

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

О СВЯЗИ МЕСТ ПРОМЫСЛА САЙРЫ С КРУПНОМАСШТАБНЫМИ КОГЕРЕНТНЫМИ СТРУКТУРАМИ В ОКЕАНЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2020 г. С. В. Пранц^а, *, В. В. Кулик^б, М. В. Будянский^а, М. Ю. Улейский^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

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

Поступила в редакцию 25.12.2019 г.

С использованием спутниковых данных по скоростям геострофических течений АВИЗО в период с 2004 по 2018 гг. показано, что значительное сокращение вылова сайры в последние годы и изменения в местах лова связаны с изменением гидрологического режима в районе российского промысла у побережья южных и средних Курил и о-ва Хоккайдо. Рассчитанные на основе поля АВИЗО лагранжевы карты происхождения вод с нанесенными местами улова судами России, Японии и Кореи показывают, что это обусловлено изменением путей распространения богатых питательными веществами субарктических вод Ойясио. Наиболее значительные изменения океанографической обстановки, начиная с 2015 г., вызваны интенсификацией 3-й ветви Ойясио и увеличением транспорта вод Ойясио в открытый океан. При этом значительно сокращаются места лова в традиционных прибрежных районах южных Курил и Хоккайдо и возникают благоприятные для лова места в открытых водах океана.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, промысел сайры, мезомасштабные вихри, воды Ойясио, лагранжевы карты

DOI: 10.31857/S0205961420040053

ВВЕДЕНИЕ

Тихоокеанская сайра (*Cololabis saira*) является важнейшим объектом рыбного промысла на Дальнем Востоке России. Во время нагула и в преднерестовый период сайра собирается в большие косяки. Эта пелагическая рыба мигрирует в северо-западной части Тихого океана с марта по август на север, а с сентября до января на юг (Kosaka, 2000; Байталюк, 2004; Филатов и др., 2011; Baitaliuk et al., 2013). Промысел сайры традиционно велся российским флотом с августа по декабрь в ночное время в районе южных и средних Курильских островов (Россия) с удалением до 300 миль в океан к востоку от Курил и о. Хоккайдо (Япония). В 2019 году оставшимся специализированным судам тайваньской постройки приходилось уходить в поисках сайры в океан еще дальше до 1200 миль от о. Хоккайдо, а в 2018 г. до 830 миль.

В районе северо-западной Пацифики (рис. 1) сходятся богатые пищей субарктические воды течения Ойясио, субтропические олиготрофные воды течения Куроисио и его продолжения и специфические водные массы из Охотского моря.

Издавна это один из важнейших районов Мирового океана по рыбному промыслу (Uda, 1938). Фронтальная зона Ойясио–Куроисио отличается повышенной вихревой активностью с большим количеством суб- и мезомасштабных вихрей различных размеров и разного происхождения вод в своих ядрах. Некоторые вихри регулярно год от года стагнируют в определенных местах. Для рыбного промысла сайры наиболее важными являются хоккайдский антициклон с ядром теплой субтропической воды (ХАЦ, обозначен НАС на рис. 1 и 3) и буассольский антициклон с холодным ядром субарктических вод Ойясио и частично охотоморских вод (БАЦ, обозначен ВАС на рис. 1 и 3). Изредка вместо хоккайдского антициклона примерно на его месте стагнирует аномальный антициклон (АХАЦ, обозначен АНАС на рис. 1, с), воды которого имеют другое происхождение, чем ХАЦ. Он также оказывает существенное влияние на промысел сайры. Большое число работ посвящено связи мест улова сайры с мезомасштабными антициклоническими вихрями в районе российского рыбного промысла (Saitoh et al., 1986; Sugimoto, Tameishi, 1992; Самко и др., 2008; Самко и др., 2010; Пранц и др., 2012; Prants et al., 2014; Сам-

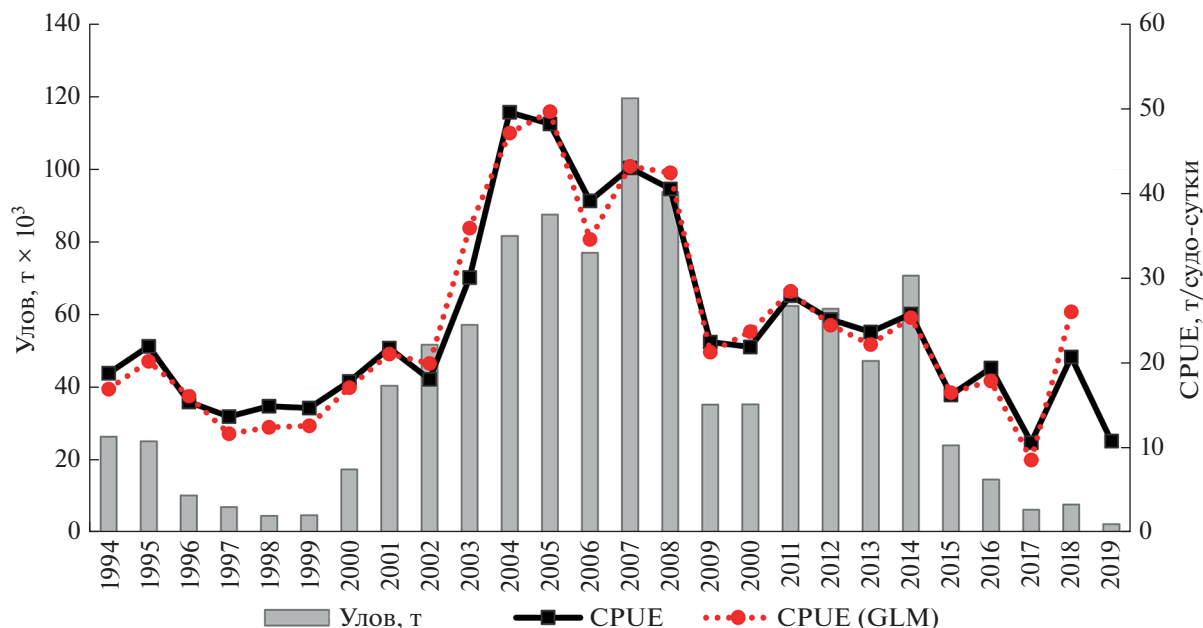


Рис. 2. Динамика вылова сайры российскими судами за судо-сутки (CPUE = вылов/судо-сутки) в 1994–2019 гг. и средние значения CPUE в тоннах, восстановленные из обобщенной линейной модели (GLM) с учетом отличий по судам и месяцам и с учетом годовых смещений.

дование связи вылова сайры с изменениями океанографической обстановки в районе российского промысла и попытка объяснения как падения уловов, так и смены мест лова этими изменениями. Для этого используются поля скорости АВИЗО в 2004–2018 гг., усредненные за период путины каждого года, и рассчитанные на их основе лагранжевы карты происхождения вод (Prants et al., 2017).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Геострофические скорости в приповерхностном слое заимствованы из базы данных АВИЗО (<http://www.aviso.altimetry.fr>) с архивированием ежесуточного глобального поля скорости с 1 января 1993 г. с горизонтальным разрешением $1/4^\circ \times 1/4^\circ$. Этот продукт получен в результате комбинирования альтиметрических данных со спутников TOPEX/POSEIDON, Jason-1 для данных после декабря 2001 г. и Envisat для данных после марта 2002 г.

Все результаты моделирования в этой статье получены после численного решения уравнений адвекции для большого числа трассеров в поле скорости АВИЗО

$$\dot{\lambda} = u(\lambda, \varphi, t), \quad \dot{\varphi} = v(\lambda, \varphi, t), \quad (1)$$

где u и v угловые зональная и меридиональная скорости, φ и λ — широта и долгота. Бикубическая пространственная интерполяция и интерполяция по времени лагранжевыми полиномами третьего порядка обеспечивают требуемую точ-

ность численного интегрирования. Траектории лагранжевых частиц находятся интегрированием уравнений адвекции по схеме Рунге–Кутты 4-го порядка.

Для фиксирования положения мезомасштабных вихрей ежесуточно вычисляются особые точки, где суточное поле скорости равно нулю. Стандартный анализ устойчивости этих точек позволяет находить местоположения устойчивых эллиптических точек и неустойчивых гиперболических точек. Движение воды в окрестности гиперболических точек неустойчиво в том смысле, что две близко расположенные частицы воды могут экспоненциально быстро расходиться. Эллиптические точки расположены, как правило, в центрах вихрей и циркуляций, где вращение водных масс превалирует над их деформацией. Такие точки, обозначающие центры антициклонов (циклонов), наносятся на рисунки с полем скорости и на лагранжевы карты в виде треугольников, ориентированных вверх (вниз). Точность вычисления эллиптических точек долгоживущих мезомасштабных вихрей много лучше номинального разрешения поля скорости АВИЗО, т.к. поле скорости вокруг центров таких вихрей гладкое и медленно меняющееся. Это было проверено в двух экспедициях: на НИС “Академик Гагаринский” в июне–июле 2012 г. со съемкой буссольского вихря (БАЦ) в районе средних Курил, координаты центра которого только на несколько км отличались от вычисленных координат соответствующей эллиптической точки (Prants et al., 2016).

С такой же точностью была определена эллиптическая точка камчатского вихря в рейсе НИС “Академик Опарин” в сентябре 2017 г.

Одной из основных задач этой работы является идентификация источников водных масс в районе промысла сайры российскими судами. Для этого рассчитывались лагранжевы карты происхождения вод — новый инструмент лагранжевой диагностики крупномасштабного переноса и перемешивания вод в океане (Prants et al., 2014; Prants et al., 2017). Методика расчета таких карт следующая: (1) каждые сутки задается решетка с большим числом пассивных частиц, покрывающая весь регион на рис. 1; (2) задаются координаты цветных отрезков — источников специфических водных масс (см. рис. 1); (3) интегрируя уравнения адвекции назад во времени на полгода, вычисляются траектории всех частиц из массива начальных данных; (4) на фиксированную дату на географической карте региона отмечаются цветом те частицы, которые в течение полугодия в прошлом пересекли соответствующий цветной отрезок. В качестве фиксированной даты выбран конец сайровой путины — 1 декабря. Рассчитанные таким образом лагранжевы карты, параметризованные датой и временем интегрирования уравнений адвекции, дают информацию о происхождении водных масс в заданном районе.

Использованы позиции движения судов, включая суда Японии и Кореи (когда они находятся внутри или поблизости ИЭЗ РФ), ловивших сайру бортовыми ловушками, сохраненные в Отраслевой Системе Мониторинга (ОСМ) ФГБУ “Центр системы мониторинга рыболовства и связи” с 2004 по 2018 гг. в ночное время, которое определялось по углу захода Солнца за горизонт глубже 6 астрономических градусов по каждой паре координат и всемирному координированному времени по алгоритму (Michalsky, 1988), реализованному со всеми последовавшими исправлениями в пакете *oce* (<https://cran.r-project.org/web/packages/oce>) для языка программирования высокого уровня R (<https://cran.r-project.org/>).

Выборка операций, где предположительно велся лов сайры, осуществлена по соответствию времени каждой операции диапазонам бюджета времени каждого судна, подававшему отчет о вылове сайры в ОСМ. Если скорость движения к следующей позиции превышала 3 м/с, то такая позиция удалялась. Прочие операции и позиции, отстоящие от предыдущей позиции дальше, чем судно могло двигаться на максимальной скорости, указанной в реестре судов ОСМ, также удалены. Данные по уловам до 2017 г. получены из ФАО (FAO, 2019), за 2018 г. получены из документов РФ для Комиссии по рыболовству в северной части Тихого океана (The North Pacific Fisheries Commission — NPFC), которые в табличном виде

представлены на сайте NPFC (<https://www.npfc.int/summary-footprint-pacific-saury-fisheries>), а за 2019 г. из ОСМ. Стандартизированный CPUE РФ получен из рабочего документа NPFC (Kulik et al., 2019).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены поля скорости АВИЗО в 2014, 2015, 2017 и 2018 гг. в районе российского промысла сайры, усредненные за путину соответствующего года, с 1 августа по 30 ноября. На каждую карту наложены за все время путины позиции судов России, Японии и Кореи, застопоривших ход и ловивших сайру бортовыми ловушками в ночное время. Это критерии успешного лова сайры в этих местах. Отметим квази-перманентные антициклонические вихри (ВАС и НАС на рис. 1), регулярно стагнирующие примерно в одних и тех же местах, и наличие квази-стационарной струи Исогучи (IJ на рис. 1), которая меняет положение и форму год от года. Поскольку эта струя трансформированной субтропической воды определяет границу фронта Ойясио, то и фронт мигрирует год от года. На положение субарктического фронта оказывает влияние и межгодовая изменчивость 2-й и 3-й ветвей Ойясио, которые вливаются в струю Исогучи, формируя благоприятные для промысла (не только сайры, но и кальмара Бартрама (Будянский и др., 2017)) лагранжевы фронты схождения трансформированных субтропических и субарктических вод.

Для идентификации происхождения различных водных масс в районе промысла мы рассчитываем на основе поля скорости АВИЗО лагранжевы карты происхождения вод в период 2004–2018 гг. в соответствии с методикой, изложенной в разд. 2 статьи. На каждую карту, так же как и на рис. 1, нанесены позиции судов (места улова) за путину. Из-за недостатка места на рис. 3 приведены карты только последних лет. Мы идентифицируем три основные водные массы в районе промысла: субарктические богатые биогенами воды течения Ойясио, продуктивные воды, поступающие в океан из Охотского моря через Курильские проливы и субтропические олиготрофные воды течения Куроисио и его продолжения. Эти водные массы отображаются на картах на рис. 3 оттенками разного цвета в зависимости от того отрезок какого цвета соответствующие трассеры пересекли в прошлом. Зональный отрезок синего цвета пересекает стрежень Ойясио вдоль 49.5° с.ш. от 154.75° до 160° в.д., отрезок зеленого цвета находится в Охотском море (оба показаны на рис. 1) и зональный отрезок красного цвета пересекает стрежень Куроисио вдоль 34.5° с.ш. от 139° до 144° в.д. (не показан, т.к. находится за границами области на рис. 1 и 3). Все отрезки приведены на рис. 1 в статье (Prants et al., 2018). Белый

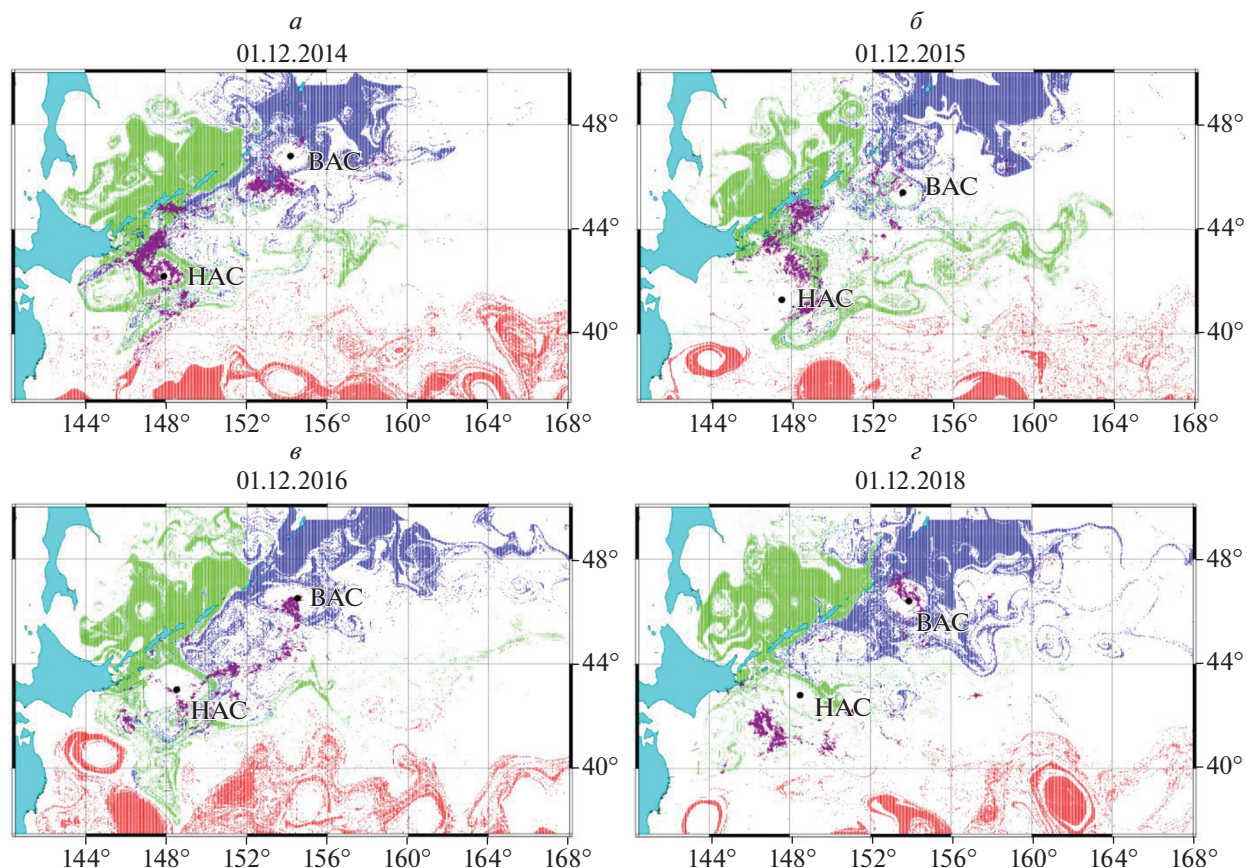


Рис. 3. Лагранжевы карты происхождения вод в 2014, 2015, 2016 и 2018 гг. с наложенными местами улова за путину соответствующего года, рассчитанные в поле скорости АВИЗО на полгода назад во времени, начиная с 1 декабря указанного года. ВАС и НАС – буссольский и хоккайдский анитциклоны, центры которых показаны черными точками. “Синие”, “зеленые” и “красные” частицы принадлежат водным массам, ведущим свое происхождение из Ойясио, Охотского моря и Куроисио соответственно (см. отрезки на рис. 1, а и текст).

цвет на картах означает, что соответствующие частицы воды имеют либо иное происхождение и не принадлежат указанным водным массам, либо за полгода в прошлом (начиная с 1 декабря каждого года) они не успели достичь ни одного из выбранных отрезков.

В период 2004–2008 гг. места уловов сайры были сосредоточены в основном вблизи лагранжевых фронтов на периферии ХАЦ в местах схождения водных масс различного происхождения: трансформированной олиготрофной субтропической воды в ядре ХАЦ, богатых питательными веществами и зоопланктоном субарктических вод Ойясио и водных масс из Охотского моря. Отметим, что субтропическая вода в ядре ХАЦ не отображается на картах на рис. 3, так как полгода недостаточно для ее переноса от Куроисио до Хоккайдо. Для этого требуется большее время. На картах происхождения вод, рассчитанных на 2 года назад во времени в статье (Prants et al., 2018), видно, что ядро ХАЦ в различные годы состоит в основном из субтропической воды Куроисио.

В период 2004–2008 гг. была хорошо сформирована 2-я ветвь Ойясио, огибающая ХАЦ по его северо-восточной периферии. В эти годы в сайровую путину регулярно формировалась устойчивая система лагранжевых фронтов, создающих благоприятную кормовую базу для нагула сайры (Пранц и др., 2012; Пранц и др., 2014; Prants et al., 2014). Лов велся также вблизи лагранжевых фронтов на океанской стороне у средних Курил на периферии и внутри БАЦ. На графике на рис. 2 видно, что наибольшие значения CPUE сайры были получены российскими рыбаками именно в этот период времени 2004–2008 гг.

Начиная с 2009 г., эффективность лова сайры снижается по разным причинам, включая уменьшение биомассы сайры и сокращение количества российских судов на путине. После сравнительно большого общего вылова сайры в 2014 г. следует существенное сокращение уловов в последующие годы и особенно в 2017 и 2019 гг. (рис. 2). Что касается CPUE (вылова за судо-сутки), то он также уменьшается с 2014 г., но в 2018 г. выходят на уро-

вень 2014 г. Согласно последним оценкам биомасса сайры в научных траловых съемках Японии сократилась на 30% в 2019 г. относительно 2018 г. Рыбы возраста 1+ встречались в основном восточнее 160° в.д., а сеголетки — восточнее 175° з.д. Ранее большая часть сеголеток отмечалась восточнее 165° в.д. (NPFC, 2019a). Последняя согласованная консенсусом оценка состояния запаса сайры, рассчитанная в соответствующей структуре NPFC, показывает, что с уровня высокой биомассы примерно равной приемной емкости в середине 2000-х гг. оценки снизились до минимума с 1980 г. в 2017 г., когда отношение биомассы сайры к ее максимальному устойчивому уровню снизилось до 0.63 (NPFC, 2019b). Однако эта оценка не включала оценки биомассы 2019 г. и CPUE 2018–2019 гг. По предварительным оценкам Вануату, Республики Корея, России, Тайваня и Японии очередной минимум эффективности лова сайры был достигнут в 2019 г. (NPFC, 2019a).

Как уже упоминалось во Введении, CPUE зависит от нескольких факторов. Изменения как общего вылова сайры в 2014–2019 гг., так и CPUE за этот период мы связываем, помимо указанных факторов, с изменением гидрологического режима, а именно, с формированием 3-й ветви Ойясио (рис. 1, в, г, д). Сравнительно высокие значения CPUE в 2014 и 2018 гг. (см. рис. 1 и 3) обусловлены ловом, главным образом, на перифериях ХАЦ и БАЦ с хорошо развитыми лагранжевыми фронтами в эти годы, где сходятся воды различного происхождения, в том числе, богатые питательными веществами и зоопланктоном субарктические воды Ойясио и водные массы из Охотского моря. В результате на периферии этих антициклонов создаются благоприятные условия для кормления сайры. БАЦ в 2015 г. был развит плохо, в отличие от 2016 г. В 2015 и 2016 гг. места уловов в значительно меньшей степени концентрируются вокруг и внутри ХАЦ и БАЦ, и находятся, главным образом, в районе между вихрями (рис. 1).

Особенная ситуация сложилась в путину 2017 г., когда вместо типичного устойчивого ХАЦ сформировался гораздо менее развитый антициклон местного происхождения АХАЦ (рис. 1), вокруг которого не смогли сформироваться достаточно устойчивые лагранжевые фронты с благоприятной кормовой базой для сайры. В путину этого года интенсифицировалась 3я ветвь Ойясио (рис. 1, в), к фронту которой, а также к фронту квази-стационарной струи Исогучи сместились места лова (рис. 1, в и 3, в). Вылов за судо-сутки в этот год был минимальным (см. рис. 2), что мы объясняем отсутствием развитого антициклона у берегов Хоккайдо, а также минимальной оценкой биомассы сайры.

Что касается катастрофического снижения общего вылова сайры в районе промысла в послед-

ние годы, то мы связываем это (помимо сокращения общей биомассы сайры) с изменением гидрологического режима Ойясио. Наиболее значительные изменения происходят, начиная с 2015 г., и связаны они с усилением 3-й ветви Ойясио, переносящей продуктивные воды этого течения в открытый океан к востоку и юго-востоку от средних Курил и с ослаблением 2-й ветви Ойясио, несущей субарктические воды на юг и юго-запад (рис. 1 и 3). Одной из причин усиления 3-й ветви является увеличение, начиная с 2015 г., средней скорости течения Ойясио в целом.

Для проверки этого на всем зональном отрезке, показанном на рис. 1, а, были вычислены значения нормальной компоненты геострофической скорости усредненной за период сайровой путины, начиная с 2014 г. Расчет показал, что эта средняя скорость неуклонно растет в последние годы и выросла в 2016 г. почти в 2 раза по сравнению с 2014 г. Вследствие этого уменьшается транспорт вод Ойясио вдоль берегов Курил и Хоккайдо и увеличивается транспорт субарктических вод на восток и юго-восток от пр. Буссоль и БАЦ. На картах скорости на рис. 1 это отражается в появлении 3-й ветви Ойясио, контролируемой БАЦ, а на картах происхождения вод на рис. 3 — в расширении на восток площади “синих” вод Ойясио. Два этих фактора приводят к сокращению уловов в прибрежных районах южных Курил и Хоккайдо и к созданию потенциальных мест лова на востоке в открытых водах океана. Снижение уловов вблизи берега вынуждает рыбаков искать новые места далеко на востоке, что для судов, традиционно работавших в прибрежных районах, экономически менее привлекательно из-за значительных расходов на топливо, когда в прибрежных районах можно успешно ловить кальмаров, сардину-иваси, скумбрию и минтая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значительные межгодовые изменения как величины общего вылова сайры российскими судами, так и вылова за судо-сутки (CPUE) обусловлены сочетанием многих факторов, из которых в этой статье рассматривалось только изменение гидрологических условий в последние годы, когда и произошло резкое падение уловов в традиционных местах лова российских и японских рыбаков. С помощью спутникового альтиметрического поля скорости АВИЗО и рассчитанных на его основе лагранжевых карт происхождения вод с нанесенными на них позициями судов России, Японии и Кореи в каждую путину мы изучили крупномасштабный транспорт и перемешивание вод в районе промысла в период с 2004 по 2018 гг.

Значительное сокращение как общего вылова сайры, так и CPUE в 2015–2018 гг. мы связываем, помимо сокращения биомассы сайры в целом, с

изменением путей распространения богатых питательными веществами субарктических вод Ойясио. Начиная с 2015 г., в результате почти двукратного увеличения средней скорости течения Ойясио интенсифицировалась 3-я ветвь Ойясио, переносящая субарктические продуктивные воды на восток в открытый океан, создавая там благоприятные условия для кормления сайры. Однако, лов сайры на большом удалении от берега становится слишком затратным из-за значительного увеличения стоимости топлива. В 2019 г. вылов сайры еще более снизился у всех стран участников промысла не только в районе российского промысла у южных и средних Курил и Хоккайдо, но и значительно восточнее этих островов. Ситуация стала настолько серьезной, что переключаться с промысла сайры на другие виды (минтай, скумбрия, сардина иваси и кальмар) стали не только российские рыбаки, но и самые успешные и опытные в океаническом промысле сайры — тайваньские рыбаки (на кальмаров).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана Российским научным фондом в рамках проекта № 19-17-00006. Промысловая статистика обработана в рамках государственного задания № 076-00005-19-00 ФГБНУ «ВНИРО» на 2019 г., а поля скорости получены в рамках государственного задания № 0271-2019-0001 ТОИ ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антоненко Д.В., Новиков Ю.В. О нагульных миграциях сайры в северо-западной части тихоого океана // Изв. ТИНРО. 2017. Т. 188. С. 115–124.
- Байталиук А.А. Тихоокеанская сайра (*Cololabis saira*): размерно-возрастная структура, особенности воспроизводства, динамика численности сезонных и региональных группировок: дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2004. 179 с.
- Белоненко Т.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Бобков А.А., Стучевский М.А., Рудаков Ю.А., Самко Е.В., Ребенкова О.А., Григоркина Р.Г., Мичурин А.Н. Истоки Ойясио / Под ред. Фукс В.Р., Мичурин А.Н. Санкт Петербург: Издательство Санкт-Петербургского университета, 1997. 248 с.
- Будянский М.В., Пранц С.В., Самко Е.В., Улейский М.Ю. Выявление и лагранжевы анализ океанографических структур перспективных для промысла кальмара Бартрама (*Ommastrephes bartramii*) в районе Южных Курил // Океанология. 2017. № 5. С. 720–730.
- Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В. Лагранжевы когерентные структуры в океане благоприятные для рыбного промысла // Докл. 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.
- Самко Е.В., Булатов Н.В. Исследование связи между положением рингов Куроисио с теплым ядром и распределением районов промысла сайры по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 18–26.
- Самко Е.В., Булатов Н.В., Капшутер А.В. Два типа антициклонических вихрей к востоку от Японии: происхождение, характеристики, влияние на промысел // Изв. ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 189–203.
- Самко Е.В., Булатов Н.В., Никитин А.А., Муктепавел Л.С., Капшутер А.В. Результаты использования материалов дистанционного зондирования в рыбохозяйственных целях на дальневосточном бассейне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 209–220.
- Филатов В.Н., Старцев А.В., Устинова Е.И., Еремин Ю.В. Тихоокеанская сайра. Научно-информационное обеспечение промысловой экспедиции. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2011. 120 с.
- Baitaliuk A.A., Orlov A.M., Ermakov Yu.K. Characteristic features of ecology of the Pacific saury *Cololabis saira* (Scomberesocidae, Beloniformes) in open waters and in the northeast Pacific Ocean // J. Ichthyol. 2013. V. 53. № 11. P. 899–913.
- FAO. Fishery and Aquaculture Statistics. Global capture production 1950–2017 (FishstatJ) // In: FAO Fisheries and Aquaculture Department [online]. Rome. Updated 2019. www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en
- Isoguchi O., Kawamura H., Oka E. Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. C10003.
- Kosaka S. Life history of Pacific saury *Cololabis saira* find consideration of resource fluctuation based on it // Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst. 2000. № 63. P. 1–96.
- Kulik V., Katugin O., Baitaliuk A. CPUE standardization for the Pacific saury Russian catches in the Northwest Pacific Ocean // 5th Small Scientific Committee on Pacific Saury (NPFC). 13–16 November 2019. Shimonoseki, Japan, 2019. WP07. P. 1–12.
- NPFC. 5th Meeting Report // Small Scientific Committee on Pacific Saury. 13–16 November 2019. Shimonoseki, Japan, 2019a. 44 p.
- NPFC. 4th Meeting Report // Technical Working Group on Pacific Saury Stock Assessment. 6–9 March 2019. Yokohama, Japan, 2019b. 50 p.
- Kuroda H., Katsumi Y. Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan // Fish. Oceanogr. 2017. V. 16. P. 482–488.
- Michalsky J. The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050) // Sol. Energy. 1988. V. 40. P. 227–235.
- 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.
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // Ocean Science. 2017. V. 13 P. 453–463.
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. How eddies gain, retain and release water: the case study of a Hokkaido

anticyclone // J. Geophysical Research. Oceans. 2018. V. 123. Iss. 3. P. 2081–2096.

Prants S.V., Lobanov V.B., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies // Deep Sea Research I. 2016. V. 109. P. 61–75.

Saitoh S., Kosaka S., Iisaka J. Satellite infrared observations of Kuroshio warm-core rings and their application to study

of Pacific saury migration // Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. 1986. Pap. 33. P. 1601–1615.

Sugimoto T., Tameishi H. Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan // Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. 1992. Pap. 39. P. S183–S201.

Uda M. Researches on “Siome” or current rip in the seas and oceans // Geophys. Mag. 1938. V. 11. P. 307–372.

On Connection of Saury Fishing Grounds with Large-Scale Coherent Structures in the Ocean Studied by Satellite Data

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

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

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

Using satellite data on the speeds of geostrophic currents AVISO from 2004 to 2018, we associate a significant reduction in saury catch in the recent years with a change in the oceanographic situation in the Russian fishery area off the coast of the southern and middle Kuril Islands and Hokkaido Island. The Lagrangian maps of the origin of water masses, calculated for this period of time on the basis of the AVISO field, with overlaid positions of fishing vessels of Russia, Japan and Korea, show that this catastrophic decrease is caused by a change in the pathways of nutrient-rich subarctic waters of the Oyashio current in the recent years. The most significant changes of the hydrological regime since 2015 were caused by an intensification of the 3rd branch of Oyashio, which transports the waters of this current to the open ocean. At the same time, the traditional fishing grounds off the eastern coasts of Hokkaido and southern Kurils significantly reduced, whereas favorable fishing grounds appeared in the open ocean.

Keywords: satellite altimetry, saury fishing, mesoscale eddies, Lagrangian maps

REFERENCES

Antonenko D.V., Novikov Yu.V. O nagul'nykh migratsiyakh sayry v severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana [On feeding migrations of saury in the North-West Pacific Ocean] // Izvestiya TINRO. 2017. T. 188. P. 115–124. (In Russian).

Baitaliuk A.A., Orlov A.M., Ermakov Yu.K. Characteristic features of ecology of the Pacific saury *Cololabis saira* (Scomberesocidae, Beloniformes) in open waters and in the northeast Pacific Ocean // J. Ichthyol. 2013. V. 53. № 11. P. 899–913.

Baytalyuk A.A. Tikhookeanskaya sayra (*Cololabis saira*): razmerno-voznrastnaya struktura, osobennosti proizvodstva, dinamika chislennosti sezonnykh i regional'nykh gruppirovok: dis. ... kand. biol. nauk. [Pacific saury (*Cololabis saira*): size and age structure, reproduction characteristics, dynamics of the number of seasonal and regional groups: PhD Thesis on biological sciences]. Vladivostok, 2004. 179 p. (In Russian).

Belonenko T.V., Staritsyn D.K., Fuks V.R., Bobkov A.A., Stuchevskiy M.A., Rudakov Yu.A., Samko E.V., Rebenkova O.A., Grigorkina R.G., Michurin A.N. Istoki Oyyasio [The origins of the Oyashio] / Pod red. Fuks V.R., Michurin A.N. Sankt Peterburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 1997. 248 p. (In Russian).

Budyansky M.V., Prants S.V., Samko E.V., Uleysky M.Yu. Identification and Lagrangian analysis of oceanographic structures favorable for fishery of neon flying squid (*Onomastrephe bartramii*) in the South Kuril area // Oceanology. 2017. V. 57. № 5. P. 648–660.

FAO. Fishery and Aquaculture Statistics. Global capture production 1950–2017 (FishstatJ) // In: FAO Fisheries and Aquaculture Department [online]. Rome. Updated 2019. www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstatj/en

Filatov V.N., Startsev A.V., Ustinova E.I., Eremin Yu.V. Tikhookeanskaya sayra. Nauchno-informatsionnoe obespechenie promyslovoy ekspeditsii [Pacific saury. Scientific and informational support of a fishing expedition]. Rostov-na-Donu: YuNTs RAN, 2011. 120 p. (In Russian).

Isoguchi O., Kawamura H., Oka E. Quasi-stationary jets transporting surface warm waters across the transition zone between the subtropical and the subarctic gyres in the North Pacific // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. C10003.

Kosaka S. Life history of Pacific saury *Cololabis saira* find consideration of resource fluctuation based on it // Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst. 2000. № 63. P. 1–96.

Kulik V., Katugin O., Baitaliuk A. CPUE standardization for the Pacific saury Russian catches in the Northwest Pacific Ocean // 5th Small Scientific Committee on Pacific Saury (NPFC). 13–16 November 2019. Shimonoseki, Japan, 2019. WP07. P. 1–12.

Kuroda H., Katsumi Y. Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan // Fish. Oceanogr. 2017. V. 16. P. 482–488.

Michalsky J. The Astronomical Almanac's algorithm for approximate solar position (1950–2050) // Sol. Energy. 1988. V. 40. P. 227–235.

- NPFC. 4th Meeting Report // Technical Working Group on Pacific Saury Stock Assessment. 6–9 March 2019. Yokohama, Japan, 2019b. 50 p.
- NPFC. 5th Meeting Report // Small Scientific Committee on Pacific Saury. 13–16 November 2019. Shimonoseki, Japan, 2019a. 44 p.
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian fronts in the ocean // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 3. P. 284–291.
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. How eddies gain, retain and release water: the case study of a Hokkaido anticyclone // *J. Geophysical Research. Oceans*. 2018. V. 123. Iss. 3. P. 2081–2096.
- 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.
- Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian simulation and tracking of the mesoscale eddies contaminated by Fukushima-derived radionuclides // *Ocean Science*. 2017. V. 13 P. 453–463.
- Prants S.V., Lobanov V.B., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies // *Deep Sea Research I*. 2016. V. 109. P. 61–75.
- Prants S.V., Uleysky M.Yu., Budyansky M.V. Lagrangian Coherent Structures in the Ocean Favorable for Fishery // *Doklady Earth Sciences*. 2012. V. 447. Part 1. P. 1269–1272.
- Saitoh S., Kosaka S., Iisaka J. Satellite infrared observations of Kuroshio warm-core rings and their application to study of Pacific saury migration // *Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res.* 1986. Pap. 33. P. 1601–1615.
- Samko E.V., Bulatov N.V. Issledovanie svyazi mezhdu polozheniem ringov Kurosio s teplym yadrom i raspredeleniem rayonov promysla sayry po sputnikovym dannym [Research on the relationship between the position of Kuroshio rings with a warm core and the distribution of saury fishing areas according to satellite data] // *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. № 2. S. 18–26. (In Russian).
- Samko E.V., Bulatov N.V., Kapshiter A.V. Dva tipa antitsiklonicheskikh vikhrey k vostoku ot Yaponii: proiskhozhdenie, kharakteristiki, vliyanie na promysel [Two types of anticyclonic eddies east of Japan: origin, characteristics, effects on fishing] // *Izvestiya TINRO*. 2008. T. 154. S. 189–203. (In Russian).
- Samko E.V., Bulatov N.V., Nikitin A.A., Muktepavel L.S., Kapshiter A.V. Rezul'taty ispol'zovaniya materialov distantsionnogo zondirovaniya v rybokhozyaystvennykh tselyakh na dal'nevostochnom bassejne [The results of the use of remote sensing materials for fishery purposes in the Far East basin] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2010. T. 7. № 2. S. 209–220. (In Russian).
- Sugimoto T., Tameishi H. Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan // *Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res.* 1992. Pap. 39. P. S183–S201.
- Uda M. Researches on “Siome” or current rip in the seas and oceans // *Geophys. Mag.* 1938. V. 11. P. 307–372.