) и 2025 (синий) года.

5.3 Расчет перемещения трассеров фоновыми течениями в верхнем усредненном 200-метровом слое с учетом суммарной приливной циркуляции в 2024 и 2025 гг.

Последний эксперимент заключается в выпуске пассивных частиц/икры в интегральную циркуляцию 0-200 метров с приливными силами.

Рассмотрим входные скорости циркуляции с приливами (Рисунок 18) в усреднённом слое 0-200 метров. На весь период исследования течений с приливной циркуляцией аналогичны с циркуляцией без приливов (Рисунок 13), в дополнение замечены приливные пульсации скоростей каждые 12 часов. Камчатское течение лежит в той же области, а скорости течений не изменились.

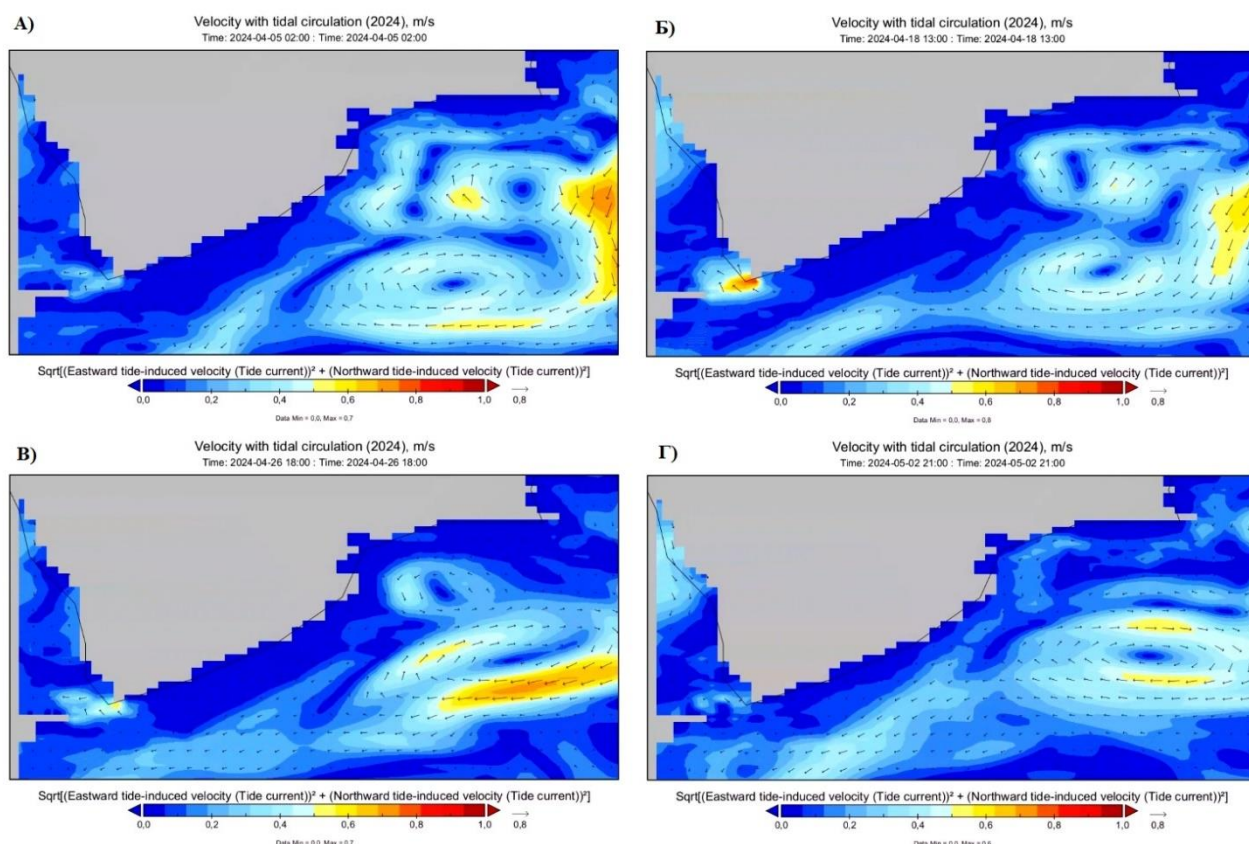


Рисунок 18. Скорости течений с приливной циркуляцией в период с 04.04-03.05.2024. А) 5 апреля; Б) 18 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2024 г.

Моделирование икры в интегральной циркуляции с приливами частично представлено на рисунке 19. Перемещение икры начинается с уже наблюдаемого движения вдоль побережья Авачинского залива. Только к 11 апреля (Рисунок 19Б), что медленнее на сутки, чем во втором эксперименте для 2024 года (Рисунок 14). Не смотря на аналогичные передвижения в следующие сутки, оно идет с запозданием в ~сутки (Рисунок 19В). К концу эксперимента икра распределяется в Камчатском течение вдоль юго-восточного побережья, и небольшое количества частиц уходит в завихрения открытой части района.

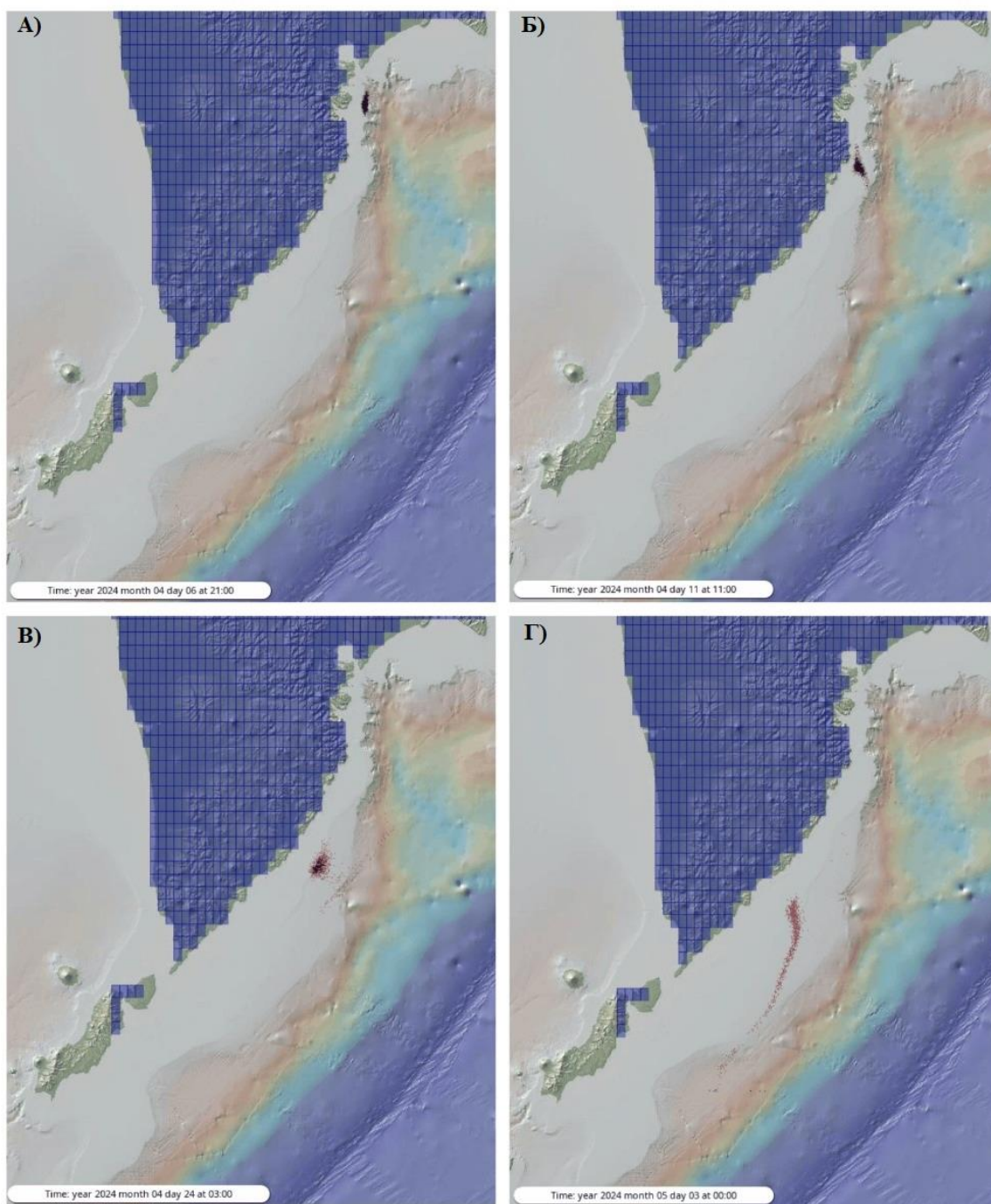


Рисунок 19. Моделирование перемещения икры в циркуляции с приливами. А) 6 апреля; Б) 11 апреля; В) 24 апреля; Г) 3 мая 2024 г.

Аналогично рассмотрим циркуляцию с приливами для 04.04-03.05.2025 года (Рисунок 20). Локальные усиления скоростей остаются аналогичными максимумами и минимумами интегральной циркуляции без приливов 2024 (Рисунок 15). Замечены увеличения скоростей с некоторых районах: север

Авачинского залива и шельфовая зона юго-восточного берега Камчатки за счет приливов.

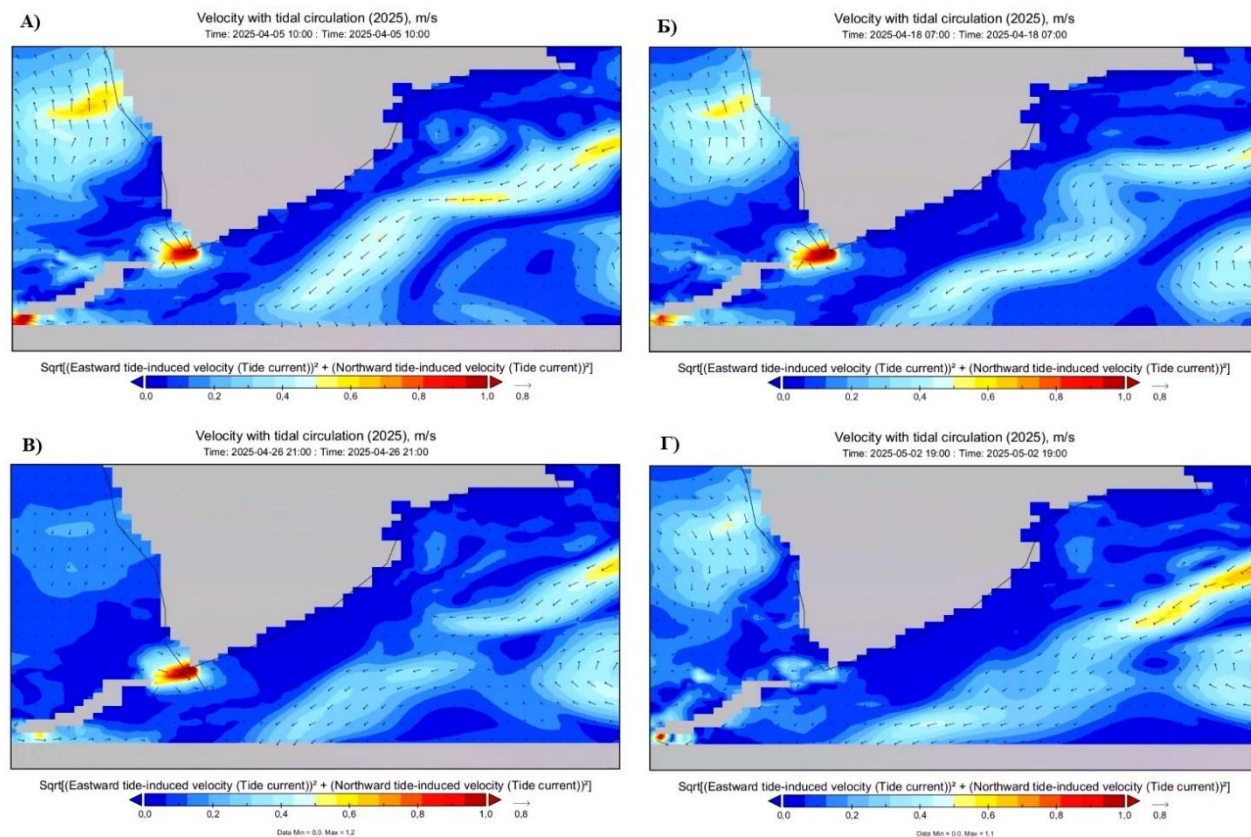


Рисунок 20. Циркуляция с приливами для 2025 года. А) 5 апреля; Б) 18 апреля; В) 26 апреля; Г) 2 мая 2024 г.

Рассмотрим модель перемещения икры в интегральной циркуляции с приливом для 2025 года (Рисунок 21). Перемещения частиц, в общем и целом, аналогичное, но при детальном исследовании видно, как в 2025 году в эксперименте с приливом, икру перенесло быстрее, чем в интегральной циркуляции без него (Рисунок 16).

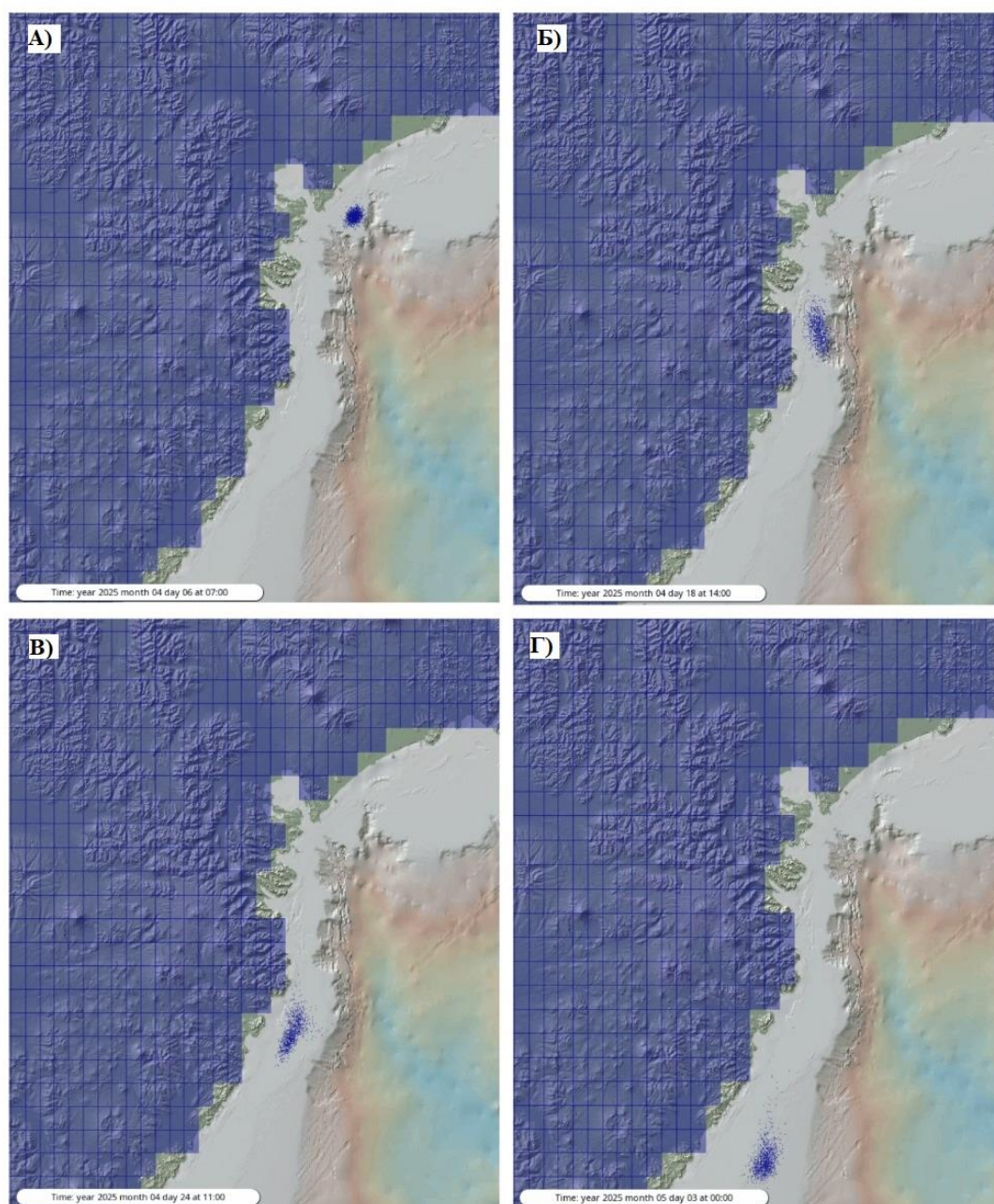


Рисунок 21. Перемещение икры в интегральной циркуляции с приливами за 2025. А) 6 апреля; Б) 18 апреля; В) 24 апреля; Г) 3 мая 2024 г.

При рассмотрении графика перемещения всех трассеров (Рисунок 22) заметны идентичные перемещения икры с движением в интегральной циркуляции без прилива (Рисунок 17). За исключением большой концентрации частиц в вихревых структура Камчатского течения в открытом районе, дополнительно некоторые частицы за 2025 год в приливной циркуляции

остались на шельфе, в отличие от результата в циркуляции без прилива. В данном эксперименте так же выживаемость выше у икры 2025 года.

Движения с приливной циркуляцией за 2024 и 2025 гг.

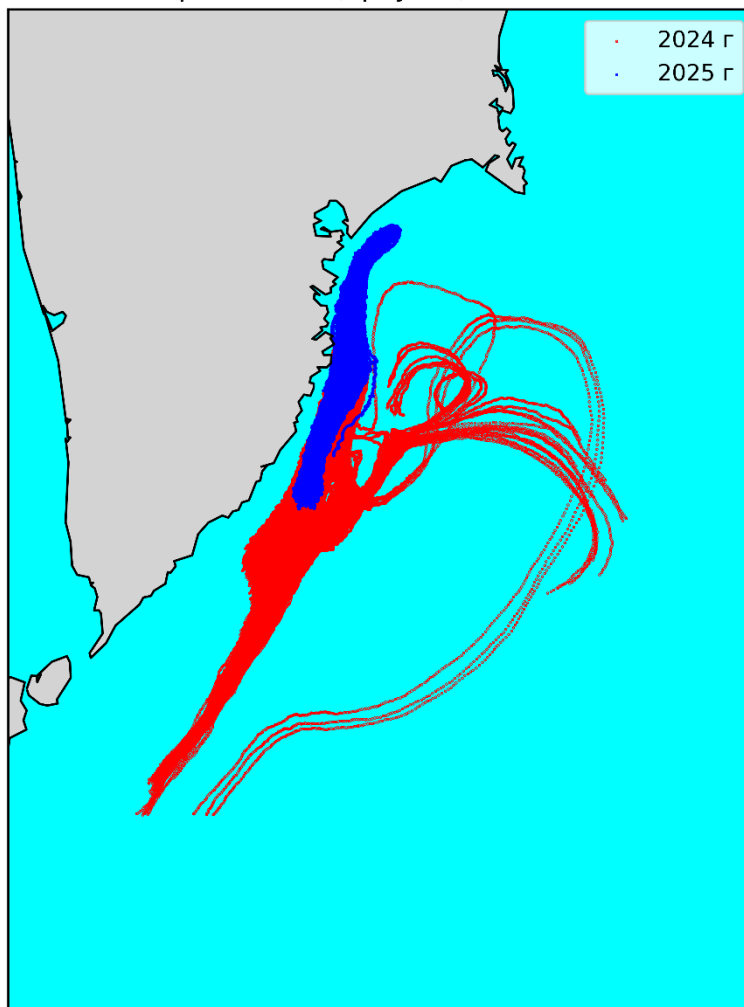


Рисунок 22. Все перемещения трассеров за 2024 (красный) и 2025 (синий) года

Заключение

Поставленные во Введении задачи научной работы выполнены в полном объеме. Впервые были выполнены модельные исследования влияния различных динамических процессов на пассивные гидробионты в тихоокеанских водах, прилегающих к юго-восточному побережью полуострова Камчатка. Цель исследовательской работы была в установлении траектории перемещения икры восточнокамчатской популяции минтая от места нереста в каньонах Авачинского залива и вдоль шельфа полуострова, и она была полностью достигнута.

Теоретическая часть исследовательской работы состоит из описания ареала обитания минтая, место нереста и описания данных и программного обеспечения для моделирования перемещения икры.

Батиметрия заливов восточного побережья полуострова Камчатка имеет в глубоководные каньоны, которые благоприятны для нереста восточнокамчатского минтая *Gadus chalcogrammus*, который любит холодолюбивые воды и нереститься на глубинах. Гидрология также важна для условий для нереста: субарктический термоклин, что делит водные массы на три типа поверхностного, подповерхностного промежуточного и глубинного слоёв. Каждый тип вод не имеет экстремальных значебний для рыбы и в среднем слое встречается внутреннее течение. Приливные колебания уровня смешанного типа (неправильные суточные) наблюдаются в пределах от 1,5 до 2,0 метров, а приливные течения варьируют локально и могут достигать 0,4 м/с.

Минтай нерестится в местах с наименьшими скоростями течений и более стабильными гидрологическими параметрами, например, внутри Авачинских глубоководных каньонов. Но в процессе инкубации икра поднимается в верхние слои акватории и тогда течения могут вынести икру в открытый океан, где к

окончанию периода инкубации молодь не сможет найти корм и выживаемость рыб упадет до нуля.

Было использовано три варианта циркуляции от продукта GLORYS и приливная модель FES2014: 1) Часовая приповерхностная циркуляция; 2) Часовая усредненная в верхнем 0-200 метров в слое циркуляция; 3) Часовая усредненная в верхнем 0-200 метров в слое циркуляция с приливами. Работа была реализована на основе лагранжевой постановки в программном обеспечении «ICHTHYOP» с следующими начальными условиями: выпускалось пятно из 1000 частиц, радиусом в 2000 метров с горизонтальной дисперсией $1e-12 \text{ m}^2/\text{sec}^2$ и начальной точкой в северном каньоне Авачинского залива $159.025^\circ \text{ E } 52.905^\circ \text{ N}$.

Результаты, полученные для пика нереста восточнокамчатского минтая в глубоководном каньоне для периода с 4 апреля по 3 мая для 2024 и 2025 годов, имеют свои индивидуальные особенности. Циркуляция 2024 и 2025 годов значительно отличается: когда в 2025 г в интересующий период времени доминирует Камчатское течение и небольшие завихренности в Авачинском заливе, то в 2024 году на начало периода Камчатское течение имеет несколько меандров, которые в последствие объединяются и трансформируются в океанический вихрь с зональной протяженностью. Величины скоростей в 2024 году имеют более высокие значения: для 2024 года максимум превышает 0,8 м/с, когда для 2025 года максимум не достигает и 0,8 м/с. Эксперимент с приповерхностной циркуляцией показал простейшую траекторию переноса частиц, в которых наиболее вероятная выживаемость характерна икре 2025 года. При добавлении к поверхностной циркуляции промежуточную, траектория передвижения икры сильно отличается. А икра 2025 года начал передвигаться в течение более медленно и группой, при расчете для 2024 года траектория не такая обширная, и большая часть икры останется в благоприятной шельфовой зоне. В эксперименте с добавлением приливной циркуляцией основные траектории остались идентичными в сравнении со вторым экспериментом.

Отличием являются влияние приливных флуктуаций течения, которые наблюдаются, согласно расчетам, в южной части Авачинского залива: для икры 2024 года выявлены дополнительные перемещения в циркуляции, а для икры 2025 года наблюдается движения небольшого количества частиц в сторону открытого океана. А передвижения в приливной циркуляции в 2024 году замедляется перемещение, а в 2025 году — ускорение.

Рассматривая модели транспорта икры только под действием циркуляции с суммарным приливом заметно как сумма приливных гармоник имеет сильное влияние на перенос частиц. Так в наблюдениях 2024 года моделирования переноса икры, в циркуляции с учетом суммарных приливов наблюдается более сильное распределение икры в слое (воздействие приливо-отливных колебаний), когда в модели без приливов они передвигаются в группе и на меньшие расстояния. При исследовании транспорта частиц за 2025 год без приливов и с ним заметно, как частицы в районах с максимальными приливными скоростями передвигаются пульсациями — влияние прилива–отлива на перенос. В дополнение, в циркуляции с приливами частицы также имеют свойство сильнее распространяться по площади, чем в более простой циркуляции. И при учете приливной циркуляции частицы транспортируются на дальние расстояния. Подытожим, учёт приливной циркуляции важен при моделировании транспорта икры минтая на ранних стадиях. Она имеет воздействие на частицы и её включение в общую циркуляцию дает более точное устройство переноса икры минтая.

За оценку проведенной работы можно взять вероятность выживаемости молоди. Так, наилучшая выживаемость наблюдается во всех экспериментах для 2025 года у икры, что в основном остается на шельфе и вблизи побережья — места с наибольшим скоплением кормовой базы будущей молоди, а также с менее динамичными процессами. Такие хорошие результаты зависят и от условий предшествующей зимы и последующего формирования гидрологических параметров. При оценке совокупности различных

динамических составляющих лучше всего использовать входные данные суммарной поверхностной циркуляцией, интегральной в слое циркуляции и приливной, что дает более полное понимание динамических процессов, влияющих на миграцию ранних стадий развития минтая.

Литература

1. Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. Труды ВНИРО. 2022; 189:105-119. DOI: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>
2. Кивва К. К. и др. Анализ пространственно-временной изменчивости распространения тихоокеанских вод в Охотском море на основе лагранжева подхода. Труды ВНИРО. 2023; 193:101-118. DOI: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2023-193-101-118>
3. Будянский М. В. и др. Выявление и лагранжев анализ океанографических структур, перспективных для промысла кальмара Бартрама (*Ommastrephes bartramii*) в Южно-Курильском районе. Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 720-730. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0030157417050069>
4. Apriansyah, Agus S. Atmadipoera, Dwiyooga Nugroho, Indra Jaya, Mohd Fadzil Akhir. Simulated seasonal oceanographic changes and their implication for the small pelagic fisheries in the Java Sea, Indonesia. Marine Environmental Research. 2023. 188:106012 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106012>
5. Irene Laiz, Nadine Foletti , Ana Teles-Machado, Sandra Plecha, Álvaro Peliz, Ricardo F. Sánchez Leal, Marina Bolado-Penagos Spatial distribution of microplastics in the Gulf of Cadiz as a function of their density: A Lagrangian modelling approach. Sci Total Environ. 2024. 10:950:175212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175212>
6. Сергеева Н.П., Тепнин О.Б., Веселов С.А., Смирнов А.В. ИНТЕНСИВНОСТЬ НЕРЕСТА И СТРУКТУРА НЕРЕСТОВОГО ЗАПАСА ЗАПАДНОБЕРИНГОВОМОРСКОГО МИНТАЯ В 2018 Г. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2019;1(53):34-40. DOI: <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2019.53.34-40>

7. Селиверстов Н. И.: Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг / Н. И. Селиверстов // Научный мир, Москва, 1998 г., 160 стр.

8. Тепнин О.Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022;(66):79-93. DOI: <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>.

9. Бышев В. И., Фигуркин А. Л., Анисимов И. М. МЕЖДЕКАДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОД ВЕРХНЕГО ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ТИХОГО ОКЕАНА 2017 Г. Доклады Академии наук. №2, 2017, Том 477. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869565217320214>

10. Пранц С. В. ВИХРИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ЖЕЛОБОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА: ОБЗОР 2021 г. ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА. 2021. Т. 57. № 4. С. 341-353. DOI: 10.31857/S0002351521040106

11. Крамарева, Л. К. Структура и динамика вихревых образований энергоактивных зон Тихого океана. [Текст] / РАН.ДВО. Тихоокеанский океанолог. ин-т им. В.И.Ильичева. - Владивосток: Дальнаука, 2002. - 233 с.,ил., - Библиогр.: с. 220-228. - Б. ц. УДК 551.901.6 (265)

12. Тепнин О.Б. Изменчивость гидрологических условий в местах нереста восточно-камчатского минтая (*Gadus chalcogrammus*) в 2012–2022 гг. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022;(66):79-93. DOI: <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2022.66.79-93>

13. Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. // Труды ВНИРО. 2022. Vol. 189. P. 105–119. DOI: 10.36038/2307-3497-2022-189-105-119

14. Еловичева Я.К. География Мирового океана. Часть 1. Физическая география Мирового океана [Текст] / Я.К. Еловичева // Мн., БГУ, 2006. – 46 с.
15. 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;16(4):45–62. DOI: [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-4](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-4)
16. Буслов, А. В., & Сергеева, Н. П. Эмбриогенез и раннее постэмбриональное развитие тресковых рыб дальневосточных морей. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2013. №29.
17. Варкентин А.И., Сергеева Н.П., Ильин О.И., Овсянников Е.Е. Промысел, размерно-возрастной состав, состояние запасов и перспективы вылова минтая (*Gadus chalcogrammus*, Pallas, 1814) на акватории, прилегающей к Камчатскому полуострову и Северным Курильским островам. Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2021; (60):5-42. DOI: <https://doi.org/10.15853/2072-8212.2021.60.5-42>
18. Григорьев С.С. Распространение минтая (*Gadus chalcogrammus*) в северной части тихоого океана: результат воздействия экологических факторов в ранний период развития. ВЕСТНИК КАМЧАТСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. 2021; 55: 73-88
19. Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг. Труды ВНИРО. 2022; 189:105-119. DOI: <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>
20. Балыкин П.А. Изменчивость сроков нереста и смертность развивающейся икры у минтая западной части Берингова моря // Исследования биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. – Петропавловск-Камчатский: Камчатское отделение ТИНРО. – Вып. 2. 1993 –С. 166-176

21. Единая государственная система информации об обстановке в мировом океане: Электронное справочное пособие: биологические ресурсы мирового океана / Минтай [Электронный ресурс]. - URL: http://vniroinfo.ru/fe/mintay_fe.htm (Дата обращения 31.05.2025)
22. Lellouche J.-M., Galloudec O. Le, Regnier C., Van Gennip S. and others. Quality Information Document. Global Production Centre GLO_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024 [Электронный ресурс]. - URL: <https://documentation.marine.copernicus.eu/QUID/CMEMS-GLO-QUID-001-024.pdf> (Дата обращения 26.05.2025)
23. Florent H. Lyard, Damien J. Allain, Mathilde Cancet. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance / Developments in the science and history of tides (OS/ACP/HGSS/NPG/SE inter-journal SI) P.L. Woodworth, R.D. Ray, M. Green. OS, 17, 2021. – С. 615–649 DOI: <https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>
24. GLOBAL TIDE - FES2014 DESCRIPTION [Электронный ресурс] AVISO+ Satellite Altimetry Data // URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes/description-fes2014.html> (дата обращения 05.06.2025)
25. Lett, Christophe, Philippe Verley, Christian Mullan, Carolina Parada, Timothée Brochier, Pierrick Penven, and Bruno Blanke. 2008. “A Lagrangian Tool for Modelling Ichthyoplankton Dynamics.” *Environmental Modelling & Software* 23 (9): 1210–14. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.en_vsoft.2008.02.005
26. Barrier N., Verley P., Lett C., Andres G. Ichthyop User Guide (3.3.17) [Электронный ресурс]. - URL: <https://documentation.ichthyop.org/> (Дата обращения 20.05.2025)