

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ ТИХООКЕАНСКИХ ВОД В ОХОТСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОМЫСЛУ МИНТАЯ

© 2022 г. М. В. Будянский^а, *, В. В. Кулик^б, К. К. Кивва^с, М. Ю. Улейский^а, С. В. Пранц^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

^бТихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ТИНРО), Владивосток, Россия

^сВсероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва, Россия

*E-mail: plaztic@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 01.02.2022 г.

На основе спутниковых альтиметрических данных о скорости геострофических течений для каждого дня из интервала с 31 января 1997 г. по 10 марта 2021 г. рассчитаны траектории движения 114000 пассивных частиц, регулярно распределенных по сетке в Охотском море. Выделены все частицы, поступившие в Охотское море из Тихого океана, определено время распространения (“возраст”) вод тихоокеанского происхождения и район поступления этих вод в море. Используя ежедневные данные положения судов на промысле минтая с 1997 по 2021 гг., лагранжевы карты происхождения и “возраста” тихоокеанских вод за этот период и статистический анализ показано, что места вылова минтая чаще располагаются в водах тихоокеанского происхождения, прошедших через северные Курильские проливы не более 100 сут до дат уловов, чем в водах, поступивших в море южнее или находящихся в море более 100 сут. Анализ спутниковых снимков температуры поверхности моря позволил сделать вывод о причинах агрегации мест улова минтая в интрузиях и на лагранжевых фронтах тихоокеанской воды, как более теплых и богатых пищей.

Ключевые слова: Охотское море, минтай, промысел, спутниковая альтиметрия, лагранжевы карты, статистический анализ

DOI: 10.31857/S0205961422050050

ВВЕДЕНИЕ

Лагранжев подход к описанию и анализу динамики вод Мирового океана с использованием современных альтиметрических данных о скорости течений высокого разрешения позволяет выделить особенности циркуляции, не отражающиеся в каких-либо других доступных данных, в том числе в температуре или оптических характеристиках вод (см. монографию Prants et al., 2017). В частности, набор лагранжевых методов помогает исследовать взаимодействие вод, имеющих схожие физические характеристики, но различного происхождения. Такие воды могут значительно отличаться по биологическим параметрам, а фронтальные зоны, формирующиеся при их взаимодействии, по всей видимости, могут обладать своими собственными биологическими, в том числе продуктивными, особенностями. Ряд исследователей уже применяли лагранжевы методы для поиска закономерностей в распределении биологических параметров, промысловых или играющих важную роль в экосистеме объектов в океане (Пранц и др., 2012, Kuroda et al., 2014,

Prants et al., 2014), тем самым демонстрируя высокую практическую значимость получаемых результатов. В данной работе приводятся первые результаты анализа распределения вод Тихого океана в восточной части Охотского моря, полученные с помощью лагранжева подхода на основе спутниковых альтиметрических данных, и оценка влияния этих вод на важный в экономическом отношении промысел минтая (*Gadus chalcogrammus*).

Северо-восточная часть Охотского моря — одна из самых рыбопродуктивных акваторий дальневосточных морей, обеспечивающая максимальные годовые уловы. Ее высокая продуктивность связана, по всей видимости, с рядом динамических особенностей региона. Море отделено от остальной части Тихого океана цепью Курильских островов, в относительно узких проливах между которыми возникают сильные приливные течения и, соответственно, интенсивное вертикальное перемешивание вод (Nakamura et al., 2006), приводящее к переносу значительного количества минеральных форм основных биогенных элементов в поверхностный слой. Эти от-

носителем теплые и богатые питательными солями тихоокеанские воды проникают в море, главным образом, через северные проливы Курильских островов (Nakamura et al., 2006; Ohshima et al., 2010) и распространяются в северном направлении вдоль западного побережья Камчатки в виде Западно-Камчатского течения (Коломейцев, 2020; Файман и др., 2021). Район действия этого течения характеризуется высокими и максимальными для Охотского моря значениями концентрации фитопланктона: в среднем 500–1000 мг/м³, местами больше 1000 мг/м³, зоопланктона и бентоса (Маркина, Чернявский, 1984).

Над шельфом и материковым склоном в этой части моря среди рыб по биомассе с большим отрывом преобладает минтай (Шунтов, 1985). В 21 в. общая биомасса минтая северной части моря достигла максимума в 2010 г. С тех пор его промысловый запас оставался примерно на одном и том же уровне и по оценкам, выполненным по современным рыбохозяйственным математическим моделям с использованием результатов съемок в качестве входных данных, составлял от 5.7 до 6.0 млн т (Кулик и др., 2020). При этом оценка индекса численности и последующая оценка промыслового запаса, полученная на основе данных о вылове с помощью обобщенной аддитивной модели (GAM – Generalized Additive Model) с косвенным учетом влияния на промысел погодных условий, сезонности и т.п., показала более существенный разброс значений: от 5.2 до 6.4 млн т (Кулик и др., 2020).

Нерест основной части минтая у берегов Западной Камчатки происходит с января по июнь с пиком в апреле (Варкентин, 2015). Причем в более “теплые” годы нерест минтая в северной части Охотского моря приходится, как правило, на более ранние сроки, чем в “холодные” (Фадеев, 1981; Варкентин и др., 2001). Отдельный интерес для рынка представляет икра данного вида, поэтому значительная часть промысловых усилий на его промысле сосредоточена в зимне-весеннее время, а сохранение его запаса требует определенных ограничений промысла во время нереста.

В основных по добыче минтая промысловых подзонах Охотского моря существует два промысловых сезона: в начале и в конце года – сезоны “А” и “Б”, соответственно. При этом в течение зимне-весеннего сезона “А” добывается больше 80% от общего годового улова данного вида. В промысловых подзонах Западно-Камчатской и Камчатско-Курильской он длится с 1 января по 31 марта, а в Северо-Охотоморской подзоне – с 1 января по 9 апреля. Специализированный промысел минтая в Охотском море круглый год ведется в Восточно-Сахалинской подзоне, а осенью возобновляется в сезон “Б” в Западно-Камчатской и Камчатско-Курильской подзонах с 1 нояб-

ря и в Северо-Охотоморской подзоне с 15 октября (рис. 1). Таким образом, восточная и северная часть акватории Охотского моря представляет собой богатую экосистему, поддерживающую исключительно ценный в экономическом отношении промысел дальневосточного минтая. Поэтому изучение особенностей физических факторов, формирующих основу этой экосистемы, актуально как с фундаментальной, так и с чисто прикладной точки зрения.

Данное исследование преследует двойную цель: во-первых, получить информацию о характере распространения вод тихоокеанского происхождения в восточной части Охотского моря с целью выявления общих черт изменчивости данного явления, и, во-вторых, оценить статистическую значимость влияния происхождения вод на формирование промысловых скоплений минтая. В рамках работы решены две основные задачи. Во-первых – идентификация происхождения вод с использованием нового инструмента лагранжевой диагностики крупномасштабного переноса и перемешивания вод в океане (см. монографию Prants et al., 2017) на основе спутниковых альтиметрических данных. Во-вторых – сопоставление распределения районов вылова минтая со сроком нахождения тихоокеанских вод в районе исследования с использованием статистических методов и обобщенных аддитивных моделей.

Развиваемая методика оценки статистической значимости некоторых лагранжевых характеристик водных масс на основе данных дистанционного зондирования Земли хорошо зарекомендовала себя для нахождения мест благоприятных для обитания и улова различных промысловых видов: сайры (Пранц и др., 2012; Prants et al., 2014; Пранц и др., 2020; Prants et al., 2021), кальмара Бартрама (Будянский и др., 2017), длинноперого тунца, креветки и различных видов лосося (Watson, 2018), а также для нахождения мест с высоким риском случайных уловов нецелевых промысловых видов (Scales et al., 2018).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Методы расчета лагранжевых индикаторов.

Расчет переноса вод основан на спутниковых альтиметрических данных. Поле геострофической компоненты скорости в приповерхностном слое получено из базы данных https://resources.marine.copernicus.eu/product-detail/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/. Используемый продукт сформирован в результате комбинирования данных всех доступных на текущий момент альтиметрических миссий (Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, Topex/Poseidon, ENVISAT, GFO, ERS1/2). Он имеет горизонтальное разрешение 1/4°×1/4° и дискретность 1 сутки. Для визуализации пере-

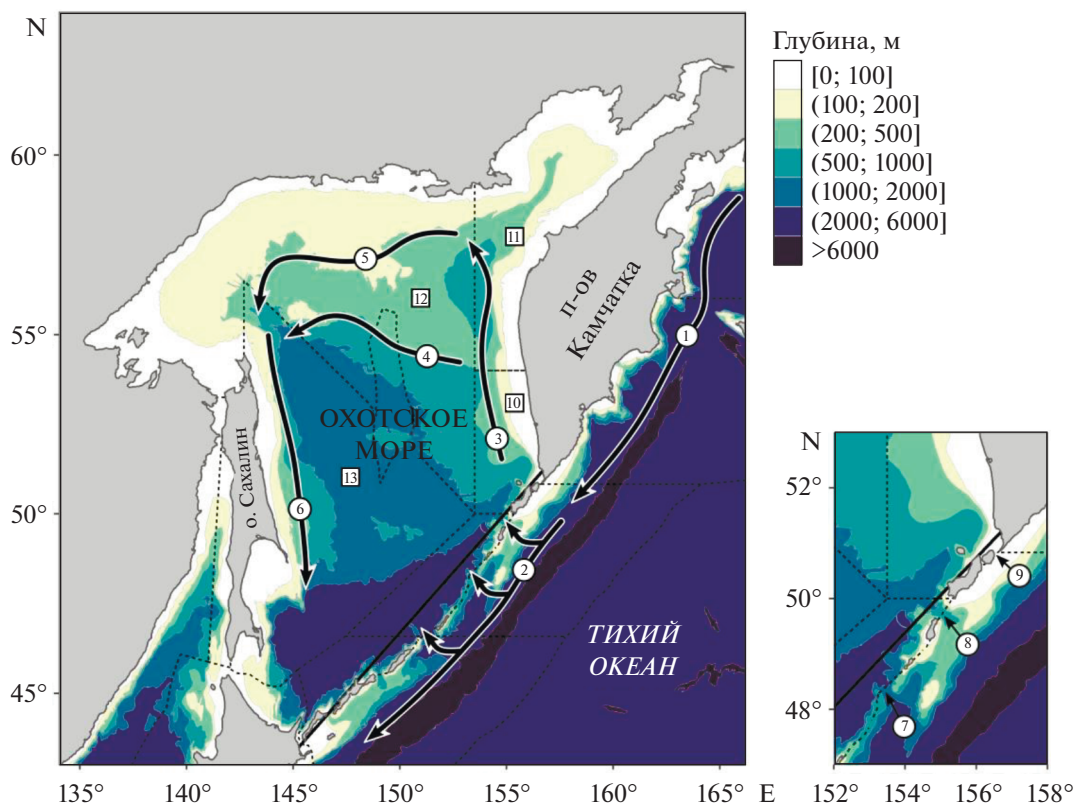


Рис. 1. Батиметрия исследуемой области. Схематически показаны основные течения: 1 – Восточно-Камчатское течение, 2 – Ойясио, 3 – Западно-Камчатское течение, 4 – Срединное течение, 5 – Северо-Охотское течение, 6 – Восточно-Сахалинское течение. На врезке отмечены основные северные Курильские проливы: 7 – пр. Круzensштерна, 8 – Четвертый Курильский пр., 9 – Первый Курильский пр. Жирной черной линией показан условный Курильский разрез (см. текст). Пунктиром показаны границы промысловых зон и подзон: 10 – подзона Камчатско-Курильская, 11 – подзона Западно-Камчатская, 12 – подзона Северо-Охотоморская, 13 – подзона Восточно-Сахалинская (эти подзоны вместе составляют Охотскую зону).

носа вод численно решены уравнения адвекции для большого числа искусственных частиц, имитирующих частицы воды, в поле скорости:

$$\frac{d\lambda}{dt} = u(\lambda, \varphi, t), \quad \frac{d\varphi}{dt} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где u и v – угловые зональная и меридиональная скорости, φ и λ – широта и долгота. Для увеличения горизонтального разрешения использована бикубическая пространственная интерполяция и интерполяция по времени лагранжевыми полиномами третьего порядка. Траектории частиц находятся интегрированием уравнений адвекции по схеме Рунге–Кутты 4-го порядка (Prants, 2014).

Расчеты проводились для интервала с 31 января 1997 г. по 10 марта 2021 г. в области 42–56.5 с.ш., 141–157 в.д. (рис. 1) с равномерной широтно-долготной сеткой начальных условий из 300×380 точек и соответствующих им ячеек (114000 частиц). Для каждого начального условия производился численный расчет траектории движения соответствующей частицы согласно ур. (1) назад по времени в течение 1095 дней. Все траектории анали-

зировались на факт пересечения условного разреза вдоль Курильских островов, представляющего собой отрезок в цилиндрической равнопромежуточной проекции с начальной точкой 43.0° с.ш., 144.5° в.д. и конечной точкой 51.75° с.ш., 157.5° в.д. (рис. 1). Также определялось время пересечения частицей данного условного разреза с точностью ± 3 сут и его географические координаты. Факт пересечения траекторией частицы указанного отрезка в данной статье трактуется как океаническое происхождение воды, соответствующей данной частице, а время пересечения позволяет оценить “возраст” этой воды в Охотском море. Происхождение частиц, не пересекавших данный отрезок в течение 3 лет от начальной даты в прошлом, условно считается охотоморским.

Данные об уловах и координатах мест улова. Различия по размерам, а значит и по мощности судов, допускаемых к промыслу в различные месяцы и подзоны, неизбежно влекут за собой различия в самих уловах, т.к. более мощные или крупные суда могут использовать более широкие тралы и поднимать на борт большие объемы за

промысловую операцию. Следовательно, для выполнения количественных оценок пространственного распределения минтая необходимо этот эффект нивелировать, либо обратить внимание только на пространственное распределение уловов без привязки к их абсолютным величинам. Был предпочтен последний вариант, т.к. предполагается, что капитаны ориентируются на акустические плотности эхозаписей в поисках промысловых концентраций минтая, а на разреженных скоплениях работать они не будут. В итоге делается допущение, что каждое судно вело промысел в меру своих технических возможностей максимально эффективно и не ловило минтай в разреженных скоплениях.

Позиции судов в Охотском море с 1997 по 2003 г. получены из судовых суточных донесений (ССД), сохраненных в базе данных “Промысел”¹ для каждого судна на каждую дату с целевым уловом минтая во всех подзонах Охотского моря. Целевым считался улов, если доля минтая от общего вылова за сутки в указанной подзоне превышала 50%. С 2004 г. использованы все позиции судов, помеченные как траления, в зеркале Отраслевой Системы Мониторинга, ведомой ИКИ РАН в ТИПРО.

Все позиции со скоростью движения судна более 5 узлов были удалены, что позволяет с высокой вероятностью отсеять ошибки в отчетности о виде работ судна (Пырков и др., 2015). Дополнительно были удалены позиции, где скорость движения составляла менее 2 узлов, т.к. даже донные траления ведутся на более высоких скоростях, чтобы трал раскрывался, а при добыче минтая донные траления запрещены. Разноглубинные траления ведутся однозначно на более высоких скоростях. Таким образом, оставлены только те позиции, в которых осуществлялся целевой лов минтая разноглубинными тралями и снюрреводами. Также добавлены координаты каждой промысловой операции при их наличии.

Статистический анализ. Проверка влияния “возраста” тихоокеанской воды в Охотском море (интервала времени с момента поступления тихоокеанской воды в Охотское море до момента наблюдения) на образование промысловых скоплений минтая выполнена следующим образом. Для всех дат выбирались места уловов, попадающие в ячейки с водой тихоокеанского происхождения. Уловы из ячеек с водой охотоморского происхождения (центр ячейки не пересекал условный Курильский разрез в течение последних 1095 сут) помечались так, чтобы при выборе случайных мест пропускать их. Для каждой даты выбирались столько же случайных точек в пределах рас-

сматриваемой акватории из сетки с разрешением $1^\circ \times 1^\circ$, сколько за эту дату наблюдалось позиций вероятных тралений так, чтобы все эти точки попадали в ячейки отличные от тех ячеек, куда попали места уловов. Условие нахождения таких “случайных” ячеек на расстоянии 1° друг от друга необходимо для избегания их попадания в места, близкие к точкам улова. Выполнялось сравнение “возраста” и района проникновения в Охотское море тихоокеанской воды для всех выбранных таким образом ячеек с уловом и без улова с помощью теста Колмогорова–Смирнова. В сумме выбрано 1153641 ячеек с уловом (“TRUE”) и столько же ячеек без улова (“FALSE”).

Для выявления общей закономерности между “возрастом” тихоокеанской воды или местом ее проникновения в Охотское море и фактом наличия или отсутствия улова и оценки значимости эффектов этих переменных использовались обобщенные аддитивные модели (GAM – Generalized Additive Model) (Hastie and Tibshirani, 2014). Отличие их от обычных линейных моделей заключается в возможности использования не только нормальных распределений, но и иных распределений из экспоненциального семейства с аддитивной ошибкой, что широко используется в рыбохозяйственных исследованиях (Venables and Ripley, 2004). Классификация бинарных событий в нашей GAM в общем виде может быть выражена по формуле логистической регрессии (2) (Hastie and Tibshirani, 1986):

$$\ln[p(X)/(1-p(X))] = \eta = \sum_1^p s_j(X_j), \quad (2)$$

где $p(X) = Prob(Y = 1 \vee X)$ – вероятность улова минтая при условиях соответствия предикторам X , η – линейный предиктор, предикторы $X = (X_1, X_2, \dots, X_p)$ долгота, широта проникновения воды в Охотское море, длительность путешествия воды в днях, порядковый номер дня в году, s_j – сглаживающие функции, например, тонкоплечный регрессионный сплайн (TPC). В отсутствие гипотезы о форме зависимости переменной отклика от предикторов достаточно эффективно применение TPC (Wood, 2003). Настройка GAM произведена совместно с оптимизацией числа псевдоузлов TPC методом, обобщенной кросс-валидации (Wood, 2004).

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены примеры рассчитанных в альтиметрическом поле скорости лагранжевых карт происхождения вод, которые показывают проникновение тихоокеанских вод в восточную часть Охотского моря. Методика расчета лагранжевых карт описана в предыдущем разделе. Как

¹ Свидетельство № 6393 от 01.08.2000 г. о регистрации в Государственном регистре базы данных “Промысел” за № 0220006764.

правило, лов в январе сосредоточен в основном на “языках” тихоокеанской воды, вошедшей в море через северные Курильские проливы в декабре-январе предыдущего года и адвектируемой Западно-Камчатским течением (рис. 2, а, е). В феврале эта сравнительно “молодая” океанская вода распространяется на север вдоль западного побережья Камчатки, и уловы распределяются по всему Западно-Камчатскому течению (рис. 2, б, д). К марту лов смещается во впадину ТИПРО и частично в зал. Шелихова (рис. 2, в, е). В конце путины места улова перемещаются на северо-запад (на рис. 2 не показано). Вероятно, это связано с действием Срединного течения. Цветная графика “возраста” тихоокеанской воды на рис. 2 позволяет сделать предварительный вывод о том, что места улова минтая сосредоточены в основном на сравнительно “молодых” водах, поступивших в море из океана до 100 суток назад.

Для статистического обоснования этого наблюдения были рассчитаны вероятности для времени путешествия частиц от условного разреза до случайно выбранных мест в пределах исследуемой акватории и до мест вылова минтая за длительный период времени с 1997 по 2021 гг. Распределение вероятности этого параметра для случайно выбранных мест за разные годы почти не имело межгодовых отличий и для всех лет было близко к равномерному с пиками на интервалах 350–400 и 700–800 сут. Эти пики соответствуют одному и двум периодам циркуляции вод в приповерхностном слое Охотского моря. При этом распределение вероятности для мест вылова минтая во многие годы показало более высокую вероятность вылова в водах, относительно недавно поступивших в Охотское море (менее 100 сут). К таким годам относятся 2006, 2009–2013, 2016–2020 гг. Почти во все годы также наблюдался второй пик вероятности в интервале примерно 350–400 сут с момента пересечения частицей воды выбранного условного разреза. За исключением некоторых лет (2002, 2004, 2007, 2014) он был второстепенным. В некоторые годы также можно выделить третью моду в интервале 700–800 сут. Вторая и третья моды также связаны с особенностью циркуляции вод в Охотском море.

Рисунок 3 демонстрирует сравнение распределений вероятности для данного параметра между местами без уловов и с уловами без разбиения по годам. На нем видны те же особенности: близкое к равномерному распределение вероятности для случайно выбранных мест и три основных моды вероятности для мест с уловами, основная из которых отвечает за интервал примерно 0–100 сут.

Такой же анализ выполнен для широты, на которой частицы тихоокеанской воды, проникающие в Охотское море, пересекали выбранный нами разрез. Сравнение распределений вероятно-

сти для широты пересечения условного разреза между случайно выбранными частицами воды и теми частицами, в которых впоследствии наблюдался вылов минтая, для разных лет представлено на рис. 4. Места с уловами минтая ежегодно располагались в водах, которые попадали в Охотское море преимущественно севернее 48° с.ш., т.е. через северные Курильские проливы (рис. 4). Результаты аналогичных сравнений по годам позволяют сделать вывод о том, что распределение уловов в географическом пространстве в те годы, когда суммарный вылов был на высоком уровне (последнее десятилетие), в основном приходилось на относительно “молодые” тихоокеанские воды, которые пересекали условный разрез в районе северных Курильских проливов. Для количественной оценки различий между полученными выборками был выполнен тест Колмогорова–Смирнова. Для времени путешествия воды от условного разреза до случайных ячеек и ячеек с уловами статистический параметр Колмогорова–Смирнова оказался равным $D = 0.2555$ при уровне значимости $p < 2.2 \times 10^{-16}$. Для широты пересечения он равен $D = 0.60818$ с $p < 2.2 \times 10^{-16}$. Таким образом, статистическая значимость различий в обоих случаях оказалась меньше машинного нуля.

Оценка совокупного влияния рассматриваемых лагранжевых параметров на вероятность вылова минтая выполнена с помощью GAM с использованием тензорного произведения. Среди всех проверенных GAM, начиная с нуль-модели и заканчивая полной моделью, максимальную долю дисперсии (49.2%) описала GAM, включавшая в качестве слагаемых функцию порядкового номера дня в году (DoY) и координат пересечения условного Курильского разреза частицей воды, в ячейке которой впоследствии наблюдался вылов (yinit, xinit), а также функцию порядкового номера дня и длительности путешествия частиц (days) с разделением по годам (Year). Формула линейного предиктора для языка R, в котором была построена GAM показана ниже (3):

$$\eta = \text{ti}(\text{days}) + \text{ti}(\text{yinit}) + \text{ti}(\text{yinit}, \text{xinit}, \text{DoY}) + \text{ti}(\text{DoY}, \text{days}, \text{by} = \text{Year}), \quad (3)$$

где ti – специальный вариант тензорного произведения, реализованный в пакете `mgcv` для языка R, для взаимодействующих предикторов, когда необходимо выделить основные эффекты (Wood, 2017). Все эти предикторы находились на высочайшем уровне значимости $p < 0.001$. Более простые конфигурации GAM имели более высокие информационные критерии, следовательно, полученную модель можно назвать оптимальной.

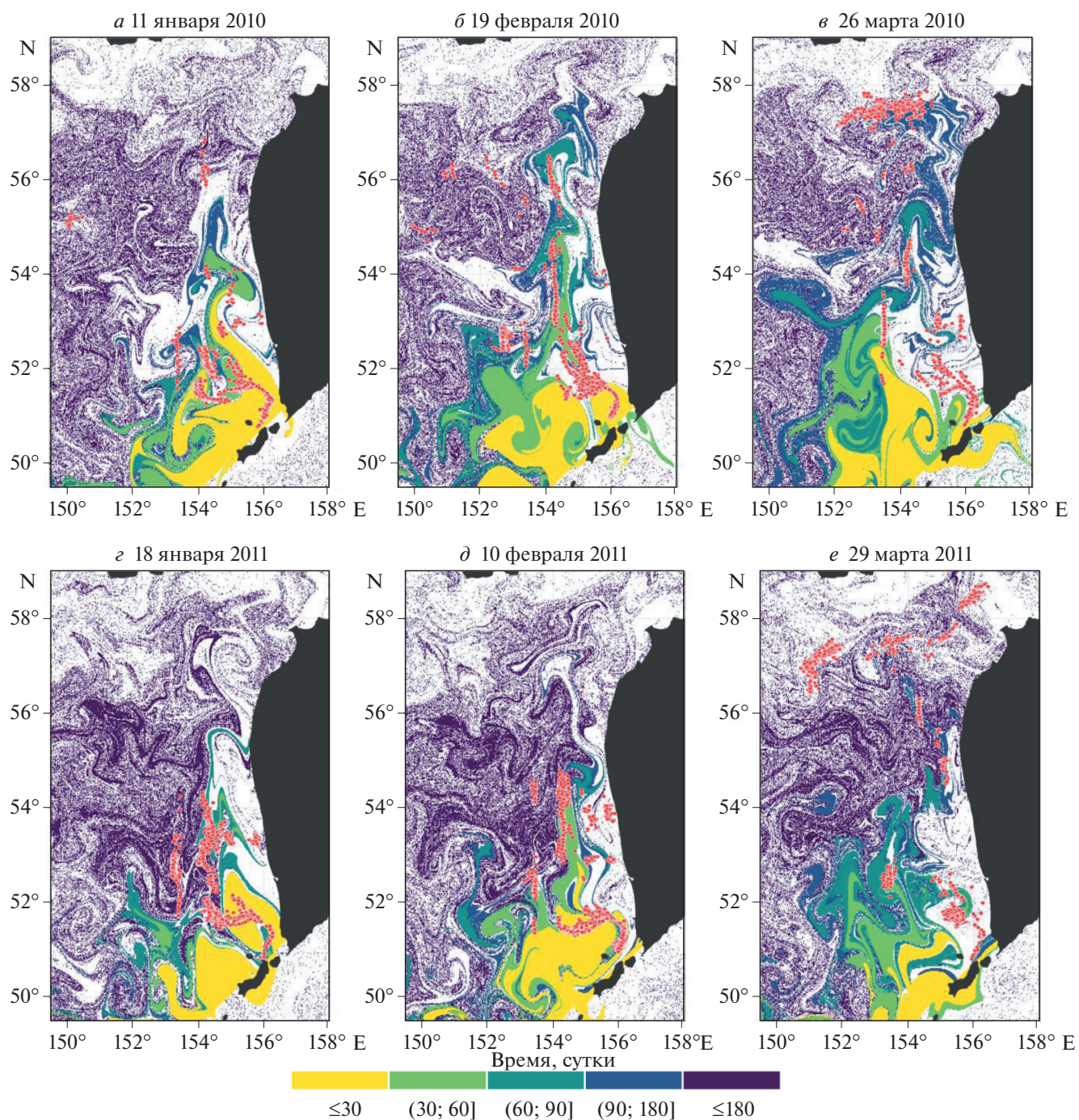


Рис. 2. Примеры лагранжевых карт, показывающих проникновение тихоокеанской воды в восточную часть Охотского моря в путины 2010 и 2011 гг. Цветом показан “возраст” тихоокеанских вод, попавших в море, в сутках. Красными кружками показаны положения судов на промысле минтая в период за 3 сут до и 3 сут после указанных на картах дат.

ОБСУЖДЕНИЕ

“Языки” тихоокеанской воды представляют собой интрузии инородных вод, вклинивающиеся в охотоморские воды. Границы этих интрузий являются лагранжевыми фронтами (Пранц и др., 2014; Prants et al., 2014), разделяющими воды с разными свойствами (температурой, соленостью,

питательными веществами, концентрацией фито- и зоопланктона и др.). Уловы минтая наблюдаются как на границах таких интрузий, так и внутри них. Тихоокеанская вода постепенно адвектируется Западно-Камчатским течением на север. В данном случае роль лагранжевых фронтов, вероятно, заключается в том, что они являются ори-

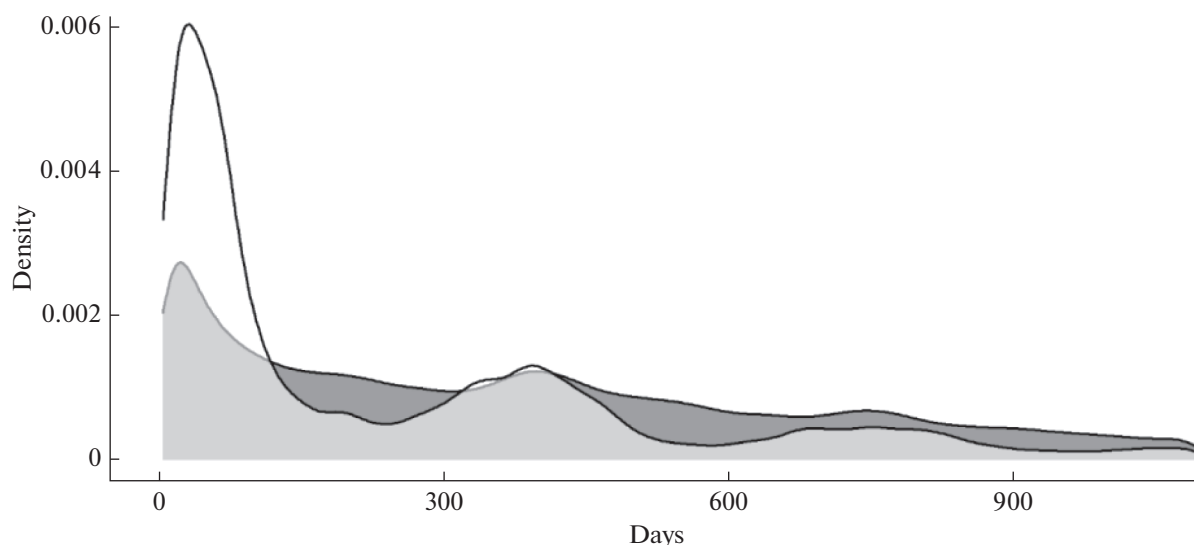


Рис. 3. Сравнение графиков распределения вероятности для времени путешествия частиц от Курильского разреза (см. рис. 1) до случайно выбранных мест (темная заливка) и до мест вылова минтая (светлая заливка) за период в 1997–2021 гг.

ентиром и предиктором наличия корма для минтая. Этот тип пассивных лагранжевых фронтов, где не обязательно возникают большие градиенты плотности и субмезомасштабные процессы агеострофической циркуляции на фронте, стимулирующие рост первичной и вторичной продукции (Levy et al., 2018).

Спутниковые измерения уровня моря позволяют получить поле скорости в геострофическом приближении. Этого достаточно для расчета характерных путей и времени крупномасштабной адвекции водных масс. В расчетах не учитываются вертикальные агеострофические процессы, которые являются локальными, субмезомасштабными и краткосрочными. Эти процессы безусловно важны для поступления биогенных элементов к поверхности и создания мест скопления корма минтая. Однако, нашими задачами являлись систематическое детектирование крупномасштабных вторжений океанических вод в Охотское море и поиск корреляций мест вылова минтая с этими водными массами, а не поиск корреляций интрузий тихоокеанских вод с местами скопления корма. Там, где есть корм, разумеется, могут быть и уловы, но не обязательно, если либо рыба, либо рыбаки не нашли эти места. Т.о., исходя из поставленных целей, не обязательно рассматривать вертикальные движения вод, да это и невозможно с геострофическим полем скорости АВИЗО.

Классический тест Колмогорова-Смирнова различий эмпирических кумулятивных распределений двух выборок и GAM показали высокую статистическую значимость исследованных лагранжевых показателей: длительности путешествия воды и места ее поступления в Охотское море для опре-

деления вероятности улова минтая. GAM позволила установить, что в начале года, когда минтая ловится больше всего, промысел идет на сравнительно “молодой” (с “возрастом” до 100 сут) воде из Тихого океана, зашедшей в море через северные проливы. Эти субарктические воды богаты питательными веществами, содержащимися в основном потоке течения Ойясио, которые еще бо-

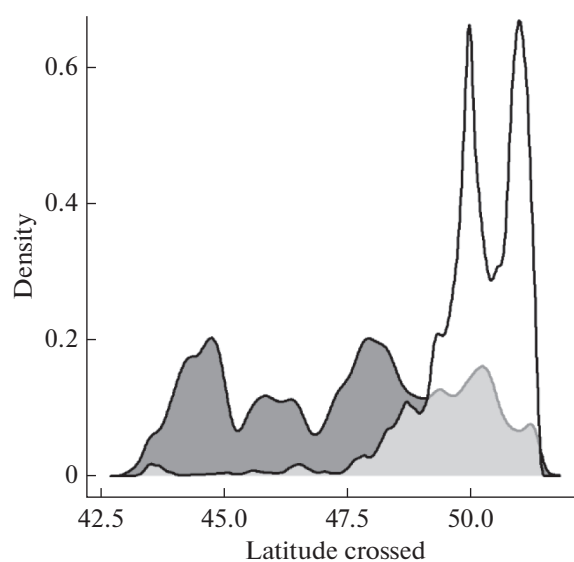


Рис. 4. Сравнение графиков распределения вероятности широты пересечения Курильского разреза (см. рис. 1) случайно выбранными частицами (темная заливка) и частицами, где впоследствии наблюдался вылов минтая (светлая заливка), за период времени 1997–2021 гг.

лее обогащаются в Курильских проливах с интенсивным вертикальным перемешиванием благодаря приливам (Kusakabe et al., 2002). По всей видимости, они отличаются от охотоморских вод повышенными концентрациями фитопланктона и зоопланктона — основы корма минтая.

В конце года наблюдается аналогичная картина, а в середине, наоборот, промысел идет на “старой” тихоокеанской воде (около 2 лет) из центральной части Курильской гряды. Однако, это может быть следствием административных ограничений промысла: в водах западной Камчатки и северной части Охотского моря промысел закрыт для большинства типов судов для защиты нереста минтая, где он образует высокие нерестовые концентрации, а в течение года доступен минтай для лова у восточного Сахалина, где его уловы на порядок ниже (см. Введение).

Вероятно, исследованная восточная часть Охотского моря не случайно является самой рыбопродуктивной зоной Охотского моря, где доминирует минтай. Его запас в оставшейся части моря на порядок ниже. Одной из множества абиотических причин, по которым минтай для нереста предпочитает воды вдоль западного побережья Камчатки, может быть заток теплых тихоокеанских вод в зимний преднерестовый период. Выживание личинок минтая там может быть выше, чем в более холодной воде на западе моря. Мы предполагаем, что в результате естественного отбора минтай предпочитает те места для нереста, куда приходит тихоокеанская вода.

Из-за ценности икры минтая основной вылов этого вида сосредоточен в период года, когда большая часть самок уже имеет созревающую икру. Растянутость нереста каждой отдельной особи и наличие в популяции особей, находящихся на различных стадиях созревания, приводит к тому, что вылов накладывается на время перед нерестом. Можно предположить, что в это время в основном облавливаются преднерестовые скопления рыб. Известно, что сроки нереста в разных частях ареала существенно отличаются, что связывают с приспособлением конкретных группировок данного вида к обитанию в водах с определенными гидрологическими и фенологическими особенностями (Шунтов и др., 1993).

В пределах рассматриваемой нами акватории наиболее раннее созревание гонад производителей и более ранний массовый нерест минтая происходит у Западной Камчатки. В заливе Шелихова и в северо-западной части рассматриваемой акватории нерест происходит обычно позже (Варкентин, 2015). По всей видимости, при нересте минтай на уровне инстинктов ориентируется, в том числе, на какие-то параметры вод, которые позволили бы его икре находиться в максимально благоприятных температурных условиях. Также

существует вероятность, что взрослые особи минтая умеют каким-то образом заблаговременно распознавать потенциальную благоприятность условий питания для личинок. Такая эволюционная приспособленность вполне может быть следствием более высокой выживаемости личинок минтая в водах тихоокеанского происхождения, которые имеют более высокую температуру, чем воды Охотского моря.

Если это предположение верно, то проникая в северную часть моря, в основном еще покрытую льдом, эти воды приносят икру минтая в те районы, где в самое ближайшее время лед разрушится и начнется прикромочное, а затем и весеннее “цветение” фитопланктона, который служит пищей для личинок. Возможным ориентиром в выборе места нереста для рыб может быть горизонтальный градиент температуры. Для подтверждения данной гипотезы нами сопоставлены места вылова минтая с усредненными спутниковыми данными по температуре поверхности моря в зимний промысловый сезон для ряда лет. Места вылова минтая в Камчатско-Курильской и Западно-Камчатской подзонах (см. рис. 1) располагаются в основном на границах интрузий более теплой (по сравнению с охотоморской) тихоокеанской воды (рис. 5). Лагранжева карта “возраста” тихоокеанской воды в восточной части Охотского моря на 18 января 2011 г. (рис. 6, б) показывает типичную картину проникновения и распространения этих вод в море и демонстрирует сходство с данными по температуре поверхности моря на конкретные сутки с выловом минтая (рис. 6, а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью статистического анализа данных за большой промежуток времени показано, что места улова минтая в Охотском море сосредоточены в основном внутри интрузий теплой сравнительно “молодой” воды тихоокеанского происхождения или вблизи границ таких интрузий, на лагранжевых фронтах. Для идентификации интрузий была предложена новая диагностическая методика — лагранжевы карты происхождения вод, которые вычисляются ежедневно на базе альтиметрического поля скорости практически в режиме реального времени. В отличие от инфракрасных спутниковых данных ТПО, которые недоступны в облачные дни, преобладающие в этом районе во время путины, лагранжевы карты легко вычисляются на каждые сутки и могут быть переданы на борт рыболовецких судов по электронной почте. Таким образом, рыбаки могут получить наглядное представление о том, где находятся перспективные для промысла места, что позволяет экономить время и горючее для поиска скоплений минтая. В работе подготовлен совершенно новый набор ранее непроверенных от-

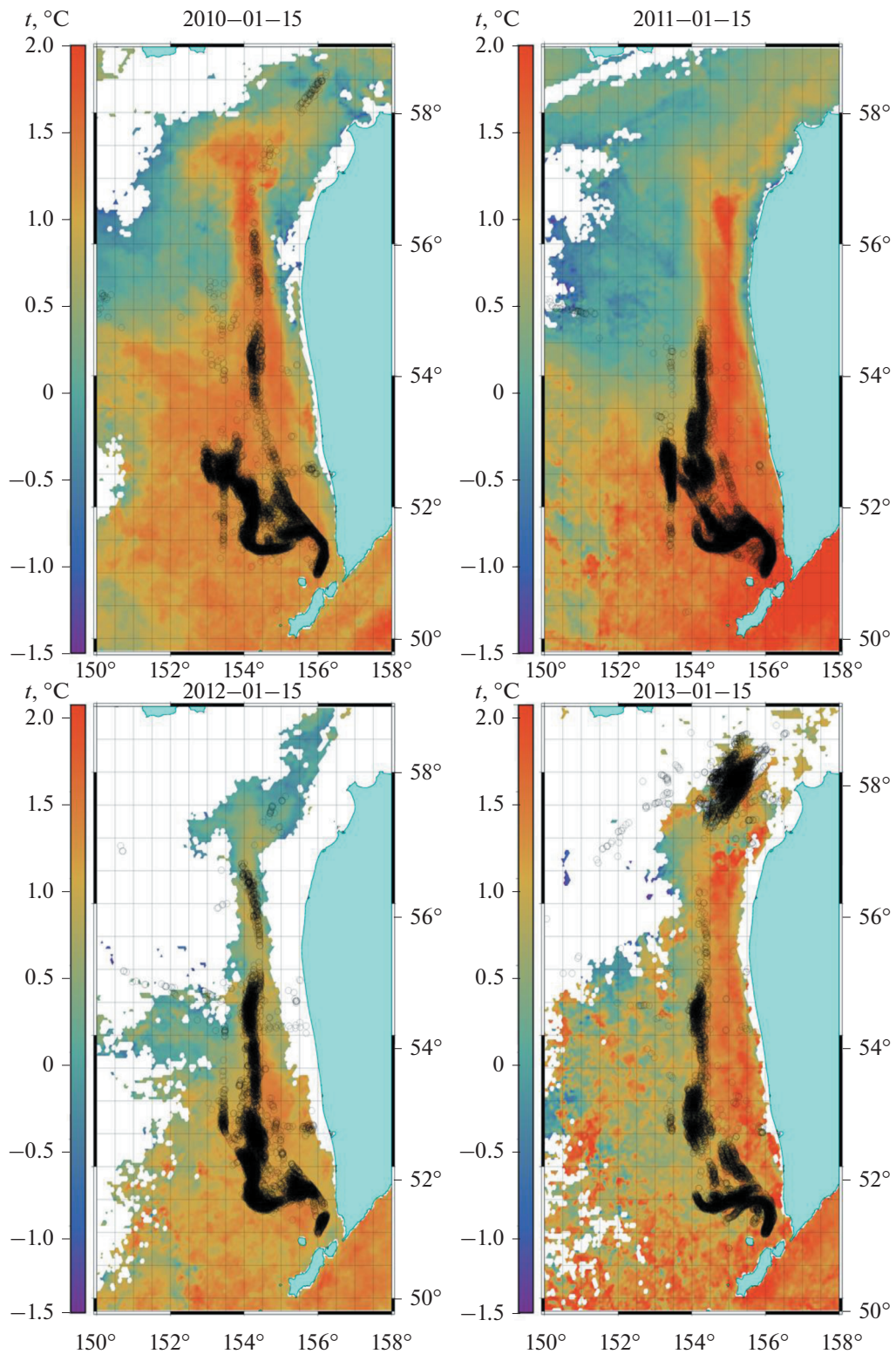


Рис. 5. Температура поверхности в Камчатско-Курильской и Западно-Камчатской подзонах в зимние промысловые сезоны 2011–2013 гг., усредненная за ± 30 сут относительно 15 января каждого года с наложенными местами вылова минтая (черные точки) за те же 60 сут. Спутниковые данные ТПО (MODIS) в восточной части Охотского моря показывают более теплые тихоокеанские воды, проникающие в море через северные Курильские проливы.

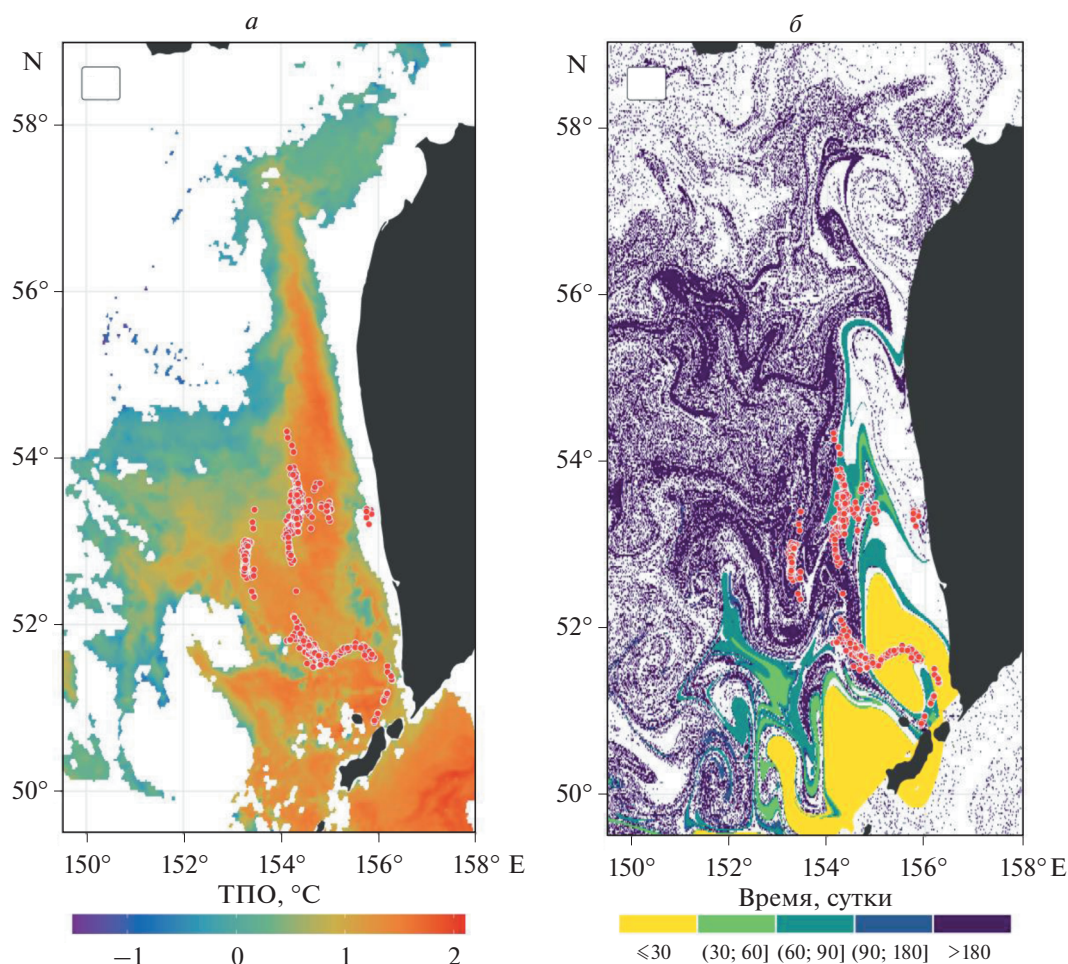


Рис. 6. *а* – ТПО (MODIS) на 18 января 2011 г. *б* – Лагранжева карта “возраста” тихоокеанской воды в Восточной части Охотского моря. Красными кружками обозначены положения судов на промысле минтая на ту же дату.

носителю рыб в Охотском море лагранжевых характеристик. Этот набор может быть проверен позднее и в отношении распределения других видов рыб или зоопланктона.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 19-17-00006. Поля скорости обработаны на вычислительном кластере в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН № 121021700341-2. Работа К.К. Киввы выполнена в рамках части II раздела 8 государственного задания ФГБНУ “ВНИРО” № 070-00007-22-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Варкентин А.И., Буслов А.В., Тепнин О.Б. Некоторые особенности нереста и распределения икры минтая в водах западной Камчатки // *Изв. ТИНРО*. 2001. Т. 128. С. 177–187.

Варкентин А.И. Сезонная динамика зрелости гонад и показателей упитанности минтая (*Theragra chalcogramma*) в северной части Охотского моря // *Изв. ТИНРО*. 2015. Т. 180. С. 77–92.

Коломейцев В.В. Изменчивость западно-камчатского течения зимой 1994–2019 гг. по альтиметрическим данным // *Изв. ТИНРО*. 2020. Т. 200. Вып. 2. С. 412–426.

Кулик В.В., Варкентин А.И., Ильин О.И. Стандартизация уловов на усилие минтая в северной части Охотского моря с учетом некоторых факторов среды // *Изв. ТИНРО*. 2020. Т. 200. Вып. 4. С. 819–836. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-819-836>

Маркина Н.П., Чернявский В.И. Количественное распределение планктона и бентоса в Охотском море // *Изв. ТИНРО*. 1984. Т. 109. С. 109–119.

Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В. Лагранжевы когерентные структуры в океане благоприятные

- для рыбного промысла // Доклады АН. 2012. Т. 447. № 1. С. 93–97.
- Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.* Лагранжевы фронты в океане // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. № 3. С. 323–330.
- Пранц С.В., Кулик В.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.* О связи мест промысла сайры с крупномасштабными когерентными структурами в океане по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 18–26. <https://doi.org/10.31857/S0205961420040053>
- Пыrkov В.Н., Солодилов А.В., Дегай А.Ю.* Создание и внедрение новых спутниковых технологий в системе мониторинга рыболовства // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 251–262.
- Фадеев Н.С.* Сроки размножения и нерестовых подходов минтая // Экология, запасы и промысел минтая. Владивосток: ТИНРО. 1981. С. 3–18.
- Файман П.А., Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.* Моделирование распространения тихоокеанских вод в Охотском море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 3. С. 372–384.
- Шунтов В.П.* Биологические ресурсы Охотского моря: монография. М.: Агропромиздат, 1985. 224 с.
- Шунтов В.П., Волков А.Ф., Темных О.С., Дулепова Е.П.* Минтай в экосистемах дальневосточных морей. Владивосток: ТИНРО. 1993. 426 с.
- Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models // *Statist. Sci.* 1986. V. 1. №. 3. P. 297–318. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013604>
- Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models // *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online.* 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03141>
- Kuroda H., Takahashi D., Mitsudera H., Azumaya T., Setou T.* A preliminary study to understand the transport process for the eggs and larvae of Japanese Pacific walleye pollock *Theragra chalcogramma* using particle-tracking experiments based on a high-resolution ocean model // *Fisheries science.* 2014. V. 80. № 2. P. 127–138. <https://doi.org/10.1007/s12562-014-0717-y>
- Kusakabe M., Andreev A., Lobanov V., Zhabin I., Kumamoto Y., Murata A.* Effects of the Anticyclonic Eddies on Water Masses, Chemical Parameters and Chlorophyll Distributions in the Oyashio Current Region // *J. Oceanogr.* 2002. V. 58. № 5. P. 691–701. <https://doi.org/10.1023/A:1022846407495>
- Levy M., Franks P.J.S., Smith K.S.* The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems // *Nature Communications.* 2018. V. 9. № 4758. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07059-3>
- Nakamura T., Toyoda T., Ishikawa Y., Awaji T.* Enhanced ventilation in the Okhotsk Sea through tidal mixing at the Kuril Straits // *Deep Sea Research Part I.* 2006. V. 53. P. 425–448. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.12.006>
- Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S., Wakatsuchi M.* Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography.* 2010. V. 57. № 13–14. P. 1247–1256. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.12.012>
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions // *Deep Sea Research I.* 2014. V. 90. P. 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.04.012>
- Prants S. V.* Chaotic Lagrangian transport and mixing in the ocean // *The European Phys. J. Special Topics.* 2014. V. 223. № 13. P. 2723–2743. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02288-5>
- Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. *Physics of Earth and Space Environments.* NY: Springer, 2017. 273 p.
- Prants S.V., Kulik V.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Relationship between Saury Fishing Grounds and Large-Scale Coherent Structures in the Ocean, According to Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2020. V. 56. № 12. P. 1638–1644. <https://doi.org/10.1134/S000143382012050>
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Kulik V.V.* Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019 // *J. Marine Systems.* 2021. V. 222. Art. No. 103605. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103605>
- Scales K.L., Hazen E.L., Jacox M.G., Castruccio F., Maxwell S.M., Lewison R.L., Bograd S.J.* 2018. Fisheries bycatch risk to marine megafauna is intensified in Lagrangian coherent structures // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* V. 115. P. 7362–7367. <https://doi.org/10.1073/pnas.1801270115>
- Venables W.N., Dichmont C.M.* GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research // *Fish. Res.* 2004. V. 70. Iss. 2–3. P. 319–337. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.08.011>
- Watson J.R., Fuller E.C., Castruccio F.S., Samhouri J.F.* 2018. Fishermen follow fine-scale physical ocean features for finance // *Frontiers in Marine Science.* 2018. V. 5. P. 46. doi: 10.2007/3389/fmars.2018.00046.
- Wood S.N.* Thin plate regression splines // *J. R. Stat. Soc. Ser. B (Statistical Methodol.).* 2003. V. 65. Iss. 1. P. 95–114. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00374>
- Wood S.N.* Stable and Efficient Multiple Smoothing Parameter Estimation for Generalized Additive Models // *J. Am. Stat. Assoc.* 2004. V. 99. Iss. 467. P. 673–686. <https://doi.org/10.1198/016214504000000980>
- Wood S.N.* Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition). London: Chapman and Hall/CRC Press, 2017. 496 p.

Satellite-Based Lagrangian Analysis of Pacific Water in the Okhotsk Sea in Application to the Pollock Fishery

M. V. Budyansky¹, V. V. Kulik², K. K. Kivva³, M. Yu. Uleysky¹, and S. V. Prants¹,

¹*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

²*Pacific branch of Russian Research Federal Institute for Fishery and Oceanography (TINRO), Vladivostok, Russia*

³*Russian Research Federal Institute for Fishery and Oceanography, Moscow, Russia*

Based on satellite altimetry velocity data, the trajectories of 114 000 passive particles, regularly distributed over a grid in the Okhotsk Sea, were daily calculated in 1997–2021. All the particles, entered the Sea from the Pacific Ocean were identified, and the time of propagation ('age') of Pacific water and the region where this water enters the Sea were determined. Using daily vessel position data in the pollock fishery in that period of time, computed Lagrangian maps of the origin and 'age' of the Pacific water and statistical analysis, it was shown that the fishing grounds were more often located in waters of Pacific origin that passed through the northern Kuril Straits no more than 100 days prior the dates of catches than in the waters entering the Sea to the south or being in the Sea more than 100 days. The analysis of satellite images of the sea surface temperature made it possible to draw conclusion about the reasons for the aggregation of pollock catches in intrusions and on Lagrangian fronts of the Pacific water, as warmer and richer in food.

Keywords: Okhotsk Sea, pollock, fishery, satellite altimetry, Lagrangian maps, statistical analysis

REFERENCES

- Budyansky M.V., Prants S.V., Samko E.V., Uleysky M.Yu.* Vyyavlenie i lagranzhev analiz okeanograficheskikh struktur perspektivnykh dlya promysla kal'mara Bartrama (*Ommastrephes bartramii*) v rayone Yuzhnykh Kuril [Identification and Lagrangian analysis of oceanographic structures promising for the fishery of the Bartram squid (*Ommastrephes bartramii*) in the South Kuriles] // *Okeanologiya*. 2017. № 5. P. 720–730. (In Russian).
- Fadeev N.S.* Sroki razmnozheniya i nerestovykh podkhodov mintaya [Terms of reproduction and spawning approaches of walleye pollock] // *Ekologiya, zapasy i promysel mintaya*. Vladivostok: TINRO. 1981. P. 3–18. (In Russian)
- Fayman P.A., Prants S.V., Budyanskiy M.V., Uleyskiy M.Yu.* Modelirovanie rasprostraneniya tikhoookeanskikh vod v Okhotskom more [Modeling the spread of Pacific waters in the Sea of Okhotsk] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2021. V. 57. № 3. P. 372–384. (In Russian).
- Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models // *Statist. Sci.* 1986. V. 1. №. 3. P. 297–318. <https://doi.org/10.1214/ss/1177013604>
- Hastie T., Tibshirani R.* Generalized Additive Models // *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat03141>
- Kolomeytsev V.V.* Izmenchivost' zapadno-kamchatskogo techeniya zimoy 1994–2019 gg. po al'timetricheskim danym [Variability of the West Kamchatka current in winter 1994–2019 according to altimetry data] // *Izv. TINRO*. 2020. V. 200. V. 2. P. 4120–426. (In Russian).
- Kulik V.V., Varkentin A.I., Il'in O.I.* Standartizatsyya ulovov na usilie mintaya v severnoy chasti Okhotskogo morya s ychetom nekotorykh faktorov sredi [Standardization of catches per pollock effort in the northern part of the Sea of Okhotsk, taking into account some environmental factors] // *Izv. TINRO*. 2020. V. 200. V. 4. P. 819–836. (In Russian).
- Kuroda H., Takahashi D., Mitsudera H., Azumaya T., Setou T.* A preliminary study to understand the transport process for the eggs and larvae of Japanese Pacific walleye pollock *Theragra chalcogramma* using particle-tracking experiments based on a high-resolution ocean model // *Fisheries science*. 2014. V. 80. № 2. P. 127–138. <https://doi.org/10.1007/s12562-014-0717-y>
- Kusakabe M., Andreev A., Lobanov V., Zhabin I., Kumamoto Y., Murata A.* Effects of the Anticyclonic Eddies on Water Masses, Chemical Parameters and Chlorophyll Distributions in the Oyashio Current Region // *J. Oceanogr.* 2002. V. 58. № 5. P. 691–701. <https://doi.org/10.1023/A:1022846407495>
- Levy M., Franks P.J.S., Smith K.S.* The role of submesoscale currents in structuring marine ecosystems // *Nature Communications*. 2018. V. 9. № 4758. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07059-3>
- Markina N.P., Chernyavskiy V.I.* Kolichestvennoe raspredelenie planktona i bentosa v Okhotskom more [Quantitative distribution of plankton and benthos in the Sea of Okhotsk] // *Izv. TINRO*. 1984. V. 109. P. 109–119. (In Russian).
- Nakamura T., Toyoda T., Ishikawa Y., Awaji T.* Enhanced ventilation in the Okhotsk Sea through tidal mixing at the Kuril Straits // *Deep Sea Research Part I*. 2006. V. 53. P. 425–448. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.12.006>
- Ohshima K.I., Nakanowatari T., Riser S., Wakatsuchi M.* Seasonal variation in the in-and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2010. V. 57. № 13–14. P. 1247–1256. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.12.012>
- Prants S.V., Uleyskiy M.Yu., Budyanskiy M.V.* Lagranzhevy kogerentnye struktury v okeane blagopriyatnye dlya rybnogo promysla [Lagrangian coherent structures in the ocean favorable for fisheries] // *Doklady AN*. 2012. V. 447. № 1. P. 93–97. (In Russian).
- Prants S.V., Budyanskiy M.V., Uleyskiy M.Yu.* Lagranzhevy fronty v okeane [Lagrangian fronts in the ocean] // *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 2014. V. 50. № 3. P. 323–330. (In Russian).

- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions // *Deep Sea Research I*. 2014. V. 90. P. 27–35.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.04.012>
- Prants S.V.* Chaotic Lagrangian transport and mixing in the ocean // *The European Phys. J. Special Topics*. 2014. V. 223. № 13. P. 2723–2743.
<https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02288-5>
- Prants S.V., Uleysky M.Y., Budyansky M.V.* Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. *Physics of Earth and Space Environments*. NY: Springer, 2017. 273 p.
- Prants S.V., Kulik V.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.* Relationship between Saury Fishing Grounds and Large-Scale Coherent Structures in the Ocean, According to Satellite Data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. № 12. P. 1638–1644.
<https://doi.org/10.1134/S000143382012050>
- Prants S.V., Kulik V.V., Budyanskiy M.V., Uleyskiy M.Yu.* О связи мест промысла сайры с крупномасштабными когерентными структурами в океане по спутниковым данным [On the connection of saury fishing grounds with large-scale coherent structures in the ocean according to satellite data] // *Issled. Zemli iz kosmosa*. 2020. № 4. P. 18–26. (In Russian).
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu., Kulik V.V.* Lagrangian fronts and saury catch locations in the Northwestern Pacific in 2004–2019 // *J. Marine Systems*. 2021. V. 222. Art. No. 103605.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103605>
- Pyrkov V.N., Solodilov A.V., Degay A.Yu.* Sozdanie i vnedrenie novykh sputnikovykh tekhnologiy v sisteme monitoringa rybolovstva [Creation and implementation of new satellite technologies in the fisheries monitoring system] // *Sovremen. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa*. 2015. V. 12. № 5. P. 251–262. (In Russian).
- Scales K.L., Hazen E.L., Jacox M.G., Castruccio F., Maxwell S.M., Lewison R.L., Bograd S.J.* 2018. Fisheries bycatch risk to marine megafauna is intensified in Lagrangian coherent structures // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. V. 115. P. 7362–7367.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1801270115>
- Shuntov V.P.* Biologicheskie resursy Okhotskogo morya: monografiya. [Biological resources of the Sea of Okhotsk: monograph.] M.: Agropromizdat, 1985. 224 p. (In Russian).
- Shuntov V.P., Volkov A.F., Temnykh O.S., Dulepova E.P.* Mintay v ekosistemakh dal'nevostochnykh morey. [Pollock in the ecosystems of the Far Eastern seas]. Vladivostok: TINRO. 1993. 426 p. (In Russian).
- Varkentin A.I., Buslov A.V., Tepnin O.B.* Nekotorye osobennosti neresta i raspredeleniya ikry mintaya v vodakh zapadnoy Kamchatki [Some features of spawning and distribution of pollock roe in the waters of Western Kamchatka] // *Izv. TINRO*. 2001. V. 128. P. 177–187. (In Russian).
- Varkentin A.I.* Szonnyaya dinamika zrelosti gonad i pokazateley upitannosti mintaya (*Theragra chalcogramma*) v severnoy chasti Okhotskogo morya [Seasonal Dynamics of Gonad Maturity and Conditioning of Pollack (*Theragra chalcogramma*) in the Northern Part of the Sea of Okhotsk] // *Izv. TINRO*. 2015. V. 180. P. 77–92. (In Russian).
- Venables W.N., Dichmont C.M.* GLMs, GAMs and GLMMs: an overview of theory for applications in fisheries research // *Fish. Res.* 2004. V. 70. Iss. 2–3. P. 319–337.
<https://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.08.011>
- Watson J.R., Fuller E.C., Castruccio F.S., Samhuri J.F.* 2018. Fishermen follow fine-scale physical ocean features for finance // *Frontiers in Marine Science*. 2018. V. 5. P. 46.
<https://doi.org/10.2007/3389/fmars.2018.00046>
- Wood S.N.* Thin plate regression splines // *J. R. Stat. Soc. Ser. B (Statistical Methodol.)*. 2003. V. 65. Iss. 1. P. 95–114.
<https://doi.org/10.1111/1467-9868.00374>
- Wood S.N.* Stable and Efficient Multiple Smoothing Parameter Estimation for Generalized Additive Models // *J. Am. Stat. Assoc.* 2004. V. 99. Iss. 467. P. 673–686.
<https://doi.org/10.1198/016214504000000980>
- Wood S.N.* Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd edition). London: Chapman and Hall/CRC Press, 2017. 496 p.