

Вихри синоптического масштаба в Японском море по спутниковым данным

А.А. Никитин¹, Г.И. Юрасов²

¹ Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр (ТИНРО-Центр)
E-mail: nikitin@tinro.ru

² Тихоокеанский океанологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН)
E-mail: yug@poi.dvo.ru

Проведенный анализ спутниковых изображений, судовых данных и литературных источников позволяет заключить, что в Японском море наблюдаются устойчивые антициклонические вихри синоптического масштаба, что позволило составить схему их положения, которая отличается от стандартной схемы, наличием циклонических и антициклонических вихрей и которые сосредоточены вдоль струй основных течений. Выделено шесть стационарных районов, где отмечено семь наиболее часто наблюдающихся антициклонических вихрей. Циклонических вихрей меньше, чем антициклонических и они расположены между областями с антициклоническими вихрями.

Введение

Исследования [1-4], выполненные с использованием судовой и спутниковой информации, показали, что Японское море насыщено вихревыми структурами [5], которые связаны с Цусимским течением [6], Восточно-Корейским [7-12] и областью банки Ямато [13]. Было показано, что синоптические вихри в водах Японского моря являются существенным компонентом его динамики [5], их возникновение обусловлено неустойчивостью струйных течений. На спутниковых ИК-изображениях море полностью заполнено вихревыми структурами [1, 2], которые вызваны горизонтальной турбулентностью с двумя спектральными пиками, один из которых соответствует диаметру вихря 100 км, а другой – 15 км [14]. Горизонтальные размеры этих вихрей в южной части района исследований, по разным источникам, оцениваются в 30-190 км, а период обращения – примерно в полмесяца [5, 15].

Существование мезомасштабных вихрей к северу от 40°с.ш. отмечалось и в северной части моря как по спутниковым ИК-изображениям [1, 2, 15, 3, 4, 16, 17], так и по данным альтиметрии в поле возвышения уровня [18, 19].

Интенсивная вихревая динамика вод к северу от фронта было показана по данным дрейфа буев [20, 21, 22] и по данным прямых измерений течений с помощью долговременных заякоренных систем [23]. Были получены типичные размеры антициклонических вихрей, орбитальные скорости и периоды обращений синоптических вихрей в южной части моря, которые составляли 90-140 км, 26-34 см/с и 12-15 дней, соответственно, а скорость поступательного движения оценивалась в 2 см/с.

В условиях близкого расположения взаимодействие вихрей приводит к развитию мезомасштабных струйных вторжений, переносящих воды Цусимского течения через вихревые структуры. Восточно-Корейское течение фактически представляет собой цепочку вихрей, по которой осуществляется адвекция вод в северном направлении [7]. Во фронтальной зоне система течений так же состоит из струйных вторжений, распространяющихся по системе вихрей и обеспечивает адвекцию вод и биологических объектов [2]. По-видимому, именно такой механизм обеспечивает регулярную подпитку ядра вихря на банке Ямато и быструю адвекцию поверхностных вод в район к северу от фронта [24-26].

Районы формирования вихрей из года в год примерно повторяются [27] и их огибающие обычно воспринимаются как ветви теплых течений. Траектории вихрей в северной и северо-западной частях моря исследованы пока недостаточно; по одним данным, вихри, формирующиеся

к востоку от возвышенности Ямато, движутся на запад [4], а по другим - на юг, юго-восток со скоростью 1-4 см/с по траектории, повторяющей контур края глубоководной японской котловины [17]. Время жизни этих вихрей превышает 2 месяца, а некоторые элементы их структуры прослеживаются в течение 6-8 месяцев и даже более. Ядро таких вихрей состоит из теплой воды с соленостью меньше чем 34‰, происхождение которой может быть связано с водами северных прибрежных областей или южными районами Восточно-Китайского моря.

Таким образом, в западной и южной частях Японского моря по гидрологическим и частично спутниковым материалам выделены районы формирования вихрей. Значительная часть из этих исследований относится к вихрям, расположенным к югу от субарктического фронта, что объясняется как большим количеством судовых наблюдений, так и резкими термическими контрастами, позволяющими выделять вихри, используя спутниковые данные. Но для северной части, а тем более для моря в целом, такой схемы нет, и вызвано это многими причинами.

Использованные материалы и методы обработки

В работе анализировались инфракрасные (ИК) и телевизионные (ТВ) изображения Японского моря с ИСЗ серии NOAA за 1988-1996 гг., сформированные в базу на магнитных носителях в Тихоокеанском научно-исследовательском рыбохозяйственном центре (ТИНРО-Центре). В эту базу включены изображения, полученные радиометром высокого разрешения (AVHRR) как в режиме автоматической передачи (АРТ) с пространственным разрешением около 4 км, так и изображения, полученные радиометром высокого разрешения (HRPT) с разрешением около 1 км в институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток) и в Дальневосточном региональном центре приема и обработки данных (ДВ РЦПОД, г. Хабаровск). Основные положения методики обработки спутниковых снимков представлены в работе [28].

Метод идентификации вихревых образований основан на том, что вихри на спутниковых ИК-снимках проявляются в виде кольцевых или дугообразных полутоновых образований иногда с хорошо выраженной спиралевидной структурой.

Оценка повторяемости вихрей в Японском море основана на использовании массива карт фронтологического анализа и отдельных ИК-снимков за период с 1988 по 1996 гг. Исходя из океанографических особенностей, море было разделено на 5 крупных районов, которые полностью охватывали акваторию (рис. 1, вставка). Первый и второй районы расположены между 40-45°с.ш., третий район - к северу от 45°с.ш., а четвертый и пятый - к югу от 40°с.ш. Отслеживались все вихри с диаметром более 20 км. Для этого все море было разделено на более мелкие квадраты. Каждый квадрат имел размер 0,5 градуса по широте и по долготе, их общее количество составляло 345. В каждый квадрат заносилось число обнаруженных вихрей (центр вихря) и количество подсчитанных карт в определенном месяце в течение 1988-1996 гг. Повторяемость вихрей в море подсчитывалась как за все время наблюдений с 1988-1996 гг., так и для каждого года и сезона в отдельности. Повторяемость вихрей в данном квадрате в определенный сезон рассчитывалась по формуле:

$R = X/Y \times 100\%$ для каждого квадрата, где

R - *Повторяемость вихрей в каждом квадрате*

X - *количество вихрей наблюдаемых в отдельном квадрате*

Y - *общее количество наблюдений (карт).*

Повторяемость антициклонических вихрей

Рассмотрим повторяемость вихрей отдельно для зимы (декабрь-февраль) и лета (июнь-август), поскольку над акваторией Японского моря в зимний и летний периоды отмечаются муссонные ветры противоположного направления (рис. 1). Видно, что распределение синоптических

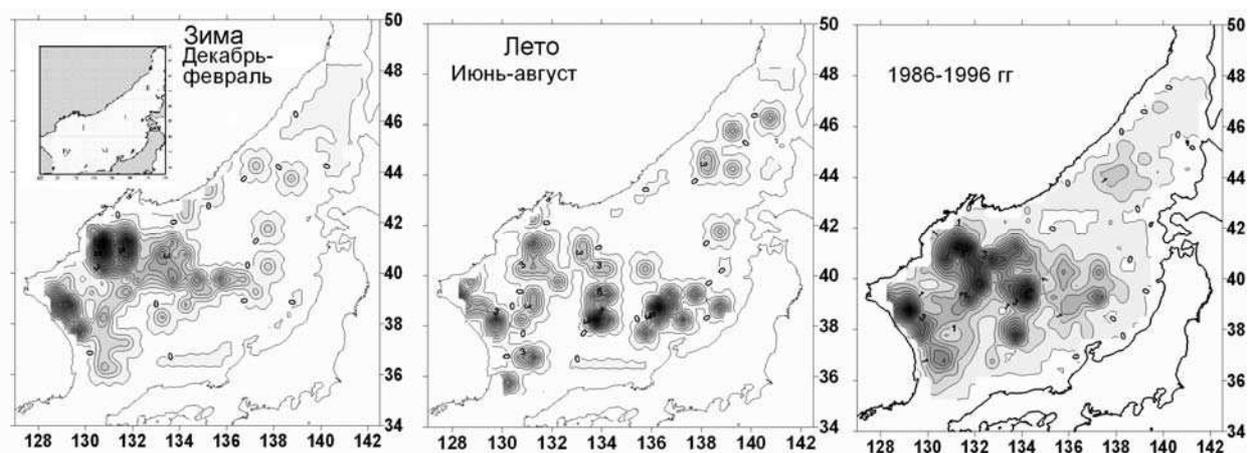


Рис. 1. Повторяемость антициклонических вихрей на спутниковых картах зимой (декабрь-февраль), летом (июнь-август) и среднемноголетняя повторяемость в 1988-1996 гг. Обозначения: Цифры 0.3.5..8 – изолинии повторяемости синоптических вихрей в %; на вставке рисунка 1 представлены районы в Японском море

вихрей в Японском море неравномерно. Отмечается их компактное распределение. В зимний период (декабре-феврале) действует холодный сухой и более устойчивый северо-западный муссон, а в летний - теплый и влажный юго-восточный. Зимой наибольшая повторяемость вихрей отмечается к югу от зал. Петра Великого и к западу от 132° в.д. (рис. 1а). К северу от 40° с.ш. вдоль 131° в.д. наблюдаются два ядра, что связано со значительным взаимодействием холодного Приморского и теплого Восточно-Корейского течений под влиянием зимнего муссона. Теплые воды в этот район в основном поступают в подповерхностном слое. В районе среднего Приморья наблюдаются вихри меньших масштабов, что возможно связано с сезонной изменчивостью [21]. Хорошо прослеживается вихревая структура вдоль побережья Кореи, где чаще всего прослеживается вихрь с координатами центра $38^{\circ}20'$ с.ш., $129^{\circ}15'$ в.д. В тоже время, отмечаются некоторые особенности: к югу от зал. Петра Великого и у среднего Приморья повторяемость вихрей увеличивается. Увеличивается повторяемость северного вихря у Корейского п-ва. Летом (июнь-август) вихри обнаруживаются в зоне влияния Восточно-Корейского и Цусимского течений (рис. 1б). Отмечаются вихревые дорожки по 131° , 134° и 137° в.д. [24, 26]. Прослеживается вихрь и в южной части зал. Петра Великого. В связи с увеличением притока субтропических вод в северную часть моря, в том числе и в проливе Татарский, увеличивается частота обнаружения антициклонических вихрей в северной части. Чаще всего вихри обнаруживаются к северу от п-ова Ното и о-вов Оки.

Среднемноголетняя повторяемость антициклонических вихрей в Японском море в 1988-1996 гг. представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что распределение синоптических вихрей в Японском море неравномерно. В то же время отмечается их компактное распределение. Наибольшая повторяемость антициклонических вихрей наблюдается к югу от залива Петра Великого и к востоку от КНДР, вдоль п-ова Корея, к северу от п-ова Ното, к западу от о-ва Хоккайдо и реже вдоль среднего Приморья. В основном синоптические вихри наблюдаются к западу от возвышенности Ямато. Практически на одном открытом от облачности снимке в Японском море можно наблюдать более трех вихрей одновременно.

Географическое положение, районы формирования и траектории движения мезомасштабных вихрей

По результатам анализа и интерпретации спутниковых материалов и с учетом литературных источников нами составлена карта основных районов формирования вихревых образований (рис. 2) на фоне обобщенной схемы течений [29]. Вихри разных знаков достаточно хорошо вписываются в циркуляционную систему вод Японского моря, однако наша схема отличается от стандартной (рис. 2, вставка) [29], наличием циклонических и антициклонических вихрей, которые сосредоточены вдоль струй основных течений.

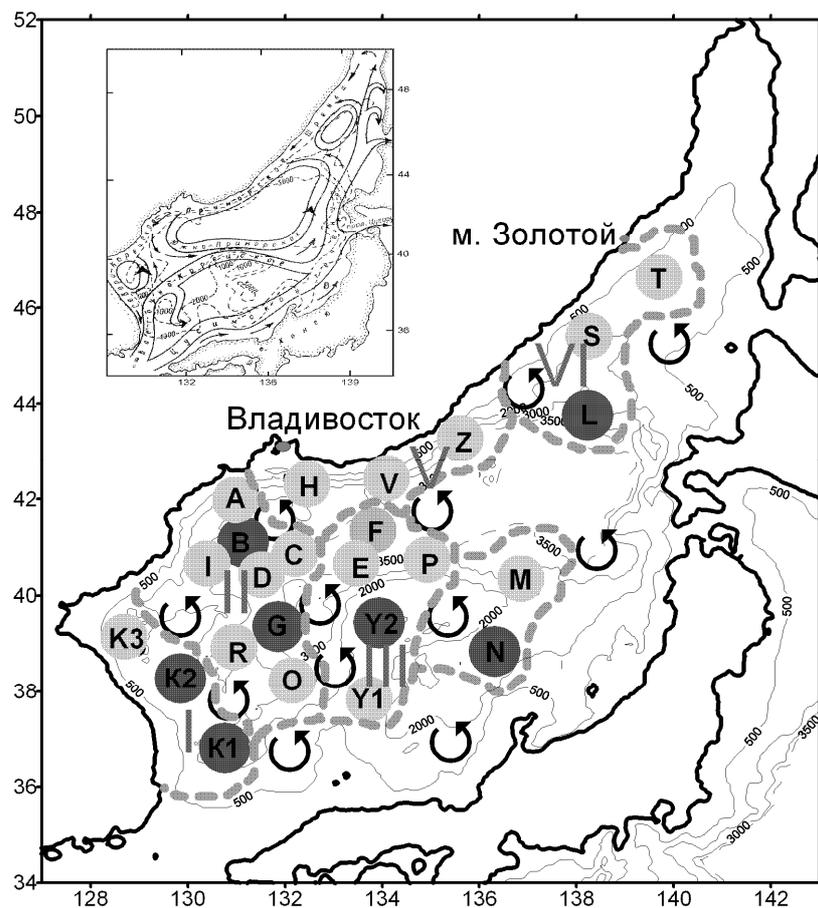


Рис. 2. Положение мезомасштабных антициклонических и циклонических вихрей и районы их формирования в Японском море по спутниковым данным в 1988-1996 гг. Обозначения:  – антициклонические вихри;  – циклонические вихри; I, II, III, IV, V, VI – районы формирования антициклонических вихрей; На вставке – обобщенная схема течений Японского моря [29]

Анализ схем показывает, что огибающей отдельных систем вихрей являются известные течения Японского моря [29]. Из рис. 2 видно, что в пределах акватории моря можно выделить шесть районов формирования антициклонических вихрей, которые достаточно хорошо согласуются с данными зарубежных исследователей [6, 7]. В этих районах наблюдаются семь квазистационарных антициклонических вихрей, из которых вихрь K1 и K2 [7] расположены в первом районе, вихрь B и G – во втором, вихрь Y2 [6] находится в третьем районе, в зоне влияния возвышенности Ямато, вихрь N формируется северней п-ова Ното и располагается в четвертом районе, а вихрь L [30] находится в шестом районе западной о. Хоккайдо. Остальные антициклонические вихри представленные в этой схеме, как видно из предыдущих рисунков, подвержены сильной сезонной и синоптической изменчивости. На этой же схеме прослеживаются циклонические вихри, которые на ИК-снимках проявляются в виде холодных областей. Из рис. 2 видно, что количество наблюдаемых циклонических вихрей в Японском море меньше, чем антициклонических. Выделяются 12 циклонических вихрей, которые расположены между областями с антициклоническими вихрями. Размеры циклонических вихрей расположенных в южной части Японского моря оцениваются в 60 км в диаметре по данным работы [31]. Оставляя вопросы, связанные с циклоническими вихрями, для рассмотрения в последующих статьях, перейдем к рассмотрению параметров и эволюции антициклонических вихрей, представленных на обобщенной схеме. Основные характеристики вихрей, определенные с использованием ИК-изображений, приведены в таблице 1. Координаты вихрей, приведенные в этой таблице, относятся к начальному периоду формирования вихрей.

Таблица 1. Характеристика мезомасштабных вихрей в Японском море в 1988-2007 гг.

Вихри	Координаты	Диаметр (км)	Глубина (м)	ядро	Гестрофическая скорость см/с	Период наблюдения	Продолжительность (месяцы)	Направление движения	Скорость см/с
A	41°50' с. ш., 131° в.д.	40-100	200			январь, март-декабрь		СЗ, Ю, ЮЗ	1.10
B	41°15' с. ш., 131°10' в.д.	50-110	2500 [36]			январь-май, октябрь, декабрь		ЮВ, мало- подвиж- ный	1.0
C	40°50' с. ш., 132°0' в.д.	40-105	250-1300 февраль, июль	50- 130	8.69	январь-май, сентябрь- декабрь		Ю, ЮВ	1.08- 3.7
D	40°30' с. ш., 131°30' в.д.	55-110	1300 февраль- март	20- 250	15.29	январь-май, сентябрь- октябрь, декабрь		СВ, мало- подвиж- ный	0.79
E	40°40' с. ш., 133°20' в.д.	50-110	2500 [36]			январь-май, сентябрь- декабрь		СВ	0.75
F	41°20' с. ш., 133°45' в.д.	40-95				Январь, март-июнь, сентябрь- декабрь		С, СВ, ЮВ	
G	39°20' с. ш., 131°50' в.д.	55-110	1000 июнь		20.5-23.3	январь-май, август, октябрь-декабрь		СВ, мало- подвиж- ный	
I	40°45' с. ш., 130°20' в.д.	40-110				Январь-июнь, октябрь	4.5	СЗ	
K1	36°50' с. ш., 130° 45' в.д.	65-130	360 [49]		24 [50]	Январь-декабрь	12	С, СВ, мало- подвиж- ный	0.56
K2	38°20' с. ш., 129°50' в.д.	55-160	350-500	30- 210 [12]	30-60 [12], 125	Январь-июнь, август, октябрь-декабрь	30 [12]	С,СВ,СЗ мало- подвиж- ный	0.46- 0.77
K3	39° с. ш., 128°45' в.д.	55-110				Февраль-июль, Сентябрь- декабрь		СЗ, мало- подвиж- ный	
Y1	37°50' с. ш., 133°50' в.д.	75-130	350		21.8	Январь-декабрь	12	мало- подвиж- ный	
Y2	39°30' с. ш., 134°00' в.д.	55-150	300-350		25.6	Январь, март-август, октябрь		мало- подвиж- ный	
L	43°50' с. ш., 138°30' в.д.	20-75			28 [30]	Январь-июль, октябрь-декабрь	7	ЮЗ, ЮВ	0.3
M	40°20' с. ш., 136°50' в.д.	40-75				Январь-июнь, сентябрь-ноябрь		СЗ	
N	38°50' с. ш., 136°20' в.д.	50-95	400-450			Январь, март-июнь,		СВ, ма- лопо- двигный	
H	42°20' с. ш., 132°30' в.д.	55-95				Февраль-май, август-сентябрь		ЮВ	
R	38°50' с. ш., 130°55' в.д.	40-95	300			Март-май, ав- густ, октябрь, ноябрь		СЗ	
O	38°10' с. ш., 132°10' в.д.	55-95				Март-май	2-2.5	СВ	
P	40°50' с. ш., 134°50' в.д.	40-75				Март-май, сен- тябрь, октябрь	1-1.5	СВ, ЮВ	
S	45°20' с. ш., 138°15' в.д.	40-55				октябрь	0.5	С	
V	42°30' с. ш., 134°10' в.д.	40-50				декабрь	0.5	ЮВ	2.89
Z	43°20' с. ш., 134°40' в.д.	40-50				Май, сентябрь, декабрь		ЮВ	
T	46°40' с. ш., 139°45' в.д.	40-55				март-сентябрь	7	С, ЮВ	0.9

Первый район, где формируются сразу три антициклонических вихря (К1, К2 и К3), расположен вдоль восточного побережья Корейского п-ова (район Корейского плато и Цусимской котловины). Среди этих вихрей существует один основной вихрь К2, южнее его расположен вихрь К1, а еще один вихрь К3, проявляется в Корейском зал. Исследованию этих вихрей в области Восточно-Корейского течения посвящено значительное количество работ [7, 8, 32, 9, 10, 11, 33, 12]. Наблюдения показали, что в области Восточно-Корейского течения отмечается 1-3 крупных вихря диаметром 100-160 км, вертикальным масштабом 300-400 м, продолжительность существования которых может составлять более года [33] и даже около 2,5 лет [12]. Они наблюдаются в различные сезоны, как по судовым, так и спутниковым данным. Отмечается устойчивое движение вихрей на север в период с весны по осень, которое связано с интенсификацией потока вод через Корейский прол. [7]. Отмечается, что вторжение тёплых вод из вихря К1 в вихрь К2 ограничивалось поверхностным слоем 0-75 м, что поддерживало в последнем стабильный режим вод с термомохалинными показателями температуры (9,59-10,87°C) и солёности (34,19-34,26‰) [11]. Вихрь содержал ядро вод однородных по вертикали за счет зимнего конвективного перемешивания в слое 0-300 м с температурой 10°C и солёностью 34,2‰ [12, 32]. Особенно это проявляется в летний период (июнь-август). Скорость течений в вихре варьировала от 30 до 60 см/с. Направление движения вихря менялось по часовой стрелке от западного до северо-восточного.

Анализ спутниковых данных и публикаций [21] дают основания полагать, что положение вихря К3 типично для Восточно-Корейского зал. В то же время другие исследования [29, 34], выполненные в различные годы, свидетельствуют о том, что на глубинах 100, 300 и 1000 м в Корейском зал. наблюдается циклонический тип циркуляции, что может свидетельствовать о недостаточной изученности сезонной изменчивости данного района.

Второй район, где формируются вихри А, В, С, D, I, G, R и O, расположен к востоку от первого (рис. 2). Формирования вихрей здесь обусловлено сложной гидродинамикой течений, наличием в рельефе дна отрогов Корейского плато и свала глубин вдоль западного побережья. Этот район условно можно разделить на северный подрайон (вихри А, В, С, D, I), простирающийся к северу от ЮЗ фронта, и на южный подрайон (вихри G, R, O), расположенный к югу от него [35]. Иногда в северном подрайоне в зимнее время (март, апрель 1981 г.) может существовать один вихрь, который с началом прогрева вод распадается на несколько. Несмотря на то, что антициклонические вихри являются довольно устойчивыми образованиями [17, 24] важной особенностью их эволюции, является формирование струйных выбросов и спиралевидных структур, проявляющихся вследствие динамической неустойчивости. В условиях близкого расположения («плотной упаковки») происходит вовлечение струй в область соседнего вихря и формирование вторжений, осуществляющих водообмен между вихрями. В результате, теплые струи распространяются через системы вихрей, формируя вихревые цепочки, переносящие субтропические воды на север. Глубина распространения струи составляет 50-100 м [26]. Ядро вихря прослеживается по прогибу изолиний температуры и солёности вниз и представлено в верхнем 100-метровом слое сравнительно однородными по вертикали теплыми водами с повышенной температурой и солёностью (7.65°C, 34.25‰). Теплая струя расположена вдоль западной периферии вихря и имеет характерные для вод Цусимского течения повышенные значения солёности (до 34.42 ‰ в поверхностном слое).

Антициклонический вихрь А, который расположен южнее зал. Петра Великого (район свала глубин) прослеживается по всей глубине зондирования (200 м). Ядро вихря было определено по прогибу изолиний, и представлено в верхнем 80-метровом слое сравнительно теплой и однородной по температуре (12-13.5°C) и солёности (33.20‰) водой. Выполненные Гидрологические наблюдения за вихрями С и D, как по температуре, так и по солёности показали, что они прослеживаются по вертикали практически до 2500-3000 м и даже до дна [36].

Анализ архивных гидрологических данных показывает, что глубина распространения струи составляет 50-100 м. Вертикальный разрез через антициклонический вихрь, располагавшийся над южной частью Японской котловины 17-20 октября 1993 г. приведен на рис. 3. Ядро вихря про-

слеживается по прогибу изолиний и представлено между 30-230 м сравнительно однородными по вертикали теплыми водами повышенной солености (7-10° С, 34.1 о/оо).

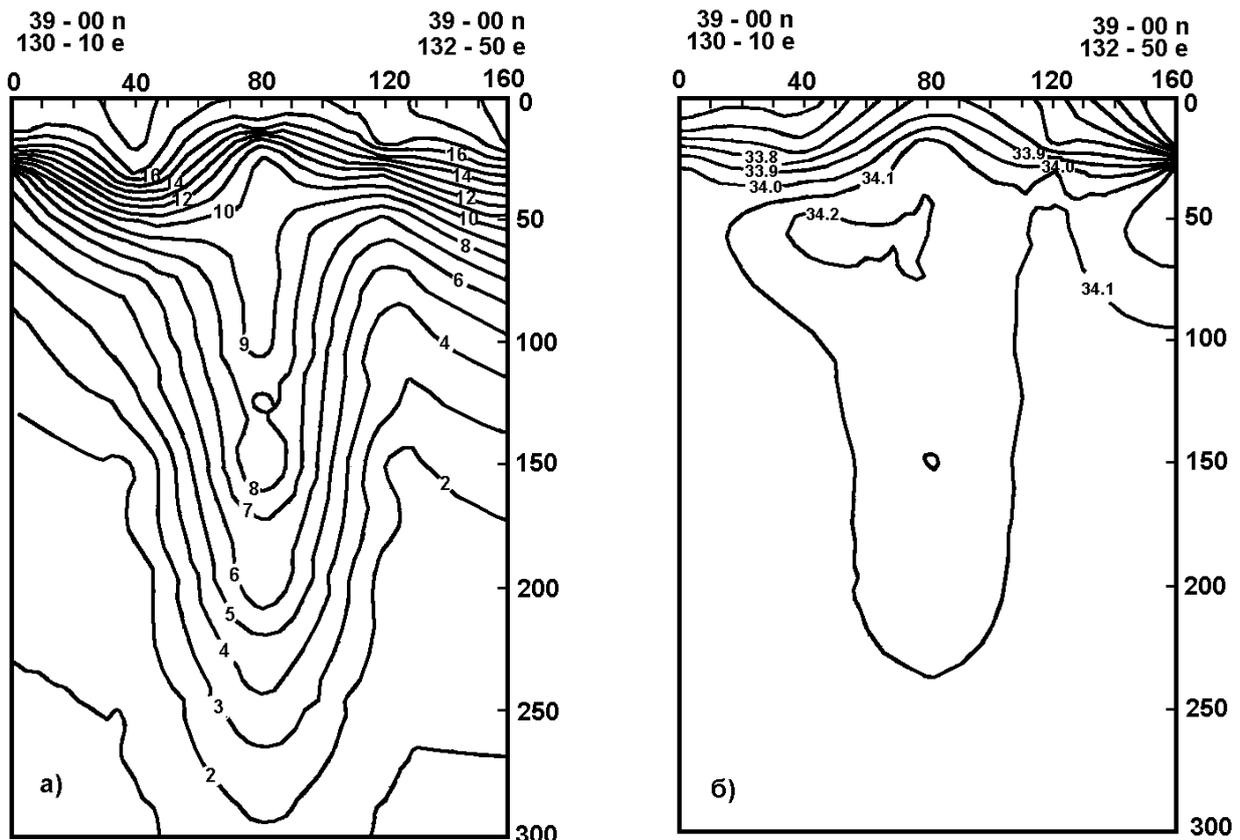


Рис. 3. Температура и соленость вихря на гидрологическом разрезе по 39°с.ш. между 130°10' – 132°50' в.д. в октябре 1993 г.

Часто на ИК-снимках видно, что вдоль западной ветви субарктического фронта (САФ) прослеживается холодная область. Предполагается [37], что зимой в районе устья реки Туманной формируется водная масса пониженной солености, которая распространяется на юго-восток вдоль Северо-западного (СЗ) фронта. Эти воды заглубляются перед САФ и далее распространяются в подповерхностном слое на юг [38]. Далее они затягиваются во вращательное движение водных масс. Распространение холодных вод происходит по восточной периферии вихрей А, В, С, D, G, O и обеспечивает транспортировку холода на юг вплоть до южного фронта (38°с.ш.). Направление движения этих вихрей имеет юго-восточное, восточное направление [17]. Постоянное присутствие в исследуемом районе синоптических вихрей и регулярная генерация струйных вторжений обуславливают незональное положение Северо-Западного Фронта [35] обеспечивает перенос теплых вод к северному побережью Кореи и району зал. Петра Великого и холодных к югу до 37°с.ш. В зависимости от расположения северного вихря А в вихревой цепочке (рис. 2) фронт может быть смещен к северу, в район устья реки Туманной и далее до м. Гамова [26]. Присутствие антициклонического вихря вызывает направленные на северо-восток прибрежные течения и вторжение теплых струй в район морского заповедника зал. Посьета. Так как положение вихрей и их конфигурация могут изменяться в течение нескольких суток-недель, то эти вторжения носят эпизодический характер [26].

Третий район, где расположены вихри Y1, Y2, E, F и P, занимает центральную часть моря, ограниченную с юга 37°, а с севера 42°с.ш. (рис. 2). Этот район можно разделить на северный подрайон с центром над возвышенностью Ямато с вихрями Y2, E, F и P и южный – над возвышенностью Оки с вихрем Y1. Сформированный в районе возвышенности Ямато вихрь Y2 удерживается

живается её топографией (отрогами) и является топографически захваченным [6]. Вихрь У1, расположенный над банкой Оки, также удерживается топографией дна. Горизонтальные размеры этих вихрей составляют 55-150 км, вертикальные – 350 м (см. таблица), а геострофическая скорость в весенний сезон может достигать 21.8- 25.6 см/с, что согласуется с работой [6, 39]. Вихри, расположенные севернее банки Ямато, прослеживаются практически до дна [36]. Весной эти вихри отчетливо проявляются на ИК-снимках, что связано с сезонным интенсивным вихреобразованием и резкими температурными контрастами между холодными и теплыми водными массами.

Четвертый район (вихри N и M) расположен к северу от п-ва Ното. Формирование антициклонических вихрей здесь, скорее всего, также связано с донной топографией севернее и западнее п-ва Ното. На ИК-снимках они проявляются отчетливо весной при этом кинематические характеристики этих вихрей такие же, что и в западной части моря [21]. В отличие от вихрей западной части моря, они практически не выходят севернее САФ, простирающегося здесь вдоль 40° с. ш. В результате перераспределения вод Цусимского течения, часть вод распространяется от п-ва Ното в северо-западном направлении и формирует один крупный антициклонический вихрь N. Диаметр этого вихря составляет примерно 90 км.

Пятый район (вихри H, V и Z) расположен в зоне среднего Приморья над глубинами 2000-3000 м. (рис. 2) Здесь встречаются вихри размером 20-55 км, что объясняется уменьшением радиуса деформации волн Россби вследствие усиления стратификации [15]. Время полного оборота и средние орбитальные скорости в вихрях составляют в среднем примерно 5 суток и 18 см/с, соответственно.

Шестой район (вихри L, S и T) расположен в северной части моря к северу от 43°с.ш. между 138-140°в.д. (рис. 2). Формирование вихрей в этом районе может быть связано с прибрежной частью большого желоба, заходящего с юга в Татарский прол., где он образует три ступени с уступами. По данным 2002 г. время жизни вихря превышает 7 месяцев (рис. 4а,б). Вихрь очень медленно (практически оставаясь на месте) смещался со скоростью 0,9 см/с по желобу между изобата-

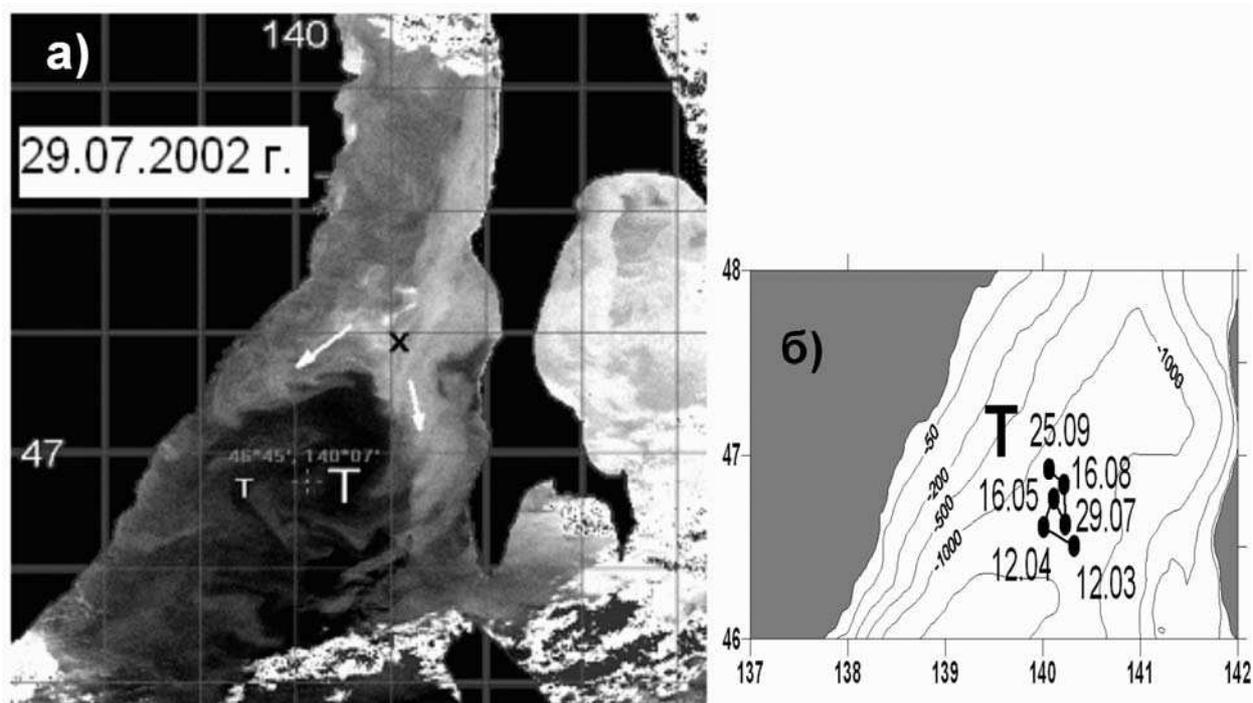


Рис. 4. Изображение антициклонического вихря T в южной части Татарского пролива по данным ИК-снимка со спутника NOAA за 29.07.2002 г.

а) *m* – теплые потоки; *x* – холодные потоки; \Rightarrow – направление холодных потоков.
 б) – траектория движения вихря T

ми 1000 м в северо-западном направлении. Следующий вихрь L расположен на 44°с.ш. между о. Хоккайдо и материком. Расчетная геострофическая скорость этого вихря составляет около 25 см/с, а по данным дрейфера - около 23 см/с [30]. Этот вихрь (практически) не меняет свое местоположение [40]. Диаметр этого вихря составляет около 75 км (табл. 1). Как известно [41] между 42-43°с.ш. прослеживается язык теплых вод, который простирается от о. Хоккайдо ветвью Цусимского течения на запад к берегам материка, образуя к северу от САФ крупный циклонический круговорот. В водах этого языка продолжительное время могут прослеживаться синоптические вихри. Так на ИК-снимках 11-12 декабря 2006 г. в восточной части моря наблюдался синоптический вихрь диаметром около 55 км. Поверхностная температура воды в центре этого вихря зимой составляла примерно 6-9°С. Он смещался в юго-западном направлении со скоростью 0,3 см/с и прослеживался в течение 7 месяцев с 11 декабря 2006 г. по 14 июня 2007 г., при этом вихрь преодолел расстояние около 166 км. Можно отметить, что этот вихрь затягивался в область крупномасштабного циклонического круговорота над Японской котловиной и перемещался в нем.

Таким образом, наблюдаемые вихри являются довольно устойчивыми образованиями, которые могут существовать от 1 до 12 месяцев и более (табл. 1). Горизонтальные размеры вихрей в Японском море составляют 20-160 км, что примерно соответствует результатам опубликованных работ [5, 15]. Наиболее крупные вихри наблюдаются в районах возвышенности Ямато и вдоль восточного побережья Кореи. Здесь вихри прослеживаются по глубине до горизонтов 300-500 м [33, 38, 39, 42]. Северные вихри по вертикали наблюдаются практически до дна [17, 43]. Большинство вихрей малоподвижно. Антициклонический вихрь над банкой Ямато захваченный этим поднятием, не меняет своего положения [7]. В то же время интенсивность, диаметр его сильно меняется (табл. 1). В юго-западной части моря вихри медленно (0,5 см/с) двигаются на север, северо-восток [33] а в северо-западной части моря они неравномерно перемещаются со скоростью до 4 см/с по сложным траекториям [17]. Антициклонические вихри образуют две цепочки, одна из которых (К1-К3) располагается вдоль побережья Кореи, а другая (О-А) примерно ориентирована в меридиональном направлении между 130-132°в.д. от 38° вплоть до 42°30'с.ш. Самый южный из вихрей первой цепочки (К1) является квазистационарным [6, 7, 21]. По-видимому, он обеспечивает начальное звено передачи теплых вод на север через систему последовательно к северу (К2, К3).

Основные системы вихревых цепочек

Спутниковые изображения показывают, что основные пути северной адвекции субтропических вод, поставляемых в Японское море Цусимским течением, связаны с Восточно-Корейским течением и вихревой цепочкой, расположенной вдоль 131°-132°в.д. [24]. Фактически, само Восточно-Корейское течение представлено восточной периферией системы из двух-трех антициклонических вихрей (рис. 2). Далее струя теплых вод вовлекается в область вихрей С, D, В и следует к северу от м. Болтина по периферии вихря А.

Распространение субтропических вод через вихревую цепочку О, Y1, Y2, Е, F берет свое начало от второй ветви Цусимского течения. Направленный на север перенос теплых вод в этом районе посредством вихрей отмечался еще в 1968 [8]. Следствием этого процесса является появление так называемой "Utsuryo-to warm water" – большого языка теплой воды от 36°с.ш. до 38,5°с.ш. [44, 45]. Дальнейшие исследования показали, что эта цепочка может продолжаться вплоть до южных границ зал. Петра Великого [26] и обычно наблюдается с марта по ноябрь. Это наиболее устойчивая в межгодовом плане динамическая структура. Другой характерный путь проникновения тепла на север проходит по 134°в.д. и обеспечивается распространением вод Цусимского течения через вихрь в районе возвышенности Ямато. По наблюдениям [6] этот вихрь обычно квазистационарен, однако, к северу от него в весенний период отрываются вихревые образования небольшого размера. Дальнейшее продвижение тепла ограничено водами Приморско-

го течения. В восточной части Японского моря к северу от САФ прослеживается еще одна вихревая дорожка по 137° в.д., но её действие не распространяется далее 41° с.ш.

Время развития струйного вторжения и его распространения вдоль периферии вихря составляет 5-8 суток. При достаточно интенсивном вторжении, как правило, через несколько суток начинается следующий цикл – формирование вторжения в соседний вихрь [26]. В результате перенос вод Цусимским течением к 41-42° с.ш. может занять всего 2-3 недели. Поэтому синоптические вихри являются важным механизмом быстрой адвекции субтропических вод на север. Перенос холодных вод в южном направлении проходит таким же путем вдоль восточной периферии вихрей.

В отдельных случаях наблюдается широтный перенос вдоль расположения антициклонических вихрей (цепочки) между 39-41° с.ш. и от 139° в.д. до района зал. Посъета. Северо-западный фронт при этом является как бы северной периферией этих вихрей. Причем между этими вихрями происходит проникновение холодных вод на юг, отмечаются разрывы в САФ, и фронт становится прерывистым [62, 46]. Учитывая, что вихрей этого масштаба вдоль фронта наблюдается достаточно большое количество, можно предположить, что они играют большую роль в образовании промежуточного слоя пониженной солености, а именно в переносе вод на юг в промежуточные слои.

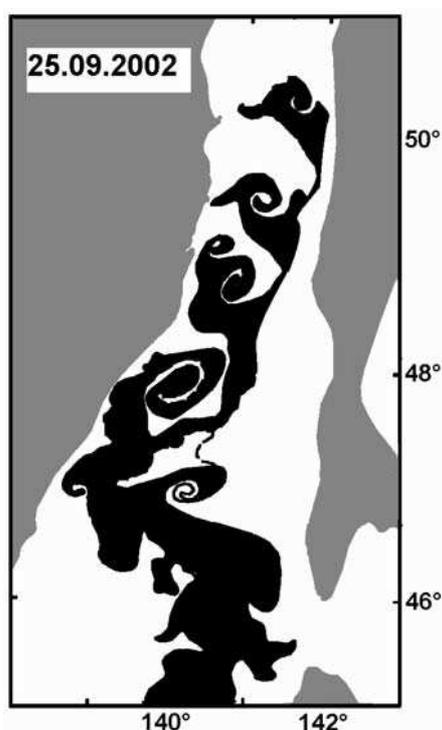


Рис. 5. Цепь вихрей в Татарском проливе представлена по результатам дешифрирования ИК-снимка со спутника NOAA за 25.09.02 г. ТВ - теплые воды; стрелками указано направление теплых и холодных потоков

В Татарском проливе в период максимального притока субтропических вод могут наблюдаться вихревые структуры. Например, в осенний период 2002-2003 гг. в южной части пролива наблюдалась цепочка, состоящая из 4-5 антициклонических вихрей (рис. 5). Это, видимо, определило здесь высокие значения температуры воды в осенний период [47, 48]. Цепь вихрей прослеживалась от 47° до 51°30' с.ш. Расстояние между центрами вихрей уменьшалось от 100 км до 50 км по мере продвижения их на северо-восток. В среднем диаметр вихрей изменялся от 15 до 35 км.

Характерные этапы эволюции мезомасштабных вихрей по данным 1987-1988 гг.

В результате усиления Восточно-Корейского течения в середине марта 1988 г. произошел прорыв субарктического фронта. На двух последовательных снимках (рис. 6а) видно, как узкой

полосой распространяется Восточно-Корейское течение на север вплоть до 41°с.ш. К северу от фронта образовался антициклонический вихрь диаметром до 50 км. На карте-схеме показан район формирования вихря (рис. 6б). 2-4 апреля был выполнен гидрологический разрез на НПС "Лесо-

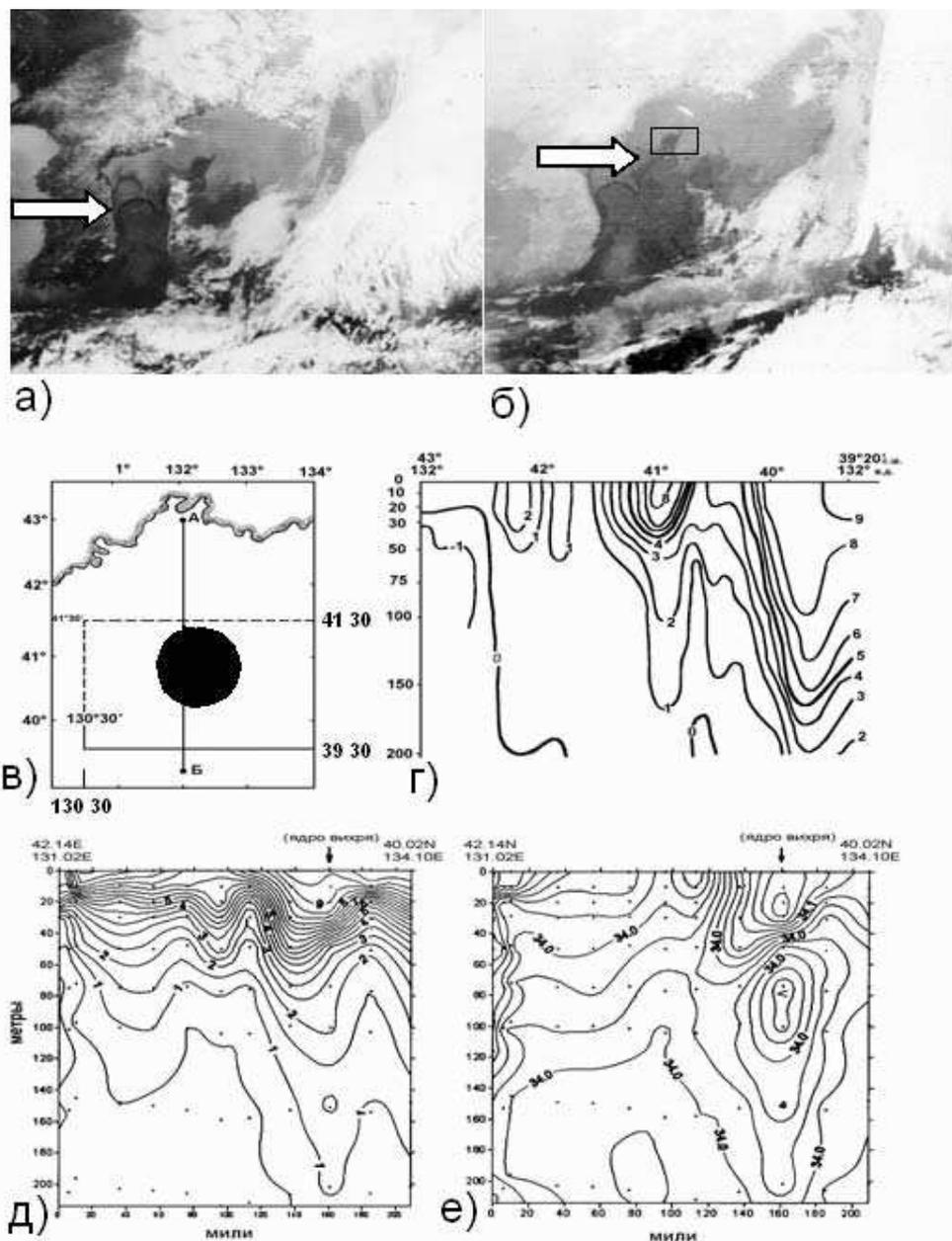


Рис. 6. а, б – два последовательных ИК изображения Японского моря, выполненных через несколько часов со спутника NOAA 18.03.1988 г.; в, г – схема положения вихря и его вертикальная структура на 132° в.д. в апреле 1988 г. Прерывистой линией обозначен район наблюдения за вихрем; д, е – структура вихря к северу от САФ в мае 1988 г.

заводск", который пересекал вихрь по западному краю. Как видно на рисунке 6б в этой части структура вихря прослеживалась на глубине более 150 м. В мае НПС «Лесозаводск» выполнял гидрологическую съемку северо-западной части района и захватил наблюдаемый вихрь. Гидрологический разрез пересек вихревую цепочку по 134°в.д., в которой формировался вихрь. Вертикальный разрез представлен на (рис. 6в). Диаметр этого вихря составлял около 90 км. Вихрь наблюдался по всей глубине зондирования и располагался севернее возвышенности Ямато. Ядро этого вихря с соленостью менее 34,00 ‰ и с температурой 2-4° С заглублялось и располагалось в слое между 50-120 м. В верхнем 50- метровом слое соленость увеличивалась (> 34,00 ‰).

Имеющиеся спутниковые данные (рис. 7) позволили проследить эволюцию вихря С в период с декабря 1987 по июнь 1988 г. В середине марта вихрь получив импульс в виде дополнительной порции трансформированных субтропических вод (струя шириной 30-40 км). Вихрь стал смещаться в северо-восточном направлении, при этом оставаясь соединенным перемычкой (стримером) шириной около 10-30 км с основной ветвью Восточно-Корейского течения. В результате с 17 по 27 марта вихрь из округлой формы преобразовался в грибовидную структуру, а затем с 28 марта – в эллипсообразную. Горизонтальный масштаб его достигал 50×80 км, вертикальный – до 200 м (по всей глубине зондирования). На периферии вихря развивались мезомасштабные возмущения в виде узкой полосы, на конце которой образовался вихрь (до 30 км в диаметре) с отходящей от него узкой полосой (до 5-10 км шириной и длиной до 80 км.). Одновременно с вытягиванием теплой полосы, на периферии вихря формировалась холодная затыжка, отсекающая теплый выброс. Время жизни периферийного образования составляло от 1-2 дней до одного месяца. При этом основной вихрь перемещался со скоростью 3.7 см/с в восточном, юго-восточном направлении, периодически (через 10-15 дней) взаимодействуя с теплыми струями.

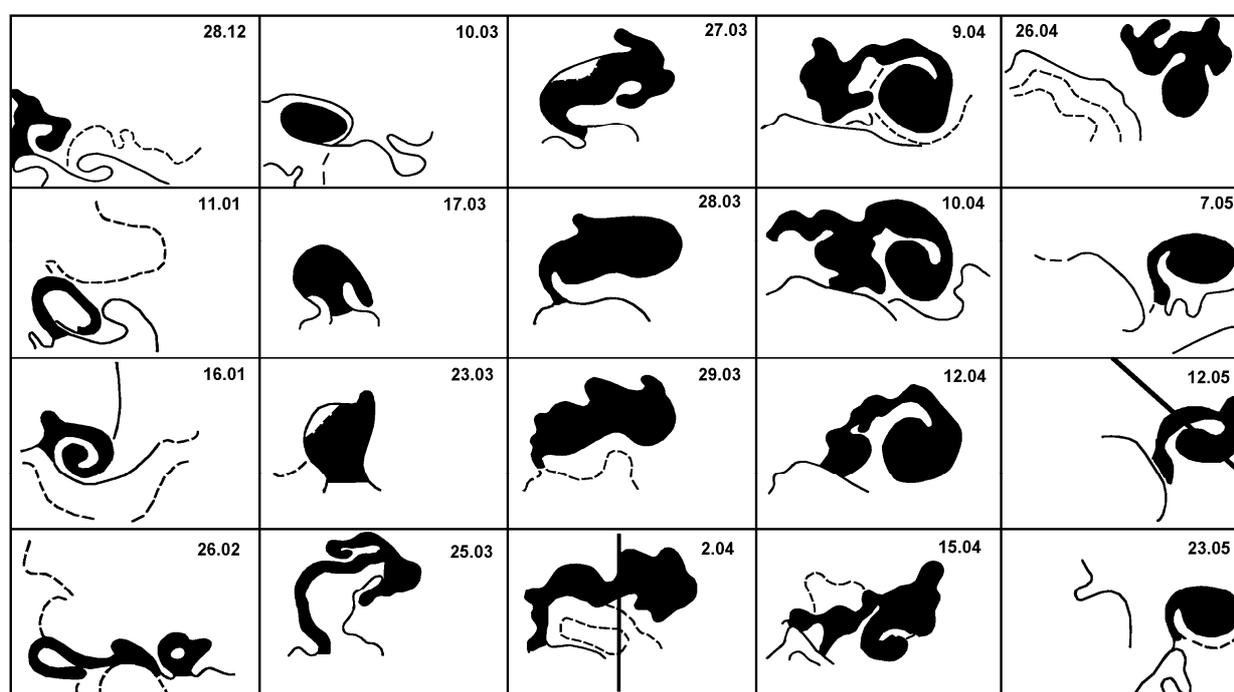


Рис. 7. Трансформация, взаимодействие и разрушение вихря С в декабре 1987 - в мае 1988 гг. (— — разрез по 132° в. д. и между 42°14' с.ш., 131°02' в. д. и 40°02' с. ш., 134°10' в. д.

Заключение

Проведенный анализ спутниковых изображений, судовых данных и литературных источников позволяет заключить, что в Японском море наблюдаются устойчивые антициклонические вихри синоптического масштаба, что позволило составить схему их положения, которая отличается от стандартной схемы [29], наличием циклонических и антициклонических вихрей, которые сосредоточены вдоль струй основных течений. Выделено шесть стационарных районов, где отмечено семь наиболее часто наблюдающихся антициклонических вихрей. Циклонических вихрей меньше, чем антициклонических и они расположены между областями с антициклоническими вихрями.

Антициклонические вихри в Японском море имеют характерные размеры 20-160 км и временем жизни от 1 месяца до 12 месяцев, а некоторые вихри могут наблюдаться до 2,5 лет [12]. Вертикальный масштаб южных вихрей составляет 300-500 м, а северных вихрей до глубины 2500-

3000 м и даже до дна [36]. Вихри в северо-западной части моря неравномерно перемещаются со скоростью от 0.3 см/с до 4 см/с по сложным траекториям. Вихри, прилегающие к побережью КНДР и южного Приморья перемещаются в южном, юго-западном и восточном направлениях. Вихри, расположенные в центральной части моря (к северу от САФ) двигаются в восточном, юго-восточном, северо-восточном направлениях. Вихри, расположенные в зоне влияния Приморского течения (ближе к течению), медленно движутся на юг, юго-запад вдоль свала глубин. В северо-восточной части вихри перемещаются в юго-западном направлении со скоростью 0.3 см/с. В северной части моря вихри практически не перемещаются или медленно (0,9 см/с) двигаются на север, северо-запад. Отметим, что эти вихри исследованы не достаточно.

Литература

1. *Huh O. K. and Shim T.* Satellite observations of surface temperatures and flow patterns, Sea of Japan and East China Sea, late March 1979. *Remote Sensing Envir.* 1987. V. 22. P. 379-393.
2. *Sugimoto T., Tameishi H.* Warm core rings, streamers and their role on the fishing ground formation around Japan // *Deep Sea Res.* 1992. V. 39. Suppl. P. 183-201.
3. *Goncharenko I. A.* SST field analysis based on AVHRR imagery during the second part of CREAMS '93 expedition // *Proc. CREAMS'94 Int. Symp.* 1994. p. 111-114.
4. *Ostrovskii A., Hiroe Y.* The Japan Sea circulation as seen in satellite infrared imagery in Autumn 1993 // *Proc. CREAMS'94.* 1994. Fukuoka. P. 75-88.
5. *Ichiye T., Takano K.* Mesoscale eddies in the Japan Sea // *La Mer.* 1988. V. 26. N 2. P. 69-75.
6. *Isoda Y.* Warm eddy movements in the eastern Japan Sea // *J. Oceanography.* 1994. V. 50. N1. P. 1-16.
7. *Isoda Y., Saitoh S.* The northward intruding eddy along the east coast of Korea // *J. Oceanogr.* 1993. V. 49. P. 443-458.
8. *An H., Shim K. and Shin H.-R.* On the warm eddies in the southwestern part of the East Sea (the Japan Sea). *J. Korean Soc. Oceanogr.* 1994. V. 29. P. 152-163.
9. *Min D.H., Lee J.C., Shim T.B., Lee H.S.* Eddy distribution off the East coast of Korea derived from satellite infrared imagery // *J. Korean Fish. Soc.* 1995. V. 28. N2. P. 145-156.
10. *Lie H. J., Byun S. K., Bang I. and Cho C. H.* Physical structure of eddies in the south-western East Sea // *J. Korean Soc. Oceanogr.*, V. 30, N 3, 1995. P. 170-183.
11. *Нукитин А.А., Дьяков Б.С.* Эволюция антициклонического вихря в Японском море у берегов Кореи в системе вод Восточно-Корейского течения в 1991-1992 гг. (по данным спутниковой и судовой информации). *Исследования Земли из космоса.* 1995. Т. 6. С. 90-98.
12. *Shin Hong-Ryeol, Shin Chang-Woong, Kim Cheolsoo, Byun Sang-Kyung, Hwang Sang-Chul.* Movement and structural variation of warm eddy WE92 for three years in the Western East/Japan Sea *Deep-Sea Research II* 52. 2005. P. 1742-1762
13. *Isoda Y., Nishihara M.* Behavior of warm eddies in the Japan Sea. *Umi to sora.* 1992. V. 67. N1. P. 231-243.
14. *Toba Y., Kawamura H., Yamashita F., Hanawa K.* Structure of horizontal turbulence in the Japan Sea // In.: *Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas.* Ed. T. Ichiye. Elsevier: Amsterdam, 1984. P. 337-332.
15. *Bunimovich L.A., Ostrovskii A.G. Umatani S.* Observations of the fractal properties of the Japan Sea surface temperature patterns // *Int. J. Remote Sensing.* 1993. V. 14. P. 2185-2201.
16. *Dubina V.A., Lobanov V.B., Mitnik L.M.* Flatures of the surface circulation in the northwestern Japan Sea from ERS synthetic aperture radar data // *Proc. of CREAMS'2000 International Symposium. Oceanography of the Japan Sea.* Editor: M.A. Danchenkov. Vladivostok. Dalnauka. 2001. P. 166-173.
17. *Lobanov V.B., Nikitin A.A., Danchenkov M.A.* New data on structure and evaluation of mesoscale eddies over the Japan Basin // *CREAMS'99.* January 26-28, 1999, Fukuoka. Abstracts. 1997. P. 12-13.

18. *Morimoto A., Yanagi T., Kaneko A.* Eddy field in the Japan Sea derived from satellite altimetric data // *J. of Oceanography*, V.56, 2000, pp. 449-462.
19. *Yoon J.-H.* Trend of oceanography in Japan Sea // *Bull. Jap. Soc. Fish. Oceanogr.* 1997. V. 61, P. 300-303.
20. *Lee D.-K., Lee J.C., Lee S.R., Lie H.J.* A circulation study of the East Sea using satellite-traced drifters. 1. Tsushima Current // *J. Korean Fish. Society.* 1997. Vol. 30. No. 6. P.1021-1032.
21. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г.* Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев). Исследование земли из космоса. № 1, 1998, с. 66-82.
22. *Lee D.-K., Niiler P.P.* The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea. *Deep-Sea Research II* 52, 2005. P. 1547-1563.
23. *Takematsu M., Ostrovskii A.G., Nagano Z.* Observations of eddies in the Japan Basin Interior. *Journal of Oceanography.* 1999. V. 55. P. 237-246.
24. *Danchenkov M.A., Lobanov V.B., Nikitin A.A.* Mesoscale eddies in the Japan Sea, their role in circulation and heat transport // *Proc. of the CREAMS'97.* 28-30 January 1997a. Fukuoka. P. 81-84
25. *Lobanov V.B., Danchenkov M.A., Nikitin A.A.* On the role of mesoscale eddies in the Japan Sea water mass transport and modification // *Oceanography.* 1998. Vol. 11, N 2. P. 46
26. *Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А.* Возможные пути переноса субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника. *Известия ТИНРО.* Т. 131. 2002а. С. 41-53.
27. *Tameishi H.* Formation of the fishing grounds of squid at warm eddies and streams in the Japan Sea // *Contributions to the fisheries researches in Japan Sea.* 1993. V. 28. P. 43-55.
28. *Булатов Н.В.* Рекомендации по использованию спутниковых ИК снимков в океанологических исследованиях. Владивосток. ТИНРО. 1984, 43 с.
29. *Яричин В.И.* Состояние изученности циркуляции вод Японского моря. Труды ДВНИГМИ. Вып. 80. 1980. С. 46-61.
30. *Kim Kuh, Kim Kyung – Ryul, Kim Young – Gyu, Cho Yang-Ki, Chung Jong-Yul, Choi Byung-Ho, Byun Sang-Kyung, Hong Gi-Hoon, Yoon Jong-Hwan, Takematsu Masaki, Volkov Y. and Danchenkov M.* New Findings from CREAMS Observations: Water Masses and Eddies in the East Sea. New findings from the Korean Society of Oceanography. Vol. 31, No. 4, December 1996. pp. 155-163.
31. *Mitchell D.A., Teague W.J., Wimbush M., Watts D.R., Sutyris G.G.* The Dok cold eddy. *Journal of Physical Oceanography.* Vol. 35, March, 2005, P. 273-288.
32. *Shin H.R., Byun S.K., Kim C. et al.* The characteristics of structure of warm eddy observed to the northwest of Ullungdo in 1992 // *J. Korean Soc. Oceanogr.* 1995. Vol. 30, N.1. P.39-56.
33. *Byun S.K., Kim S., Shin H.-R.* Movement of an eddy observed in the southwest of East Sea during 1994-1995 // *Proc. Fourth CREAMS Workshop.* Vladivostok, 1996. P. 51-52.
34. *Yarichin V., Ryabov O.* Current field structure of the Japan Sea in February-March 1990. *Proc. CREAMS'94 Int. Symp.,* 24-26 Jan. 1994, Fukuoka, Japan, 1994. P. 99-101.
35. *Никитин А.А.* Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость. *Исследование Земли из космоса.* 2006, N 5. С. 49-62.
36. *Lobanov V., Ponomarev V., Tischenko P., Talley L., Mosyagina S., Sagalaev S., Salyuk A., Sosnin V.* Evolution of anticyclonic eddies in the northwestern Japan/East Sea // *The 11th PAMS/JECSS,* Cheju, Korea, 11-13 April 2001. 2001. P. 37-40.
37. *Данченков М.А., Обри Д.Г., Лобанов В.Б.* Пространственная структура вод северо-западной части Японского моря зимой. Труды ДВНИГМИ, вып. 3. Владивосток. 2000. с. 92-105
38. *Nikitin A.A., Dyakov B.S.* Spatial structures of fronts and eddies of the Japan Sea in the 90-s by satellite data // *Proc. of CREAMS'2000 Int. Symp. Oceanography of the Japan Sea.* Editor: M.A. Danchenkov. Vladivostok. Dalnauka. 2001. P.260-263
39. *Isoda Y., Naganobu M., Watanabe H., Nukata K.* Horizontal and vertical structures of a warm eddy above the Yamato Rise // *Oceanogr. Research.* 1992. V. 1. N4. P. 141-151.

40. *Park Kyung-Ae, Chung Jong Yul, and Kim Kuh.* Sea surface temperature fronts in the East (Japan) Sea and temporal variations. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*. 2004. V. 31, L07304, doi: 10.1029/2004GL019424
41. *Данченков М.А.* Непериодические течения. Ч. VII. В кн. Японское море. Т.8, Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат. 2003. С. 313-326.
42. *Никитин А.А., Дьяков Б.С.* Структура фронтов и вихрей в западной части Японского моря. *Изв. ТИНРО*. 1998. Т. 124. С. 714-733.
43. *Talley L.D., Lobanov V.B., Tishchenko P.Ya. et al.* Hydrographic observation in the Japan/East Sea in winter, 2000, with some results from summer, 1999 // *Oceanography of the Japan Sea*. Ed. By Danchenkov M.A. Vladivostok: Dalnauka, 2001. P. 25-32.
44. *Moriwaki S. and Ogawa Y.* Hydrographic features of the "Bottom cold Water" on the continental shelf. *B. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.* 1988. N50. P. 25-47.
45. *Naganuma K. and Ichihashi M.* Monthly mean and standard variation of temperature at the surface, 50 m, 100 m and 200 m depth in the Japan Sea for thirty years 1961-1990. *Contr. Fish. Res. Japan Sea block*. 1993. V.26. 1993. P. 1-117.
46. *Дьяков Б.С., Никитин А.А.* Сезонная и межгодовая изменчивость структуры воды в зоне Полярного фронта Японского моря по данным судовой и спутниковой информации // *Известия ТИНРО*. 2001. Т. 128. С. 996-1019.
47. *Monthly Ocean Report*. October 2002. N. 118. P. 2-6
48. *Ванин Н.С.* Аномальные термические условия северо-западной части Японского моря осенью 2003 г. // *Известия ТИНРО*. Т. 138, 2004. С. 345-354.
49. *Kim C., Shin H.-R., Byun S.K.* Anticyclonic warm eddy in the southwestern part of the East Sea (Japan Sea). *Proc. CREAMS'94 Int. Symp.*, 24-26 Jan. 1994, Fukuoka, Japan, 1994. P. 119.
50. *Heung-Jae Lie, Sang-Kyung Dyun, and Cheol-Ho Cho.* Physical structure of eddies in the Southwestern East Sea. *The Journal of the Korea Society of Oceanography*. 1995. V. 30. N3. P. 170-183.