

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СИНОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ В РАЙОНЕ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2013 г. С. Ю. Ладыченко\*, В. Б. Лобанов

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток*

*\*E-mail: svemos@poi.dvo.ru*

Поступила в редакцию 14.08.2012 г.

В данной работе исследовались синоптические вихри в районе залива Петра Великого, расположенного в северо-западной части Японского моря. Были получены характеристики вихрей на основе данных NOAA/AVHRR в ИК-диапазоне за июль–октябрь 2000–2004 гг. Показано, что антициклонические вихри постоянно присутствуют в исследуемом районе. Они наблюдались на 85% безоблачных изображений. Нами были определены характеристики 43 из них. Диаметр вихрей варьирует от 20 до 110 км с наиболее повторяющимися значениями 20–60 км. Типичное время существования вихрей составляет от 3 до 30 сут. Однако некоторые вихри среднего размера (40–60 км) наблюдались более продолжительное время – до 40–60 суток, а крупные вихри (диаметром 60–110 км) – на протяжении 1–2 мес. При этом они перемещаются в юго-западном и южном направлениях вдоль континентального склона со скоростями 3–6 см/с. Отмечаются межгодовые различия в вихревой структуре вод, проявляющиеся в присутствии в отдельные годы одного крупного вихря, охватывающего большую часть залива (2000, 2002 и 2003 гг.), либо в формировании нескольких более мелких образований (2001 и 2004 гг.). Вихри содержат более теплые и менее соленые в сравнение с окружающими воды шельфового происхождения и переносят их в своем ядре на значительное расстояние. Таким образом, они являются элементом механизма формирования промежуточных вод Японского моря и играют важную роль в водообмене поперек шельфа, обеспечивая быструю вентиляцию прибрежной зоны и определяя изменчивость биологических процессов.

**Ключевые слова:** синоптические антициклонические вихри, инфракрасные спутниковые изображения, NOAA/AVHRR, Японское море, залив Петра Великого

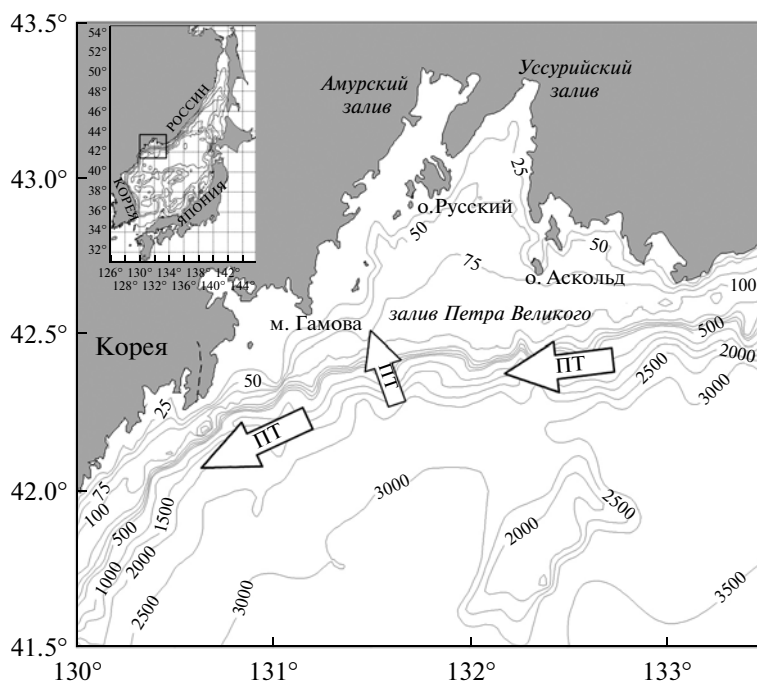
DOI: 10.7868/S0205961413030032

ВВЕДЕНИЕ

Залив Петра Великого расположен в северо-западной части Японского моря (рис. 1). Благодаря особенностям климатического режима и обширному шельфу, в заливе формируются воды, отличающиеся по своим характеристикам от вод прилегающей морской акватории (Зуенко, Юрасов, 1995; Данченков и др., 2003; Лучин и др., 2005). Водообмен залива с открытым морем имеет большое значение как для вентиляции вод залива, подвергающегося все возрастающей антропогенной нагрузке, очистке загрязненных вод прибрежной зоны, так и для формирования свойств водных масс самого моря. В частности, в период зимней термохалинной конвекции на шельфе залива формируются воды повышенной плотности, впоследствии стекающие вниз по склону и вентилирующие глубинные слои Японского моря (Lobanov et al., 2002; Talley et al., 2003). Формирование специфической водной массы в летний сезон, отличающейся пониженными значениями солености, также может играть важную роль в

формировании структуры водных масс Японского моря.

По сложившимся представлениям, циркуляция вод залива и прилегающей акватории в значительной степени определяется ветровым режимом, сгонно-нагонными явлениями и динамикой Приморского течения – потока вод, направленного на юго-запад вдоль континентального склона и проникающего в пределы залива (Леонов, 1960; Юрасов, Яричин, 1991; Японское море, 2003). Учитывая сложный рельеф дна, очертание побережья и изменчивость поля ветра можно ожидать существенную нестационарность динамики вод в этом районе, меандрирование течений и формирование вихрей синоптического масштаба. Действительно, присутствие вихревых структур вдоль побережья Приморья было показано в работах (Goncharenko, 1994; Гинзбург и др., 1998) на основе анализа спутниковых изображений в ИК-диапазоне. Характерный для исследуемого района муссонный климат умеренных широт предполагает значительную сезонную изменчи-



**Рис. 1.** Район исследований – залив Петра Великого и прилегающая акватория северо-западной части Японского моря (показаны изобаты в метрах). ПТ – Приморское течение.

вость циркуляции вод. Нестационарность течений усиливается в осенний период смены муссона и преобладания ветров западного и северо-западного направлений, под влиянием которых у юго-восточного побережья Приморья и в районе залива развивается апвеллинг (Гончаренко и др., 1993; Жабин и др., 1993; Зуенко, Надточий, 2004; Юрасов и др., 2007). В это время усиливается неустойчивость вдольсклонового потока и отмечается формирование системы антициклонических вихрей (Ладыченко, 2002). Было показано, что сравнительно крупные вихревые образования диаметром 40–80 км существуют в течение нескольких суток–недель, усиливая водообмен поперек шельфа, изменяя термохалинные и гидрохимические параметры вод и продукционные характеристики (Никитин и др., 2002; Звалинский и др., 2006; Лобанов и др., 2007). Однако их характеристики и особенности эволюции остаются неизученными.

В настоящей работе на основании материалов спутниковых ИК-изображений за летне-осенние периоды 2000–2004 гг. рассматриваются особенности синоптической динамики вод в районе залива Петра Великого, характеристики формирующихся здесь вихревых образований (типичные размеры, времена существования, траектории движения), условия формирования и эволюции. По данным специальных судовых съемок рассматривается термохалинная структура вод вихрей и их влияние на динамику вод в районе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемый район включает залив Петра Великого и прилегающую акваторию Японского моря, ограниченную приблизительно параллелью 42° с.ш., меридианом 133°30' в.д. и береговой чертой. Район исследований охватывает акваторию несколько большую, чем внешняя граница залива (проходящая по линии устье р. Туманная – м. Поворотный), так как вихри, центры которых располагаются за пределами шельфа, также оказывают влияние на динамику вод залива.

Для изучения вихрей были использованы спутниковые изображения в ИК-диапазоне, полученные в Межинститутском центре спутникового мониторинга ДВО РАН (Александрин, Александрин, 2007) со спутников серии NOAA. Рассматривались данные за летне-осенний период (июль–октябрь) 2000–2004 гг. В этот период контрасты температуры воды на поверхности моря максимальны, что благоприятствует визуализации особенностей, связанных с динамикой вод. Ежедневно принималось от двух до пяти изображений, охватывающих залив Петра Великого. Эта цифра варьировала в зависимости от количества доступных спутников и технических условий приема (табл. 1). Она значительно возросла в 2004 г. в связи с появлением на орбите новых спутников NOAA. Всего было получено 1661 изображение.

Однако из-за присутствия облачности значительная часть изображений не давала достаточной информации для анализа водной поверхности и не

**Таблица 1.** Анализ набора спутниковых изображений района залива Петра Великого за период июль–октябрь 2000–2004 гг.

Год	Месяц	Количество полученных изображений	Количество изображений, свободных от облачности	Количество изображений, свободных от облачности, %	Количество изображений с присутствием вихрей	Количество изображений с присутствием вихрей, %
2000	07	70	5	7	4	80
	08	60	2	3	0	0
	09	64	15	23	11	73
	10	71	27	38	22	81
2001	07	60	10	17	8	80
	08	74	19	26	19	100
	09	61	16	26	14	88
	10	66	29	44	27	93
2002	07	80	4	5	4	100
	08	67	16	24	16	100
	09	74	22	30	22	100
	10	83	26	31	18	69
2003	07	71	3	4	3	100
	08	69	13	19	13	100
	09	79	25	32	24	96
	10	84	42	50	33	79
2004	07	82	10	12	10	100
	08	149	28	19	19	68
	09	153	41	27	39	95
	10	144	80	56	64	80
Всего:		1661	433	26.2	370	85.4

использовалась для дальнейшего анализа. Всего было использовано около 433 информативных изображений, что составляет лишь 26% от общего количества принятых.

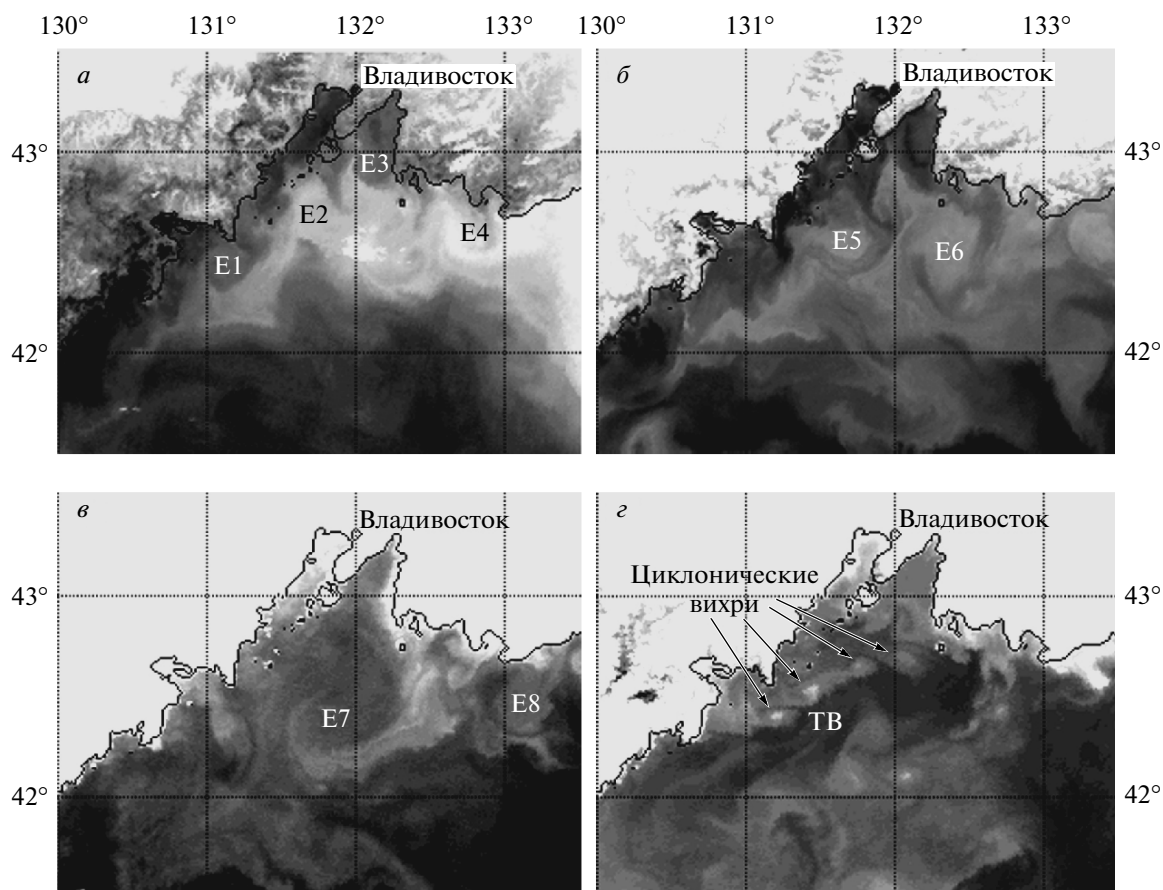
Облачность представляет собой значительную помеху для исследования данного района особенно в начале летнего периода. Изображения водной поверхности для июня практически отсутствуют, поэтому мы исключили этот месяц из анализа. В июле количество информативных изображений возрастает, но пока еще невелико (3–10 изображений с открытой водной поверхностью). Оно значительно возрастает к концу августа–октябрю, когда увеличивается повторяемость выхода в район сухой воздушной массы с континента. В этот период количество информативных изображений составляет 40–60%.

В табл. 1 приведено ежемесячное количество ИК-изображений, полученных над исследуемым районом, количество безоблачных изображений, использованных для последующего анализа, и количество изображений, на которых присутствуют вихревые структуры. Интересно отметить, что даже тогда, когда количество свободных от облачности изображений мало (июль–август),

относительное количество изображений, на которых наблюдаются вихри, достаточно велико. Частота присутствия вихрей велика на протяжении всего рассмотренного сезона июль–октябрь и изменяется от 69 до 100%. Всего из использованных 433 информативных изображений вихри наблюдались на 370, т.е. в 85% случаев. Это означает, что вихревые образования являются характерной и устойчивой особенностью динамики вод исследуемого района.

Вихревые образования выделялись по характерным структурам в поле температур поверхности океана (ТПО). Принимая во внимание ограничения исходной информации (пространственное разрешение около 1 км, помехи, связанные с туманом и слоистой облачностью), а также сложную конфигурацию вихрей, нами рассматривались только вихревые структуры размером более 20 км и наблюдающиеся на нескольких ИК-изображениях на протяжении не менее 2 сут. Размеры вихрей определялись по внешнему краю теплой области или его спиральной структуры, при этом мы полагали точность определения около 10 км.

Для изучения термохалинной структуры вод вихрей были использованы материалы судовых



**Рис. 2.** Синоптические вихри в районе залива Петра Великого на спутниковых ИК-изображениях: *а* – 23.07.2001 г.; *б* – 10.08.2001 г.; *в* – 21.09.2002 г.; *г* – 28.09.2001 г. (темный тон соответствует наиболее теплым водам, светлый – холодным). E1–E8 – антициклонические вихри; ТВ – вторжение теплых вод.

наблюдений, выполненных осенью 2000 г. в экспедиции на НИС “Профессор Гагаринский”, где гидрологические измерения выполнялись с помощью СТД-зонда Neil Brown МК-III.

### СИНОПТИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД НА ИК-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Несколько типичных изображений района залива Петра Великого приведено на рис. 2.

В летний период на шельфе залива и прилегающей части южного Приморья формируется относительно прогретая и распресненная водная масса (Зуенко, Юрасов, 1995; Данченков и др., 2003). Она хорошо выделяется по наиболее темному тону на ИК-изображениях рис. 2*а*. Воды Приморского течения, проходящего над склоном, в начале лета имеют более низкую температуру, чем воды шельфа и воды открытого моря, и хорошо выделяются на спутниковых изображениях как поток наиболее холодных вод (светлый тон). Поток меандрирует, на его границах видны струйные ответвления и вихревые структуры. С прибрежной стороны можно выделить несколько антицикло-

нических вихрей E1–E4. Их размеры сравнительно невелики и составляют 25–30 км. Заметно, что вдоль западной периферии вихрей в прибрежную зону поступают струи более холодных вод Приморского течения, и, наоборот, вдоль восточной периферии выносятся языки относительно теплых шельфовых вод. Контраст температуры между водами шельфа и Приморского течения сохраняется и в августе (рис. 2*б*). Видны два более крупных антициклонических вихря E5 и E6 (диаметр около 45–55 км). Как и на предыдущем изображении, с вихрями связано поступление холодных вод на шельф и вынос струй теплых вод в открытые районы моря. Проникновение морских вод в залив отмечается в двух местах – в центральной части и далее вдоль восточного побережья о. Русский, и в районе о-вов Римского-Корсакова к востоку от м. Гамова.

С началом охлаждения поверхности моря в сентябре и развитием прибрежного ветрового апвеллинга характер распределения ТПО меняется. Температура шельфовых вод понижается быстрее, и они имеют более светлый тон на ИК-изображениях. Присутствие крупного антицикло-

**Таблица 2.** Количество антициклонических вихрей, наблюдавшихся в районе залива Петра Великого в июле–октябре 2000–2004 гг.

Месяц/Год	2000	2001	2002	2003	2004	Всего
Июль	2	3	2	2	1	10
Август	—	4	3	3	3	13
Сентябрь	3	1	3	2	5	14
Октябрь	3	3	6	2	6	20
Всего за сезон	8	9	10	5	11	43

ческого вихря Е7, занимающего практически всю открытую часть залива, показано на рис. 2в. В данном случае, наоборот, антициклон определяет поступление в залив более теплых морских вод и вынос холодного языка вод зоны апвеллинга, сформированной у восточного побережья залива и в районе о. Аскольд. Поток вод Приморского течения в данном случае не выражен, и циркуляция вод на шельфе определяется антициклоническими вихрями. Другой, менее крупный, вихрь Е8 замечен вблизи побережья в восточной части района.

Как показывает анализ изображений, картина течений в осенний период может отличаться от классической схемы, предполагающей направленный на юго-запад поток вод Приморского течения. Рисунок 2г демонстрирует прямо противоположную ситуацию, когда вдоль кромки шельфа залива с юго-запада на северо-восток распространяется струя более теплых вод (ТВ). Вдоль северного края струи заметны цепочки сдвиговых вихрей циклонического знака. Они имеют сравнительно малые размеры с диаметром 10–20 км. Данная ситуация, отмечавшаяся в конце сентября 2001 г., радикально отличается от рассмотренных выше картин поля ТПО с присутствием одного или двух крупных антициклонических вихрей (рис. 2б, 2в). В данном случае крупных вихрей не наблюдалось, а доминировали мелкие вихревые образования диаметром 10–20 км, преимущественно циклонического знака.

Таким образом, анализ спутниковых изображений показывает, что вихри синоптического масштаба являются характерным элементом динамики вод в районе залива Петра Великого, однако их проявление различно и изменяется как на протяжении сезона, так и от года к году.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ

В подавляющем большинстве случаев наблюдавшиеся на ИК-изображениях вихри были антициклонами. На отдельных изображениях наблюдались и циклонические вихри (рис. 2г). Однако их размеры были, как правило, менее 20 км (только в отдельных случаях достигали 30–50 км) и продолжительность наблюдения редко превышала не-

сколько суток. По имеющейся в нашем распоряжении спутниковой информации не удалось уверенно проследить эволюцию циклонических вихрей и в настоящей работе они не рассматриваются. Однако они, безусловно, присутствуют, хотя и не являются для данного района доминирующими. Несколько примеров циклонических вихрей в заливе приведены в работе (Дубина, Митник, 2008) на основании спутниковых данных более высокого пространственного разрешения.

В рассмотренные летне-осенние периоды всего было идентифицировано 43 антициклонических вихря (табл. 2). Присутствие вихрей отмечалось в каждом из рассмотренных месяцев, за исключением августа 2000 г. (возможная причина — недостаточное количество изображений (табл. 1)). Количество вихрей в районе изменяется как внутри сезона, так и от года к году. Обычно в июле–августе можно обнаружить два–четыре вихря и до пяти–шести в сентябре–октябре (табл. 2). С одной стороны, увеличение количества вихрей от лета к осени связано с увеличением доступной информации (больше безоблачных изображений, сильнее контрасты ТПО), а с другой стороны, период смены муссона характерен увеличением повторяемости ветров западного направления, благоприятных развитию апвеллинга в прибрежной зоне Приморья и активизации синоптической динамики вод.

Можно выделить несколько ситуаций, типичных для осеннего сезона. Одна из них, — когда генерируется один крупный вихрь диаметром 80–110 км, занимающий большую часть залива (рис. 2в). Такая ситуация отмечалась в сентябре–октябре 2000, 2002 и 2003 гг. В другие годы (2001 и 2004) мы не наблюдали формирования крупных вихрей. Напротив, в заливе наблюдалось несколько вихрей меньшего диаметра (20–50 км), как, например, показано на рис. 2а, 2б. В этих случаях поток Приморского течения выглядел более сильным и следовал вдоль континентального склона.

На рис. 3 показаны характерные размеры и время существования вихрей. В качестве размера здесь взята длина большой оси аппроксимирующего вихрь эллипса. При этом размер вихря определялся один раз на протяжении его эволюции в тот период, когда он был максимальным. Под временем су-

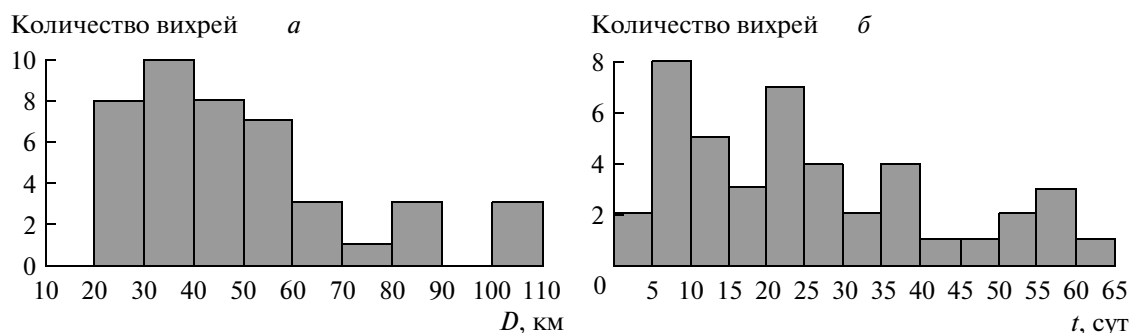


Рис. 3. Параметры вихрей: *a* – характерные горизонтальные размеры; *b* – время существования.

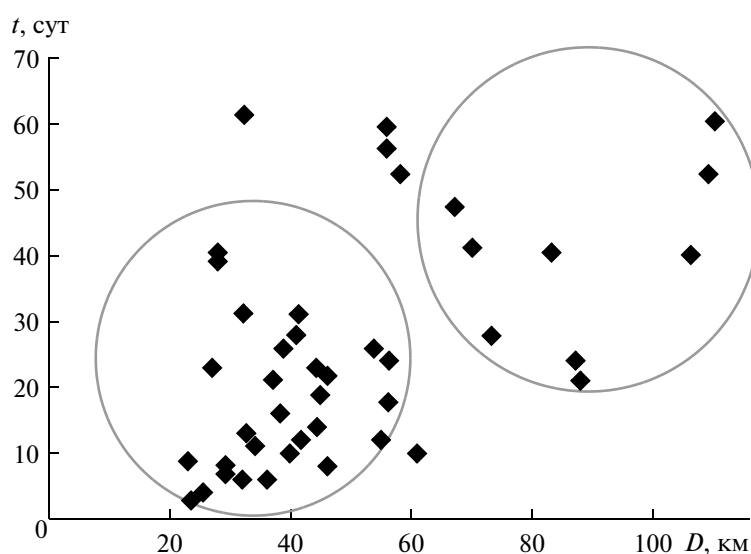


Рис. 4. Зависимость продолжительности наблюдения вихря от его диаметра.

существования подразумевается продолжительность наблюдения вихря на ИК-изображениях, которая во многих случаях ограничивалась облачностью и не всегда завершалась естественным разрушением вихря. Рисунок 3а показывает, что размеры вихрей варьируют от 20 до 110 км, с наиболее повторяющимися значениями 20–60 км. Менее часто наблюдаются вихри размером 60–110 км. Продолжительность существования вихрей колеблется от нескольких дней до двух месяцев (рис. 3б). При этом по наибольшей частоте наблюдений можно выделить три группы вихрей – короткоживущие (5–15 сут), средней продолжительности (20–40 сут) и долгоживущие (50–65 сут). Мы попытались найти зависимость продолжительности существования вихря от его размера (рис. 4). Однако, несмотря на некоторую тенденцию большей продолжительности жизни крупных вихрей, есть довольно много случаев, когда вихри среднего размера (30–60 км) наблюдались на протяжении 40–60 сут. Приведенная диаграмма также показывает, что большинство мелких вихрей (диаметром

20–50 км) наблюдалось на протяжении не более месяца, в то время как большинство более крупных вихрей (более 60 км) наблюдалось более 20 сут, и все вихри размером 100 км и более наблюдались более 40 сут. С другой стороны, можно отметить, что все короткоживущие вихри (менее 20 сут) имели сравнительно малый размер и никогда не превышали 60 км.

#### ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВИХРЕЙ

В связи с пропусками в рядах спутниковых изображений из-за облачности в большинстве случаев проследить эволюцию вихрей затруднительно. В случае вихрей малого размера обычно удавалось получить лишь короткую серию изображений в нескольких днях. Но для крупных вихрей такие серии могут составлять несколько недель и позволяют проследить их развитие. Анализ отдельных случаев показывает, что вихри формируются в центральной или восточной частях исследуемого района. Возможно перемещение в

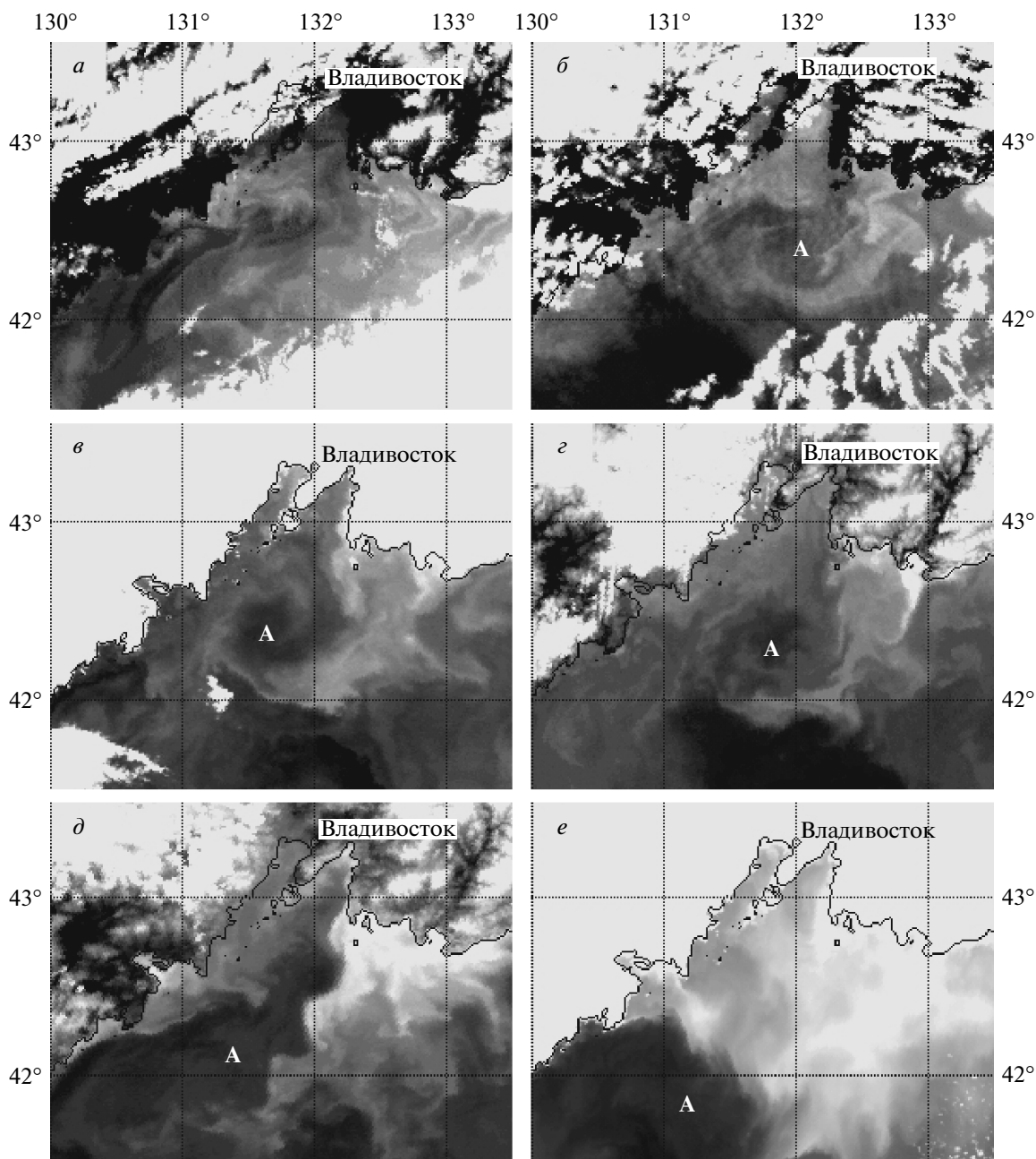


Рис. 5. Формирование и эволюция антициклонического вихря А в заливе Петра Великого осенью 2003 г. Спутниковые ИК-изображения: а – 02.09; б – 10.09; в – 19.09; г – 23.09; д – 06.10; е – 23.10.

район вихрей с востока, однако, как правило, они стационарируют и значительно трансформируются в восточной части района. Практически происходит формирование новых вихрей.

Как правило, центры крупных вихрей располагаются над областью континентального склона. В дальнейшем они медленно перемещаются на юго-запад. Это совпадает с отмеченными ранее случаями (Ладыченко, 2002; Лобанов и др., 2007).

На рис. 5 показан процесс формирования крупного антициклонического вихря А в сентябре–ок-

тябре 2003 г. Формированию вихря предшествовал мощный заток теплых вод (темный тон на ИК-изображении) в район залива Петра Великого с юго-запада. Этот поток зарегистрирован на нескольких изображениях за конец августа–начало сентября (рис. 5а). Подобный случай также наблюдался в сентябре 2001 г. (рис. 2г). В дальнейшем поток потерял устойчивость, и произошло формирование крупного вихря А. Вихрь отчетливо виден на изображении за 10 сентября как изолированная область теплой воды к юго-

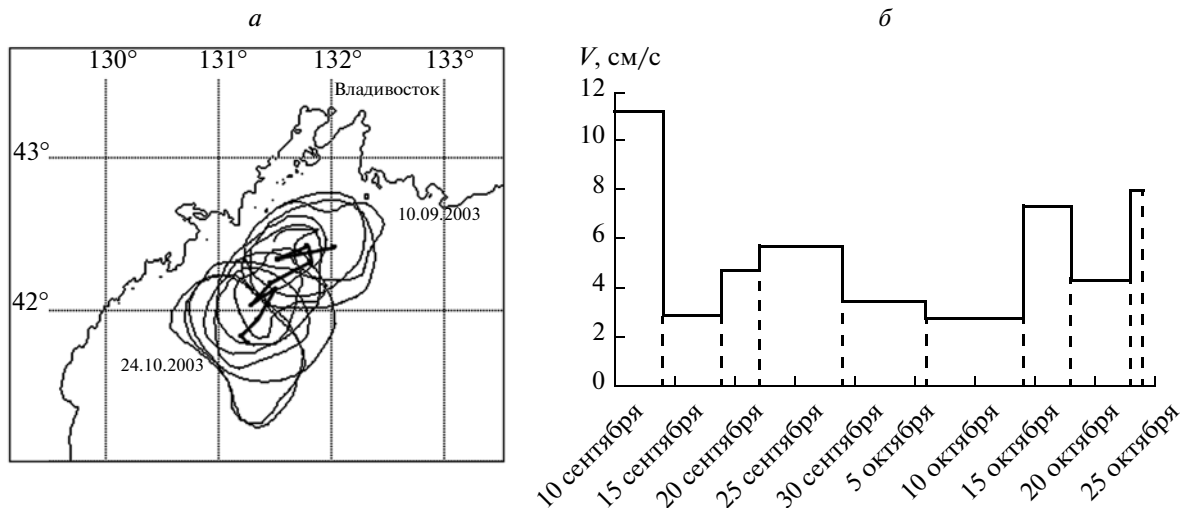


Рис. 6. а – Схема эволюции антициклонического вихря А в районе залива Петра Великого осенью 2003 г. (траектория движения центра вихря обозначена ломаной линией); б – скорость его перемещения.

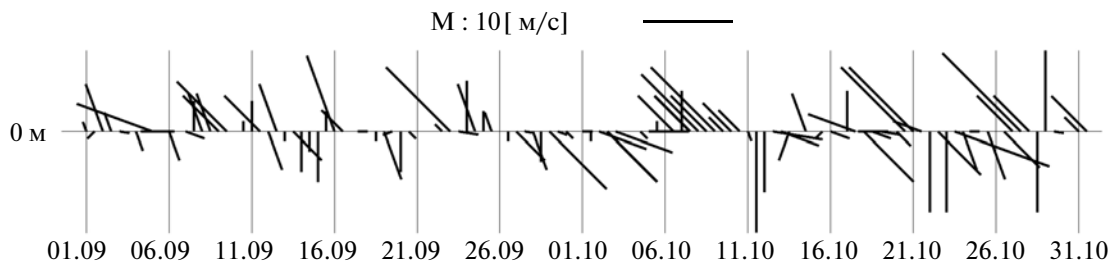


Рис. 7. Скорость ветра во Владивостоке в период сентябрь–октябрь 2003 г.

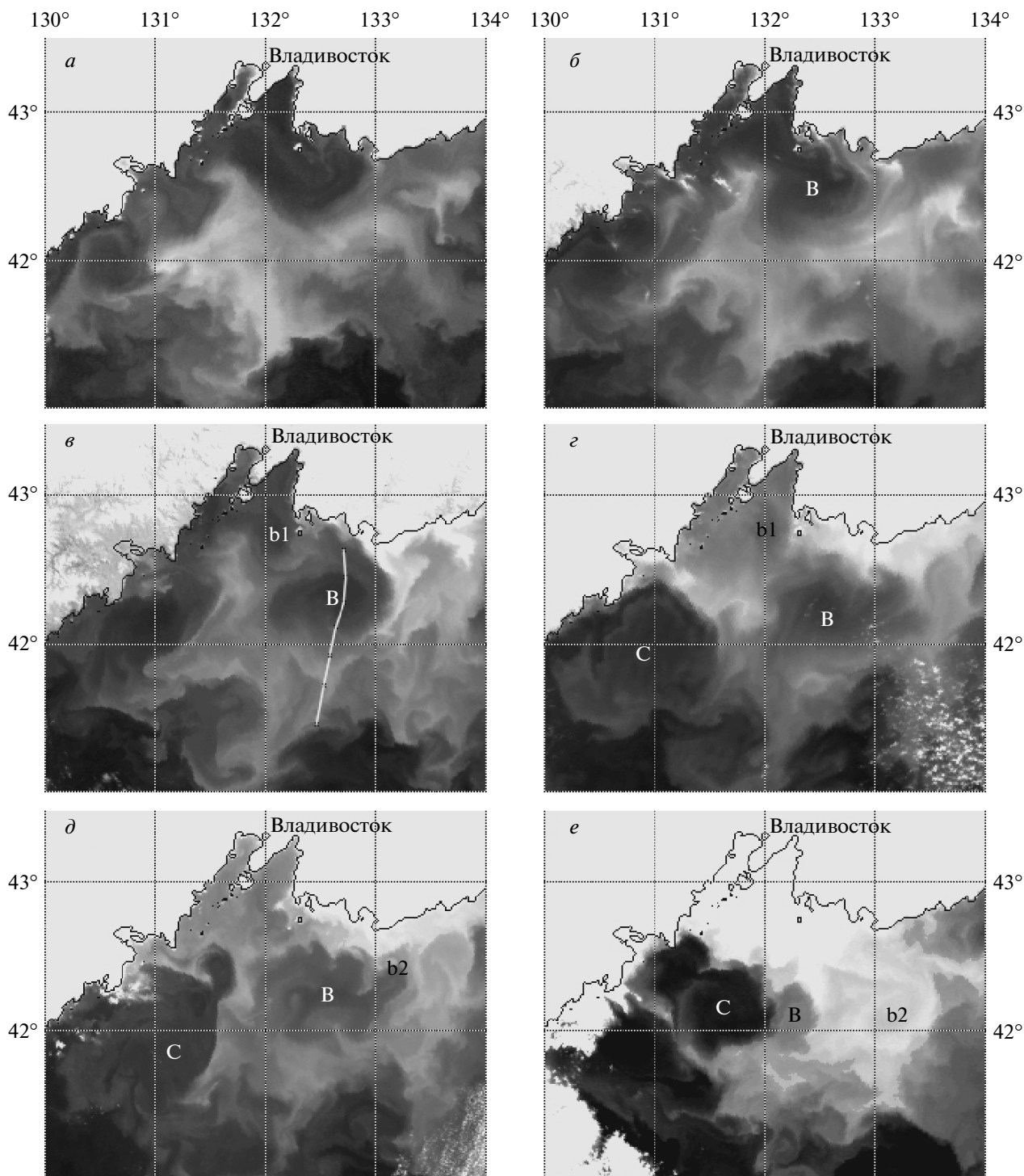
западу от о. Аскольда (рис. 5б–5г). Затем он смещался на юго-запад, и к 6 октября достиг северо-западной ветви субарктического фронта (рис. 5д), а к концу месяца окончательно слился с областью теплых вод около Кореи (рис. 5е). На рис. 6 показаны: схема перемещения вихря (рис. 6а) и скорость его движения (рис. 6б). За период наблюдений (около 1.5 мес.) вихрь переместился на юго-запад на расстояние около 100 км. Скорость его движения варьировала от 2.6 до 11.2 см/с, при типичных значениях 3–6 см/с, что совпадает с оценками скоростей дрейфа синоптических вихрей в северо-западной части Японского моря (Лобанов и др., 2007).

Мы сравнили траекторию дрейфа вихря с данными о ветре на метеостанции Владивосток (рис. 7). Хотя не отмечается устойчивой связи между характером ветра и движением вихря, можно предположить ветровое воздействие на особенности его траектории. Например, преобладание восточных и юго-восточных ветров в первой половине сентября могло вызвать неустойчивость потока теплых вод, направленного вдоль склона на восток, формирование вихря А и его быстрый дрейф на запад (рис. 5а–5в, рис. 6). Ана-

логичным образом воздействие сильного ветра северных направлений на протяжении второй половины сентября и в октябре повлияло на движение вихря на юг (рис. 5г–5д, рис. 6). Обратное движение вихря (на северо-восток), отмечавшееся между 6 и 14 октября (рис. 6а), может быть связано с сильным южным ветром в период 6–11 октября (рис. 7).

Другой крупный антициклонический вихрь В, наблюдавшийся в октябре–ноябре 2000 г., имел иную схему формирования и эволюции (рис. 8). Спутниковые данные показывают обширную область теплых вод, сформированную на шельфе залива к середине октября (рис. 8а), и последующее ее разделение на два антициклонических вихря, завершившееся к 21 октября (рис. 8б). Один из них – крупный антициклон В диаметром около 110 км, а другой – более мелкий антициклонический вихрь, расположенный на шельфе к северо-западу от него, b1 (рис. 8в, 8г). После формирования вихрь В практически не менял своего положения более трех недель, а к 12 ноября форма вихря заметно вытянулась (рис. 8д), и к 26 ноября от него отделился антициклон b2 диаметром около 55 км (рис. 8е). В дальнейшем вихрь В со-





**Рис. 8.** Формирование и эволюция антициклонического вихря В в заливе Петра Великого осенью 2000 г. Спутниковые ИК-изображения: *a* – 15.10; *б* – 18.10; *в* – 27.10; *г* – 08.11; *д* – 12.11; *е* – 28.11. Белой линией показано положение судового разреза, представленного на рис. 9.

единился с более крупным вихрем С, расположенным западнее (рис. 8е). Эволюцию вихря b2 проследить не удалось из-за ослабления контрастов ТПО в результате осеннего охлаждения поверхности моря.

#### СТРУКТУРА ВОДНЫХ МАСС ВИХРЕЙ

Для исследования структуры водных масс вихрей был выполнен гидрологический разрез через область антициклонического вихря В 02 ноября 2000 г. в экспедиции на НИС «Профессор Гагарин»

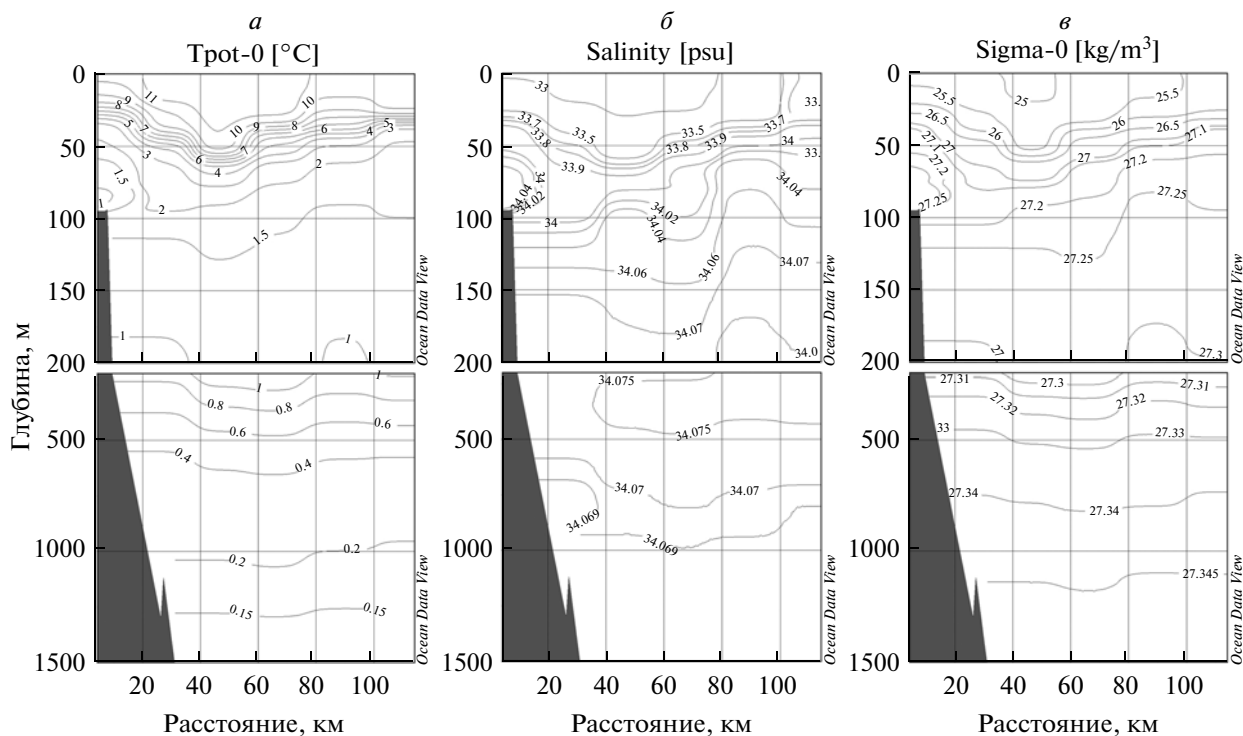


Рис. 9. Вертикальное распределение гидрологических параметров на разрезе через вихрь В по данным съемки НИС “Профессор Гагаринский” от 02.11.2000 г.: а — температура; б — соленость; в — условная удельная плотность воды. Участок шельфа расположен слева.

ский”. Положение разреза показано на рис. 8в, а вертикальное распределение температуры, солености и условной плотности вод приведено на рис. 9. Прогиб изолиний, соответствующий антициклонической структуре, прослеживается до глубины более 1000 м. Сезонный и основной термоклин заглублены в центре вихря на 70–90 м (рис. 9а). В верхнем слое вихрь содержит более теплые в сравнении с окружающими воды (11–12°C), которые определяют его вид на ИК-изображении. В то же время эти воды имеют экстремально низкую соленость, характерную для шельфовых вод (32.9–33.0) (рис. 9б), что указывает на их происхождение из залива Петра Великого.

Интересной особенностью структуры вихря является линза относительно холодных вод высокой солености (<1.5°C и >34.02‰), наблюдающаяся в северной части вихря на глубинах 50–90 м. Эта вода располагается на шельфе, и ее происхождение можно объяснить апвеллингом и адвекцией по периферии вихря морских вод с глубин 150–180 м. Этот факт подтверждает предполагавшийся выше механизм адвекции морских вод на шельф за счет вихрей не только в поверхностном слое, но и на глубинах, что важно для вентиляции прибрежной зоны.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ спутниковых изображений показывает, что вихри синоптического масштаба являются существенным элементом динамики и структуры вод в районе залива Петра Великого в летне-осенний период. Вихри наблюдались на 370 спутниковых ИК-изображениях из 442 отобранных безоблачных изображений за период июль–октябрь 2000–2004 гг. Это означает, что вихри присутствовали в 85% случаев. Среди них наиболее часто наблюдающимися и наиболее устойчивыми являются антициклонические вихри. Обычно на протяжении месяца в районе наблюдаются 2–3 вихря в июле–августе и до 5–6 вихрей в сентябре–октябре. Увеличение числа вихрей от лета к осени связано как с улучшением условий наблюдений (уменьшение облачности, снижение влажности, усиление контрастов ТПО), так и с усилением нестационарности циркуляции вод в переходный период между летним и зимним муссоном, с частыми западными ветрами, благоприятствующими формированию прибрежного апвеллинга и активизации синоптической динамики вод.

В рассмотренные летне-осенние периоды всего было идентифицировано 43 антициклонических вихря. Их размеры были различны и изменялись от 20 до 110 км. Наиболее часто наблюдались небольшие вихри диаметром 20–60 км. Для них типично короткое время существования (3–30 сут). Однако некоторые вихри среднего

размера (40–60 км) наблюдались более продолжительное время – до 40–60 сут. Крупные вихри (более 60 км) наблюдались довольно долго – в течение 1–2 мес., и ни в одном случае не менее 20 сут. В связи с наблюдаемыми различиями в размерах и времени жизни можно предположить различное происхождение вихрей. Небольшие неустойчивые образования обычно наблюдаются летом и связаны с зонами сдвига скорости между потоком Приморского течения и шельфовыми водами. Эти вихри наблюдаются часто и имеют короткое время жизни. Крупные вихри, центры которых, как правило, располагаются над континентальным склоном, очевидно, связаны с топографическими волнами, распространяющимися вдоль отвесного склона, а также меандрированием и неустойчивостью потоков в области Приморского и Северо-Корейского течений.

Изменчивость ветра влияет на формирование и эволюцию вихрей. Пример формирования крупного вихря А в сентябре 2003 г. (рис. 5) указывает на связь с потоком теплых вод северо-восточного направления, распространявшихся в заливе Петра Великого от побережья Кореи. Это противоречит традиционным представлениям о циркуляции вод в районе, предполагающим юго-западный перенос вод вдоль кромки шельфа Приморским течением (Юрасов, Яричин, 1991; Данченков, 2003). Однако такая ситуация не является исключительной. Аналогичная картина наблюдалась по нашим данным и в 2001 г. (рис. 2з). Обратный (направленный на северо-восток) поток вод у северного побережья Кореи в сентябре-октябре был также обнаружен по дрейфу поверхностных буев (Lee, Niiler, 2005) и получен в численных моделях циркуляции (Yoon et al., 2005; Trusenikova et al., 2009). По-видимому, его проявление связано с сезонной сменой характера циркуляции в период смены муссонных ветров. Проникновение этих вод в залив и неустойчивость потока приводит к формированию крупных антициклонических вихрей.

Другая картина формирования крупного вихря в заливе наблюдалась в октябре 2000 г. (рис. 8). В этом случае механизм формирования был связан с ростом меандра шельфового фронта и Приморского течения и выбросом части шельфовых вод, аккумулированных в заливе за летний сезон. Вихрь располагался восточнее, чем в других случаях.

Формирование крупных антициклонических вихрей (диаметром 80–100 км) в районе залива происходит не каждый год. Наши данные указывают, что они формировались осенью 2000, 2002 и 2003 гг. (рис. 2в; 5в; 8в), но не наблюдались в 2001 и 2004 гг., когда, напротив, в заливе отмечалось частое формирование большого количества мелких вихрей (рис. 2б). Это позволяет предположить две типичные моды динамики вод и характера поля ТПО в районе. В случае, когда один крупный вихрь занимает большую часть залива, Примор-

ское течение не выражено, в то время как в случае нескольких более мелких вихрей поток течения более сильный и меандрирующий над областью склона. Тогда можно предположить, что проявление той или иной моды связано с изменчивостью крупномасштабной циркуляции северной части Японского моря (Trusenikova et al., 2009), что требует дальнейшего исследования.

После формирования вихри перемещаются под воздействием фоновых течений и ветра. Вихри, сформировавшиеся в северо-восточной части залива, в большинстве случаев стационарируют либо дрейфуют на юго-запад, где они достигают северо-западной ветви субарктического фронта и сливаются с более теплыми водами. Вихри, образованные на юго-западе залива, также перемещаются на юго-запад и, по отдельным наблюдениям, – на восток. Скорости перемещения вихрей составляют 3–6 см/с. Небольшие вихри прослеживаются всего несколько дней и обычно исчезают после прохождения сильных атмосферных возмущений, с одной стороны, препятствующих наблюдению вихрей из-за облачности, а с другой, – по-видимому, разрушающих вихри в результате перестройки поля ТПО под ветровым воздействием. Крупные вихри, формирующиеся осенью, наблюдаются в течение 1–2 мес., перемещаясь на юго-запад на расстояние около 100 км и более. Особенности их траектории можно объяснить характером сезонных изменений поля ветра и крупномасштабной циркуляции вод. Преобладание сильных северо-западных ветров осенью усиливает апвеллинг у восточного побережья залива (Гончаренко и др., 1993) и приводит к развитию циклонического круговорота к юго-востоку от залива (Yoon et al., 2005), что заставляет вихри перемещаться дальше на юг.

Гидрологические наблюдения показывают, что вихри содержат более теплые и менее соленые в сравнении с окружающими воды шельфового происхождения. После формирования они переносят эти захваченные воды на значительное расстояние в область субарктического фронта. Таким образом, перенос и последующая субдукция вод низкой солености вихрями являются важной составляющей процесса формирования промежуточной водной массы Японского моря (Kim, Kim, 1999; Talley et al., 2006) и требуют дальнейшего изучения.

Другая важная роль вихрей, очевидно, состоит в интенсификации водообмена поперек шельфа. Спутниковые изображения показывают, что в результате формирования как крупных, так и сравнительно небольших вихрей вблизи побережья возникают интрузии морских вод в прибрежную зону и вынос шельфовых вод в море. Отдельные интрузии проникают глубоко внутрь залива, обеспечивая быструю вентиляцию прибрежной зоны. При этом, как следует из рассмотренных гидрологических данных (рис. 9), интрузии раз-

виваются не только в поверхностном слое, но и на глубинах.

Еще один механизм воздействия вихрей на локальные особенности структуры вод связан с генерацией областей апвеллинга на периферии вихрей, обращенной к берегу, за счет дивергенции поверхностных вод при расположении вихря вблизи побережья. Такие участки холодных вод, поднимающихся с подповерхностных горизонтов, хорошо заметны на приведенных изображениях (например, рис. 2в; 5в; 8в). В дальнейшем струи холодных вод выносятся из прибрежной зоны по периферии вихрей. При этом чем дальше вихрь располагается у побережья, тем более интенсивно развивается апвеллинг.

Указанные выше особенности подтверждают важную роль вихревой динамики в процессах водообмена и перемешивания вод в исследуемом районе. Вместе с тем они должны также влиять и на продукционные процессы и распределение биологических характеристик, так как с динамикой вихрей связано изменение стратификации, течений и распределение биогенных элементов на шельфе и в прилегающей части моря. Эффективность водообмена шельфа и глубокого моря зависит от интенсивности вихрей, их количества и продолжительности воздействия и может изменяться от года к году.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные ряды спутниковых ИК-изображений и результаты судовых гидрологических измерений за летне-осенний (июль—октябрь) период 2000—2004 гг. показывают регулярное присутствие синоптических вихрей в районе залива Петра Великого. Вихри наблюдались на 85% безоблачных изображений, отобранных для анализа. Однако структура вихрей и их характеристики изменяются как на протяжении сезона, так и от года к году. Наиболее интенсивное вихреобразование отмечается в начале осени. При этом наиболее часто наблюдающимися и наиболее устойчивыми являются антициклонические вихри. Нами определены характеристики 43 из них. Диаметр вихрей варьирует от 20 до 110 км, с наиболее повторяющимися значениями 20—60 км. Эти вихри связаны с зонами сдвига скорости между потоком Приморского течения и шельфовыми водами. Для них типично короткое время существования (3—30 сут). Некоторые вихри среднего размера (40—60 км) наблюдались более продолжительное время — до 40—60 сут. Крупные вихри (диаметром 60—110 км) наблюдаются довольно долго — в течение 1—2 мес. — и при этом перемещаются в юго-западном и южном направлениях вдоль континентального склона со скоростями 3—6 см/с. Их формирование, очевидно, связано с топографическими волнами, а также неустойчивостью потоков в области Приморского и Северо-Корей-

ского течений. Изменчивость поля ветра также оказывает влияние на формирование и эволюцию вихрей.

Отмечаются межгодовые различия в вихревой структуре вод, проявляющиеся в присутствии в отдельные годы одного крупного вихря, охватывающего большую часть залива (2000, 2002 и 2003 гг.), либо в формировании нескольких более мелких образований (2001 и 2004 гг.), что, очевидно, связано с изменчивостью крупномасштабной циркуляции северного циклонического круговорота Японского моря.

Ядра вихрей содержат более теплые и менее соленые в сравнении с окружающими воды шельфового происхождения. После формирования они переносят эти захваченные воды на значительное расстояние (более 100 км). Таким образом, перенос и последующая субдукция вод низкой солености вихрями являются важной составляющей процесса формирования промежуточной водной массы Японского моря.

С динамикой вихрей связана интенсификация водообмена поперек шельфа, обусловленная развитием прибрежного апвеллинга, вихревой адвекцией морских вод на шельф и выносом струй шельфовых вод в море вдоль периферии вихрей. Эти процессы обеспечивают быструю вентиляцию прибрежной зоны, а также определяют изменчивость биологических процессов.

Таким образом, синоптические вихри являются важным элементом динамики вод в районе залива Петра Великого, определяющим быстрые короткопериодные изменения не только полей физических, но и биологических характеристик. Вместе с тем, отмеченные межгодовые изменения структуры вихрей и других особенностей их динамики соответственно должны приводить к межгодовым вариациям гидрологического режима, условий вентиляции шельфа и продукционных характеристик прибрежных районов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрин А.И., Александрина М.Г.* Спутниковое информационное обеспечение мониторинга океана на Дальнем Востоке // Дальневосточные моря. Т. 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 552—573.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г.* Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буйев) // Исслед. Земли из космоса. 1998. С. 66—83.
- Гончаренко И.А., Федоряков В.Г., Лазарюк А.Ю., Пономарев В.И.* Тематическая обработка данных AVHRR на примере изучения прибрежного апвеллинга // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 2. С. 97—107.
- Данченков М.А., Фельдман К.Л., Файман П.А.* Температура и соленость вод залива Петра Великого // Гидрометеорология и экология Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2003. С. 10—25.
- Дубина В.А., Митник Л.М.* Мезомасштабные океанографические явления в заливе Петра Великого // Со-

временные проблемы окружающей среды залива Петра Великого. М: ГЕОС, 2008. С. 356–398.

Жабин И.А., Грамм-Осипова О.Л., Юрасов Г.И. Ветровой апвеллинг у северо-западного побережья Японского моря // Метеорология и гидрология. 1993. № 10. С. 82–86.

Звалинский В.И., Лобанов, В.Б., Захарков С.П., Тищенко П.Я. Хлорофилл, замедленная флуоресценция и первичная продукция в северо-западной части Японского моря осенью 2000 г. // Океанология. 2006. Т. 46. № 1. С. 27–37.

Зуенко Ю.И., Надточий В.В. Исследование влияния апвеллинга на состав и обилие мезопланктона в прибрежной зоне Японского моря // Океанология. 2004. № 4. С. 561–569.

Зуенко Ю.И., Юрасов Г.И. Водные массы северо-западной части Японского моря // Метеорология и гидрология. 1995. № 8. С. 50–57.

Ладыченко С.Ю. Изменение термической структуры поверхностных вод у побережья Приморья в осенний период 2000 года // Океанологические исследования: Матер. конф. молодых ученых ТОИ ДВО РАН. 27–30 ноября 2001 г. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 75–83.

Леонов А.К. Японское море // Региональная океанография. М.: Гидрометеиздат, 1960. С. 292–463.

Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салок А.Н., Тищенко П.Я., Тэлли Л.Д. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря. Т. 1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450–473.

Лучин В.А., Тихомирова Е.А., Круц А.А. Океанографический режим вод залива Петра Великого // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 140. С. 118–129.

Никитин А.А., Лобанов В.Б., Данченков М.А. Возможные пути переноса теплых субтропических вод в район Дальневосточного морского заповедника // Изв. ТИНРО. 2002. Т. 131. С. 41–53.

Юрасов Г.И., Ванин Н.С., Рудых Н.И. Особенности гидрологического режима зал. Петра Великого в осенне-зимний период // Изв. ТИНРО. 2007. Т. 148. С. 211–220.

Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: Дальнаука, 1991. 176 с.

Японское море. Гидрометеорологические условия // Проект “Моря”. Т. 8. Вып. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 398 с.

Danchenkov M.A., Aubrey D.G., Feldman K.I. Oceanography of the area close to the Tumannaya river mouth (the Japan Sea) // Pacific Oceanogr. 2003. V. 1. № 1. P. 61–69.

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.

Kim Y.-G., Kim K. Intermediate waters in the East/Japan Sea // J. Oceanogr. 1999. V. 55. № 2. P. 123–132.

Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 5. № 11–13. P. 1547–1563.

Lobanov V., Salyuk A., Ponomarev V., Talley L., Kim K., Kim K.-R., Tishchenko P., Nedashkovskiy A., Kim G.-B., Sagalaev S. Renewal of bottom water in the Japan/East Sea // Proc. 17th Int. Symp. Okhotsk Sea and Sea Ice. 24–28 February 2002. Mombetsu, Japan. 2002. P. 31–36.

Talley L.D., Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.Y., Zhabin I.A., Riser S. Deep convection and brine rejection in the Japan Sea // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. № 4. P. 8.1–8.4.

Talley L.D., Min D.-H., Lobanov V.B., Luchin V.A., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Shcherbina A.Y., Tishchenko P.Y., Zhabin I.A. Japan/East Sea water masses and their relation to the sea's circulation // Oceanography. 2006. V. 19. № 3. P. 32–49.

Trusenkova O., Lobanov V., Kaplunen D. Dynamically induced anomalies of the Japan/East Sea surface temperature // Ocean and Polar Res. 2009. V. 31. № 1. P. 11–29.

Yoon J.H., Abe K., Ogata T., Wakamatsu Y. The effects of wind-stress curl on the Japan/East Sea circulation // Deep-Sea Res. II. 2005. V. 52. № 11–13. P. 1827–1844.

## Mesoscale Eddies in the Area of Peter the Great Bay on Satellite Data

S. Yu. Ladychenko, V. B. Lobanov

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

The paper presents analysis of mesoscale eddies in the Peter the Great Bay and adjacent area of the north-western Japan Sea. Their characteristics are obtained on the base of satellite (NOAA/AVHRR) infrared images for July–October period of 2000–2004. It is shown that anticyclonic eddies are persistent feature of the studied area. They were identified on 85% of available cloud free images. Characteristics of 43 anticyclonic eddies were determined. Their diameters vary from 20 to 110 km, with more frequently occurred sizes of 20–30 km. Typical eddies life-time vary from 3 to 30 days. However some medium size vortices (40–60 km) have been observed more longer – up to 40–60 days, and large eddies (60–110 km in diameter) – up to 1–2 months. The eddies drift southwestward and westward along continental slope with typical speed of 3–6 cm/s. There is inter-annual variability of mesoscale water pattern in the studied area with presence of a large single eddy occupying major part of the bay in some years (2000, 2002 and 2003) or in formation of a few smaller vortices (2001 and 2004). The eddies contain warm and less saline shelf water in their cores and transport it for quite a long distance. Thus they are essential element of the process of the Japan Sea intermediate low salinity water mass formation. Furthermore the eddies play important role in cross shelf water exchange provided rapid ventilation of coastal zone and determined variability of biological processes.

**Keywords:** mesoscale anticyclonic eddies, infrared satellite images, NOAA/AVHRR, Japan Sea, Peter the Great Bay