

УДК 551.465.454 551.465.8

## ВЫЯВЛЕНИЕ И ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ПРОМЫСЛА КАЛЬМАРА БАРТРАМА (*Ommastrephes bartramii*) В РАЙОНЕ ЮЖНЫХ КУРИЛ

© 2017 г. М. В. Будянский<sup>1</sup>, С. В. Пранц<sup>1</sup>, Е. В. Самко<sup>2</sup>, М. Ю. Улейский<sup>1</sup><sup>1</sup>Тихоокеанский океанологический институт Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия  
e-mail: prants@poi.dvo.ru<sup>2</sup>Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр, Владивосток, Россия

Поступила в редакцию 06.08.2015 г., после доработки 03.12.2015 г.

На основе поля скорости AVISO вычислены ежесуточные синоптические лагранжевы карты в регионе Южно-Курильских островов для каждой из путин 1998, 1999, 2001–2005 гг. с имеющимися в нашем распоряжении данными по уловам кальмара Бартрама. С помощью карт переноса вод через географические границы региона показано, что подавляющее большинство мест уловов кальмара Бартрама находится вблизи границ тех или иных крупномасштабных лагранжевых интрузий – “языков” воды, вклинивающихся в воды с отличающимися лагранжевыми характеристиками. Причем, места улова тяготеют к тем областям, где воды с разными лагранжевыми характеристиками не просто сходятся, а перемешиваются с возникновением филаментообразных структур и “завитков”, типичных для хаотической адвекции. Главным образом, уловы зафиксированы вблизи: 1) лагранжевых интрузий субарктического фронта, 2) интрузий вод из Охотского моря и/или течения Ойясио, огибающих мезомасштабные антициклоны вблизи о. Хоккайдо с постепенным проникновением внутрь вихрей и 3) интрузий в центральной части региона, обусловленных проникновением туда модифицированных субтропических или субарктических вод в результате взаимодействия с вихрями разного размера и полярности. Выявлены основные механизмы возникновения и эволюции лагранжевых интрузий, благоприятных для промысла кальмара Бартрама. Обсуждены возможные причины повышенной биологической и промысловой продуктивности вблизи лагранжевых интрузий.

DOI: 10.7868/S0030157417050069

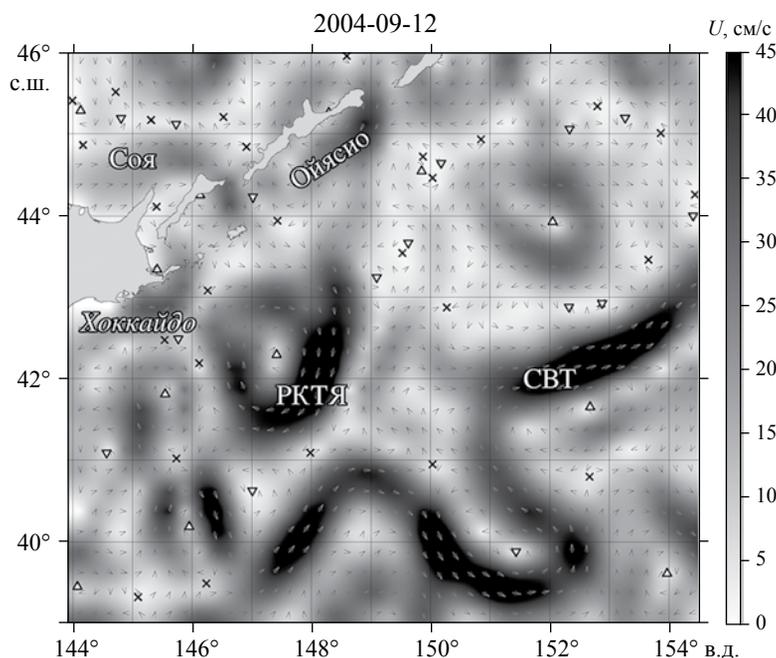
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Кальмар Бартрама (*Ommastrephes bartramii*) является одним из массовых пелагических видов, коммерческий вылов которого в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) ведется разными странами. Российский промысел ведется в районе южных Курил с августа по ноябрь включительно в регионе, представленном на рис. 1. Рыбалка осуществляется, как правило, ночью с использованием мощных прожекторов. По сравнению с другими пелагическими видами, косяки кальмара Бартрама невелики по размеру и плотности, поэтому их обнаружение эхолотами может быть затруднено. Каждый год, начиная с июня по август с интенсификаций Куро-сио, кальмар Бартрама мигрирует на север в поисках корма. В сентябре кормежка происходит во всей обширной фронтальной зоне Куро-сио–Ойясио. С интенсификацией Ойясио в октябре–ноябре косяки мигрируют на юг [13].

Имеется достаточно много публикаций, посвященных изучению распределения кальмара Бартрама по обширному региону СЗТО и зависимости мест улова от температуры поверхности

океана (ТПО), структуры вод и концентрации хлорофилла “а” (хл “а”) [1, 7, 8, 11–13, 20]. Что касается связи мест промысла кальмара Бартрама с океанографическими структурами, то выделим работу [6], где отмечены роль и влияние на промысел кальмара Бартрама мезомасштабных антициклонических вихрей в районе к востоку от о. Хоккайдо в 2004 и 2005 гг.

Кратко резюмируем полученные разными авторами результаты по изучению влияния океанографических факторов на места улова кальмара Бартрама в районе южных Курил. В большинстве работ изучается ТПО, как наиболее доступная характеристика, которая, к тому же, регулярно используется рыбаками при выборе мест лова. Анализ спутниковых данных ТПО и хл “а” в работе [22] привел авторов к выводу, что в период 1995–2001 гг. в районе 140°–150° в.д. около 40% уловов находилось вблизи градиентов ТПО и около 50% – вблизи градиентов концентрации хл “а”. Оптимальные для лова диапазоны ТПО разнятся в зависимости от района и времени. Лов ведется в очень широком диапазоне ТПО, от 10 до 22 °С [13]. Что касается абсолютных значений концентрации хл “а”, то в диапазоне 0.15–3 мг/м<sup>3</sup>



**Рис. 1.** Альтиметрическое поле скорости в регионе, рассчитанное на 12.09.2004 г. с отмеченными эллиптическими (треугольники) и гиперболическими (крестики) точками. Треугольник, ориентированный вершиной вверх (вниз), обозначает центр антициклона (циклона). СВТ – Северо-восточное течение (северо-восточная ветвь Куросио), РКТЯ – ринг Куроисио с теплым ядром.

находилось до 95% уловов [13]. Оптимальным для лова является диапазон  $0.1\text{--}0.3\text{ мг/м}^3$ , причем уловы не растут с увеличением концентрации хл “а”. Соленность не является фактором, влияющим на улов.

Разными исследователями отмечена связь аномалий возвышения уровня моря с местами, благоприятными для лова кальмара Бартрама. Сообщалось [22], что, в основном, в августе–ноябре лов велся в водах со значениями аномалий уровня ниже или около нуля. Максимум количества результативных постановок находился в диапазоне от  $-20$  до  $5$  см по уровню и от  $0.2$  до  $0.4\text{ мг/м}^3$  по концентрации хл “а”. Оптимальными оказались значения от  $-5$  до  $0$  см и от  $0.3$  до  $0.4\text{ мг/м}^3$ . Совместный анализ распределения промысла кальмара Бартрама в Южно-Курильском районе и спутниковых данных показал [7], что максимальные величины как по суммарным уловам, так и по количеству результативных постановок наблюдаются при небольших отрицательных аномалиях до  $-10$  см. Однако, в работе [13] сообщалось, что максимальные уловы наблюдались в районах с положительными аномалиями в диапазоне  $0\text{--}30$  см. Оптимальный вертикальный температурный градиент в верхнем перемешанном слое  $0\text{--}50$  м, по уверениям авторов [12], составляет  $0.15\text{--}0.25\text{ }^\circ\text{C/м}$  в августе–сентябре и  $0.10\text{--}0.15\text{ }^\circ\text{C/м}$  в октябре. Эти авторы считают, что данная характеристика более важна для поиска мест,

благоприятных для лова кальмара Бартрама, чем горизонтальный температурный градиент.

Целью нашей работы является анализ взаимосвязи таких мезомасштабных океанологических структур, как интрузии, вихри, струи, стримеры и фронты, с местами промысла кальмара Бартрама. Этот анализ проводится на основе расчета по альтиметрическим данным синоптических лагранжевых карт различных индикаторов с использованием спутниковых карт ТПО и концентрации хл “а”. Для решения поставленных задач используется методология теории динамических систем, обзор которой применительно к океану опубликован в недавних работах [2, 16].

В настоящей работе мы ставим перед собой следующие задачи.

1. Вычислить на основе поля скорости AVISO ежесуточные синоптические лагранжевы карты в регионе Южно-Курильских островов для каждой из путин 1998, 1999, 2001–2005 гг. с имеющимися в нашем распоряжении данными по уловам кальмара Бартрама.

2. Пометить цветом воды разного происхождения на картах переноса вод через географические границы региона ( $D$ -карты) и картах времени пребывания частиц ( $T$ -карты) в регионе для четкого выявления мезомасштабных океанологических структур и вод с различным происхождением.

3. Наложить на эти карты места и величины уловов кальмара Бартрама и исследовать их

взаимосвязь с идентифицированными океанологическими структурами.

4. Характеризовать эти океанологические структуры по типам и лагранжевым свойствам вод.

5. Выявить основные механизмы возникновения и эволюции океанологических структур, благоприятных для промысла кальмара Бартрама.

## 2. МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Лагранжев подход, как известно, состоит в вычислении траекторий жидких частиц в заданном поле скорости. В последнее время этот метод активно развивается в физической океанологии и физике атмосферы благодаря появлению новых средств изучения океана и атмосферы. Буи и дрейфтеры являются квазилагранжевыми трассерами. Естественными трассерами являются ТПО и концентрация хл “а”, регистрируемые со спутников. Развитие глобальных и региональных численных моделей циркуляции с высоким разрешением и ассимиляцией данных и доступность альтиметрических полей скорости практически для любого района Мирового океана стимулировали дальнейшее развитие лагранжева подхода. В результате стало возможным в полной мере использовать преимущества лагранжева метода мониторинга перемешивания и переноса в океане, вычисляя траектории большого числа пассивных частиц на основе альтиметрических и других полей скорости, и таким образом отслеживать происхождение и “судьбу” разных вод, их перенос и перемешивание.

Все расчеты производились с альтиметрическим полем скорости AVISO с пространственным разрешением  $1/4^\circ$  и суточным шагом по времени (<http://aviso.altimetry.fr>) с последующей бикубической пространственной интерполяцией и интерполяцией по времени полиномами Лагранжа третьей степени. Достаточно крупномасштабные структуры на лагранжевых синоптических картах адекватно воспроизводятся по данным альтиметрии. Уравнения адвекции пассивной примеси имеют простой вид

$$\frac{dx}{dt} = u(x, y, t), \quad \frac{dy}{dt} = v(x, y, t), \quad (1)$$

где  $x, y$  – географические координаты частицы (долгота и широта, соответственно),  $u$  и  $v$  являются зональной и меридиональной компонентами угловой скорости в месте положения частицы. Интегрирование уравнений адвекции (1) вперед во времени позволяет выяснить “судьбу” различных вод и их распределение при движении частиц воды по своим траекториям. Интегрирование назад во времени позволяет выяснить происхождение вод [20].

На рис. 1 в качестве примера показано альтиметрическое поле скорости в регионе на 12 сентября

2004 г. с отмеченными эллиптическими (треугольниками) и гиперболическими (крестики) точками. Это стационарные точки уравнений адвекции, в которых скорость равна нулю. Они рассчитываются посуточно в альтиметрическом поле скорости и, вообще говоря, являются движущимися эйлеровыми объектами. Эллиптические точки расположены, в основном, в центрах вихрей, а гиперболические – между вихрями и на периферии изолированных вихрей. Треугольник, ориентированный вершиной вверх (вниз), обозначает центр антициклона (циклона). Движение воды вокруг эллиптических точек устойчиво. У гиперболической точки имеются направления, по которым частицы воды приближаются к ней, и направления, по которым они удаляются. То есть, такая точка “притягивает” к себе воду в одних направлениях и “отталкивает” – в других.

В работах [4, 5, 17] для количественной характеристики перемешивания и переноса в океане было предложено рассчитывать так называемые лагранжевы карты для ряда индикаторов, в первую очередь для величины

$$D = R \arccos [\sin(y_0) \sin(y_f) + \cos(y_0) \cos(y_f) \cos(x_f - x_0)], \quad (2)$$

являющейся расстоянием между двумя положениями частицы  $(x_0, y_0)$  и  $(x_f, y_f)$  на поверхности Земли радиуса  $R$ , и, так называемого, максимального накопленного показателя Ляпунова, являющегося средней скоростью расхождения изначально близких частиц за некоторый конечный промежуток времени. Эти карты оказались полезными для ряда прикладных задач: например, для поиска мест, благоприятных для улова сайры [5, 18], для моделирования распространения радиоактивного загрязнения после аварии на АЭС “Фукусима” [4, 10, 19] и для поиска в 56-м рейсе НИС “Профессор Гагаринский” мезомасштабных вихрей с риском заражения изотопами цезия [10].

В данной работе для выявления мест, благоприятных для улова кальмара Бартрама, в путины 1998, 1999, 2001–2005 гг., и анализа их корреляции с определенными океанографическими структурами посуточно для каждой из путин рассчитывались пять видов лагранжевых карт в обратном времени. Методика проведения расчетов следующая. По всему региону Южных Курил (см. рис. 1) равномерно распределяется 250000 частиц, для каждой из которых в интерполированном поле AVISO решается назад во времени уравнение адвекции (1). При расчете  $D$ -карты переноса вод на фиксированные сутки по формуле (2) считается смещение, испытанное каждой частицей в течение 30 предшествующих суток. Оттенками серого цвета показано, какое смещение  $D$  в км испытали частицы за это время. На карте

широтного переноса оттенками серого цвета (оттенками красного и синего цветов в онлайн-версии рисунков) показано, на какое количество градусов,  $\Delta\phi$ , сместились частицы за 30 суток в меридиональном направлении с юга на север или с севера на юг. Карта зонального переноса оттенками серого цвета (оттенками красного и синего цветов в онлайн-версии) показывает, на какое количество градусов,  $\Delta\lambda$ , сместились частицы за это время в зональном направлении с запада на восток и с востока на запад.

В дополнение к этим картам рассчитываются  $D$ - и  $T$ -карты переноса вод с учетом границ региона, показанного на рис. 1. На карте пограничного переноса вод оттенками серого цвета (разными цветами в онлайн-версии рисунков) показаны воды, проникшие в регион через все четыре его географические границы в течение определенного промежутка времени. Этот промежуток должен быть больше, чем для расчета величин  $D$ ,  $\Delta\lambda$  и  $\Delta\phi$  без границ, т.к. для достижения центральной части региона частицам, пересекающим границу, требуется значительное время. Оптимальным временем оказалось 150 суток. К сожалению, по полиграфическим причинам мы не можем привести здесь цветные версии рисунков, которые можно найти по адресу: <http://dynamalab.poi.dvo.ru/papers/squid>. Интрузии и лагранжевы фронты (ЛФ) на цветных картах гораздо более контрастны, чем на тоновых. На цветных  $D$ -картах переноса через географические границы региона воды разного типа помечены следующим образом: “красные” воды (светло-серые на печати) в течение 150 суток, предшествующих этой дате, проникли в регион с юга, “желтые” (серые) – с запада, “синие” (темно-серые) – с севера и “зеленые” (черные) – с востока, а серым цветом (белым) показаны воды, которые в течение 150 суток оставались в регионе.

Для характеристики вод по времени пребывания в регионе с заданными границами мы рассчитываем  $T$ -карты в обратном времени. Цветом помечено время  $T$  пребывания частиц в регионе. По значению времени  $T$  воды подразделяются на “свежие” (попавшие в указанную область за время счета) и “застойные” (оставшиеся в области за время счета). Фактически, время  $T$ , вычисленное для частицы с определенными координатами на карте, означает, что ей понадобилось  $T$  суток, чтобы попасть на свое место на карте от границ области. Эти карты предоставляют дополнительную информацию, поскольку позволяют различать “свежие” воды, сравнительно недавно попавшие в регион (помечены серым цветом), и “застойные” воды (помечены фиолетовым цветом).

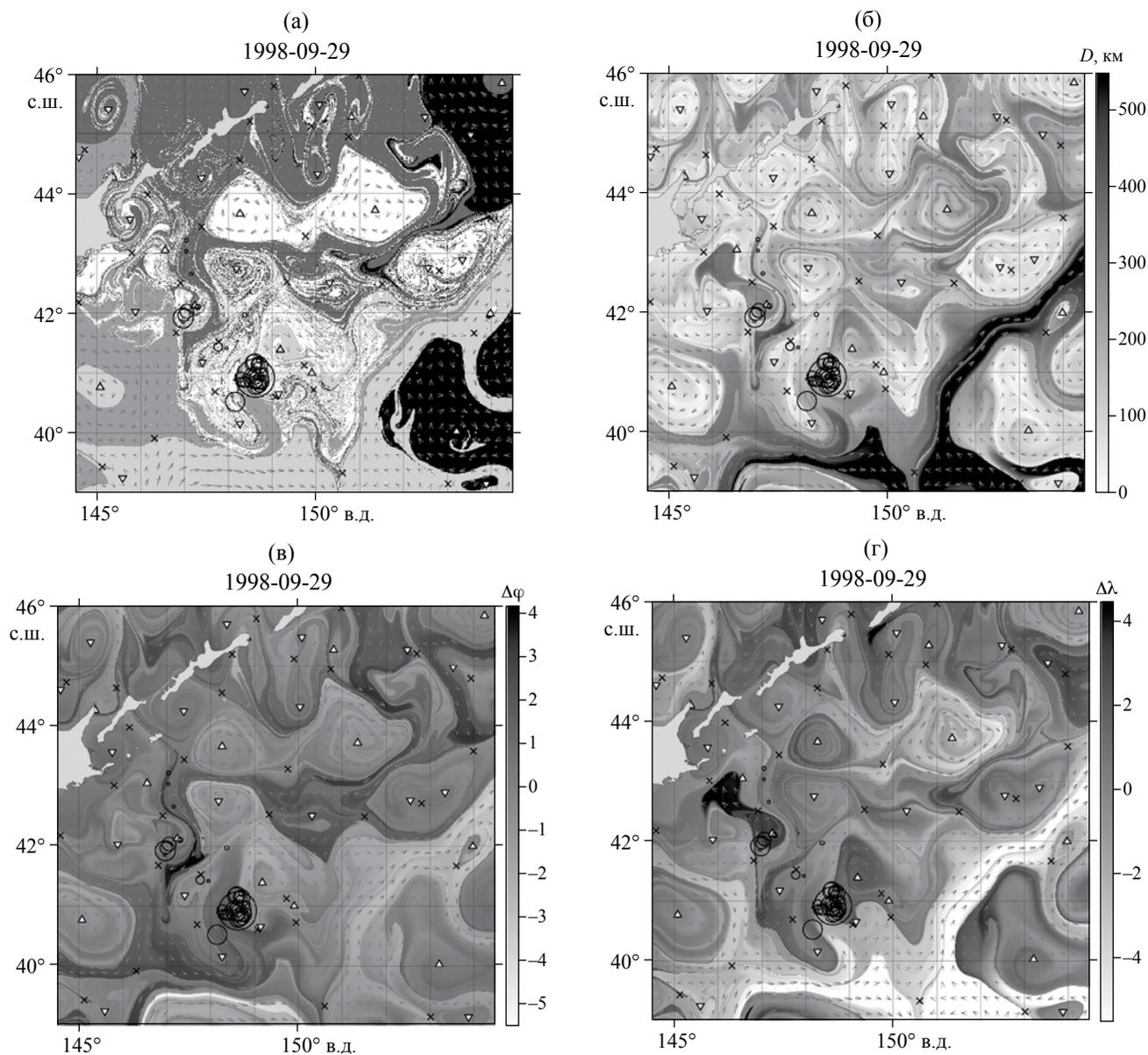
Анализ горизонтального переноса в регионе, идентификация лагранжевых интрузий и вихрей и поиск мест, благоприятных для улова кальмара Бартрама, проводились с помощью всех пяти

видов лагранжевых карт, рассчитанных ежедневно. Ограничения на размер статьи не позволяют опубликовать все карты по каждой путине и их цветные версии (частично они помещены на сайт <http://dynamalab.poi.dvo.ru/papers/squid>). В статье мы приводим только наиболее представительные карты переноса вод через географические границы региона.  $D$ -карта с границами позволяет отобразить определенную информацию с  $D$ -,  $T$ -,  $\Delta\lambda$ - и  $\Delta\phi$ -карт и облегчает визуальное восприятие (одна карта вместо 4). Кроме этого, изображения на лагранжевых картах с границами являются более контрастными. При соответствующем выборе границ можно определить, водами какого течения образованы интрузии. Выбор границ осуществлялся, исходя из данных о расположении крупномасштабных течений Ойясио, Соя и северо-восточной ветви Куроисио. Несмотря на то, что выбор границ субъективен, видимые на картах с границами лагранжевы интрузии, вблизи которых производился лов кальмара, являются реальными образованиями, что подтверждается их наличием на  $D$ -,  $\Delta\lambda$ - и  $\Delta\phi$ -картах, рассчитанных без учета каких-либо границ (см. рис. 2б-2г).

В качестве промысловой информации (дата, координаты и величина улова) в работе используются данные контрольных обловов кальмара Бартрама дрейферными сетями, выполненных в летне-осенний период 1998, 1999, 2001–2005 гг. В связи с тем, что суда, осуществлявшие лов кальмара, применяли сети разной длины, для получения сравнимых результатов в качестве улова на усилие (CPUE) нами используется улов кальмара в кг на 100 м сети. На лагранжевы карты с фиксированной датой накладываются места улова за 8 суток до и 8 суток после указанной на карте даты в виде кружков с радиусом, пропорциональным величине улова.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы располагаем данными об уловах кальмара Бартрама в Южно-Курильском промысловом районе, океанографическая обстановка в котором осенью определяется, главным образом, субарктическими водами Ойясио и Охотского моря, субтропическими водами течения Соя и Цусимского течения, проникающих в регион с запада через Курильские проливы и Сингарский пролив, и менее известным Северо-восточным течением (Северо-восточная ветвь Куроисио) на юге зоны, являющимся участком субарктического фронта (САФ) и текущим в направлении примерно от  $39^\circ$  с.ш.,  $148^\circ$  в.д. к  $43^\circ$  с.ш.,  $155^\circ$  в.д. В японской литературе этот участок САФ известен под названием “Isoguchi jet” [14] и представляет собой квазистационарную топографически



**Рис. 2.** Лагранжевы карты переноса вод на 29.09.1998 г. показывают, что лов кальмара Бартрама в сентябре–октябре происходил вблизи САФ, главным образом, в “головках” лагранжевых интрузий “серой” и “светло-серой” вод, попавших в показанный на карте регион через его западную и южную границы. Здесь и на остальных рисунках места уловов нанесены в виде кружков с радиусом пропорциональным величине улова за 8 суток до и 8 суток после указанной на карте даты. (а) – На карте пограничного переноса вод оттенками серого цвета показано, через какую географическую границу частицы попали в регион в течение 150 суток до указанной даты (см. текст в статье). (б) – На  $D$ -карте переноса без учета границ оттенками серого цвета показано, какое смещение  $D$  в км испытали частицы в течение сентября. (в) – На карте широтного переноса без учета границ показано, на какое количество градусов,  $\Delta\varphi$ , сместились частицы в сентябре в направлении с юга на север и с севера на юг. (г) – На карте зонального переноса без учета границ показано, на какое количество градусов,  $\Delta\lambda$ , сместились частицы в сентябре в направлении с запада на восток и с востока на запад.

обусловленную струю с интенсификацией в осенний период. Регион известен своей вихревой активностью. Наряду с появлением у восточного побережья Хоккайдо больших антициклонических вихрей, в том числе рингов Курошио, как в 2004 г., в результате меандрирования Северо-восточного

течения образуются достаточно большие циклоны и антициклоны в южной части региона. Некоторые из этих антициклонов, перемещаясь на север, формируют долгоживущие буссольские вихри [21]. Помимо этого, в результате взаимодействия интрузий и стримеров с этими структурами

в центральной части Южно-Курильского региона образуются сравнительно короткоживущие одиночные вихри, диполи, триполи и даже квадруполь меньшего размера. Выявление в этой турбулентной среде мест, благоприятных для улова кальмара Бартрама, — очень непростая задача.

Кратко результаты анализа 7 путин можно сформулировать так. Наиболее часто места уловов кальмара Бартрама находятся вблизи границ крупномасштабных лагранжевых интрузий — “языков” воды с одними лагранжевыми характеристиками, вклинивающихся в толщу вод с отличающимися характеристиками. Под крупномасштабными мы подразумеваем интрузии, максимальный линейный размер которых порядка 100 км и больше. При этом, в другом направлении размер может не превышать 10 км. Причем, места улова тяготеют к тем областям, где воды с разными лагранжевыми характеристиками не просто сходятся, а перемешиваются с возникновением филаментобразных структур и “завитков”, типичных для хаотической адвекции в океане [2, 16].

Как правило, интрузии зарождаются на границах фронтальных течений в результате их неустойчивости. В нашем случае это интрузии САФ, в том числе интрузии теплых и соленых субтропических вод Северо-восточного течения, вторгающихся в субарктические воды, и интрузии более холодных и распресненных вод Ойясио с севера и вод Охотского моря с запада. Другим механизмом зарождения и эволюции интрузий является взаимодействие течений с вихрями разного знака и размера. В результате возникают длинные узкие стримеры, которые “наматываются” на вихри, в изобилии присутствующие в регионе о. Хоккайдо.

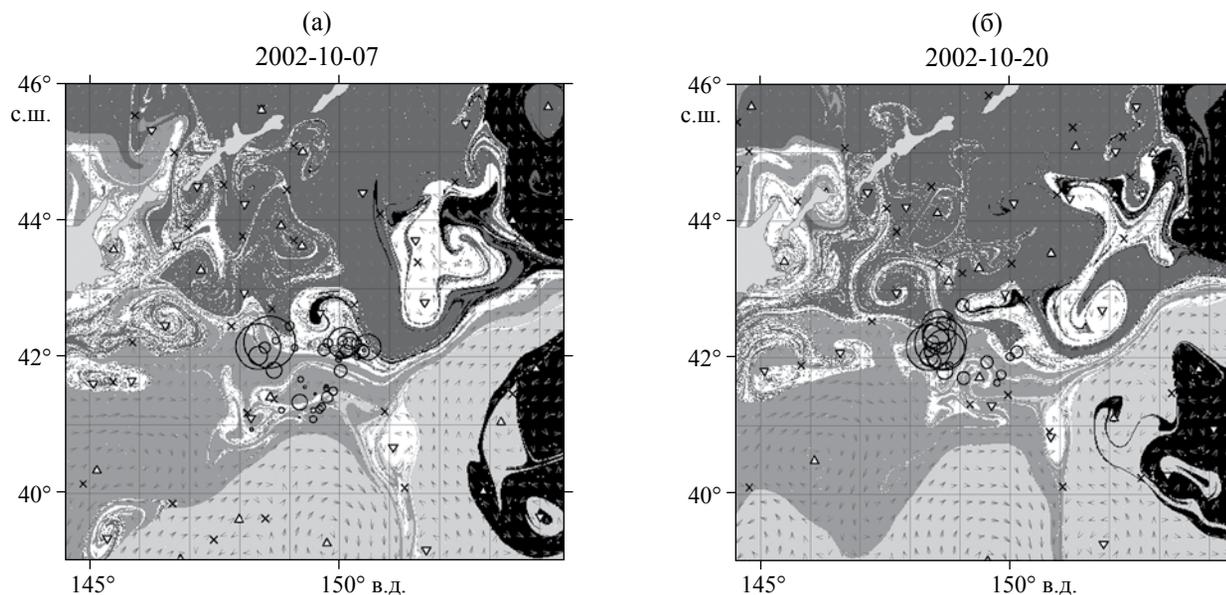
По определению, границы интрузии являются лагранжевыми фронтами [3, 18], т.е. границами раздела вод с различными лагранжевыми свойствами. Каждому элементарному объему воды, помимо физико-химических свойств, можно также приписать более специфические характеристики, являющиеся функциями траектории, которые несут важную информацию, но не являются физико-химическими свойствами [3, 18]. Даже если соседние воды неразличимы по температуре и соответствующие спутниковые снимки ТПО не покажут никакого теплового гидрологического фронта, в данном месте может сформироваться ЛФ синоптического масштаба, разделяющий водные массы, например, различного происхождения и (или) с разной историей. Такие ситуации как раз складываются при крупномасштабных вторжениях вод с одними значениями лагранжевых индикаторов в воды с другими значениями этих индикаторов. В этом разделе иллюстрируются и описываются типичные случаи формирования крупномасштабных интрузий, благоприятных для лова кальмара Бартрама.

### 3.1. Лов кальмара Бартрама на лагранжевых интрузиях субарктического фронта

В 1998 г. рыбалка происходила вблизи САФ с 29 сентября вплоть до 17 ноября. Лов велся, главным образом, на границах лагранжевых интрузий субтропической воды в область субарктических вод. На картах пограничного переноса (рис. 2а) это границы раздела “светло-серой” (вторгшейся в регион через его южную границу), “серой” (пришедшей с запада) и “темно-серой” (пришедшей с севера) вод, а на  $T$ -картах (<http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid>) — границы раздела “застойных” вод со временем “жизни” в регионе более 150 суток и более “свежих” вод, проникших в регион за меньшее время. На цветных электронных  $D$ -картах пограничного переноса это границы раздела “желтой”, “красной” и “синей” воды.

Для доказательства объективности существования этих интрузий независимо от выбора границ региона мы приводим на рис. 2б–2г карты переноса вод, рассчитанные без учета границ. Интрузия на карте с границами (рис. 2а) в виде серого “языка” (желтого на рис. 2а на сайте) в районе  $40^{\circ}$ – $41^{\circ}$  с.ш. и  $148^{\circ}$ – $149^{\circ}$  в.д., возле которой происходил лов кальмара, видна также на  $D$ -карте без границ (темно-серый “язык” в том же месте на рис. 2б), где оттенками серого цвета показано, какое смещение  $D$  в км испытали частицы в течение сентября. Эта же интрузия видна и на карте широтного переноса вод без границ (синий “язык” на рис. 2с на сайте), где оттенками серого цвета в статье (и оттенками красного и синего цветов на сайте) показано, на какое количество градусов,  $\Delta\varphi$ , сместились частицы в сентябре в направлении с юга на север и с севера на юг. Однако, она не видна на карте зонального переноса без учета границ (рис. 2г), поскольку эта интрузия образована водами, сместившимися, главным образом, в меридиональном направлении, а зональная карта показывает, на какое количество градусов,  $\Delta\lambda$ , сместились частицы в направлении с запада на восток и с востока на запад. Другая группа мест улова расположена вдоль лагранжева фронта “серых” (“желтых” на цветной карте рис. 2а) и “белых” вод в районе с координатами  $42^{\circ}$  с.ш.,  $147^{\circ}$  в.д., главным образом, в южной части небольшого вихря, видимого в виде круглого пятна с эллиптической точкой как на  $D$ -карте без границ (рис. 2б), так и на карте  $\Delta\lambda$  без границ (рис. 2г).

К 12 октября 1998 г. интрузия существенно деформируется, ее “голова” смещается на запад и места уловов следуют за ней (рис. 2е на сайте). Кроме этого, места улова аккумулируются в голове интрузии субтропической “красной” воды (рис. 2е на сайте) в районе  $41^{\circ}$ – $42^{\circ}$  с.ш. и  $149^{\circ}$ – $150^{\circ}$  в.д. в область субарктических застойных “серых”



**Рис. 3.** Карты переноса вод через географические границы региона с аккумуляцией мест улова КБ в октябре 2002 г. вблизи САФ на границе раздела “светло-серой” субтропической и “темно-серой” субарктической вод. (а) – На 07.10.2002 г. (б) – На 20.10.2002 г.

вод. Что касается концентрации хл “а” по данным спутников MODIS, то в этот период места лова часто закрыты облаками и ежедневный мониторинг концентрации хл “а” невозможен. В безоблачных ситуациях не обнаружено значимой корреляции концентрации хл “а” с местами лова.

В 2002 г. уловы появились на САФ в конце сентября и закончились там же в конце октября. После конца октября уловов не зафиксировано. На рис. 3а, б показаны карты переноса вод через географические границы региона с аккумуляцией мест улова кальмара Бартрама в октябре 2002 г. на границе раздела “светло-серой” субтропической (“желтой” на рис. 3а, б на сайте) и “темно-серой” субарктической (“синей” на рис. 3а, б на сайте) вод.

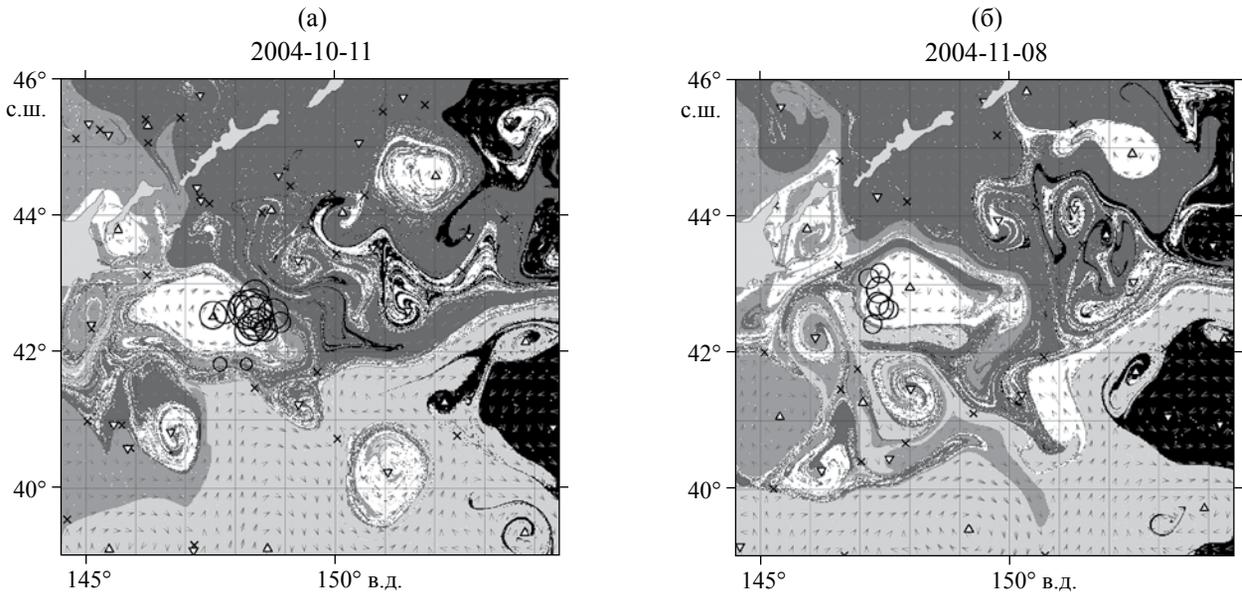
За недостатком места мы не приводим иллюстраций с местами уловов кальмара Бартрама на интрузиях САФ в другие путины. В 1999 г. рыбалка с большими уловами в августе началась на границе лагранжевой интрузии субтропической воды (“желтой” на рисунке [http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D\\_1999.08.24.png](http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D_1999.08.24.png)) в область субарктической воды (“синей” на этом рисунке) и закончилась в октябре на северной границе интрузии САФ с субтропической водой (“красная” вода на рисунке [http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D\\_1999.10.05.png](http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D_1999.10.05.png)), далеко внедрившейся в область субарктических вод. Расчет соответствующих *T*-карт (см. сайт) показывает, что лов в путину 1999 г. велся вблизи лагранжевых интрузий на границах раздела “застойных” и более “свежих” вод. Лов кальмара Бартрама на

лагранжевых интрузиях субарктического фронта велся также в 2001, 2003 и 2004 гг.

### 3.2. Лов кальмара Бартрама на лагранжевых интрузиях, огибающих мезомасштабные антициклоны Хоккайдо с постепенным проникновением внутрь вихрей

Осенью 2004 г. в регионе к востоку от о. Хоккайдо находился антициклонический ринг Куроисио с теплым ядром субтропической воды, который во многом определял океанографическую обстановку в регионе (рис. 1). С севера его огибала интрузия вод из Охотского моря (“серые” воды на рис. 4а, б в статье и “желтые” на рис. 4а, б на сайте) и 2-я ветвь Ойясио (“темно-серые” воды на рис. 4а, б в статье и “синие” на рис. 4а, б на сайте). Как показано в работах [3, 5, 18], сформировавшиеся осенью ЛФ схождения субтропических и субарктических вод вокруг этого ринга создали условия, благоприятные для лова сайры.

С середины сентября ринг Куроисио захватывает “серые” воды из Охотского моря (“желтые” на рис. 4а на сайте), попавшие в регион из Японского моря через проливы между островами, и субарктические “темно-серые” воды Ойясио (“синие” на рис. 4а на сайте). Эти воды в виде filamentобразных интрузий “наматываются” на ринг, начиная с его северной периферии (рис. 4а). Со 2 по 12 октября лов идет с восточной стороны ринга на границах раздела субтропических вод ринга, вод из Охотского моря и субарктических вод



**Рис. 4.** Карты переноса вод через географические границы региона показывают места улова (а) в октябре, (б) в ноябре 2004 г. на узких лагранжевых интрузиях “серых” вод из Охотского моря и “темно-серых” вод течения Ойясио, огибающих ринг Куроисио (пятно с эллиптической точкой в центре ринга с координатами 43° с.ш., 148° в.д.) с постепенным проникновением внутрь ринга.

Ойясио. С 13 по 20 октября отмечается проникновение мест уловов внутрь ринга Куроисио. Далее, лов смещается на западную периферию ринга на границу “намотанных” на него вод из Охотского моря и Ойясио (рис. 4б). С точки зрения времени пребывания воды в заданном регионе (*T*-карты на сайте) периферия вихря – это граница раздела застойных субтропических вод в ядре вихря и свежих субарктических вод вокруг него.

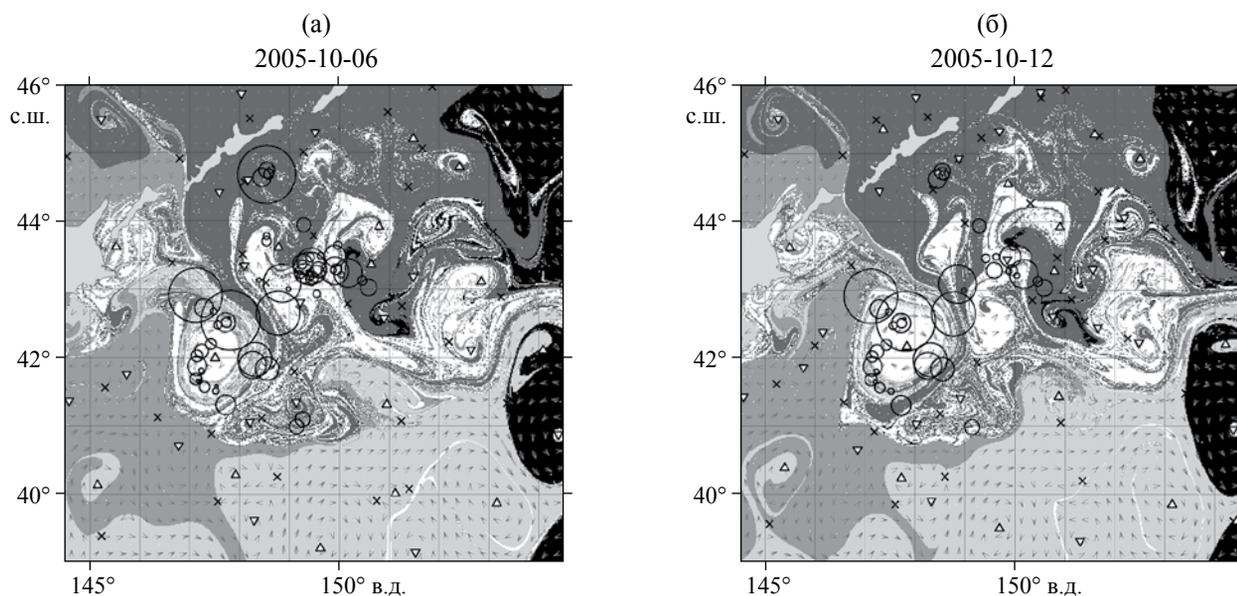
Осенью 2005 г. в регионе к востоку от о. Хоккайдо находился мезомасштабный антициклон. С 30 сентября по 14 октября отмечается интенсификация струи Ойясио (“темно-серые” воды на рис. 5а в статье и “синие” воды на рис. 5а на сайте), огибающей вихрь с востока, и проникновение вод из Охотского моря (“серые” воды на рис. 5а в статье и “желтые” на рис. 5а на сайте). На периферии вихря появляется интрузия продуктивных вод Ойясио с высокой концентрацией хл “а”. На картах хл “а” вихрь выглядит пятном с очень низкой концентрацией хл “а”. С 9 октября по 14 октября 2005 г. отмечается проникновение мест улова внутрь вихря вслед за проникновением туда стримеров вод Ойясио и вод из Охотского моря (рис. 5б). Кроме этого, места улова кальмара Бартрама аккумулируются к северо-востоку от вихря на границах интрузии субарктических “темно-серых” вод Ойясио и “белых” застойных вод (рис. 5б в статье) и соответственно “синих” и “серых” вод (рис. 5б на сайте).

В 1999 г. в регионе также находился мезомасштабный антициклон с эллиптической точкой

в центре 43° с.ш., 148° в.д. (см. рисунки на сайте). С конца августа до конца сентября места улова отмечались на его северо-восточной периферии (застойная вода) с интрузиями вод Ойясио и вод из Охотского моря (свежие воды). 26 сентября – 2 октября рыбалка переместилась на юго-восточную периферию антициклона (застойная вода) на границу с интрузией относительно свежих (проникших в регион за 50 суток) вод.

### 3.3. Проникновение лагранжевых интрузий в центральную часть региона

Мезомасштабные и субмезомасштабные вихри к северу от САФ, взаимодействуя с субтропическими водами САФ и, в частности, с Северо-Восточным течением, зачастую “наматывают” на себя воды САФ и этого течения и увлекают их за собой, перемещаясь далеко на север в центральную часть региона. Таким образом, возникают лагранжевые интрузии модифицированных субтропических вод в зону субарктических вод, на границах которых создаются условия, благоприятные для лова (см. рисунок [http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D\\_2003.10.03.png](http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D_2003.10.03.png)). В начале октября 2003 г. уловы, в основном, аккумулируются в районе 41°–42°30′ с.ш. и 148°–149°30′ в.д. на северной границе интрузии субтропической воды (“желтой” на рисунке [http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D\\_2003.10.10.png](http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D_2003.10.10.png)) в субарктические воды (“синие” на рисунке [http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D\\_2003.10.10.png](http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid/D_2003.10.10.png)). Рассчитанная *T*-карта (см. сайт) показывает, что места улова



**Рис. 5.** Карты переноса вод через географические границы региона показывают места улова в путину 2005 г. на лагранжевых интрузиях “темно-серых” вод Ойясио и “серых” вод из Охотского моря, огибающих антициклонический вихрь (серое пятно с эллиптической точкой в центре с координатами 42° с.ш., 148° в.д.), с постепенным проникновением внутрь вихря. (а) – На 06.10.2005 г. (б) – На 12.10.2005 г.

в центральной части региона в октябре 2003 г. сосредоточены на границах относительно свежих вод САФ и застойных вод центральной части региона.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ мест улова и лагранжевых карт позволил выявить три основных типа лагранжевых структур, благоприятных для лова кальмара Бартрама: границы лагранжевых интрузий САФ, граница антициклонических вихрей Хоккайдо и границы лагранжевых интрузий в центральной части региона. Общей причиной, повышенной биопродуктивности этих структур, является внедрение вод, богатых питательными веществами и кормовым планктоном, в более олиготрофические воды. В случае интрузий САФ – это Северо-Восточное течение, являющееся транспортным коридором для миграции икры и малых пелагических рыб к местам их нагула в Южно-Курильском регионе [14, 15]. “Наматывание” интрузий продуктивных вод Ойясио и вод из Охотского моря на антициклонические вихри Хоккайдо и их конвергенция с более олиготрофическими водами ядер этих вихрей приводит к концентрации кормового планктона и рыбы [3, 5, 9, 18], способствуя развитию там кормовой базы для кальмара Бартрама. Лагранжевые интрузии вод Северо-Восточного течения и Ойясио, глубоко проникающие в центральную часть региона, также являются транспортными коридорами для кормового планктона и рыбы.

Мы провели сравнение наших лагранжевых карт с соответствующими картами ТПО и концентрации хл “а”, полученными со спектрорадиометра MODIS спутников Terra и Aqua (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>). Не обнаружено существенных корреляций мест улова кальмара Бартрама с определенным диапазоном концентрации хл “а”. Что касается температуры, то границы субарктического фронта и границы вторжений вод Ойясио и Соя в периоды интенсификации этих течений хорошо совпадают на картах ТПО и на лагранжевых картах. Однако, лагранжевые карты, помимо этого, показывают гораздо более тонкую структуру с интрузиями, вихрями, филаментами и стримерами, которые не проявляются на картах ТПО. Это происходит прежде всего потому, что лагранжевые карты отражают историю движения вод за определенный период, а карты ТПО и хл “а” – это “мгновенные” эйлеровы снимки поверхности океана, к тому же недоступные в облачные и дождливые сутки. Т.е. воды лагранжевой интрузии и окружающие воды могут не сильно отличаться по температуре на данные сутки, но иметь совершенно разное происхождение, а, значит, и различные физико-химические свойства. Для оперативного прогноза мест, благоприятных для улова кальмара Бартрама, в качестве первого приближения можно руководствоваться картами ТПО (если они доступны), а для более точного определения таких мест – пользоваться лагранжевыми картами в обратном времени,

рассчитанными на данные сутки и переданными на борт судна по электронной почте.

Лагранжевы карты, рассчитанные на основе альтиметрического поля скорости, дают картину горизонтального перемешивания и переноса вод. Имеются серьезные свидетельства того, что при формировании мест, благоприятных для улова кальмара Бартрама, большую роль играет вертикальная структура вод поверхностного слоя, в частности, толщина верхнего квазиоднородного слоя и глубина залегания термоклина [8]. На фронтальных разделах, как правило, возникают большие горизонтальные градиенты температуры и термоклин с высокими вертикальными градиентами. Начиная с октября, в районе Южно-Курильских островов в результате усиления ветра происходит интенсивное перемешивание прогретого поверхностного слоя с холодными водами, залегающими глубже, что ведет к снижению температур поверхности океана и к увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя, в котором сосредотачивается богатая питательными веществами вода. Это приводит к интенсификации фотосинтеза и созданию более благоприятных условий для формирования кормовой базы кальмара Бартрама. Эти процессы, разумеется, никак не отражаются на наших лагранжевых картах. Таким образом, на ЛФ, идентифицируемых на лагранжевых картах, могут возникать “горизонтальные” условия, благоприятные для улова кальмара Бартрама, но для выявления именно тех ЛФ, где возникают “вертикальные” условия для формирования кормовой базы кальмара Бартрама, желательно проведение гидрологической съемки для уточнения границ промыслового района.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов и анализа лагранжевых синоптических карт региона с наложенными координатами и величинами улова кальмара Бартрама получены следующие ответы на поставленные во Введении вопросы.

1. На основе поля скорости AVISO вычислены ежесуточные синоптические лагранжевы карты переноса вод в регионе Южно-Курильских островов для каждой из путин 1998, 1999, 2001–2005 гг. с имеющимися в нашем распоряжении данными по уловам кальмара Бартрама.

2. Выявлены мезомасштабные океанографические структуры, состоящие из вод с различным происхождением (карты переноса) и временем пребывания в регионе (*T*-карты, см. цветные версии этих карт на сайте <http://dynamlab.poi.dvo.ru/papers/squid>).

3. Подавляющее большинство мест уловов кальмара Бартрама находятся вблизи границ

тех или иных крупномасштабных лагранжевых интрузий.

4. По районам промысла места улова аккумулируются вблизи 1) лагранжевых интрузий субарктического фронта, 2) интрузий вод из Охотского моря и/или Ойясио, огибающих мезомасштабные антициклоны Хоккайдо с постепенным проникновением внутрь вихрей и 3) интрузий в центральной части региона, обусловленных проникновением туда модифицированных субтропических или субарктических вод в результате взаимодействия с вихрями разного размера и полярности.

5. Выявлены основные механизмы возникновения и эволюции лагранжевых интрузий, благоприятных для промысла кальмара Бартрама.

6. Обсуждены возможные причины повышенной биологической и промысловой продуктивности вблизи лагранжевых интрузий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-05-00213 а и № 15-35-20105 мол\_а\_вед) и в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН (№ 01201363045).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Ю.В., Слободской Е.В., Шевцов Г.А. Влияние океанологических условий на распределение и биологические особенности массовых видов кальмаров в Южно-Курильском районе // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 2. С. 259–265.
2. Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. Порядок в хаосе океанских течений // *Природа*. 2013. № 3. С. 3–13.
3. Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю. Лагранжевы фронты в океане // *Изв. РАН. Физ. атм. и океана*. 2014. Т. 50. № 3. С. 323–330.
4. Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В. Численное моделирование распространения в океане радиоактивного загрязнения от АЭС “Фукусима-Дайичи” // *Докл. РАН*. 2011. Т. 439. № 6. С. 811–814.
5. Пранц С.В., Улейский М.Ю., Будянский М.В. Лагранжевы когерентные структуры в океане благоприятные для рыбного промысла // *Докл. РАН*. 2012. Т. 447. № 1. С. 93–97.
6. Самко Е.В., Булатов Н.В., Капштер А.В. Характеристики антициклонических вихрей различного происхождения и их влияние на промысел сайры и кальмара Бартрама юго-восточнее о. Хоккайдо // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 1. С. 357–369.
7. Самко Е.В., Булатов Н.В., Никитин А.А. и др. 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.
8. Слободской Е.В. Руководство по промыслу и поиску скоплений кальмара Бартрама в Южно-Курильском районе. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2007. 59 с.
  9. Старицын Д.К., Фукс В.Р., Самко Е.В., Филатов В.Н. Особенности концентрации промысловых организмов в зонах волновой и вихревой конвергенции течений // Вопросы промысловой океанологии. 2007. Вып. 4. № 2. С. 159–177.
  10. Budyansky M.V., Goryachev V.A., Kaplunenko et al. Role of mesoscale eddies in transport of Fukushima-derived cesium isotopes in the ocean // Deep-Sea Res. I. 2015. V. 96. P. 15–27.
  11. Chen X., Tian S., Chen Y., Liu B. A modeling approach to identify optimal habitat and suitable fishing grounds for neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the Northwest Pacific Ocean // Fish. Bull. 2010. V. 108. № 1. P. 1–14.
  12. Chen X., Tian S., Guan W. Variations of oceanic fronts and their influence on the fishing grounds of *Ommastrephes bartramii* in the Northwest Pacific // Acta Oceanol. Sin. 2014. V. 33. № 4. P. 45–54.
  13. Fan W., Wu Y., Cui X. The study on fishing ground of neon flying squid, *Ommastrephes bartrami*, and ocean environment based on remote sensing data in the Northwest Pacific Ocean // Chinese Journal of Oceanology and Limnology. 2009. V. 27. № 2. P. 408–414.
  14. 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. C10003.
  15. Ito S., Wagawa T., Kakehi S. et al. Importance of advection to form a climate and ecological hotspot in the western North Pacific // Proc. 3rd International Symposium on Effects of Climate Change on the World's Oceans, March 23–27, Santos City, Brazil. 2015. P. 91.
  16. Prants S.V. Dynamical systems theory methods for studying mixing and transport in the ocean // Physica Scripta. 2013. V. 87. art. no. 038115.
  17. Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I., Uleysky M.Yu. Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // Ocean modelling. 2011. V. 38. Is. 1–2. P. 114–125.
  18. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu. Identifying Lagrangian fronts with favourable fishery conditions // Deep-Sea Res. I. 2014. V. 90. P. 27–35.
  19. Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M. Yu. Lagrangian study of surface transport in the Kuroshio Extension area based on simulation of propagation of Fukushima-derived radionuclides // Nonlinear Processes in Geophysics. 2014. V. 21. P. 279–289.
  20. Prants S.V. Backward-in-time methods to simulate chaotic transport and mixing in the ocean // Physica Scripta. 2015. V. 90. art. no. 074054.
  21. Prants S.V., V.B. Lobanov, Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Lagrangian analysis of formation, structure, evolution and splitting of anticyclonic Kuril eddies // Deep-Sea Res. I. 2016. V. 109. P. 61–75.
  22. Wen-yu W., Quan-qin S. The spatial relationship between the distribution of *Ommastrephes bartrami* and marine environment in the western north Pacific Ocean // ISPRS Workshop on Service and Application of Spatial Data Infrastructure, XXXVI (4/W6), Oct.14–16, Hangzhou, China, 2001. P. 177–182.

## Identification and Lagrangian Analysis of Oceanographic Structures Favorable for Fishery of Neon Flying Squid (*Ommastrephes bartramii*) in the South Kuril Area

M. V. Budyansky, S. V. Prants, E. V. Samko, M. Yu. Uleysky

Basing on the AVISO velocity field, we compute daily synoptic Lagrangian maps in the South Kuril area in the fishery seasons of 1998, 1999, 2001–2005 with available data on neon flying squid (NFS) catching. With the help of drift maps for artificial particles, we found that the majority of NFS fishing grounds with maximal catches are situated in vicinity of large-scale Lagrangian intrusions, i.e., the tongues of water penetrating into surrounding water with other Lagrangian properties. It is shown that the NFS catch locations tend to accumulate at those places where waters with different values of some Lagrangian indicators not just converge but mix producing filaments, swirls and tendrils typical for chaotic advection. The NFS potential fishing grounds are situated mainly in vicinity of 1) Lagrangian intrusions of the subarctic front, 2) intrusions of Soya and Oyashio waters around mesoscale anticyclones to the east off the Hokkaido Island with subsequent penetration of catch locations inside the eddies and 3) intrusions of subtropical waters into the central part of the South Kuril area due to interaction with eddies of different size and polarity. Possible reasons of increased biological production and fishery in vicinity of Lagrangian intrusions are discussed.