

Анализ океанологических условий в местах промысла японской скумбрии по спутниковым и модельным данным в Южно-Курильском проливе в 2020–2022 гг.

М. В. Будянский¹, М. А. Лебедева^{1,2}, Т. В. Белоненко², П. А. Файман¹,
А. А. Байталюк³, Е. В. Самко³, Ю. В. Новиков³, Р. Е. Смагин², А. А. Круц⁴

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: lebedevamasha671@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия

³ Тихоокеанский филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии, Владивосток, 690091, Россия

⁴ Дальневосточный региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт, Владивосток, 690091, Россия

Анализируются океанологические условия образования промысловых скоплений японской скумбрии в Южно-Курильском проливе. В работе использовалась информация о местах вылова скумбрии в 2020–2022 гг. Для комплексного исследования океанологической информации применялись методы лагранжева моделирования и эйлеров подход. Для построения лагранжевых карт использовались поля геострофических течений, рассчитанные по спутниковым альтиметрическим данным AVISO (англ. Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data). Информация о распределении температуры и солёности в Южно-Курильском проливе получена из реанализа GLORYS12V1 (англ. Global Ocean Physics Reanalysis). Выявлены благоприятные условия для образования промысловых скоплений японской скумбрии для различных месяцев в периоды путин. Проведено их сравнение с типичными гидрологическими условиями в районе исследования. Рассмотрено влияние южных курильских проливов и вод Ойясио на гидрологические условия в районах промысла.

Ключевые слова: японская скумбрия, промысел, AVISO, геострофические течения, океанологические условия промысла, реанализ GLORYS12V1

Одобрена к печати: 26.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-286-299

Введение

Южно-Курильский пролив (рис. 1, см. с. 287) является частью Южно-Курильского района, который по праву считается одним из наиболее перспективных районов для рыболовного промысла Российской Федерации. Данный регион богат разнообразными видами морской биоты, среди которых сайра, сардина, скумбрия, тресковые рыбы, камбала, тихоокеанские лососи, а также крабы, моллюски, иглокожие и другие морские организмы (Промысел..., 2013). Согласно литературным источникам, основной гидрологический режим Южно-Курильского района определяет система течений Ойясио (Истоки..., 1997).

Течение Ойясио — часть циклонического круговорота, расположенного в субарктической зоне океана; воды этого течения имеют низкую температуру и пониженную солёность. Будучи продолжением Курило-Камчатского (Курильского) течения, оно начинается от пролива Буссоль, разделяющего острова Симушир и Уруп. Здесь Курило-Камчатское течение значительно интенсифицируется за счёт притока охотоморских вод, включающих воды течений Соя и Восточно-Сахалинского (Истоки..., 1997). Через Курильские проливы происходит водообмен океана с Охотским морем: течение Соя приносит к южным Курильским о-вам тёплые и солёные япономорские воды Цусимского течения, а Восточно-Сахалинское, омывающее восточное побережье о. Сахалин, — холодные и существенно распреснённые воды р. Амур.

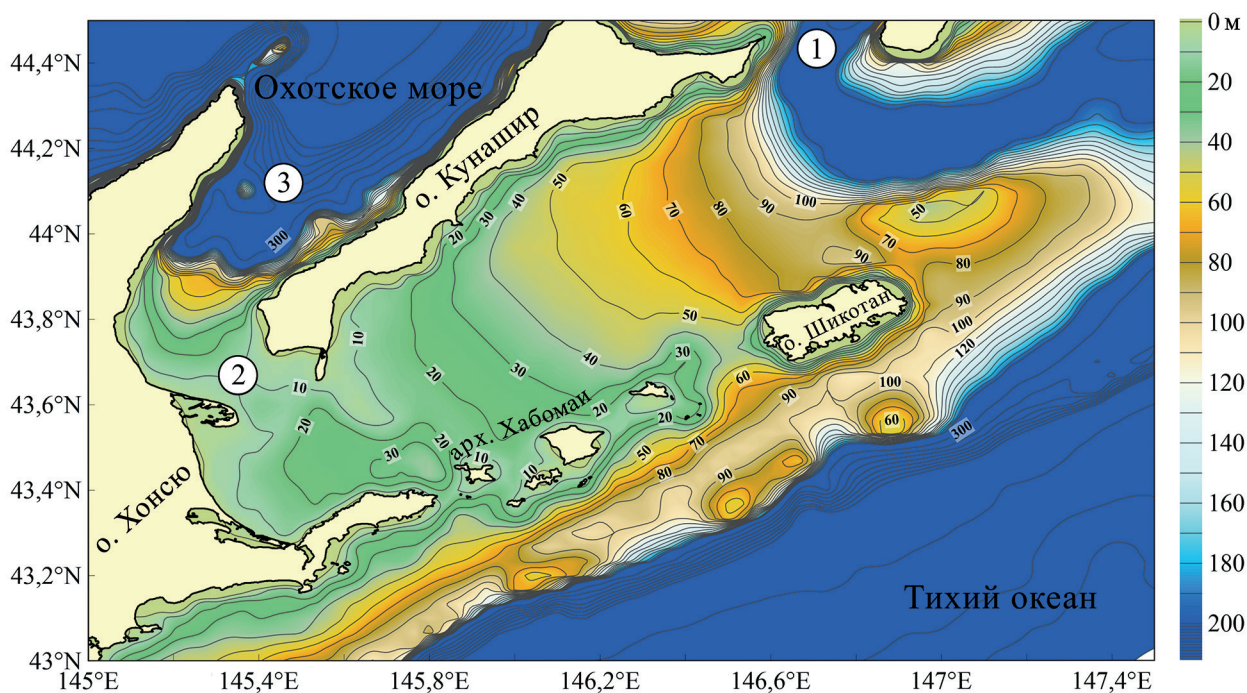


Рис. 1. Район исследования: Южно-Курильский пролив; цветом показана донная топография. 1 — пролив Екатерины; 2 — пролив Измены; 3 — Кунаширский пролив

На термохалинные характеристики вод в Южно-Курильском проливе значительное влияние оказывает водообмен с Охотским морем через Курильские проливы. В соответствии со сложившимися представлениями о водообмене Охотского моря с Тихим океаном все проливы, расположенные к юго-западу от о. Симушир: проливы Буссоль, Фриза, Екатерины, сбрасывают воды Охотского моря в океан, а через проливы, расположенные к северо-востоку от пролива Буссоль, воды океана поступают в Охотское море.

Водообмен района исследования — Южно-Курильского пролива — с Охотским морем осуществляется преимущественно через проливы Екатерины и Измены. Пролив Екатерины отделяет о. Кунашир на юге от о. Итуруп на севере, ширина пролива — 22 км, пороговая глубина — 205 м. Хотя пролив Екатерины довольно узкий по сравнению с другими Курильскими проливами, его роль в океанологическом режиме Южно-Курильского района, и Южно-Курильского пролива в частности, весьма значительна и своеобразна. Согласно сложившимся представлениям, в летне-осенний период года в верхнем 30-метровом слое воды в проливе Екатерины наблюдается следующая схема постоянных течений. Течение Соя располагается, как правило, в западной части пролива, ближе к о. Кунашир. Океанологические параметры ветви Соя, заходящей в пролив Екатерины и далее в Южно-Курильский пролив, в среднем составляют 14–17 °С по температуре и 33,4–33,7 ‰ по солёности (Iton, Ohshima, 2000; Takizawa, 1982). Скорость этого течения на подходах к проливу со стороны Охотского моря и в самом проливе достигает 2 км/ч. По выходе из пролива скорость его ослабевает. В противоположной, восточной части пролива, вдоль южной оконечности о. Итуруп, хорошо прослеживается сравнительно слабый и узкий поток, направленный из океана в Охотское море. На поверхности скорость потока достигает 1 км/ч. В восточной части пролива Екатерины наблюдается относительно холодная, обычно не превышающая 8–10 °С, и менее солёная, порядка 32,8–32,9 ‰, струя, проникающая в Охотское море из Тихого океана вследствие характерной антициклонической циркуляции вокруг островов. Эта общая схема течений в проливе Екатерины является доминирующей и сохраняется при различных синоптических условиях. Повторяемость такого типа циркуляции в летний период составляет 70 %. Анализ эпюр неперiodических течений показывает, что течение Соя, входящее в пролив из Охотского моря, захватывает всю толщу воды от поверхности до дна, однако скорость

с глубиной заметно уменьшается и у дна не превышает 5–10 см/с. Скорость этого течения летом увеличивается более чем в два раза (Власова и др., 2008). Холодные воды, поступающие из Тихого океана в восточной части пролива Екатерины, занимают слой мощностью около 200 м. Вертикальное распределение скорости в этом потоке более однородное, чем в западной части пролива, но всё же наблюдается некоторое уменьшение скорости течения с глубиной. Исследования, выполненные в проливе Екатерины, показывают, что интенсификация ветви течения Соя в проливе происходит при усилении циклонической деятельности над Охотским морем. Естественно, подобное описание течений в проливе Екатерины относится только к поверхностному слою. Течения на нижних горизонтах, складывающиеся в основном из градиентных и плотностных течений, могут значительно отличаться от течений на поверхности. Есть данные, свидетельствующие о преобладании в нижних слоях течения, идущего из Тихого океана в Охотское море (Истоки..., 1997).

Самый южный пролив Большой Курильской гряды — это пролив Измены, соединяющий Кунаширский пролив на севере и Южно-Курильский пролив на юге. Этот пролив разделяет острова Кунашир и Хоккайдо и существенной роли в водообмене Охотского моря с Тихим океаном не играет (Истоки..., 1997; Fauman et al., 2020, 2021), однако, как мы покажем в дальнейшем, водообмен через Кунаширский пролив оказывает влияние на гидрологический режим Южно-Курильского пролива.

Цели исследования, материалы и методы

Цель данного исследования — описать новые методы анализа гидрологической обстановки в местах промысла японской скумбрии, используя эйлеров и лагранжевы подходы. Активный промысел японской скумбрии ведётся на океанском шельфе о. Итуруп и Малой Курильской гряды в Южно-Курильском районе (см. *рис. 1*). Однако фокус данного исследования сосредоточен на Южно-Курильском проливе, расположенном между о. Кунашир и Малой Курильской грядой.

Основой исследования стала информация о координатах расположения судов, осуществлявших промысел японской скумбрии в путины 2020–2022 гг. Информация о местах промысла японской скумбрии, а также соответствующие данные океанологических зондирований предоставлены Тихоокеанским институтом рыбного хозяйства и океанографии (Тихоокеанским филиалом Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО)). Для построения лагранжевых карт использовались данные полей геострофических скоростей AVISO (*англ.* Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data). Идея лагранжева подхода заключается в оперативной оценке количества вод различного происхождения в месте промысла. Траектории пассивных маркеров, адвектируемых в поле скорости AVISO, позволяют выявить типичные транспортные коридоры (места наиболее вероятного переноса водных масс из одного региона в другой). Поля температуры и солёности строятся по данным глобального океанического реанализа GLORYS12V1 (*англ.* Global Ocean Physics Reanalysis) (<https://doi.org/10.48670/moi-00016>).

Геострофические течения по альтиметрическим данным

Для анализа циркуляции в Южно-Курильском проливе использовались геострофические скорости, рассчитанные по альтиметрическим данным. Уровень моря, являясь интегральной характеристикой, несёт в себе информацию о термодинамическом состоянии океана и поэтому может рассматриваться как индикатор синоптических, сезонных и климатических изменений океана (Church, White, 2011). Это означает, что геострофические течения, рассчитанные по альтиметрическим данным, содержат интегральную информацию о циркуляции в неглубоком Южно-Курильском проливе. Геострофические скорости, предоставляемые AVISO, получены объединением измерений с различных альтиметрических мис-

сий, охватывающих период с 1993 г. по настоящее время. Эти миссии включают Jason-3, Sentinel-3A, HY-2A (HaiYang-2A), Serial/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, TOPEX/Poseidon (англ. Topography Experiment), Envisat (англ. Environmental Satellite), ERS-1, -2 (англ. European Remote Sensing). В процессе объединения данных используется метод оптимальной интерполяции. Для пространственного представления данные имеют среднее разрешение $1/4^\circ$ широты и долготы. Во временном отношении данные доступны с разрешением 1 сут. Такой подход обеспечивает получение всеобъемлющего и обновляемого набора данных в результате сочетания различных альтиметрических миссий, способствуя более точному описанию геострофических скоростей в океанографических исследованиях. Данные доступны на сайте системы Европейских центров морских прогнозов Copernicus (англ. Copernicus Marine Environment Monitoring Service — CMEMS, <http://marine.copernicus.eu>).

Температура и солёность из реанализа GLORYS12V1 на основе модели NEMO

Продукт GLORYS12V1 создан на основе глобальной системы прогнозирования в реальном времени, использующей модель NEMO (англ. Nucleus for European Modelling of the Ocean) и получающей входные данные из реанализа ECMWF ERA-Interim (англ. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Re-Analysis). Этот продукт объединяет данные *in situ* и спутниковые данные, полученные из таких миссий, как TOPEX/Poseidon, Jason-1, -2, MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua и AVHRR NOAA (англ. Advanced Very High Resolution Radiometer, National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США). Кроме того, в него включены судовые измерения, данные с мареографных постов и дрейфующих буёв, включая данные ARGO (англ. Array for Real-Time Geostrophic Oceanography, An Array of Profiling Floats Observing the Ocean in Real-Time, проект по созданию глобальной сети дрейфующих буёв для проведения океанографических измерений в верхнем слое океана в реальном масштабе времени), другие данные *in situ* наблюдений и океанографических исследований. Включение наблюдений в модель NEMO достигается с помощью фильтра Калмана низкого порядка. Реанализ GLORYS12V1 точно фиксирует сложную динамику поверхности в малом масштабе и демонстрирует надёжное соответствие с независимыми данными, не участвующими в процессе ассимиляции, что делает его ценным инструментом для изучения различных аспектов исследования океана и облегчает такие приложения, как краткосрочные прогнозы. Пространственное усреднение данных проводилось на $1/12^\circ$ широты и долготы с временным разрешением 1 сут.

Валидация данных GLORYS12V1 в Южно-Курильском проливе с помощью судовых CTD-измерений

Для валидации данных GLORYS12V1 были использованы результаты CTD-измерений (англ. Conductivity, Temperature, Depth), выполненные с борта научно-исследовательского судна ВНИРО «Профессор Кагановский» (рейс № 71) в период с 28 марта по 4 апреля 2021 г. Данные 51 CTD-станции (температура и солёность) сравнивались с соответствующими данными GLORYS12V1 в ближайших к станциям узлах модельной сетки, определённых при помощи метода «ближайших соседей» (англ. Nearest Neighbours Method).

В качестве статистических критериев согласованности данных CTD-измерений и результатов моделирования использовались:

1) среднее абсолютное отклонение C , нормированное на стандартное отклонение результатов измерений (функция стоимости) (Wang et al., 2022):

$$C = \left| \frac{M - O}{STD} \right|,$$

где M — среднее значение температуры или солёности по данным GLORYS12V1; O — среднее значение температуры или солёности по данным STD-измерений; STD — среднеквадратическое отклонение результатов STD-измерений;

2) пространственный коэффициент корреляции Пирсона.

Коэффициенты корреляции и функция стоимости рассчитывались на каждом пространственном горизонте от поверхности до 50 м с дискретностью 1 м по вертикали для каждой даты измерений (рис. 2 и 3, см. с. 291). Вертикальное распределение статистических оценок приводится на рис. 2. Считается, что если функция стоимости не превышает 1, то это означает хорошую согласованность между данными STD-измерений и результатами моделирования; если функция стоимости лежит в пределах от 1 до 2, то это показывает удовлетворительную согласованность; если функция стоимости превышает 2, то это говорит о плохом качестве результатов моделирования. Из рис. 2 видно, что по температуре наблюдается хорошая согласованность между данными измерений и результатами моделирования, в то время как по солёности согласованность неудовлетворительная (функция стоимости превышает 2 по всей исследуемой глубине). В то же время коэффициенты корреляции и критерии корреляционной значимости показывают статистически значимую корреляционную связь между данными STD-измерений и результатами моделирования как для температуры, так и для солёности (см. рис. 2).

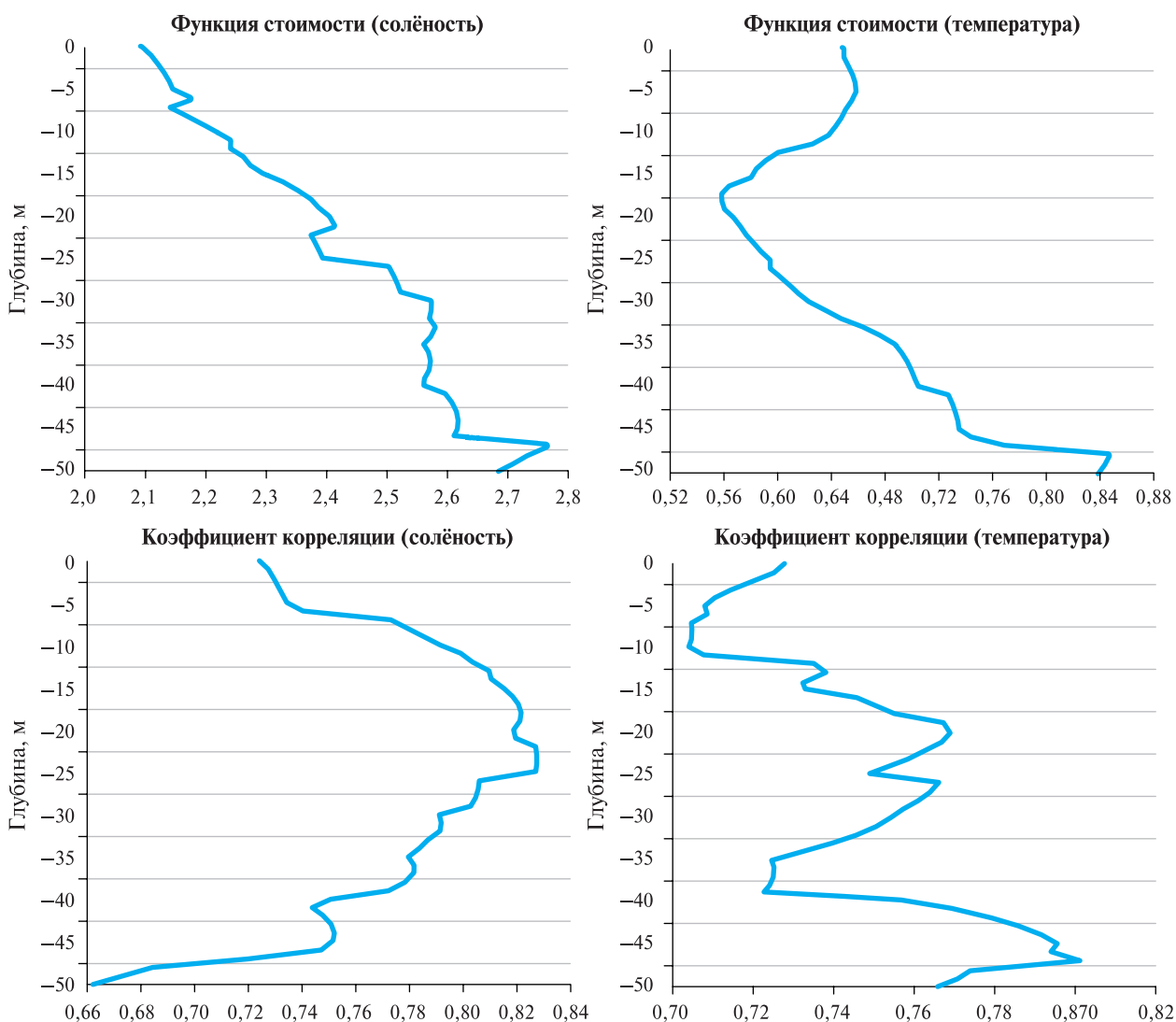


Рис. 2. Функция стоимости значений солёности и температуры (верхний ряд) и соответствующие коэффициенты пространственной корреляции (нижний ряд)

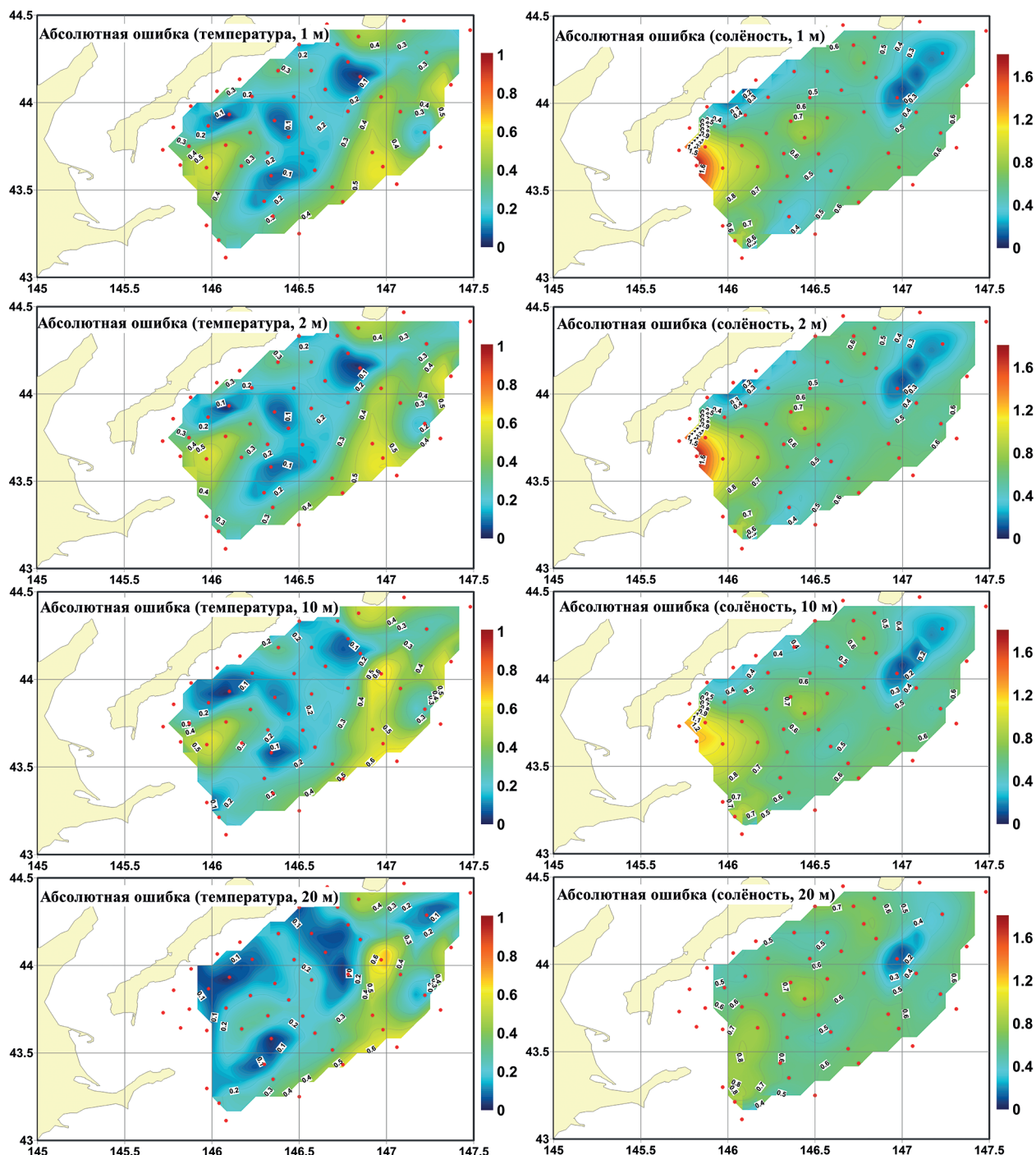


Рис. 3. Пространственное распределение абсолютных ошибок между измеренными и модельными данными на различных горизонтах в Южно-Курильском проливе. При построении карт применялась бикубическая интерполяция на основе триангуляции

На рис. 3 показано пространственное распределение разницы между измеренными и модельными данными, полученное для разных горизонтов при помощи линейной интерполяции. Эти распределения демонстрируют неравномерность распределения ошибок, которые, возможно, обусловлены мезомасштабной вихревой динамикой. Значения ошибок солёности на рис. 3 уменьшаются с глубиной, что также находит подтверждение в графиках на рис. 2, а для температуры эта зависимость имеет более сложный характер. Однако можно заявить, что в целом реанализ GLORYS12V1 для района Южно-Курильского пролива будет служить хорошей основой для решения как диагностических, так и прогностических задач.

Пространственное распределение промысловых скоплений скумбрии

В данной работе позиции рыболовных судов во время сезона вылова скумбрии соотносятся с местами скопления рыбы. Это обусловлено тем, что суда, как правило, выбирают наиболее эффективные места для промысла, хотя, конечно, часть уловов получена в качестве сопутствующего прилова при промысле сардины, который по районам и срокам может пересекаться с промыслом скумбрии (Беляев, 2003; Филатов, 2015; Шунтов, 2022). На рис. 4 звёздочками показано расположение судов, где проводился вылов скумбрии в период с 1 июня по 31 декабря 2020–2022 гг. Видно, что большая часть отмеченных мест вылова японской скумбрии расположена в Южно-Курильском районе.

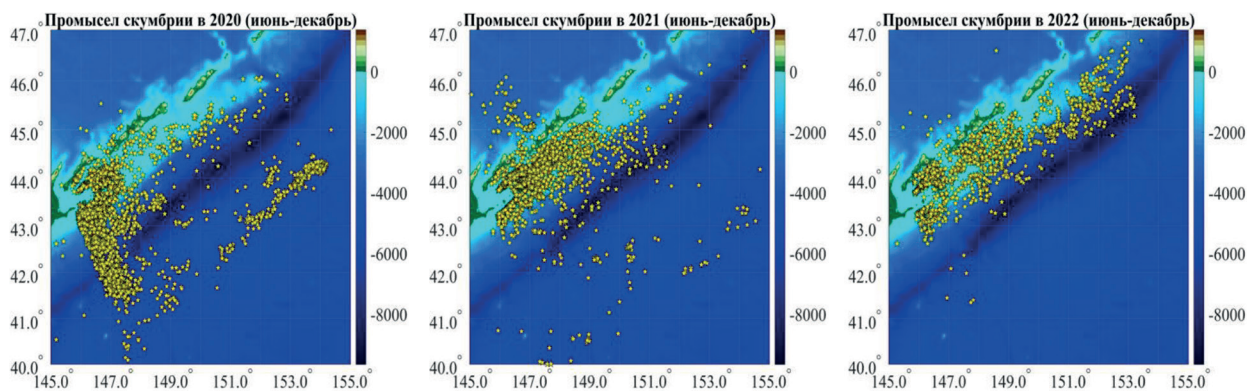


Рис. 4. Пространственное расположение судов во время скумбриевой путины в июне – декабре 2020–2022 гг.

Применение машинного обучения для выявления значимых факторов, определяющих условия формирования промысловых скоплений японской скумбрии в Южно-Курильском проливе

Авторы работы (Kulik et al., 2023) реализовали алгоритм машинного обучения применительно к местам вылова скумбрии для данных реанализов GLORYS12V1 и GOF3.1 (англ. Global Ocean Forecasting System) в скумбриевую путину 2020–2022 гг. в Южно-Курильском проливе. Было установлено, что значимые дескрипторы для скумбрии — температура воды на поверхности и на горизонте 1,5 м. На втором месте — солёность воды на данных горизонтах. Оказалось, что хлорофилл, биогены, фосфор, азот и кремний вообще не являются значимыми дескрипторами. Также не считаются значимыми динамические факторы: скорость течений, дивергенция, относительная завихренность и параметр Окубо – Вейса. Таким образом, получено подтверждение, что термохалинные факторы наиболее важны для образования промысловых скоплений японской скумбрии в данном регионе. Однако методы машинного обучения не отвечают на вопросы о диапазоне значений, наиболее благоприятных для косяков рыбы.

Лагранжево моделирование

Лагранжево моделирование используется для изучения движения частиц в жидкостях, течений, транспорта веществ и микроорганизмов в океане. Это помогает лучше понимать динамику океанических процессов. Лагранжевы методы позволяют изучать транспорт и перемешивание в пределах исследуемой области расчётом траекторий для большого количества искусственных пассивных частиц. Для расчётов используются поля скоростей течений. Наше исследование опирается на поля геострофических скоростей, рассчитанных по данным спутниковой альтиметрии.

Для отслеживания траекторий частиц рассчитываются различные специфические функции траекторий, или лагранжевы индикаторы, которые позволяют понять свойства адвекции. Различные типы индикаторов могут быть сформулированы в зависимости от целей исследования. Одним из способов описания процессов транспорта и смешивания, происходящих в исследуемой области, становится построение карт происхождения вод, так называемых О-карт, которые рассчитываются численным отслеживанием плотной сетки множества искусственных частиц, перемещающихся до заданного разреза в обратном направлении от фиксированной даты (Budyansky et al., 2022).

В нашем исследовании лагранжевы О-карты рассчитываются для каждого дня в период 2020–2022 гг. Серия последовательных карт даёт возможность проанализировать эволюцию этого поля. О-карты позволяют диагностировать водные массы различного происхождения и установить их принадлежность к определённым течениям в регионе (Prants, 2013, 2014; Prants et al., 2017a, b). Это особенно ценно для изучения циркуляции в ограниченных районах исследования.

Лагранжевы траектории рассчитываются решением уравнений адвекции:

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

где u и v — угловые зональные и меридиональные компоненты скорости поля AVISO; φ и λ — широта и долгота. Угловые скорости используются для упрощения уравнений движения на сфере. Значения скорости внутри ячеек пространственно-временной сетки получаются путём бикубической интерполяции в пространстве и интерполяцией полиномами Лагранжа третьей степени по времени. Расчёты лагранжевых траекторий включает интегрирование уравнений (1) с использованием схемы Рунге–Кутты четвёртого порядка с постоянным временным шагом 0,001 сут. Каждая траектория рассчитывалась на 60 сут в обратном времени.

Результаты

Диапазоны значений температуры и солёности, благоприятные для образования промысловых скоплений скумбрии

На *рис. 5* (см. с. 294) показана временная изменчивость значений температуры и солёности, при которых число тралений (выловов) скумбрии было наибольшим. Так как эти значения соответствуют наибольшему числу выловов, можно ожидать, что они соответствуют наиболее благоприятным условиям промысла. На графиках температуры на *рис. 5* виден сезонный ход: в тёплые месяцы значения температуры отличаются на 6–7 °С от таковых в холодные месяцы. В частности, если в сентябре 2020 г. благоприятная для промысла температура составляла 16,5 °С, то в ноябре этого же года она не превышала 10 °С. Также видно, что характеристики, соответствующие благоприятным условиям промысла, значительно отличаются от средних значений по району. Если в июне 2020 г. благоприятные для промысла условия соответствовали температуре 10,5 °С (см. *рис. 5*, верхний ряд), то типичная температура, которая наблюдалась для большинства точек сетки GLORYS12V в районе исследования, соответствует 6,3 °С (см. *рис. 5*, нижний ряд). В 2022 г. виден пик в июле на 18 °С, которого нет на типичных распределениях для района промысла.

Аналогично благоприятные для промысла значения солёности отличаются от типичных для района: если солёность в июне 2020 г. в большинстве точек сетки составляла 32,5 епс (единицы практической солёности), то благоприятные для промысла значения в этот период соответствуют 32,9 епс. Обратим внимание, что для октября 2022 г. подходящая для промысла солёность равна 32,5 епс, в то время как для района в целом она соответствует 33,7 епс, т. е. в этот месяц благоприятные значения отличаются от типичных на 1,2 епс. В период 2020–2022 гг. солёность в районе промысла увеличивается с июня по декабрь.

Таким образом, значения температуры и солёности, при которых осуществлялся промысел, отличаются от характерных значений по региону. Отметим также, что если для температуры

характерный вид графиков за отдельные годы имеет общие черты (повышение значений в тёплые месяцы и понижение в холодные) как для мест вылова, так и для типичных значений по району, то для солёности такого свойства не наблюдается. Вероятно, указанные особенности распределения солёности в отдельные годы связаны с усилением или ослаблением влияния течений, оказывающих воздействие на гидрологические условия в районе исследования.

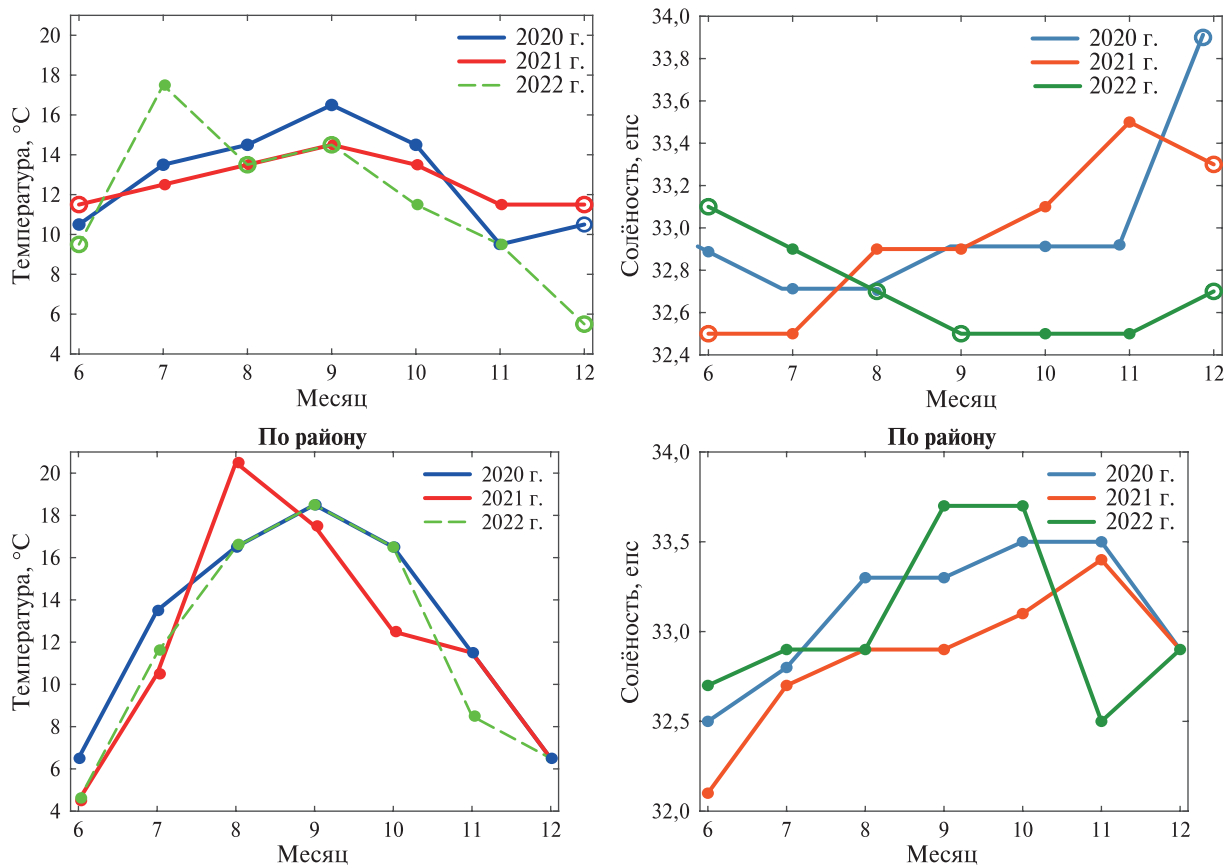


Рис. 5. Температура и солёность по данным реанализа GLORYS12V1 на горизонте 1,5 м, соответствующие наибольшему числу выловов японской скумбрии в Южно-Курильском проливе в зависимости от месяца: июнь — 6, декабрь — 12 (верхний ряд); аналогичная изменчивость для всех точек сетки (нижний ряд). Окружностями показаны значения, соответствующие ситуациям, когда суммарное число выловов в указанный месяц не превышало 10

Карты происхождения вод в Южно-Курильском проливе

О-карты, или лагранжевы карты происхождения вод, предоставляют информацию о том, откуда и как перемещаются водные массы в Южно-Курильском проливе (43,0–44,5° с. ш., 145,0–147,5° в. д.). Для построения О-карт район, ограниченный 41,5–47,5° с. ш., 144–155° в. д., на каждые сутки в течение 2020–2022 гг. засеивался маркерами на равномерной сетке 400×400 узлов. Далее для каждого из маркеров проводился расчёт траекторий в обратном времени на 60 сут. Для анализа типа вод внутри Южно-Курильского пролива и вблизи него мы выбрали шесть отрезков: пять — через южные Курильские проливы и поперечный разрез — через струю Ойясио (рис. 6, см. с. 295). В итоге были построены усреднённые за каждый месяц графики, определяющие процентный состав типа вод. Каждая кривая раскрашена согласно отрезку, который маркеры пересекали при адвекции в обратном времени, а цвет кодирует тип вод (рис. 7, см. с. 295). Тип вод определялся в зависимости от того, на какие разрезы (отрезки на рис. 6) попадали те или иные маркеры.

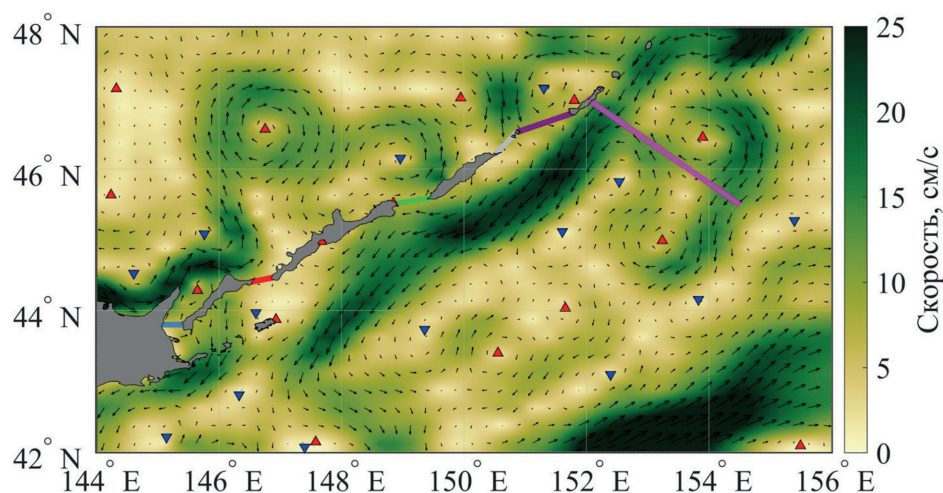


Рис. 6. Среднее поле скорости за июнь – сентябрь 2020–2022 гг. Красные и синие треугольники – центры антициклонов и циклонов соответственно. Отрезки соответствуют разрезам через проливы: голубой – Кунаширский, красный – Екатерины, зелёный – Фриза, серый – Уруп, фиолетовый – Буссоль; сиреневым цветом показан поперечный разрез через Ойясио

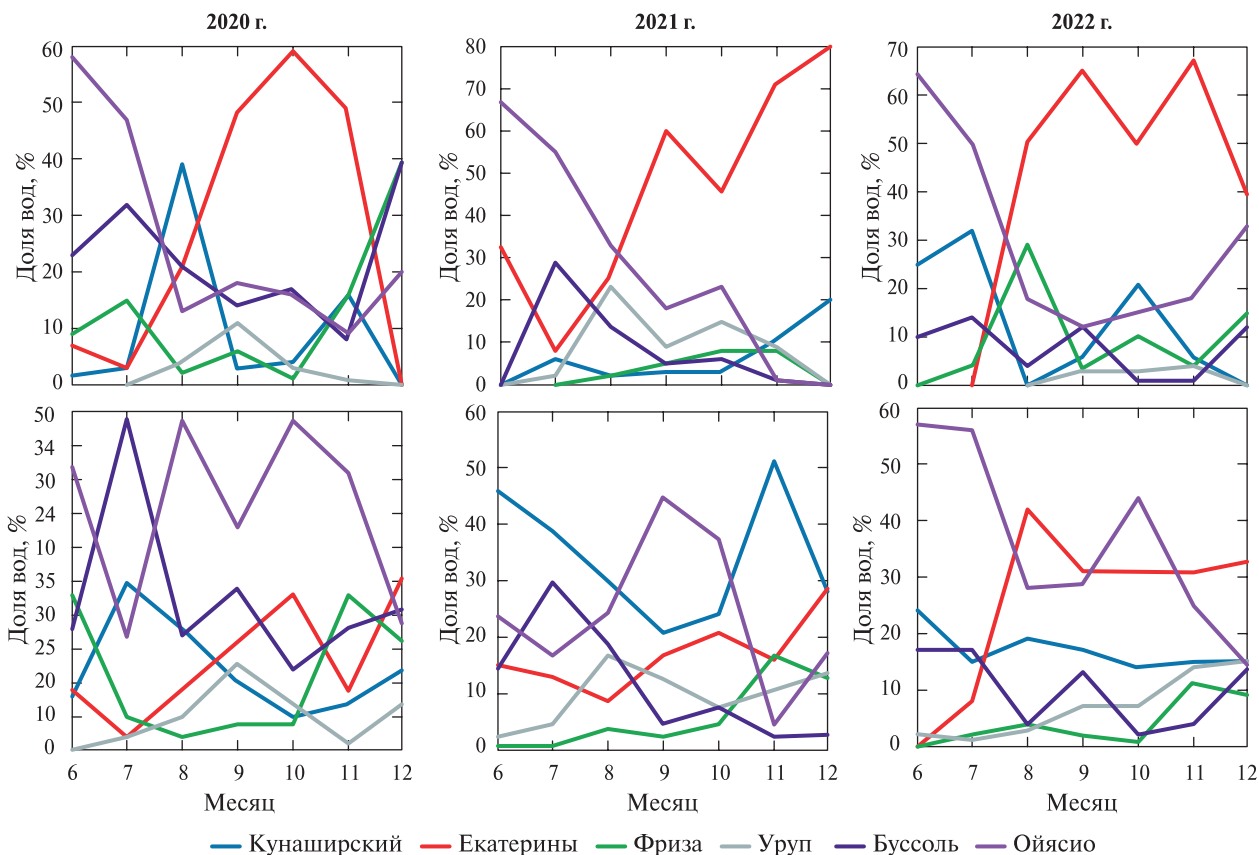


Рис. 7. Влияние вод различного происхождения (в %) для точек промысла и в целом по району (Южно-Курильский пролив) за июнь – декабрь 2020–2022 гг.

Заключение и выводы

Далее для каждой точки, где вёлся лов японской скумбрии, определялся тип вод. Доля вод различного происхождения рассчитывалась в процентах от общего числа выловов за рассматриваемый месяц. На рис. 7 по оси ординат показано процентное содержание вод

определённого типа в местах вылова японской скумбрии в указанный месяц. Для сравнения аналогичные графики были построены для всех точек сетки внутри района.

На *рис. 7* видно, что графики процентного состава вод различного происхождения для точек промысла и в целом по району различаются как значениями, так и расположением пиков, что указывает на тяготение мест промысла к водам определённого типа. Заметно, что места лова тяготеют к водам, проникающим в район через пролив Екатерины (начиная с июля), и водам Ойясио (июнь – август), а начиная с августа по ноябрь — к водам, проникающим через Кунаширский пролив и по-прежнему пролив Екатерины. В меньшей степени в начале путин на места лова влияют охотоморские воды пролива Буссоль, к концу путин их влияние становится ещё меньше.

Отметим, что графики, демонстрирующие влияние вод различного происхождения на район в целом, отличаются от графиков для мест промысла. Общим для тех и других во все годы в период путин становится большое содержание вод Ойясио. Однако следует отметить, что влияние пролива Екатерины гораздо значительнее для мест промысла, чем в целом по району. В 2020 г. отмечается также большое количество вод, пришедших из пролива Буссоль, в 2021 г. — вод из Кунаширского пролива, а в период с августа до конца 2022 г. заметно увеличенное содержание маркеров, имитирующих воды, проникающие в район исследования через пролив Екатерины, по сравнению с 2020 и 2021 гг. Проливы Фриза, Буссоль и Уруп оказывают на район существенно меньшее влияние, чем пролив Екатерины; влияние Кунаширского пролива значительно в 2021 г. и гораздо менее заметно в 2020 и 2022 гг. (см. *рис. 7*).

В данном исследовании совместно применялись методы лагранжева моделирования и эйлеров подход для комплексного анализа промысловой и океанологической информации для Южно-Курильского пролива. Идея лагранжева подхода заключается в оперативной оценке количества вод различного происхождения в местах промысла. Траектории пассивных маркеров, адвектируемых в поле скорости AVISO, позволяют выявить типичные транспортные коридоры (места наиболее вероятного переноса водных масс из одного региона в другой). С другой стороны, эйлерова информация — данные реанализа GLORYS12V1 с пространственным разрешением $1/12^\circ$ и временной дискретностью 1 сут — позволяют определить температуру и солёность воды на разных горизонтах в местах промысла.

Методами машинного обучения ранее установлено, что наиболее информативными дескрипторами для промысла японской скумбрии служат температура и солёность на горизонте 1,5 м, причём температура — более значимая характеристика по сравнению с солёностью (Kulik et al., 2023). В настоящей работе эти характеристики анализировались как для мест вылова японской скумбрии в Южно-Курильском проливе, так и в целом по району. Использовалась информация о местах вылова в промысловые путины 2020–2022 гг. Для них оценивались значения температуры и солёности, которые соответствуют наибольшему числу выловов в различные месяцы в Южно-Курильском проливе. Также оценивались для данного района типичные (наиболее часто встречающиеся) температура и солёность во всех точках сетки GLORYS12V1.

Для оценки сравнительного влияния вод различного происхождения строились О-карты, характеризующие источник происхождения вод. Рассматривались разрезы через южные курильские проливы: Кунаширский, Екатерины, Фриза, Уруп, Буссоль, а также поперечный разрез через Ойясио. Далее в процентах рассчитывался вклад вод различного происхождения как непосредственно в местах лова, так и в целом по району во всех точках сетки.

Новизна данной работы заключается в том, что в ней впервые соединяется лагранжево построение О-карт с эйлеровой информацией о температуре и солёности воды в местах промысла. При этом термохалинная информация и влияние различных источников вод непосредственно в местах промысла японской скумбрии сравниваются с таковыми для района в целом. Новый методический подход представляется оригинальным и имеет большие перспективы к развитию. Основанием служит возможность использования данных реанализа в качестве репрезентативной информации о температуре и солёности в регионе. Проведённое выше сравнение 51 вертикального профиля температуры и солёности, полученных из

СТД-измерений в рамках океанологических экспедиций, показало значимую пространственную корреляцию между результатами измерений и реанализа GLORYS12V1 в полях температуры и солёности по всей глубине. Также установлено (в данной работе не показано), что для северо-западной части Тихого океана реанализ GLORYS12V1 является гораздо более эффективным по сравнению с данными реанализа HYCOM (*англ.* Hybrid Coordinate Ocean Model) и даже японским реанализом JCOPE (*англ.* Japan Coastal Ocean Predictability Experiment), который сегодня используется для оперативных промысловых прогнозов профильными специалистами.

В результате исследования получены следующие выводы:

1. Установлены значения температуры и солёности, являющиеся наиболее благоприятными для образования промысловых скоплений японской скумбрии. Эти величины получены непосредственно в местах промысла и соответствуют реальным промысловым ситуациям 2020–2022 гг.
2. Сравнение показало, что гидрологические характеристики в местах вылова японской скумбрии значительно отличаются от типичных значений по району.
3. Показано, что в местах лова японской скумбрии в Южно-Курильском проливе доминируют воды, поступившие в район через пролив Екатерины (начиная с июля), а также воды Ойясио (июнь–август), а с августа по ноябрь — воды, проникающие через Кунаширский пролив и по-прежнему пролив Екатерины. Влияние других проливов на места промысла менее значительно.
4. Влияние вод проливов и Ойясио на район в целом отличается от такового для мест промысла. Однако общим и для мест промысла, и для района в целом является большая доля содержания вод Ойясио в период путин 2020–2022 гг.
5. Влияние вод пролива Екатерины в местах промысла выражено гораздо значительнее, чем в среднем по району.

Работа по лагранжевому анализу адвекции маркеров выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-17-00068, при помощи вычислений на высокопроизводительном кластере Тихоокеанского океанологического института им. В. И. Ильичёва ДВО РАН (госзадание № 124022100072-5).

Литература

1. *Беляев В. А.* Экосистема зоны течения Куроисио и ее динамика. Хабаровск. Хабаровское книж. изд-во. 2003. 382 с.
2. *Власова Г. А., Васильев А. С., Шевченко Г. В.* Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря. М.: Наука, 2008. 360 с.
3. Истоки Ойясио / под ред. В. Р. Фукса, А. Н. Мичурина. СПб.: СПбГУ, 1997. 248 с.
4. Промысел биоресурсов в водах Курильской гряды: современная структура, динамика и основные элементы / под ред. А. В. Буслова. Южно-Сахалинск, 2013. 265 с.
5. *Филатов В. Н.* Миграции и формирование скоплений массовых пелагических гидробионтов (на примере тихоокеанской сайры). Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. 168 с.
6. *Шунтов В. П.* Биология дальневосточных морей России. Т. 3. Владивосток: Изд-во ТИНРО-Центр, 2022. 445 с.
7. *Budyansky M. V., Kulik V. V., Kivva K. K. et al.* Lagrangian Analysis of Pacific Waters in the Sea of Okhotsk Based on Satellite Data in Application to the Walleye Pollock Fishery // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. V. 58. P. 1427–1437. <https://doi.org/10.1134/S0001433822120088>.
8. *Church J. A., White N. J.* Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century // *Surveys in Geophysics*. 2011. V. 32. P. 582–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.
9. *Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu.* New Circulation Features in the Okhotsk Sea from a Numerical Model // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. V. 56. P. 618–631. <https://doi.org/10.1134/S0001433820060043>.
10. *Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu.* Simulated Pathways of the Northwestern Pacific Water in the Okhotsk Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. V. 57. P. 329–340. <https://doi.org/10.1134/S000143382103004X>.

11. Iton M., Ohshima K. I. Seasonal variations of water masses and sea level in the southwestern part of the Okhotsk sea // *J. Oceanography*. 2000. V. 56. No. 6. P. 643–654. <https://doi.org/10.1023/A:1011121632160>.
12. Kulik V., Baitaliuk A., Katugin O., Budyansky M., Uleysky M. New predictors for tracking the habitat of chub mackerel (*Scomber japonicus*). NPFC-2023-TWG CMSA07-WP05. 2023. <https://www.npfc.int/new-predictors-tracking-habitat-chub-mackerel-scomber-japonicus>.
13. Prants S. V. Dynamical systems theory methods to study mixing and transport in the ocean // *Physica Scripta*. 2013. V. 87. No. 3. Article 038115. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/87/03/038115>.
14. Prants S. V. Chaotic Lagrangian transport and mixing in the ocean // *The European Physical J. Special Topics*. 2014. V. 223. No. 13. P. 2723–2743. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02288-5>.
15. Prants S. V., Uleysky M. Yu., Budyansky M. V. (2017a) *Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean*. Ser. Physics of Earth and Space Environments. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017. 273 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53022-2>.
16. Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu. (2017b) Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2017. V. 24. No. 1. P. 89–99. <https://doi.org/10.5194/npg-24-89-2017>.
17. Takizawa T. Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea // *J. Oceanographical Society of Japan*. 1982. V. 38. P. 281–292. <https://doi.org/10.1007/BF02114532>.
18. Wang H., Ren K., Lina M. et al. Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models // *Frontiers in Marine Science*. 2022. V. 9. Article 1050028. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1050028>.

Analysis of oceanographic conditions for Japanese mackerel fishery based on satellite and modelling data in the South Kuril Strait in 2020–2022

M. V. Budyansky¹, M. A. Lebedeva^{1,2}, T. V. Belonenko², P. A. Fayman¹,
A. A. Baitaliuk³, E. V. Samko³, Yu. V. Novikov³, R. E. Smagin², A. A. Krutz⁴

¹ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: lebedevamasha671@gmail.com

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

³ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Pacific Branch
Vladivostok 690091 Russia

⁴ Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute
Vladivostok 690091 Russia

In the study, the oceanographic conditions leading to the formation of Japanese mackerel aggregations in the South Kuril Strait are analyzed. Information on mackerel catch locations from 2020 to 2022 was utilized. To comprehensively investigate oceanographic data, Lagrangian modeling methods and Eulerian approaches were employed. Geostrophic current fields calculated from satellite altimetry data (AVISO) were used to construct Lagrangian maps. Information on temperature and salinity distribution in the South Kuril Strait was obtained from the GLORYS12V1 reanalysis. Favorable conditions for the formation of commercial Japanese mackerel aggregations were identified for different months during the study periods. Their comparison was conducted with typical hydrological conditions in the research area. The influence of the South Kuril Straits and Oyashio waters on fishing grounds was examined.

Keywords: Japanese mackerel, fishery, AVISO, geostrophic currents, fishery oceanographic conditions, GLORYS12V1 reanalysis

Accepted: 26.03.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-286-299

References

1. Belyaev V. A., *Ekosistema zony techeniya Kuroshio i ee dinamika* (Ecosystem of the Kuroshio current zone and its dynamics), Khabarovsk: Khabarovsk Book Publ. House, 2003, 382 p. (in Russian).
2. Vlasova G. A., Vasiliev A. S., Shevchenko G. V., *Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' struktury i dinamiki vod Okhotskogo morya* (Spatial and temporal variability of the structure and dynamics of the waters of the Sea of Okhotsk), Moscow: Nauka Publ. House, 2008, 360 p. (in Russian).
3. *Istoki Oiyasio* (The Origins of Oyashio), A. N. Michurin, V. R. Foux (eds.), Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, 1997, 248 p. (in Russian).
4. *Promysel bioresursov v vodakh Kuril'skoi gryady: sovremennaya struktura, dinamika i osnovnye elementy* (Fishing Resources Harvesting in the Waters of the Kuril Ridge: Modern Structure, Dynamics, and Key Elements), 2013, A. V. Buslov (ed.), Yuzhno-Sakhalinsk, 265 p. (in Russian).
5. Filatov V. N., *Migratsii i formirovanie skoplenii massovykh pelagicheskikh gidrobiontov (na primere tikho-okeanskoj sairy)* (Migrations and formation of clusters of mass pelagic hydrobionts (on the example of the Pacific saury)), Rostov-on-Don: Southern Science Center RAS Publ. House, 2015, 168 p. (in Russian).
6. Shuntov V. P., *Biologiya dal'nevostochnykh morei Rossii. T. 3* (Biology of the Far Eastern seas of Russia. V. 3), Vladivostok: Publ. House TINRO Center, 2022, 445 p. (in Russian).
7. Budyansky M. V., Kulik V. V., Kivva K. K. et al., Lagrangian Analysis of Pacific Waters in the Sea of Okhotsk Based on Satellite Data in Application to the Walleye Pollock Fishery, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, pp. 1427–1437, <https://doi.org/10.1134/S0001433822120088>.
8. Church J. A., White N. J., Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century, *Surveys in Geophysics*, 2011, Vol. 32, pp. 582–602, <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.
9. Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu., New Circulation Features in the Okhotsk Sea from a Numerical Model, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, pp. 618–631, <https://doi.org/10.1134/S0001433820060043>.
10. Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu., Simulated Pathways of the Northwestern Pacific Water in the Okhotsk Sea, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, Vol. 57, pp. 329–340, <https://doi.org/10.1134/S000143382103004X>.
11. Iton M., Ohshima K. I., Seasonal variations of water masses and sea level in the southwestern part of the Okhotsk sea, *J. Oceanography*, 2000, Vol. 56, No. 6, pp. 643–654, <https://doi.org/10.1023/A:1011121632160>.
12. Kulik V., Baitaliuk A., Katugin O., Budyansky M., Uleysky M., *New predictors for tracking the habitat of chub mackerel (Scomber japonicus)*, *NPFC-2023-TWG CMSA07-WP05*, 2023, <https://www.npfc.int/new-predictors-tracking-habitat-chub-mackerel-scomber-japonicus>.
13. Prants S. V., Dynamical systems theory methods to study mixing and transport in the ocean, *Physica Scripta*, 2013, Vol. 87, Article 038115, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/87/03/038115>.
14. Prants S. V., Chaotic Lagrangian transport and mixing in the ocean, *The European Physical J. Special Topics*, 2014, Vol. 223, No. 13, pp. 2723–2743, <https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02288-5>.
15. Prants S. V., Uleysky M. Yu., Budyansky M. V. (2017a), *Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean*, Ser. Physics of Earth and Space Environments. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2017, 273 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53022-2>.
16. Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Yu. (2017b), Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2017, Vol. 24, No. 1, pp. 89–99, <https://doi.org/10.5194/npg-24-89-2017>.
17. Takizawa T., Characteristics of the Soya Warm Current in the Okhotsk Sea, *J. Oceanographical Society of Japan*, 1982, Vol. 38, pp. 281–292, <https://doi.org/10.1007/BF02114532>.
18. Wang H., Ren K., Lina M. et al., Long-term mean circulation in the Japan Sea as reproduced by multiple eddy-resolving ocean circulation models, *Frontiers in Marine Science*, 2022, Vol. 9, Article 1050028, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1050028>.