

Взаимодействие антициклонических вихрей, сформировавшихся из первого и второго меандров Куросио

Н.В. Булатов, А.В. Капшитер, И.Л. Цыпышева

Тихоокеанский научно-исследовательский рыболовохозяйственный центр (ТИНРО-Центр),

Владивосток, Россия

E-mail: tsypysheva@tinro.ru

В статье по результатам спутникового мониторинга сравнивалось формирование антициклонических вихрей из первого (от Японии) и второго меандров Куросио, рассматривались процессы их взаимодействия за период с 2007 по 2010 гг. Для определения положения вихрей использовались карты распределения температуры поверхности океана, восстановленной по данным радиометра AVHRR со спутников NOAA. Также использовались карты аномалий скорости течений, построенные по альбитметрическим данным, полученным с сайта AVISO. Определена продолжительность существования вихрей, сформировавшихся из первого и второго меандров Куросио. Исследование взаимодействия антициклонических вихрей Куросио необходимо для прогнозирования океанологической обстановки в промысловых районах северо-западной части Тихого океана.

Ключевые слова: меандры Куросио, антициклонические вихри, взаимодействие, спутниковая температура поверхности океана, альбитметрические данные, аномалии скорости течения.

Введение

Антициклонические вихри – «ринги Куросио с теплым ядром» – формируются из каждого антициклонического меандре течения, но более часто наблюдаются вихри, сформировавшиеся из первого и второго от Японии меандров Куросио. Вихри, сформировавшиеся из первого меандра Куросио, с высокой вероятностью обнаруживаются по данным спутниковых наблюдений. В частности, они выделяются на картах температуры поверхности океана (ТПО), построенных по спутниковым данным инфракрасных каналов, на картах аномалий скорости течений, построенных по альбитметрическим данным. В процессе формирования вихрь несколько раз с периодом около месяца отделяется от течения и вновь захватывается его меандром (Булатов, 1980а; Булатов, 1990). После образования вихри движутся на север–северо-восток вдоль глубоководного желоба (Козлов, Гурулев, 1994), образуя первую (северо-восточную) ветвь Куросио.

Вихри, сформировавшиеся из второго меандра Куросио, слабее выделяются на картах ТПО и аномалий скорости течений. Они движутся в северо-западном направлении и в районе восточнее острова Хоккайдо взаимодействуют с вихрями первой ветви Куросио (Yoshimori, Kishi, 1994; Булатов и др., 1999). Однако проследить сам процесс взаимодействия вихрей удается далеко не всегда из-за высокой повторяемости облачности, хотя этот процесс весьма важен для прогнозирования океанологических условий в районах промысла сайры и кальмара (Sugimoto, Tameishi, 1992; Самко и др., 2007). Используется авторская нумерация антициклонических вихрей первой ветви Куросио с начала спутниковых наблюдений в северо-западной части Тихого океана (СЗТО) в ТИНРО-Центре в 1973 г. (Булатов, 1980б). На приведенных ниже картах гидрологической структуры

СЗТО буквой «А» обозначены антициклонические вихри, пронумерованы цифрами крупные вихри первой ветви Куросио. Строчными буквами обозначены менее устойчивые и меньшие по размерам вихри: «в» – восточный (вихрь второй ветви Куросио); «св» – северо-восточный (вихрь Субарктического течения). В данном случае рассматривается взаимодействие вихря А31, сформировавшегося в начале 2007 г. из первого меандра Куросио и вихрей А32 и А33, сформировавшихся из второго меандра Куросио в 2008 и 2009 гг., соответственно.

Материалы и методика

Основным материалом для исследования служили карты распределения ТПО, восстановленной по двум инфракрасным каналам сканера AVHRR спутников NOAA по алгоритму, разработанному в Центре спутникового мониторинга ИАПУ ДВО РАН. Карты построены в программе Glance 1.82. Вторым видом информации были карты аномалий скорости течений, построенные по альtimетрическим данным, полученным с сайта AVISO (URL: <http://las.aviso.oceanobs.com>). В качестве исходных были использованы аномалии уровня моря, рассчитанные относительно средней высоты морской поверхности по показаниям альтиметров всех доступных спутников. Эти значения интерполировались в узлы регулярной сеточной области с шагом $\frac{1}{4}$ градуса по широте и долготе для середины каждого исследуемого месяца. Далее на основе уравнения для геострофических течений в океане были рассчитаны поля аномалий скорости течений, по которым и были построены карты. Для получения более полных и регулярных наблюдений дополнительно привлекались факсимильные карты ТПО японского агентства JAFIC, принимаемые в ТИНРО-Центре. При совместном анализе перечисленных данных отмечалось их хорошее соответствие в выявлении положений фронтов и рингов.

Образование и взаимодействие вихрей из первого и второго меандров Куросио

В начале 2007 г. в первой ветви Куросио наблюдались два антициклонических вихря, к концу апреля координаты их центров были: А31 – $36^{\circ} 30'$ с. ш. $144^{\circ} 20'$ в. д. (диаметр около 130 миль) и А29 – $40^{\circ} 30'$ с. ш. $146^{\circ} 20'$ в. д. (*рис. 1а*). Вихри хорошо выделялись в поле ТПО и на картах аномалий скорости течений (*рис. 2а, б*).

Фронт Куросио в вершине первого меандра, как всегда после образования вихря, занимал южное ($35^{\circ} 25'$ с. ш.) положение. Воды Куросио продолжали поступать в вихрь А31 в виде стримера шириной около 15 миль. Стремер – струя (интрузия) более теплых или холодных вод шириной 10–30 миль, вторгающаяся в воды вихря (Sugimoto et al., 1992). Начало образования вихря А31 относится к концу 2006 г. В марте вихрь А31 был изолирован от течения Куросио, но в апреле–мае произошла весенняя активизация Куросио, и сформировалась крупная теплая интрузия в первой ветви Куросио, захватившая вихри А31 и А29 (*рис. 1а, б; 2в*). Западнее теплого вторжения выделялся вихрь А30 (*рис. 1б*), сформировавшийся из второго меандра Куросио. Он занимал прибрежное положение

и не выделялся на картах аномалий течений (*рис. 2б, в*). В летний период (июнь–август), как обычно, термические фронты размывались в результате радиационного прогрева поверхностного слоя океана. Вихрь A31 уже в августе 2007 г. был снова изолирован от Куросио (*рис. 1в*), и с этого времени его можно считать окончательно сформировавшимся рингом Куросио с теплым ядром (*рис. 2г*). До конца года центр вихря продвинулся до $38^{\circ} 40'$ с. ш. $143^{\circ} 30'$ в. д. Его движение было неравномерным. В январе–феврале, май–июне и сентябрь–декабре он двигался к северу, в июле–августе он занимал квазистационарное положение, а в марте–апреле даже отступал к югу. Причем в период весенней активизации Куросио скорость вихря достигала 2 миль/сут., что в 4 раза больше средних значений – 0,5 миль/сут. (Kitano, 1975; Лобанов и др., 1991). Аномалии скорости течений в вихре достигали 1,4 см/сек., а его контраст с окружающими водами фронтальной зоны был 5–6°C. Теплая область вихря в основном имела диаметр около 120 миль, что характеризует его как мощный антициклонический вихрь. Между вихрями A31 и A29 в течение всего года наблюдалась крупная циклоническая область (*рис. 2*). В конце года юго-восточнее вихря A31 выделялся формирующийся антициклонический вихрь второй ветви Куросио (Ab).

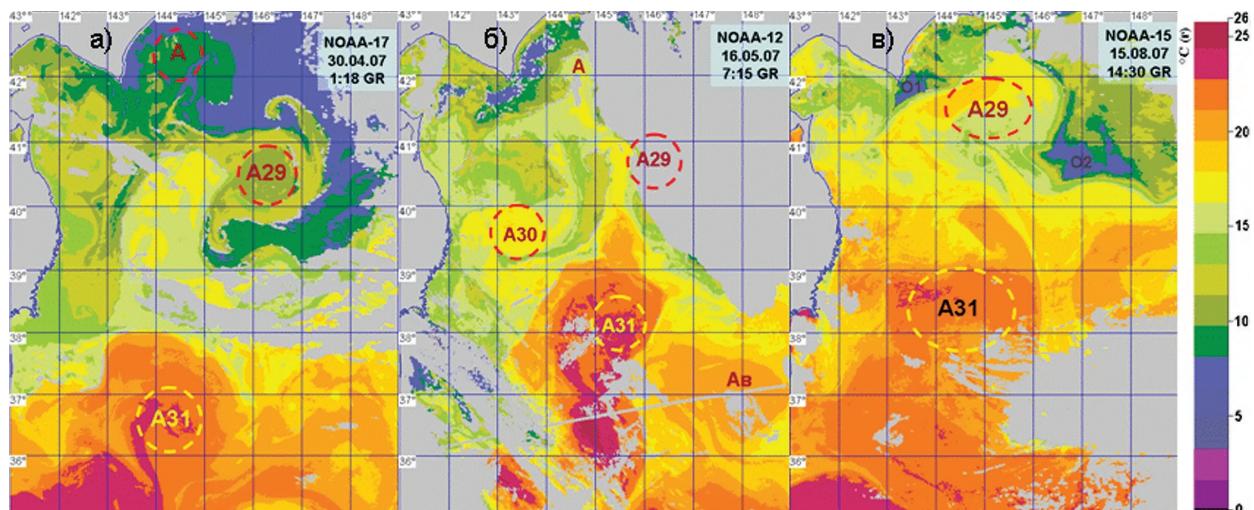


Рис. 1. Образование антициклонического вихря A31 (ринга Куросио с теплым ядром) из первого меандра течения в 2007 г. Распределение температуры поверхности океана, восстановленной по данным сканера AVHRR NOAA: а – 22.02.2007; б – 30.04.2007; в – 16.05.2007. A, A29–A31 – антициклонические вихри; Ab – восточный антициклонический вихрь, O1, O2 – первая и вторая ветви течения Оясио

В 2008 г. вихрь A31 продолжал двигаться к северу–северо-востоку. Его центр переместился от точки $38^{\circ} 45'$ с. ш. $144^{\circ} 30'$ в. д. до точки $41^{\circ} 00'$ с. ш. $146^{\circ} 00'$ в. д. (в декабре). Скорость движения вихря была неравномерной. В январе–марте и июле–декабре вихрь двигался в северо-восточном направлении со средней скоростью 0,6–0,7 миль/сут., а в апреле–июне, в отличие от прошлого (2007 г.), занимал квазистационарное положение. Размер теплой области вихря колебался от 90 до 120 миль, а его термический контраст при контакте с субарктическими водами увеличился до 6–7°C. В начале 2009 г. вихрь A31 не изменил своего положения. Его центр оставался в координатах $41^{\circ} 00'$ с. ш. $146^{\circ} 00'$ в. д. Теплая область вихря имела размер 120 миль.

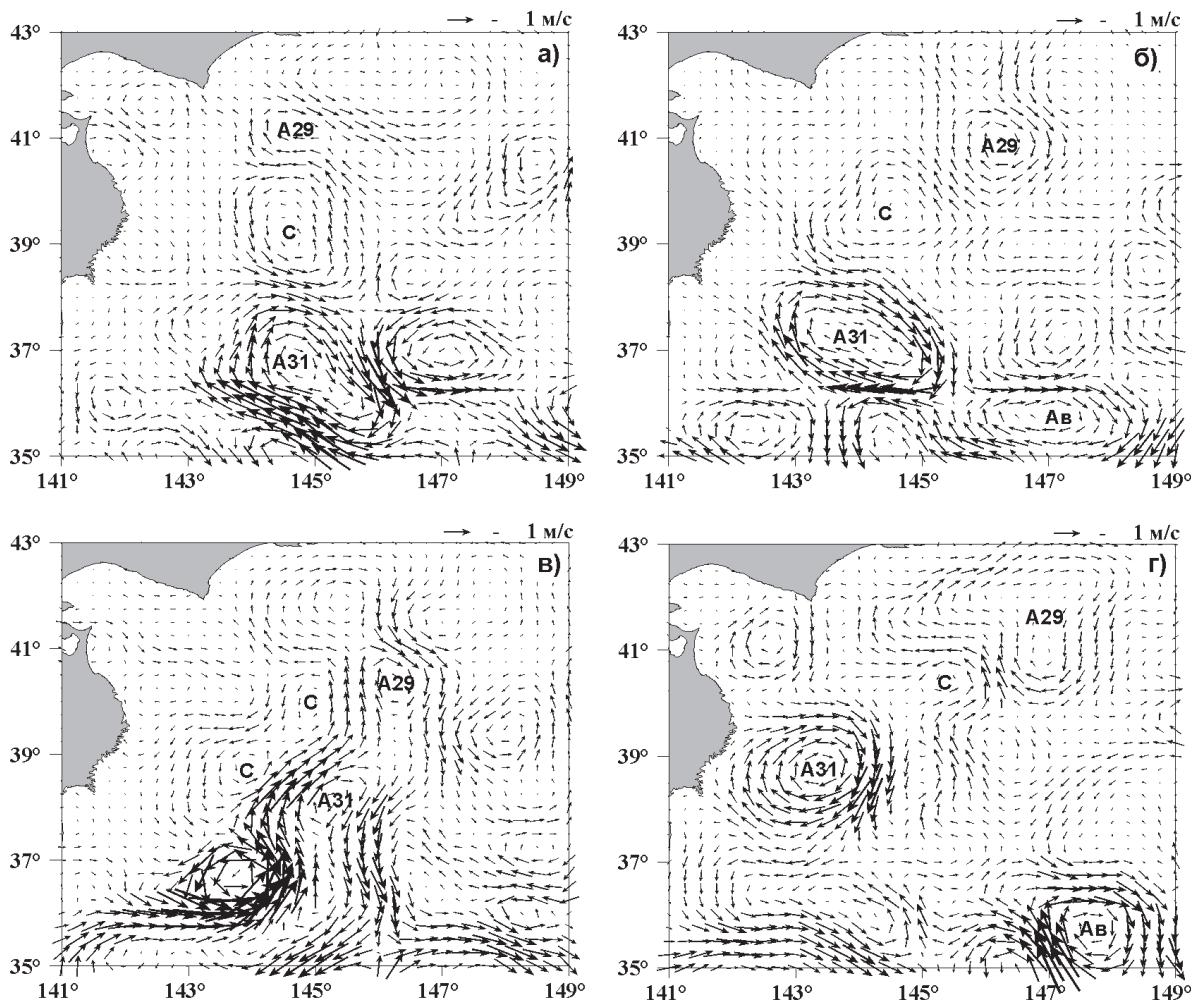


Рис. 2. Образование антициклического вихря A31 из первого меандра Курошио в 2007 г.

Карты аномалий скорости течений, построенные по альтиметрическим данным:

а – январь 2007; б – февраль 2007; в – май 2007; г – ноябрь 2007.

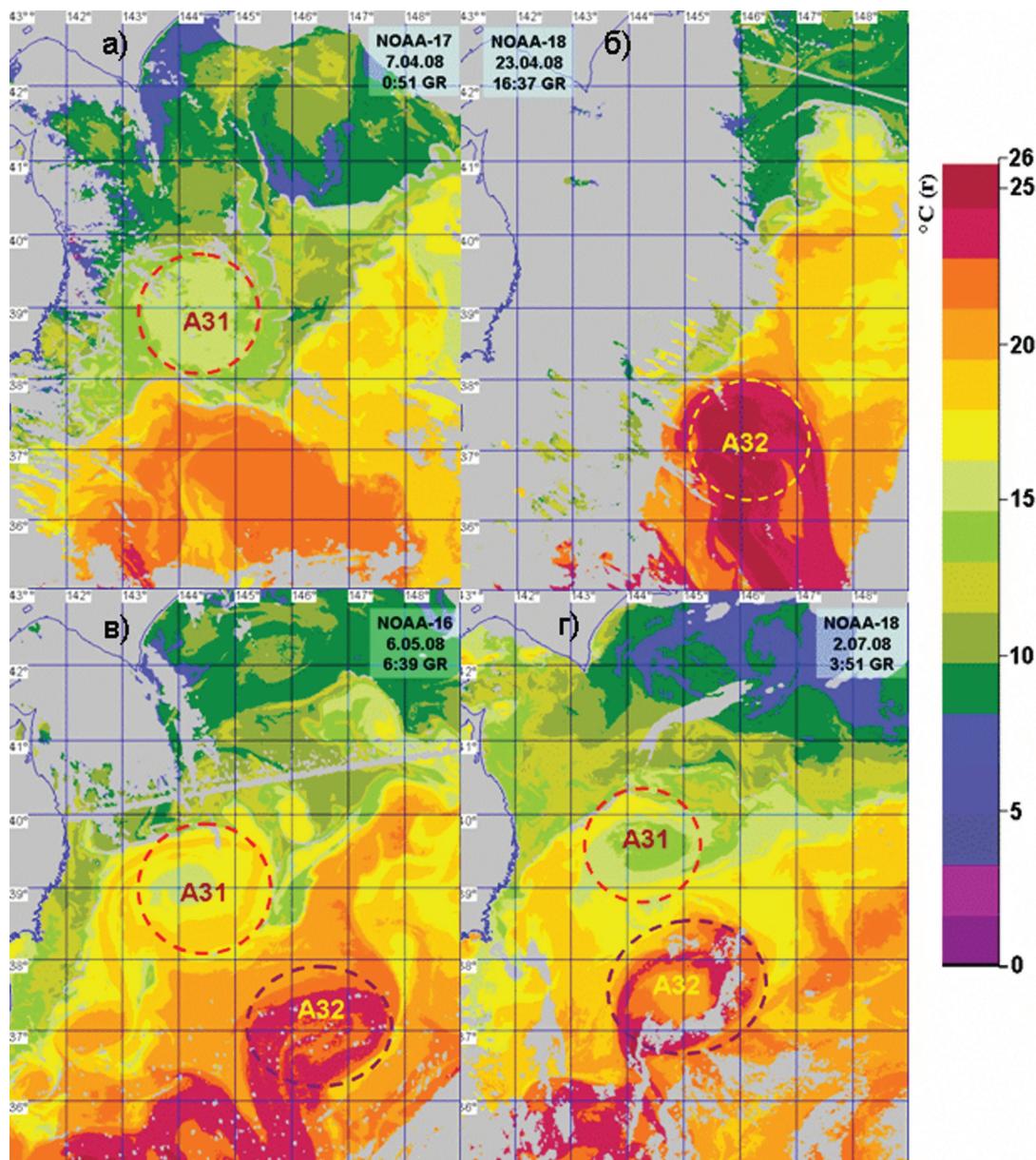
A29, A31 – антициклические вихри; Av – восточный антициклический вихрь,

С – циклонический вихрь

В 2008–2010 гг. второй меандр Курошио был более развит, чем первый, и ориентирован на северо-запад. От него довольно часто отделялись антициклические вихринги Курошио с теплым ядром. Многолетние спутниковые наблюдения показывают, что при образовании вихрей замкнутая циркуляция (вихрь) внутри меандра формируется раньше, чем вихрь отрывается от течения. Естественно эту стадию образования вихря назвать «меандр-вихрь». Уже в 2008 г. в южной части фронтальной зоны формировался из второго меандра Курошио новый вихрь, получивший номер А32 (рис. 3, 4). Кроме того, на юго-востоке района выделялся еще один меандр-вихрь Курошио (рис. 4в), и ожидался выход в первую ветвь Курошио следующего антициклического вихря. Окончательное образование вихря А32 произошло в конце июня – начале августа (рис. 4б). Центр вихря находился в координатах $37^{\circ} 30' \text{ с. ш. } 145^{\circ} 00' \text{ в. д.}$; теплая область вихря имела размер около 100 миль (рис. 3г; 4б).

В сентябре 2008 г. сформировавшийся вихрь (А32) соприкасался с первым меандром Курошио, и в нем образовался стример вод Курошио (рис. 4в). В октябре вихрь был

изолирован от Куросио, но в ноябре он был снова захвачен первым меандром Куросио (рис. 4г). В конце года вихрь снова был изолирован от основного течения. Таким образом, в период формирования (2008 г.) из второго меандрда Куросио вихрь A32, периодически взаимодействовал с первым меандром Куросио и отрывался от него, что характерно для таких вихрей (Булатов, 1980а; Булатов, 1990). По его размерам и устойчивости как на картах ТПО, так и на альтиметрических картах аномалий скорости течений он выглядел так же, как ринг Куросио с теплым ядром, сформировавшийся из первого меандрда. Значения аномалий скорости течений были почти такими же, как в вихре A31—1,20 см/сек.



*Рис. 3. Образование антициклонического вихря A32 из второго меандрда Куросио в 2008 г. Распределение температуры поверхности океана, восстановленной по данным сканера AVHRR NOAA: а – 7.04.2008; б – 23.04.2008; в – 6.05.2008; г – 2.07.2008.
A31, A32 – антициклонические вихри*

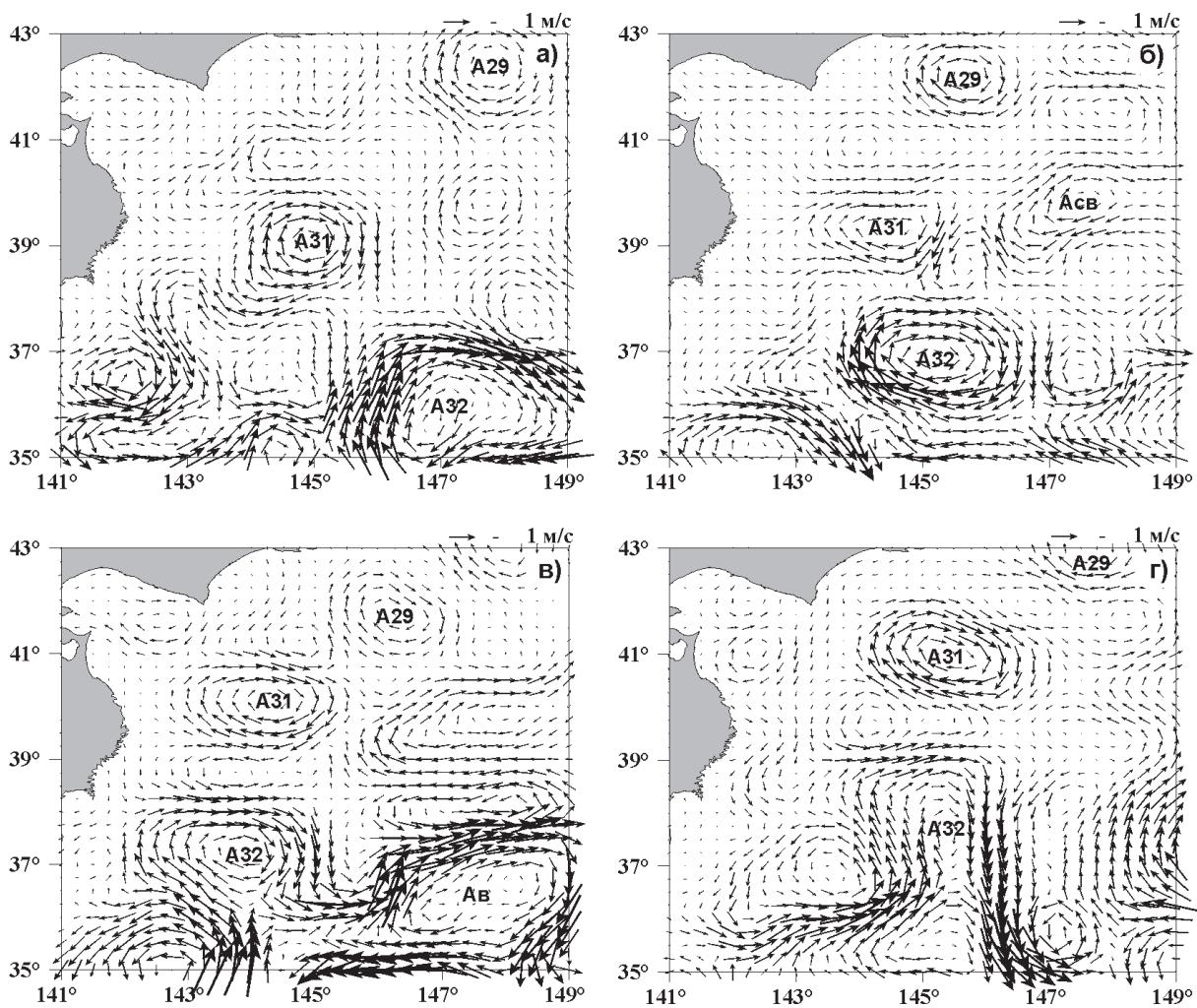


Рис. 4. Образование антициклонического вихря Куросио A32 в 2008 г.

Карты аномалий скорости течений, построенные по альтиметрическим данным:

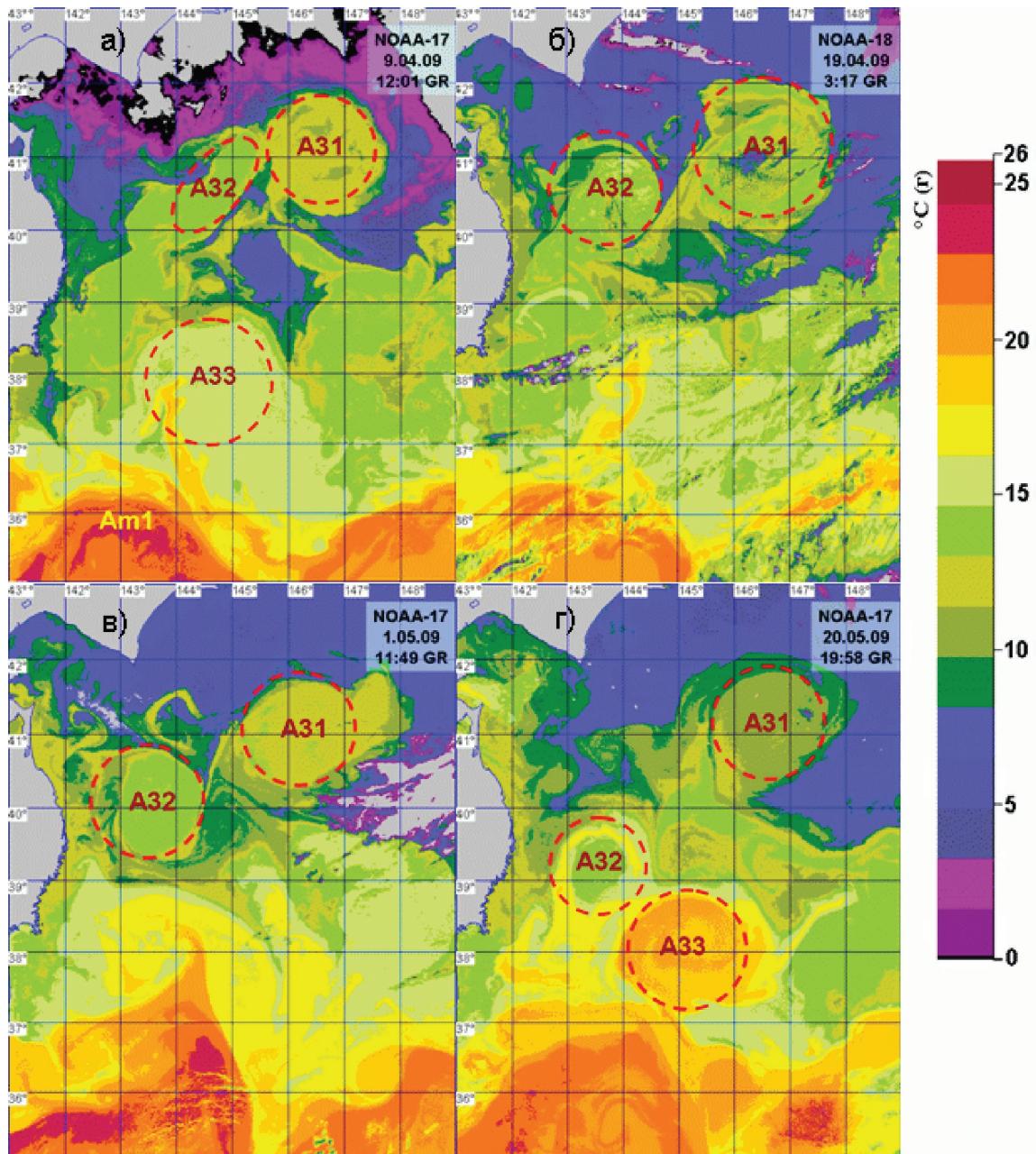
а – январь 2008; б – июнь 2008; в – сентябрь 2008; г – ноябрь 2008.

A29–A32 – антициклонические вихри; Ab – восточный антициклонический вихрь,

Асв – северо-восточный антициклонический вихрь

В начале 2009 г. (январь–май) выделялись три антициклонических вихря: ринг A31, вихрь A32 и вновь сформировавшийся вихрь A33 (рис. 5а, г; 6а, б). Между антициклоническими вихрями наблюдались области циклонических вихрей (Булатов, 1980б; Булатов, Самко, 2002). В апреле 2009 г. вихрь A32 приблизился к «старому» рингу A31 и соединился с ним теплой перемычкой (рис. 5а). Однако карты аномалий скорости течений показывают, что вихри не соприкасались. Во-первых, нужно принять во внимание различие во времени получения данных: карта ТПО за 9 апреля, а карта аномалий течений построена по данным 15 апреля. Это различие во времени может иметь значение, поскольку уже на изображении 19 апреля видно, что воды течения Оясио отрезают вихрь A32 от вихря A31. Во-вторых, если учесть трехмерную структуру антициклонических вихрей, то можно предположить, что толщина теплой перемычки между ними была значительно меньше толщины ядер вихрей. Поэтому она была неустойчивой. Но, анализируя спутниковые карты ТПО за первую декаду апреля, можно было ожидать, что вихри сольются,

но этого не произошло. После отрыва вихря A32 от ринга A31 он начал смещаться на юг под влиянием первой ветви Ойясио (рис. 5, б) и размылся под ее воздействием в августе–сентябре примерно на широте $37^{\circ} 45'$ с. ш.



*Рис. 5. Взаимодействие вихрей A31 и A32 в 2009 г. Распределение температуры поверхности океана, восстановленной по данным сканера AVHRR NOAA: а – 09.04.2009; б – 19.04.2009; в – 1.05.2009; г – 20.05.2009.
A31–A33 – антициклонические вихри; Am1 – первый меандр Куросио*

В конце 2008 – начале 2009 г. из второго меандра Куросио сформировался новый антициклонический вихрь, имевший вначале индекс Ав (восточный) (рис. 4в). Окончательно сформировался вихрь в марте–апреле 2009 г. и получил номер А33 (рис. 5а; 6а). Вихрь двигался в северном направлении примерно вдоль 145° в. д. В апреле его центр находился на широте $37^{\circ} 40'$ с. ш., а в мае – $38^{\circ} 15'$ с. ш. Вихрь периодически

взаимодействовал с Куросио (в мае, июле) и отделялся от него (в июне, августе). Он имел небольшие размеры (около 80 миль), но хорошо выделялся как в поле ТПО, так и на альтиметрических картах аномалий скорости течений (*рис. 5, 6*), которые достигали 1,28 см/сек.

В августе размер вихря A33 увеличился до 100 миль. Восточнее его выделялся второй антициклонический меандр-вихрь (формирующийся вихрь), получивший номер A34. Его размер был около 100 миль (*рис. 6г*). В сентябре трансформированные субтропические воды через вихрь A34 стали поступать в вихрь A33, и он начал двигаться к северу со скоростью 0,5–1,0 миль/сут. В начале 2010 г. положение и размер вихря (90 миль) оставались примерно такими же, как в конце 2009 г. (*рис. 7а*). В марте–мае обычно наблюдается обострение термических фронтов и упорядочение термической структуры верхнего слоя океана, поэтому отчетливо выделялись вихри A31, A33 и A34 (*рис. 7а–в; 8*). При этом вихрь A34 продолжал взаимодействовать с Куросио (*рис. 7в, 8а, б*).

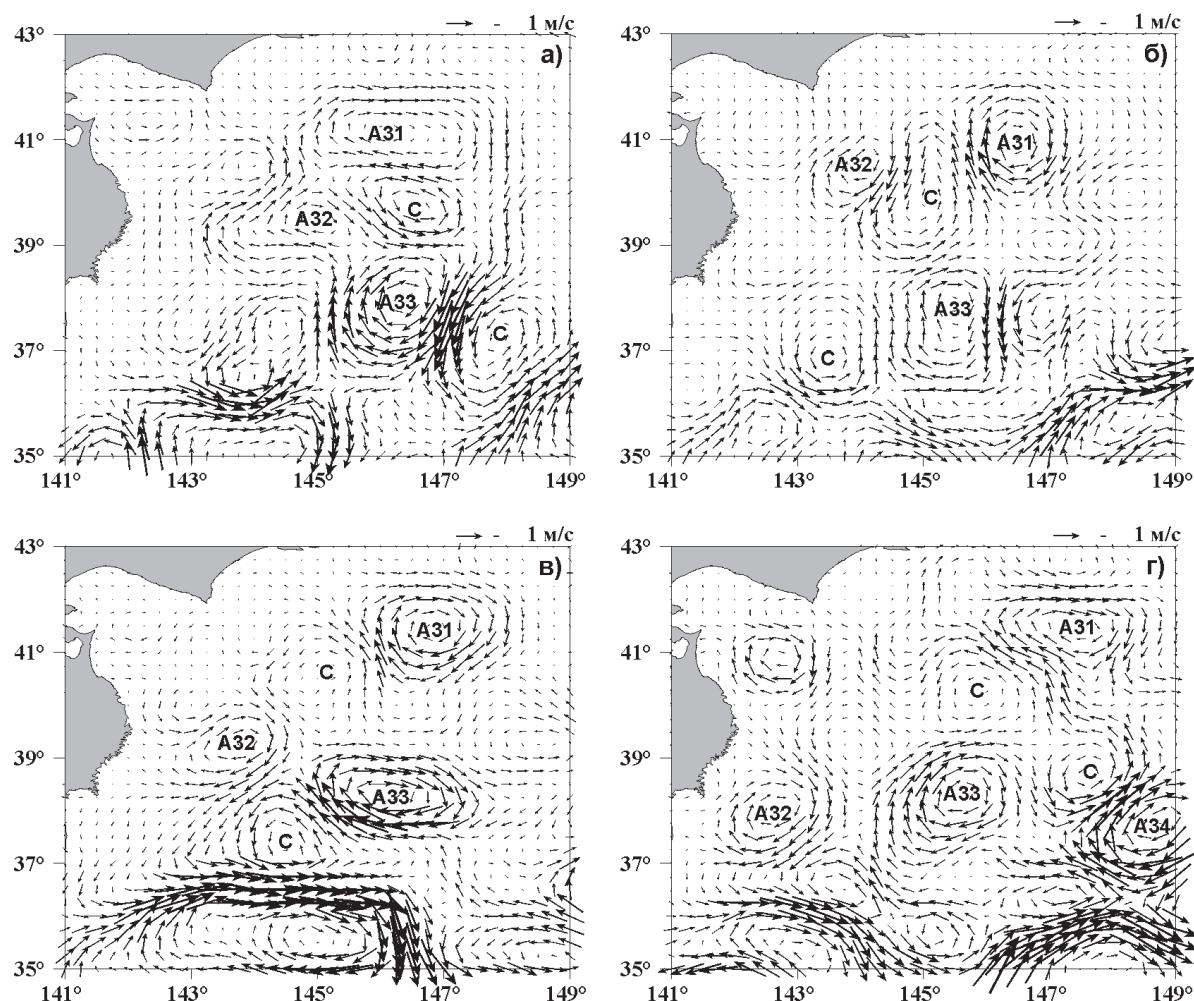


Рис. 6. Взаимодействие вихрей A31 и A32 в 2009 г.

*Карты аномалий скорости течений,
построенные по альтиметрическим данным:
а – март 2009; б – апрель 2009; в – июнь 2009;
г – август 2009 г. A31–A34 – антициклонические вихри;
С – циклонический вихрь*

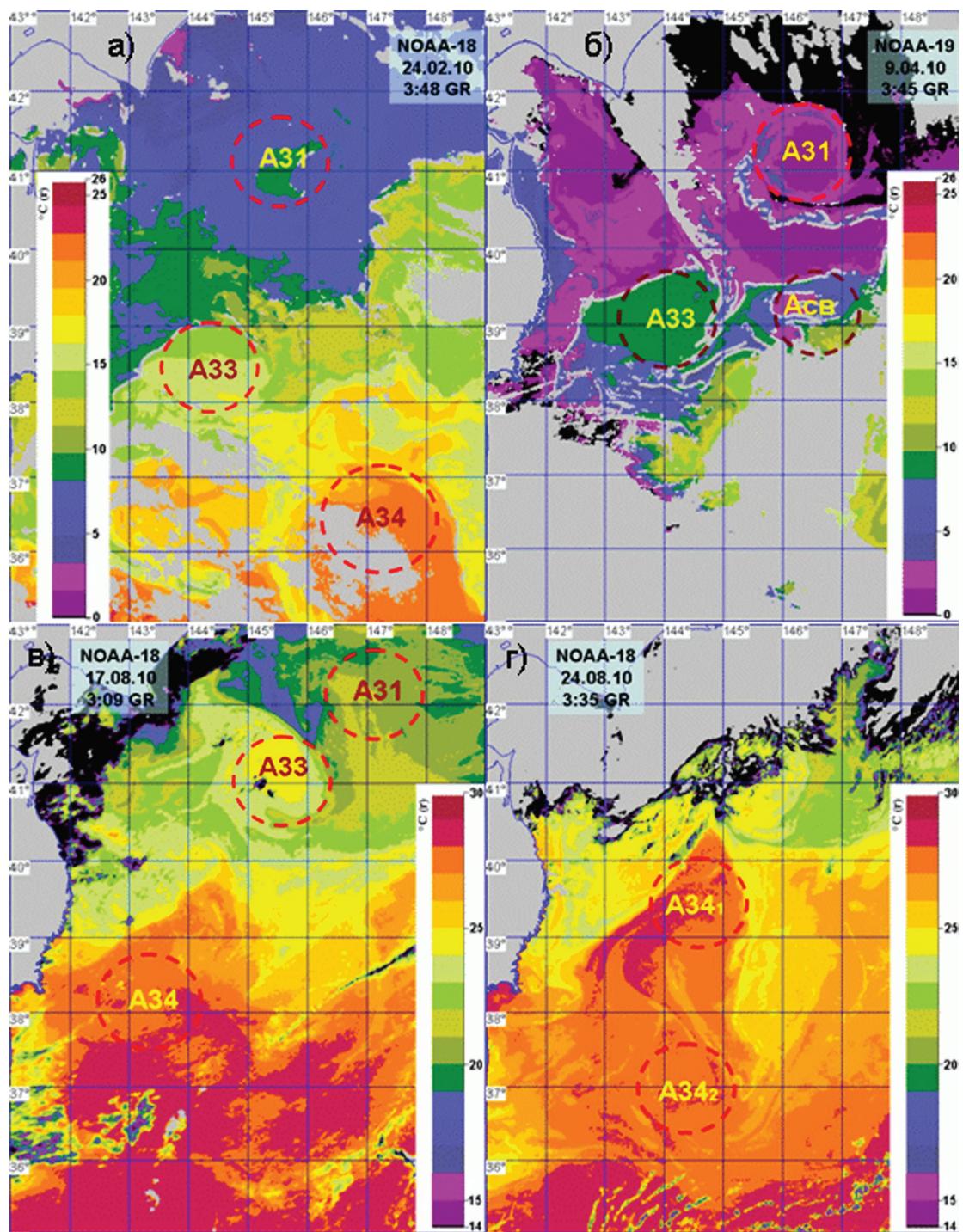


Рис. 7. Взаимодействие вихрей A31 и A33 в 2010 г.

Распределение температуры поверхности океана, восстановленной по данным сканера AVHRR NOAA: а – 24.02.2010; б – 9.04.2010; в – 17.08.2010. г – 24.08.2010 г. A31–A34 – антициклонические вихри; Асв – северо-восточный антициклонический вихрь

Вихрь A33 в августе продвинулсь к северу до $41^{\circ} 00' - 41^{\circ} 20'$ с. ш. (рис. 8в), и во второй половине года продолжалось его сближение с вихрем A31. В декабре вихри сблизились настолько, что образовалась одна антициклоническая область с двумя центрами (рис. 8г). В последующие месяцы наблюдалось ослабление аномалий скорости течений в северном вихре (A31) и усиление в южном (A33).

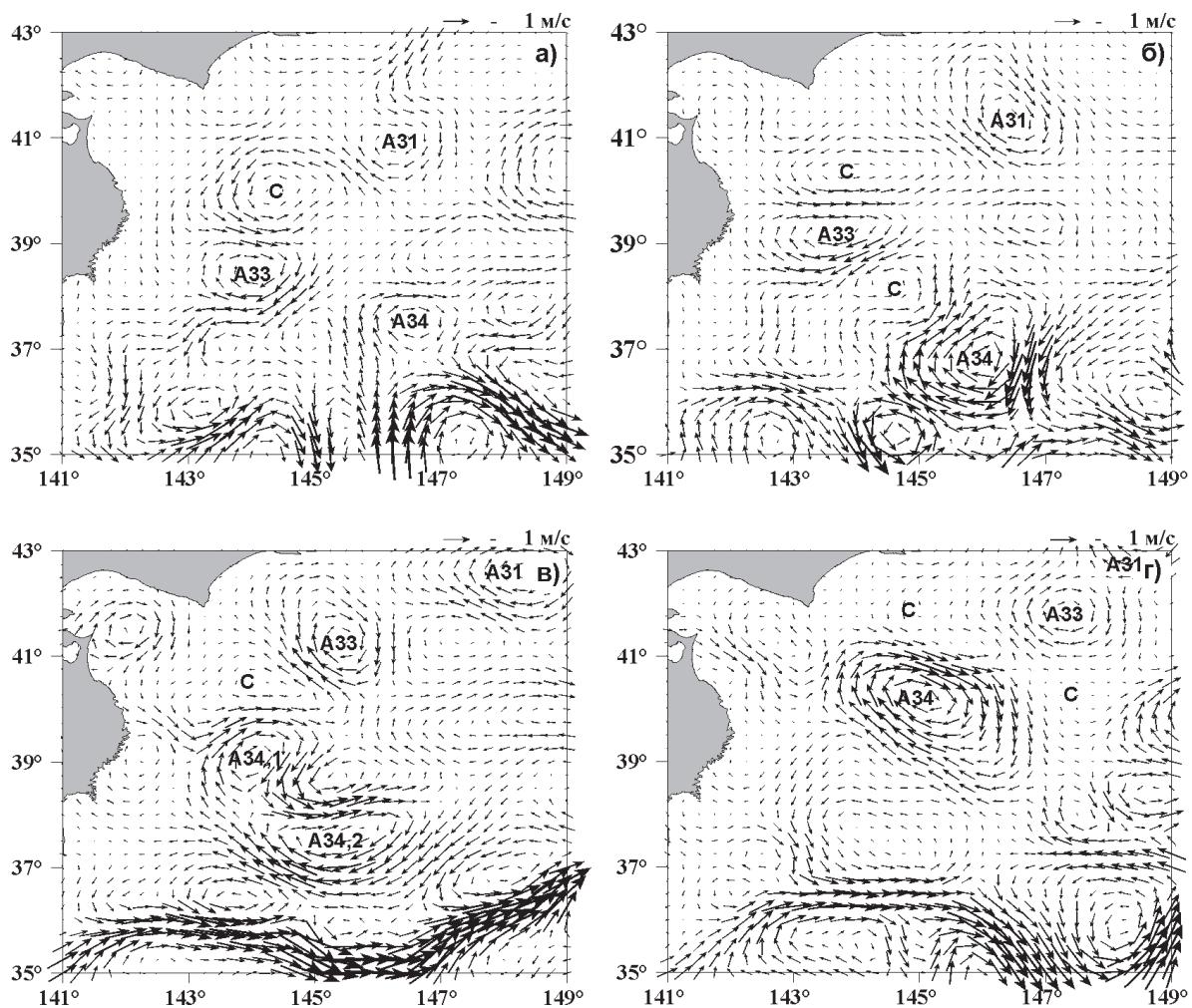


Рис. 8. Взаимодействие вихрей A31 и A33 в 2010 г.

Карты аномалий скорости течений: а – февраль 2010; б – апрель 2010; в – август 2010; г – октябрь 2010 г. A31–A34 – антициклонические вихри; С – циклонический вихрь

Заключение

Сравнивая развитие антициклонических вихрей (лингов Куросио с теплым ядром), образовавшихся из первого и второго меандра течения, можно заметить следующие их различия, важные для прогнозирования океанологической обстановки в промысловых районах северо-западной части Тихого океана. Ринги Куросио, сформировавшиеся из первого меандра течения, более устойчивы, существуют в течение четырех лет и движутся в северо-восточном направлении со средней скоростью 0,5 миль/сут. без значительных отклонений от этого направления. Следовательно, прогнозировать их состояние относительно просто.

Вихри, сформировавшиеся из второго меандря Куросио, менее устойчивы. Непосредственно после образования они мало отличаются от вихрей первого типа на спутниковых картах ТПО и картах аномалий скорости течений, но их вертикальная мощность, вероятно, меньше, чем у вихрей, сформировавшихся из первого меандра Куросио. Двигаясь

в период образования в северо-западном направлении, вихри в той или иной мере взаимодействуют с первым меандром Куросио, приобретая черты вихрей первого типа (A34). Поскольку вихри, сформировавшиеся из второго меандря Куросио, движутся быстрее, чем вихри, сформировавшиеся из первого меандря, они постепенно сближаются и в районе к востоку от острова Хоккайдо начинают взаимодействовать. При этом наблюдались три варианта. В первом случае вихрь, приблизившись к «старому» вихрю, соединяется с ним теплой перемычкой, отдает ему часть теплых вод и энергии, а затем отступает к югу и разрушается под действием окружающих вод (A31 и A32). Во втором случае новый вихрь (A33) приближается к более «старому» вихрю (A31), существующему уже около четырех лет, и сливается с ним, продолжая двигаться в северном направлении. По всей вероятности, именно в подобных случаях формируются вихри с «двуярусными» теплыми ядрами (нижнее ядро – остаток «старого» вихря, а верхнее – вновь подошедший вихрь). Наконец, в третьем случае новый вихрь (A34) выходит в район после разрушения существовавших там вихрей (A31 и A33) и продолжает существовать самостоятельно. Наблюдавшаяся продолжительность существования вихрей, сформировавшихся из второго меандря Куросио, – полтора–два года. При сближении таких вихрей трудно предположить, по какому из рассмотренных вариантов будет развиваться процесс их взаимодействия.

Литература

1. Булатов Н.В. Некоторые черты синоптической и межсезонной изменчивости в системе вод Куросио по данным метеорологических спутников Земли // Труды ДВНИГМИ. 1980а. Вып. 80. С. 34–35.
2. Булатов Н.В. Вихревая структура Субарктического фронта в северо-западной части Тихого океана // Ученые записки ЛГУ. 1980б. № 403. С. 61–71.
3. Булатов Н.В. Спутниковые наблюдения взаимодействия вихрей с течениями // Дистанционные исследования океана. Владивосток: ТИНРО-ВНИРО, 1990. С. 32–44.
4. Булатов Н.В., Дарницкий В.Б., Савин А.Б. Океанологические факторы среды, способствующие переносу молоди лемонемы (*Laemonema Longipes*, Moridae) от нерестилищ к районам нагула // Исследование Земли из космоса. 1999. № 1. С. 97–104.
5. Булатов Н.В., Самко Е.В. Основные черты структуры фронтальных зон северо-западной части Тихого океана // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 130. С. 12–23.
6. Козлов В.Ф., Гурулев А.Ю. О перемещении вихрей вдоль глубоководного желоба // Метеорология и гидрология. 1994. № 6. С. 70–78.
7. Лобанов В.Б., Рогачев К.А., Булатов Н.В. и др. Долгопериодная эволюция теплого вихря Куросио // Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 4. С. 984–988.
8. Самко Е.В., Булатов Н.В., Капиштер 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. № 4. С. 357–369.

9. Itoh S., Yasuda I. Characteristics of mesoscale eddies in the Kuroshio–Oyashio extension region detected from the distribution of the sea surface height anomaly // J. Phys. Oceanogr. 2010. Vol. 40. P. 1018–1034.
10. Kitano K. Some properties of the warm eddies, generated in the confluence zone of the Kuroshio and Oyashio current // Journal of Physical Oceanography. Vol. 5. 1975. P. 245–252.
11. Sugimoto T., Tameishi H. Warm-core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan // Deep-Sea Research. 1992. Vol. 39. № 1. P. 183–201.
12. Sugimoto T., Kawasaki Y., Li J. A description of the time-dependent hydrographic structure of the warm streamer around the Kuroshio warm-core ring 86B // Deep-Sea Research. 1992. Vol. 39. P. 77–96.
13. Yoshimori A., Kishi M.J. Effects of interaction between two Warm-Core Rings on phytoplankton distribution // Deep-Sea Research. 1994. Vol. 41. P. 1039–1052.

Interaction between anticyclonic eddies formed from the first and second Kuroshio meanders

N.V. Bulatov, A.V. Kapshiter, I.L. Tsypysheva

Pacific Scientific Research Fisheries Centre (TINRO-centre), Vladivostok, Russia
E-mail: tsypysheva@tinro.ru

In this paper, the formations of anticyclonic eddies from the first (from Japan) and the second meanders of the Kuroshio Current were compared by the results of satellite monitoring, as well as the processes of their interaction were analyzed from 2007 to 2010. To determine the position of eddies; maps of the sea surface temperature distribution were used. Values of the surface temperature were reconstructed using the AVHRR radiometer data from the NOAA satellites. Also the maps of current velocity anomalies constructed by the altimetry data from the AVISO website were used. Lifetime of eddies formed from the first and the second meanders of the Kuroshio Current was determined. Research of the anticyclonic eddies interaction in the Kuroshio Current region is necessary for predicting the oceanological situation in order to provide the fishery in the Northwest Pacific.

Keywords: the Kuroshio meanders, anticyclonic eddy, interaction, satellite-derived sea surface temperature, altimeter data, current velocity anomaly.