Вихревой апвеллинг как механизм создания благоприятных условий скоплений сайры в Южно-Курильском районе

Т.В. Белоненко, П.К. Козуб

Санкт-Петербургский государственный университет Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: btvlisab@yandex.ru

Рассматриваются спутниковые данные по температуре поверхности океана (ТПО), уровню океана (АДТ — абсолютная динамическая топография), а также промысловые планшеты, содержащие информацию о распределении промыслового флота за сентябрь 2001 г. Установлено, что благоприятными условиями для образования скоплений сайры в Южно-Курильском районе являются вихревые образования циклонического типа с пониженными значениями аномалий ТПО. Показано, что скопления тихоокеанской сайры приурочены пре-имущественно к мезомасштабным циклоническим структурам с отрицательными аномали тПО в пределах от -2 до -0,5 °С и отрицательными значениями АДТ в пределах от -0,21 до -0,08 м. Вихревой апвеллинг рассмотрен как механизм для создания благоприятных условий для образования промысловых скоплений сайры. На основе распределения промыслового флота в Южно-Курильском районе показано, что вихревой апвеллинг удовлетворяет условиям подъёма биогенов в верхние слои океана только для вихрей в период их формирования. Другим подобным механизмом может являться кросс-фронтальный поток струйного течения — Ойясио.

Ключевые слова: температура поверхности океана, абсолютная динамическая топография, сайра, промысловые скопления, Ойясио, Южно-Курильский район, Тихий океан

Одобрена к печати: 06.10.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-221-232

Введение

Распределения питательных веществ и первичной продукции в океане контролируются множеством биогеохимических и физических процессов. Физические процессы перераспределяют питательные вещества внутри водяного столба жидкости через перенос и перемешивание. Комбинированная роль биогеохимических и физических процессов отражается в наблюдаемых распределениях биогенов. Эти распределения в широком смысле отражают свойства классических водных масс, такие как температура и солёность, подчёркивая важность физических процессов.

Рыбы могут ощущать температурные градиенты в воде, что позволяет им путём выбора вод с определённой температурой контролировать температуру своего тела. Температурные фронты являют собой наиболее благоприятные условия для миграции рыб (Huang et al., 2007). Скопления нагульной рыбы формируются вокруг скоплений пищи, так как в этом случае процесс питания происходит по линии наименьших энергозатрат и рыба остаётся с положительным балансом энергии. Скопления пищи (зоопланктона) концентрируются в зонах гидрологических фронтов, районах конвергенции вод с различными температурно-солёностными характеристиками. Данные дистанционного зондирования, имеющие высокое пространственное разрешение, могут использоваться для определения областей, благоприятных для промысла.

Приуроченность тихоокеанской сайры (Cololabis saira) к океаническим фронтам была известна задолго до спутниковых исследований океана (Левасту, Хела, 1974; Новиков, 1966). С развитием дистанционного зондирования Земли эта тема стала чаще появляться в публикациях (Булатов и др., 2008; Козуб, Белоненко, 2017; Родин, 2000; Самко, Булатов, 2014; Самко и др., 2008; Устинова и др., 2007; Huang et al., 2007). Сайра, являясь стайной рыбой, образует значительные скопления в преднерестовый и нагульный периоды. В основном на этих скоплениях базируется её промышленный лов. Наиболее благоприятные зоны для нагула сайры связаны с зонами развития среднего или крупного зоопланктона (Филатов, 2015). В Южно-Курильском районе промышленный вылов сайры осуществляется в течение августа – ноября.

В работе (Kuroda, Yokouchi, 2017) изучены междекадные вариации объёмов потенциального промысла тихоокеанской сайры в Южно-Курильском районе и районах традиционного промысла Японии — к востоку от побережья Хоккайдо в период с августа по сентябрь 1993-2014 гг. Авторы сравнили индекс численности (т.е. суммарный за август – сентябрь улов на ловушку) для Южно-Курильского района с соответствующими показателями для трёх районов традиционного японского вылова сайры и показали, что японские районы вылова имеют чётко выраженную тенденцию к резкому сокращению. Были исследованы линейные тренды океанологических полей (температура поверхности океана (ТПО), абсолютная динамическая топография и концентрация хлорофилла) на основе спутниковых данных и выявлены тенденции, показывающие междекадное сокращение в августе – сентябре потенциальных промысловых участков у побережья Хоккайдо. Всё это привело к тому, что в последние годы вблизи побережья Хоккайдо исчезли большие площади, благоприятные для промысла. Однако катастрофические изменения площадей традиционного вылова сайры у побережья Хоккайдо, осуществляемого японскими судами, не касаются Южно-Курильского района, в котором производится промышленный вылов сайры судами России (Kuroda, Yokouchi, 2017).

В этой работе также были отмечены значительные аномалии ТПО и уровня моря вдоль Курило-Камчатского жёлоба, которые связаны с влиянием мезомасштабных вихрей. Проведённое авторами на основе спутниковой альтиметрии исследование показало, что в последние годы на склоне Курило-Камчатского жёлоба влияние Ойясио существенно уменьшилось, причём темпы снижения были значительными в июне – сентябре, а максимальное снижение наблюдалось в августе и сентябре. По этим данным авторы зафиксировали изменение основного потока Ойясио, с которым активно взаимодействуют мезомасштабные вихри. Исследование (Kuroda, Yokouchi, 2017) приводит к выводу, что влияние Ойясио и мезомасштабных вихрей крайне существенно для промысла сайры, а Южно-Курильский район оказывается в более выигрышном положении и является наиболее благоприятным для промысла сайры в регионе.

Основываясь на моделировании, авторы работы (Zhou, Xie, 2017) связывают происходящие изменения в системе вод Ойясио с циклоническими аномалиями поверхностного ветра над северной частью Тихого океана, что не только усиливает турбулентные тепловые потоки к югу от области взаимодействия Куросио и Ойясио, но также приводит к аномальному циклоническому движению вод на север. На изменения циркуляционного режима и меридиональный сдвиг фронта Ойясио после 1990 г. указывают также результаты гидродинамического моделирования (Pak et al., 2017).

В работе (Gaube et al., 2014) показано, что вихри не только переносят питательные вещества путём вращения, захвата жидкости или горизонтальной адвекции, но могут и влиять на биогеохимические циклы с помощью различных механизмов, включающих вертикальные движения питательных веществ в вихрях. Проанализировав влияние мезомасштабных океанских вихрей на приповерхностный хлорофилл, оценённый по спутниковым измерениям цвета океана, авторы приходят к выводу, что, как правило, в циклонических вихрях содержатся положительные аномалии хлорофилла, а в антициклонических — отрицательные. Однако различные механизмы воздействия вихрей на морской фитопланктон определяются региональными особенностями, а на распределение хлорофилла в вихре могут влиять различные биофизические процессы: адвекция («перемешивание») фитопланктона по периферии вихрей, перенос экосистем, захваченных в ядрах вихрей, апвеллинг/даунвеллинг и вихревые изменения стратификации.

Существование больших (диаметром 150–200 км) антициклонических вихрей, которые растянуты вдоль всей длины Курило-Камчатского жёлоба и играют важную роль в смешении вод в области западных пограничных течений, является главной особенностью западных

пограничных течений (Рогачев, Горин, 2004). Мезомасштабные вихри Курило-Камчатского жёлоба многократно исследовались, и на основе спутниковых и судовых измерений проанализированы их свойства и траектории движения (Рогачев, Гогина, 2001; Рогачев и др., 1996; Rogachev, 2000). Но в этих публикациях речь идёт преимущественно об антициклонических вихрях, которые хорошо видны на спутниковых снимках, в то время как циклонические образования практически не видны, что вовсе не означает, что циклонические вихри отсутствуют в регионе. Образование мезомасштабных вихрей, как циклонов, так и антициклонов, является следствием бароклинной неустойчивости крупномасштабных течений, каким является и Ойясио. В то время как за перемещением антициклонического вихря в Ойясио можно наблюдать продолжительный период (Rogachev, 2000), циклонические вихри гораздо менее устойчивы и быстро разрушаются, что, возможно, является следствием так называемой «циклон-антициклонной асимметрии» (Незлин, 1986). Интерес к циклоническим вихрям в Южно-Курильском районе вызван ещё и тем, что на сегодня доказано отсутствие приуроченности мест вылова сайры к антициклоническим вихрям и непосредственная связь между положением центров антициклонических вихрей и величиной улова сайры на судосутки не обнаружена (Самко, Булатов, 2014; Самко и др., 2008; Старицын и др., 2004).

Авторы работы (Chang et al., 2017) также исследовали процессы увеличения и уменьшения фитопланктона в мезомасштабных вихрях в северо-западной части Тихого океана как на основе *in situ* измерений концентрации хлорофилла в 52 рейсах, проведённых Японским метеорологическим агентством, так и по данным численного моделирования. Как *in situ* данные, так и результаты моделирования показали, что концентрация хлорофилла/фитопланктона существенно выше в подповерхностных водах холодных вихрей, чем тёплых (глубина до 70 м). Важно подчеркнуть, что в своём исследовании авторы выделяют две стадии развития вихреобразования: **стадия А** —период формирования вихря, длящийся примерно 10 дней, и **стадия Б** — период существования вихря, наступающий после стадии А, до его разрушения.

На стадии А в идеализированных моделях при вихреобразовании вертикальные движения изопикн переносят фитопланктон и питательные вещества путём апвеллинга/даунвеллинга на разные вертикальные глубины. В холодных вихрях фитопланктон и питательные вещества переносятся по направлению к поверхности, в то время как в тёплых вихрях — в противоположном направлении. В холодных вихрях солнечный свет и биогены способствуют росту фитопланктона, тогда как в тёплых вихрях в более глубоких водах фитопланктон распадается иза недостаточного солнечного света.

На стадии Б апвеллинг и даунвеллинг сосуществуют как в тёплых, так и в холодных вихрях, что в равной степени способствует вертикальному перемещению в обоих направлениях, но на этой стадии поток нитратов, вызванный апвеллингом/даунвеллингом, составляет небольшой процент (3 %) от общего потока нитратов, поэтому на стадии Б вертикальная скорость, вызванная распространением вихрей, не является основным фактором, вызывающим различия в концентрациях фитопланктона между тёплыми и холодными вихрями.

Более того, эти исследования также показали, что вихревая накачка в тёплых вихрях переносит питательные вещества вниз, что приводит к уменьшению фитопланктона, в то время как вихревое всасывание в холодных вихрях ведёт к увеличению потока питательных веществ и способствует росту фитопланктона (Gaube et al., 2013; Ning et al., 2008). Тем не менее ни о каких прямых свидетельствах увеличения потока фитопланктонов не сообщалось из-за трудностей в наблюдении относительно слабых (~ $10^{-4}...10^{-6}$ м/с) вертикальных скоростей. Изменения концентрации фитопланктона, связанные с образованием вихрей, не были хорошо документированы.

Несмотря на то что наибольшие концентрации планктона фиксируются в центре вихря, пополнение питательных веществ в вихрях происходит в основном на их периферии. Моделирование с высоким разрешением показывает, что наибольшая относительная завихренность в вихревых образованиях соответствует нитевидным объектам по фронтам и краям вихрей, а не в их центрах, и обычно равна или превышает по величине планетарную завихренность, приводя в действие субмезомасштабные процессы и включая каскадный механизм. Как только биогены поднимаются в эвфотическую зону, они потребляются фитопланктоном, поэтому существует средний отрицательный вертикальный градиент концентрации биогенов, однако апвеллинг и вертикальные скорости поддерживают перенос наверх новых биогенов. Уровень потребления и переноса биогенов наверх является функцией темпа роста фитопланктона. Вихревой апвеллинг может обеспечить значительную часть питательных веществ, необходимых для поддержания первичной продуктивности океана (Mahadevan et al., 2008).

Исследование (Chang et al., 2017), в котором проводится сравнение холодных циклонических вихрей с тёплыми антициклоническими, приводит к выводу, что наиболее благоприятные условия для формирования скоплений сайры связаны с холодными циклонами на стадии А. Подобное исследование, анализирующее связь кинематических характеристик и высоких концентраций пелагических рыб в прибрежном мезомасштабном циклоническом вихре у побережья Санта-Барбары, проводится также в работе (Simons et al., 2015).

Перечисленные исследования, как правило, опираются на отдельные факторы и не могут одновременно охватить весь спектр вопросов, связанных с образованием промысловых скоплений. Сложность моделирования состоит в том, что биогеохимические процессы должны включать рост, смертность и накопление фитопланктона; образование зоопланктона и его смертность; реминерализацию продуктов жизнедеятельности и их перемещение на дно океана. В данной работе мы коснёмся только одного аспекта этой большой проблемы: на основе спутниковой информации о поверхности океана для одного промыслового месяца, взятого в качестве примера, — сентябрь 2001 г. — мы установим связь промысловых участков сайры с мезомасштабными циклоническими образованиями в Южно-Курильском районе.

Данные

Использовались данные за сентябрь 2001 г. сервиса Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) (http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/): температура поверхности океана (TПО) и абсолютная динамическая топография (АДТ). Поля значений ТПО были извлечены из продукта SST_GLO_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_011. Входными данными для продукта являются данные вторичной обработки спутниковых массивов радиометров (A)ATSR и AVHRR Pathfinder, а также данные *in situ* базы данных ICOADS (суда и буи). Продукт содержит ежедневные результаты анализа значения TПО, свободные от суточной изменчивости, уровня L4 с разрешением регулярной сетки 0,05×0,05°. Для работы со значениями АДТ был выбран продукт GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025. Данный продукт покрывает период с 1993 по 2015 г. и доступен для пользователей в виде среднесуточных значений полей с пространственным разрешением 0,25° широты и долготы.

Информация о распределении промыслового флота тихоокеанской сайры за период сентября 2001 г. получена по промысловым планшетам (Филатов, 2015). В дальнейшем мы предполагаем, что места вылова и распределение промыслового флота соответствуют промысловым скоплениям сайры.

Результаты

Данные промысловых планшетов о распределении флота в акватории сопоставлялись с картами ТПО. На *рис. 1* (см. с. 225) видно, что в районе, примыкающем к Курильской гряде, значения ТПО ниже, чем в других частях акватории. Традиционно фронтальные зоны являются благоприятными для скоплений сайры, а расположение промыслового флота приурочено к изотермам 13–15 °C. После 20 сентября происходит перестройка температурного поля, фронт углубляется, и с тихоокеанской стороны о. Итуруп формируется область холодного вторжения вод с минимальной температурой 9 °C. Промысловый флот сосредотачивается на периферии этой области, сохраняя приуроченность к изотермам 13–14 °C до конца месяца.



Рис. 1. Карта ТПО и распределение сайрового флота (фиолетовый цвет) за различные даты в сентябре 2001 г.

По данным ТПО нами рассчитывались аномалии путём вычитания из данных средней крупномасштабной изменчивости. Осреднение производилось с использованием фильтра скользящего среднего с шириной окна $2 \times 2^{\circ}$. Для указанного района оценка бароклинного радиуса деформации Россби составляет 20 км (Белоненко и др., 2016), поэтому мезомасштабные структуры, которые не видны в ТПО, должны проявиться в аномалиях ТПО (*рис. 2*, см. с. 226).



Рис. 2. Карта аномалий ТПО и распределение сайрового флота (фиолетовый цвет) за различные даты в сентябре 2001 г.

Анализ графиков аномалий ТПО совместно с картированием мест вылова сайры за сентябрь 2001 г. приводит к выводу: скопления тихоокеанской сайры приурочены преимущественно к мезомасштабным структурам с отрицательными аномалиями ТПО в пределах от -2 до -0.5 °C. На *рис. 3* (см. с. 227) показаны распределения АДТ за те же даты, на которых видно, что благоприятными условиями для скоплений сайры являются образования циклонического типа с пониженными значениями температуры воды.



Рис. 3. Карта аномалий АДТ и распределение сайрового флота (фиолетовый цвет) за различные даты в сентябре 2001 г.

Несмотря на то что на картах АДТ не видно чётких циклонических структур с замкнутыми изолиниями, следует отметить, что за исследуемый период в Южно-Курильском районе абсолютно все места вылова сайры относятся к отрицательным значениям АДТ. Значения АДТ в районах промысла колебались от -0,21 до -0,08 м, а во второй половине сентября, начиная с 18.09.2001, места вылова, главным образом, оказались приуроченными к ещё более низким аномалиям. К сожалению, недостаточное пространственное разрешение данных АДТ и влияние береговых эффектов, объективно ухудшающих качество данных АДТ в прибрежной области, не позволило получить распределения с более чёткими мезомасштабными структурами, однако проведённый анализ фиксирует соответствие областей с отрицательными значениями в поле АДТ отрицательным аномалиям ТПО, для которых характерен циклонический тип циркуляции. Использование моделей высокого разрешения могло бы способствовать выявлению более точного соответствия, но на данном этапе ограничимся феноменологическим анализом этих данных.

В начале сентября в поле аномалий ТПО начинает формироваться область с отрицательными значениями, внутри которой располагаются суда промыслового флота (даты 1 и 7 сентября 2001 г. на *рис. 2*). С течением времени при дальнейшем развитии ситуации промысловые суда перемещаются на периферию сформировавшегося циклонического образования (даты 20–30 на *рис. 2*). Очевидно, что в начальный период циклонический вихрь только формировался, т. е., согласно классификации в работе (Chang et al., 2017), находился в стадии А, когда фитопланктон и питательные вещества переносятся по направлению к поверхности, создавая благоприятные условия для скоплений сайры и её промысла. К тому времени, когда циклонический вихрь переходит в стадию Б, апвеллинг в центре вихря, ранее снабжающий верхние слои питательными веществами, уже не является определяющим, так как здесь одновременно сосуществуют апвеллинг и даунвеллинг, и тогда скопления сайры перемещаются на периферию, где апвеллинг более выражен за счёт вторичной циркуляции в вихре.

Обсуждение

Приуроченность сайровых скоплений к отрицательным значениям АДТ и отрицательным аномалиям ТПО, характерным для циклонических вихрей, имеющим положительную относительную завихренность, обусловлена гидродинамическими условиями. Действительно, относительная завихренность, являясь вертикальной составляющей ротора скоростей, характеризует вращательные движения в поле течений. С другой стороны, знак относительной завихренности зависит от знака градиентов скоростей и может характеризовать само течение. Рассмотрим, например, струйное течение в системе координат, в котором одна из составляющих скоростей направлена вдоль основного потока. Положив вторую составляющую равной нулю, получаем по разные стороны от оси струйного течения разные знаки относительной завихренности (Белоненко, Шоленинова, 2016). Следовательно, в поле основного течения могут создаваться градиенты, способствующие возникновению вертикальных скоростей и переносу биогенов в верхние слои океана. Продемонстрируем сказанное на простом примере.

Введём прямоугольную систему координат, в которой ось абсцисс направлена вдоль Курильской гряды на северо-восток, ось ординат — перпендикулярно на северо-запад, а ось аппликат — вверх. Вдоль фронта существует баланс между ускорением вдоль-фронтальной скорости Du/Dt и кросс-фронтальным ускорением Кориолиса *fv*:

$$\frac{Du}{Dt} - fv = 0, (1)$$

где u и v — составляющие скоростей вдоль фронта и поперёк фронта; f — параметр Кориолиса; D/Dt — полная производная, характеризующая скорость перемещения частицы жидкости. Вторичная циркуляция, ассоциируемая с кросс-фронтальным потоком (Williams, Follows, 2003), удовлетворяет уравнению:

$$\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \tag{2}$$

где *w* — вертикальная составляющая скорости. Таким образом, для течения Ойясио, направленного вдоль Курильской гряды на юго-запад, справедливо неравенство Du/Dt < 0, тогда, согласно (1), v < 0, и чтобы выполнялось (2), необходимо:

$$w > 0. \tag{3}$$

Следовательно, в потоке Ойясио, устремлённом на юго-запад, так же как и в циклонических вихрях, кросс-фронтальный поток способствует вертикальным движениям частиц, направленным вверх, что обеспечивает снабжение биогенами верхнего слоя океана.

Разумеется, вышесказанным не исчерпывается весь комплекс причин для создания благоприятных условий скоплений сайры. Однако среди множества различных факторов, влияющих на образование промысловых скоплений сайры, имеет большое значение вихревой апвеллинг, дальнейшее исследование механизмов образования которого, без сомнения, позволит улучшить путинные прогнозы сайры в синоптическом и внутрисезонном масштабах.

Выводы

- 1. По спутниковым данным и информации промысловых планшетов установлено, что благоприятными условиями для скоплений сайры в Южно-Курильском районе в сентябре 2001 г. являлись вихревые образования циклонического типа с пониженными значениями аномалий ТПО.
- 2. Скопления тихоокеанской сайры приурочены преимущественно к мезомасштабным циклоническим структурам с отрицательными аномалиями ТПО в пределах от −2 до −0,5 °С и отрицательными значениями АДТ в пределах от −0,21 до −0,08 м.
- Важнейшим механизмом, способствующим подъёму биогенов в верхние слои океана, является вихревой апвеллинг, однако это относится лишь к вихрям в период их формирования. Для сформировавшихся вихрей вихревой апвеллинг перестаёт быть доминирующим механизмом переноса биогенов.
- 4. Кросс-фронтальный поток струйного течения также способствует вертикальным движениям частиц, направленным вверх, что обеспечивает снабжение биогенами верхнего слоя океана.
- Разработка гидродинамических моделей высокого разрешения и улучшение качества данных дистанционного зондирования могут способствовать надёжному определению областей, благоприятных для промысла, и получению более точных путинных прогнозов сайры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00452 и 17-05-00034).

Литература

- 1. *Белоненко Т. В., Шоленинова П. В.* Об идентификации синоптических вихрей по спутниковым данным на примере акватории северо-западной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 79–90.
- 2. *Белоненко Т.В., Кубряков А.А., Станичный С.В.* Спектральные характеристики волн Россби Северо-западной части Тихого океана // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1–2. С. 43–52.
- 3. *Булатов Н. В., Самко Е. В., Цыпышева И. Л.* Океанологические образования, благоприятные для концентрации пелагических рыб по инфракрасным данным ИСЗ NOAA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. Вып. 5. С. 49–61.
- 4. *Козуб П.К., Белоненко Т.В.* Зависимость формирования промысловых скоплений сайры от океанологических условий в Южно-Курильском районе по спутниковым данным // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 49. С. 82–88.
- 5. Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 298 с.
- Незлин М. В. Солитоны Россби (Экспериментальные исследования и лабораторная модель природных вихрей типа Большого Красного Пятна Юпитера) // Успехи физических наук. 1986. Т. 150. С. 3–60.
- Новиков Ю. В. Условия образования промысловых скоплений сайры // Труды ВНИРО. 1966. Т. 60. С. 143–149.
- 8. *Родин А. В.* Океанологические процессы и промысловые скопления пелагических рыб: дис... д-ра геогр. наук. СПб., 2000. 59 с.

- 9. Рогачев К.А., Гогина Л. В. Вихри течения Ойясио // Природа. 2001. № 12. С. 36-42.
- 10. *Рогачев К.А., Горин И.И.* Перенос массы и долговременная эволюция вихрей Камчатского течения // Океанология. 2004. Т. 4. № 1. С. 19–25.
- 11. *Рогачев К.А., Саломатин А.С., Юсупов В.И., Кармак Э.К.* Внутренняя структура антициклонических вихрей Курильского течения // Океанология. 1996. Т. 36. № 3. С. 347–354.
- 12. *Самко Е. В., Булатов Н. В.* Исследование связи между положением рингов Куросио с теплым ядром и распределением районов промысла сайры по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 18–26.
- 13. *Самко Е. В., Булатов Н. В., Капшитер А. В.* Два типа антициклонических вихрей к востоку от Японии: происхождение, характеристики, влияние на промысел // Известия ТИНРО. 2008. Т. 154. С. 189–203.
- 14. Старицын Д. К., Филатов В. Н., Фукс В. Р. Основы использования спутниковой альтиметрической информации для оценки условий формирования промысловых скоплений сайры // Известия ТИНРО. 2004. Т. 137. С. 398–408.
- 15. *Устинова Е. И.*, *Филатов В. Н.*, *Капшитер А. В.* Мониторинг гидрометеорологических условий Южно-Курильского района в период сайровой путины 2005 г. // Вопросы промысловой океанологии. 2007. Вып. 4. № 1. С. 28–50.
- 16. *Филатов В. Н.* Миграции и формирование скоплений массовых пелагических гидробионтов на примере тихоокеанской сайры. Ростов-на-Дону, 2015. 168 с.
- 17. *Chang Y.-L., Miyazawa Y., Oey L.-Y., Kodaira T., Huan S.* The formation processes of phytoplankton growth and decline in mesoscale eddies in the western North Pacific Ocean // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. Iss. 5. P. 4444–4455. DOI:10.1002/2017JC012722.
- Gaube P., Chelton D. B., Strutton P. G., Behrenfeld M. J. Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and Ekman pumping in nonlinear mesoscale eddies // J. Geophysical Research: Oceans. 2013. V. 118. Iss. 12. P. 6349–6370. DOI:10.1002/2013JC009027.
- Gaube P., McGillicuddy D. J. Jr., Chelton D. B., Behrenfeld M. J., Strutton P. G. Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119. Iss. 12. P. 8195–8220. DOI:10.1002/2014JC010111.
- Huang W. B., Lo N. C.H., Chiu T. S., Chen C. S. Geographical Distribution and Abundance of Pacific Saury, Cololabis saira (Brevoort) (Scomberesocidae). Fishing Stocks in the Northwestern Pacific in Relation to Sea Temperatures // Zoological Studies. 2007. V. 46. Iss. 6. P. 705–716.
- 21. *Kuroda H., Yokouchi K.* Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan // Fisheries Oceanography. 2017. V. 26. Iss. 4. P. 439–454.
- 22. *Mahadevan A.*, *Thomas L. N.*, *Tandon A*. Comment on "eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms" // Science. 2008. V. 320. Iss. 5875. P. 448. DOI:10.1126/science.1152111.
- 23. *Ning X., Peng X., Le F., Hao Q., Sun J., Liu C., Cai Y.* Nutrient limitation of phytoplankton in anticyclonic eddies of the northern South China Sea // Biogeosciences Discussions. 2008. V. 5. P. 4591–4619. DOI:10.5194/bgd-5-4591-2008.
- 24. *Pak G., Park Y.-H., Vivier F., Bourdalle-Badie R., Garric G., Chang K.-I.* Upper-ocean thermal variability controlled by ocean dynamics in the Kuroshio-Oyashio Extension region // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. Iss. 2. P. 1154–1176.
- 25. *Rogachev K.A.* Rapid thermohaline transition in the Pacific western subarctic and Oyashio fresh core eddies // J. Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. Iss. C4. P. 8513–8526.
- 26. *Simons R. D., Nishimoto M. M., Washburn L., Brown K. S., Siegel D.A.* Linking kinematic characteristics and high concentrations of small pelagic fish in a coastal mesoscale eddy // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2015. V. 100. P. 34–47. DOI:10.1016/j.dsr.2015.02.002.
- Williams R. G., Follows M.J. Physical transport of nutrients and the maintenance of biological production // Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change / ed. M.J.R. Fasham. Berlin: Springer, 2003. P. 19–51. URL: https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-55844-3.
- Zhou W., Xie S.-P. Intermodel spread around the Kuroshio-Oyashio extension region in coupled GCMs caused by meridional variation of the westerly jet from atmospheric GCMs // J. Climate. 2017. V. 30. Iss. 12. P. 4589–4599.

Vortex upwelling as a mechanism for creating favorable conditions for saury clusters in the South Kuril region

T.V. Belonenko, P.K. Kozub

Saint Petersburg State University, St. Petersburg 199034, Russia E-mail: btvlisab@yandex.ru

We analyze the satellite data for the sea surface temperature (SST), sea level (ADT-absolute dynamic topography), as well as the fishing maps with the information on fishing fleet distribution for September 2001. We established that vortex formations of cyclonic type with reduced values of SSTanomalies are favorable conditions for saury accumulations in the South Kuril region. We show that Pacific saury clusters are associated with the mesoscale cyclonic structures with negative SSTanomalies in the range from -2 to -0.5 °C and negative values of ADT in the range from -0.21to -0.08 m. Vortex upwelling is described as the main mechanism for creating favorable conditions for the formation of commercial saury clusters. By using maps with fishing fleet distribution in the South Kuril region we show that only vortices in formation stage satisfy vortex upwelling as they are lifting nutrients into the upper ocean layers. Cross-frontal flow of the jet stream like Oyashio may be considered as another similar mechanism.

Keywords: sea surface temperature, absolute dynamic topography, saury, commercial clusters, Oyashio, South Kuril region, Pacific

Accepted: 06.10.2017 DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-221-232

References

- 1. Belonenko T. V., Sholeninova P. V., Ob identifikatsii sinopticheskikh vikhrey po sputnikovym dannym na primere akvatorii severo-zapadnoy chasti Tikhogo okeana (On identification of mesoscale eddies from sa-tellite altimetry based on the area in the NW Pacific), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 79–90.
- Belonenko T. V., Kubrjakov A. A., Stanichny S. V., Spectral Characteristics of Rossby waves in the Northwestern Pacific based on satellite altimetry, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, Issue 9, pp. 920–928, DOI:10.1134/S0001433816090073.
- Bulatov N. V., Samko E. V., Tsypysheva I. L., Okeanologicheskiye obrazovaniya, blagopriyatnyye dlya kontsentratsii pelagicheskikh ryb po infrakrasnym dannym ISZ NOAA (Oceanological formations favorable for the concentration of pelagic fish by infrared data from the NOAA satellite), *Sovremennye problemy distantsi*onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 49–61.
- Kozub P. K., Belonenko T. V., Zavisimost' formirovaniya promyslovykh skoplenii sairy ot okeanologicheskikh uslovii v Yuzhno-Kuril'skom rayone po sputnikovym dannym (Dependence of Pacific saury fishing on oceanographic variables in the South Kuril area by satellite data), *Uchenye zapiski RGGMU*, 2017, No. 49, pp. 82–88.
- 5. Laevastu T., Hela I., Fisheries oceanography, London: Fishing New Books Ltd, 1970, 238 p.
- 6. Nezlin M. V., Rossby solitons (Experimental investigations and laboratory model of natural vortices of the Jovian Great Red Spot type), *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1986, Vol. 29, pp. 807–842.
- 7. Novikov Yu. V., Usloviya obrazovaniya promyslovykh skopleniy sayry (Conditions for the formation of commercial saury clusters), *Trudy VNIRO*, 1966, Vol. 60, pp. 143–149.
- 8. Rodin A. V., *Okeanologicheskiye protsessy i promyslovyye skopleniya pelagicheskikh ryb: Diss. doct. geogr. nauk* (Oceanological processes and commercial accumulations of pelagic fishes. Dr. geogr. sci. thesis), Saint Petersburg, 2000, 59 p.
- Rogachev K. A., Gogina L. V., Vikhri techeniya Oyyasio (Vortices of the Oyashio Current), *Priroda*, 2001, No. 12, pp. 36–42.
- Rogachev K.A., Gorin I.I., Perenos massy i dolgovremennaya evolyutsiya vikhrey Kamchatskogo techeniya (Mass transfer and long-term evolution of vortices of the Kamchatka Current), *Okeanologia*, 2004, Vol. 4, No. 1, pp. 19–25.

- 11. Rogachev K. A., Salomatin A. S., Yusupov V. I., Karmak E. K., Vnutrennyaya struktura antitsiklonicheskikh vikhrey Kuril'skogo techeniya (The internal structure of the anticyclonic eddies of the Kuril Current), *Okeanologia*, 1996, Vol. 36, No. 3, pp. 347–354.
- 12. Samko E. V., Bulatov N. V., Issledovaniye svyazi mezhdu polozheniyem ringov Kurosio s teplym yadrom i raspredeleniyem rayonov promysla sayry po sputnikovym dannym (Investigation of the relationship between the situation of Kuroshio rings with a warm core and the distribution of saury fishing areas according to satellite data), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 18–26.
- 13. Samko E. V., Bulatov N. V., Kapshiter A. V., Dva tipa antitsiklonicheskikh vikhrey k vostoku ot Yaponii: proiskhozhdeniye, kharakteristiki, vliyaniye na promysel (Two types of anticyclonic vortices east of Japan: origin, characteristics, impact on the fishery), *Izvestiya TINRO*, 2008, Vol. 154, pp. 189–203.
- 14. Staritsyn D. K., Filatov V. N., Foux V. R., Osnovy ispol'zovaniya sputnikovoy al'timetricheskoy informatsii dlya otsenki usloviy formirovaniya promyslovykh skopleniy sayry (Fundamentals of the use of satellite altimetric information for estimating conditions for formation of commercial saury clusters), *Izvestiya TINRO*, 2004, Vol. 137, pp. 398–408.
- Ustinova E. I., Filatov V. N., Kapshiter A. V., Monitoring gidrometeorologicheskikh usloviy Yuzhno-Kuril'skogo rayona v period sayrovoy putiny 2005 g. (Monitoring of hydrometeorological conditions of the Yuzhno-Kurilsky region during the cropland 2005), *Voprosy promyslovoy okeanologii*, 2007, Issue 4, No. 1, pp. 28–50.
- 16. Filatov V.N., *Migratsii i formirovaniye skopleniy massovykh pelagicheskikh gidrobiontov na primere tikho-okeanskoy sayry* (Migrations and formation of accumulations of mass pelagic hydrobionts on the example of the Pacific saury), Rostov-on-Don, 2015, 168 p.
- 17. Chang Y.-L., Miyazawa Y., Oey L.-Y., Kodaira T., Huang S., The formation processes of phytoplankton growth and decline in mesoscale eddies in the western North Pacific Ocean, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2017, Vol. 122, Issue 5. pp. 4444–4455, DOI:10.1002/2017JC012722.
- Gaube P., Chelton D. B., Strutton P. G., Behrenfeld M. J., Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and Ekman pumping in nonlinear mesoscale eddies, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2013, Vol. 118, Issue 12, pp. 6349–6370, DOI:10.1002/2013JC009027.
- Gaube P., McGillicuddy D.J.Jr., Chelton D.B., Behrenfeld M.J., Strutton P.G., Regional variations in the influence of mesoscale eddies on near-surface chlorophyll, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2014, Vol. 119, Issue 12, pp. 8195–8220, DOI:10.1002/2014JC010111.
- Huang W. B., Lo N. C. H., Chiu T. S., Chen C. S., Geographical Distribution and Abundance of Pacific Saury, Cololabis saira (Brevoort) (Scomberesocidae), Fishing Stocks in the Northwestern Pacific in Relation to Sea Temperatures, *Zoological Studies*, 2007, Vol. 46, Issue 6, pp. 705–716.
- 21. Kuroda H., Yokouchi K., Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan, *Fisheries Oceanography*, Vol. 26, Issue 4, 2017, pp. 439–454.
- 22. Mahadevan A., Thomas L. N., Tandon A., Comment on "eddy/wind interactions stimulate extraordinary mid-ocean plankton blooms", *Science*, 2008, Vol. 320, Issue 5875, p. 448, DOI:10.1126/science.1152111.
- 23. Ning X., Peng X., Le F., Hao Q., Sun J., Liu C., Cai Y., Nutrient limitation of phytoplankton in anticyclonic eddies of the northern South China Sea, *Biogeosci. Discuss.*, 2008, Vol. 5, pp. 4591–4619, DOI:10.5194/bgd-5-4591-2008.
- 24. Pak G., Park Y.-H., Vivier F., Bourdalle-Badie R., Garric G., Chang K.-I., Upper-ocean thermal variability controlled by ocean dynamics in the Kuroshio-Oyashio Extension region, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2017, Vol. 122, Issue 2, pp. 1154–1176.
- 25. Rogachev K. A., Rapid thermohaline transition in the Pacific western subarctic and Oyashio fresh core eddies, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2000, Vol. 105, Issue C4, pp. 8513–8526.
- 26. Simons R. D., Nishimoto M. M., Washburn L., Brown K. S., Siegel D. A., Linking kinematic characteristics and high concentrations of small pelagic fish in a coastal mesoscale eddy, *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2015, Vol. 100, pp. 34–47, DOI:10.1016/j.dsr.2015.02.002.
- 27. Williams R. G., Follows M. J., Physical transport of nutrients and the maintenance of biological production, In: *Ocean Biogeochemistry: The role of the ocean carbon cycle in global change*, M. J.R. Fasham (ed.), Berlin: Springer, 2003, pp. 19–51, https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-55844-3.
- 28. Zhou W., Xie S.-P., Intermodel Spread around the Kuroshio-Oyashio Extension Region in Coupled GCMs Caused by Meridional Variation of the Westerly Jet from Atmospheric GCMs, *Journal of Climate*, Vol. 30, Issue 12, 2017, pp. 4589–4599.