

Моделирование циркуляции синоптического масштаба в северо-западной части Японского моря

На основе численного моделирования циркуляции, анализа спутниковых ИК-изображений и данных дрейфующих буев *Argo* исследуются особенности циркуляции синоптического масштаба в северо-западной части Японского моря. Используется квазиизопикническая модель циркуляции океана, разработанная Н.Б. Шапиро и Э.Н. Михайловой в МГИ НАН Украины. Определяются особенности образования и эволюции системы вихрей и струйных течений в районах шельфа, материкового склона и прилегающей части глубокого моря.

Ключевые слова: Японское море, численное моделирование, циркуляция, синоптические вихри, субсиноптические вихри, спутниковые данные, дрейфующие буи *Argo*, бароклинная неустойчивость над крутым континентальным склоном.

Введение

Вихревые структуры и струйные течения синоптического масштаба играют существенную роль в процессах перемешивания и переноса [1 – 3], обмена теплом, солью, биогенными элементами, другими растворенными и взвешенными веществами между водами шельфа и глубокого моря. Достигая максимума в спектре кинетической энергии среди разномасштабных движений в океане, циркуляция синоптического масштаба в значительной мере обуславливает гидрохимические и биологические процессы в морской среде. Как в Черном [1, 4, 5], так и в Японском [6 – 9] море наблюдаются вихревые структуры синоптического масштаба [3], наиболее заметными из которых являются антициклонические вихри и термические фронты струйных течений, хорошо выраженные на спутниковых изображениях и океанографических разрезах. Натурные наблюдения антициклонических вихрей, струйных течений и фронтов Черного моря активно проводились в совместных исследованиях МГИ НАН Украины и ИО им. П.П. Ширшова РАН [1, 4]. Особенности аналогичных динамических структур в Японском море, главным образом в его северо-западном субарктическом районе, в последние два десятилетия изучались совместно с зарубежными коллегами в ТОИ ДВО РАН, ДВНИГМИ и ТИНРО на основе анализа данных дистанционных наблюдений [6 – 9] и океанографических съемок [8, 9], а также численного моделирования [2, 3].

В отличие от предшествующих работ основная цель данного исследования – показать на основе численного моделирования и анализа данных наблюдений особенности формирования и эволюции разномасштабных вихревых структур (как антициклонических, так и циклонических) на шельфе Приморья, над континентальным склоном Японской котловины и в глубокой ее части. Используются спутниковые наблюдения, данные буев *Argo*, дрейфующих на глубинах от 500 до 800 дбар, и вариант квазиизопикнической мо-

© В.И. Пономарев, П.А. Файман, И.В. Машкина, В.А. Дубина, 2013

дели циркуляции моря, разработанной в МГИ НАН Украины [10], позволяющий моделировать синоптическую вихревую динамику. Используемая численная модель применялась ранее для исследования изменчивости крупномасштабной циркуляции Черного [10] и Японского [11, 12] морей.

В данной работе наибольшее внимание уделяется исследованию условий образования и эволюции вихрей синоптического масштаба, определению зависимости размеров вихрей и скорости их перемещения от условий вертикальной стратификации, топографии дна шельфа, материкового склона и глубокой части Японской котловины. Результаты численных экспериментов для верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) сопоставляются с данными наблюдений в ИК-диапазоне с различных спутников (*NOAA, Terra, Aqua, Landsat*), для глубинного слоя – с результатами измерений вертикальных профилей температуры и солености, а также оценок траекторий и скорости дрейфа буев *Argo*.

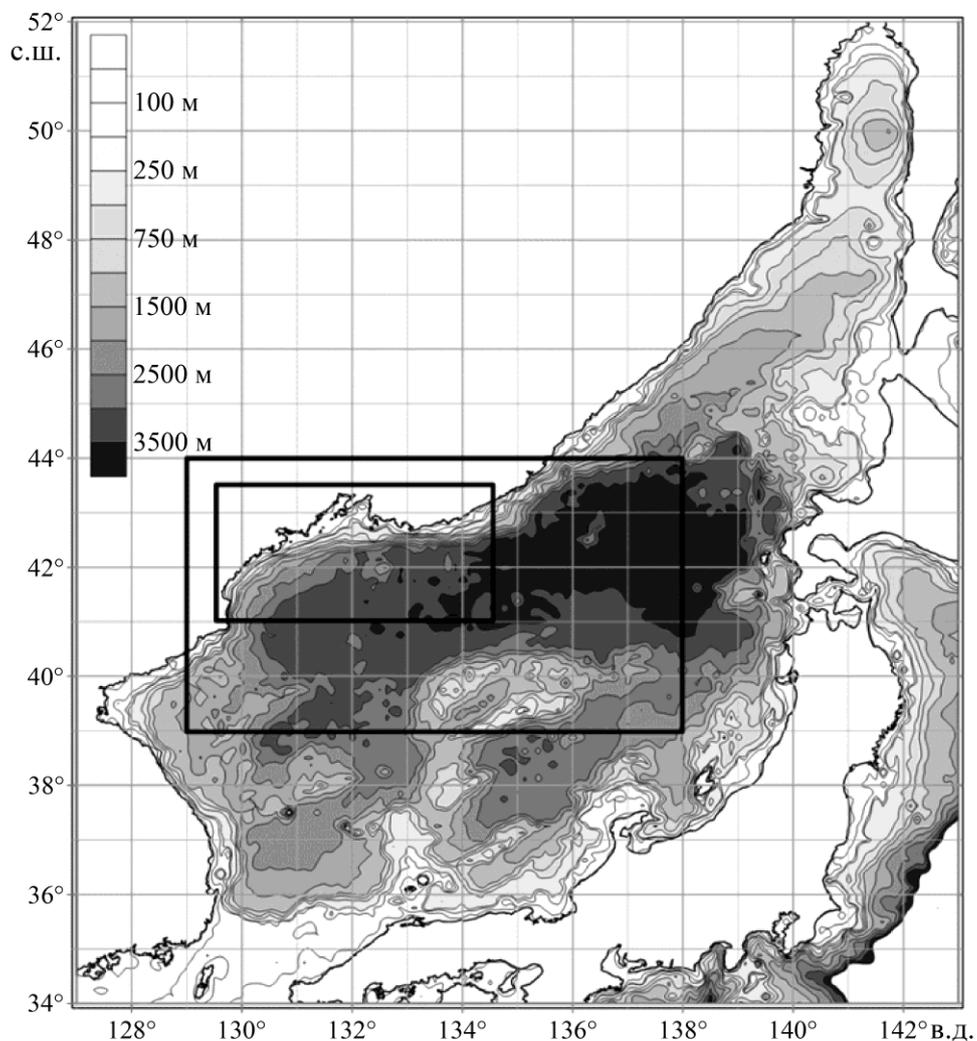
Постановка численных экспериментов

Численные эксперименты по моделированию циркуляции синоптического масштаба выполнялись для двух вложенных крупномасштабных расчетных областей, расположенных в северо-западной части Японского моря (рис. 1). Наиболее крупный район интегрирования модели ($39 - 44^\circ$ с.ш., $129 - 138^\circ$ в.д.) охватывает большую часть Японской котловины, ее континентального шельфа и склона. Этот район включает поднятия Ямато и Богорова, гору Сибирь (юго-западная часть возвышенности Первенца) и залив Петра Великого. В этой области интегрирования модели задавалось горизонтальное разрешение 2,5 км. В численном эксперименте для этой области, обозначенном в работе как эксперимент 1, исходный рельеф дна высокого разрешения из архива *ETOPO2* обрабатывался процедурой уменьшения градиента рельефа в полтора раза, что позволило увеличить количество точек сетки над крутым материковым склоном Японской котловины во избежание вычислительной неустойчивости.

Меньшая область ($41 - 43,4^\circ$ с.ш., $129,5 - 134,3^\circ$ в.д.) включает залив Петра Великого, а также прилегающие районы континентального шельфа, склона и глубокой части Японской котловины (рис. 1). В этой области интегрирования задавалось в два раза более высокое горизонтальное разрешение 1,25 км. В работе рассматриваются два численных эксперимента для этой области интегрирования: эксперимент 2 – с заниженными величинами градиента рельефа дна и его сглаживанием пятиточечным фильтром Шапиро, а также эксперимент 3 – с наиболее реалистичным рельефом без использования процедур уменьшения наклонов дна и его сглаживания. После согласования начальных условий (запуска модели с повышенной горизонтальной вязкостью на срок около 2 мес) проводилось интегрирование модели на один год.

Для моделирования вихрей и стримеров синоптического (20 – 100 км) и субсиноптического (8 – 12 км) масштабов после согласования начальных условий в модели минимизировалось влияние горизонтальной и вертикальной вязкости. Вертикальная вязкость учитывалась только при параметризации ВКС и придонного пограничного слоя. Заданное значение безразмерного коэффициента нелинейного придонного трения составляло 0,001 в экспери-

менте 1 с меньшим горизонтальным разрешением и 0,0001 в экспериментах 2 и 3 с более высоким разрешением. Диапикнический обмен теплом и солью, как и трение между внутренними слоями модели не принимались во внимание. На боковых границах области интегрирования задавались условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. Речной сток и водообмен на открытых горизонтальных границах области интегрирования, приливы и суточный ход заданных метеорологических характеристик в рассматриваемых численных экспериментах не учитывались.



Р и с. 1. Рельеф дна Японского моря и две выделенные расчетные области, для которых проводились численные эксперименты 1 (большая область), 2 и 3 (меньшая область)

Внешние поля напряжения трения ветра, скорости ветра, потока коротковолновой радиации, температуры и влажности воздуха, скорости выпадения атмосферных осадков и облачности задавались с суточным разрешением по данным метеорологического реанализа (*NCEP / NCAR*). Значения всех

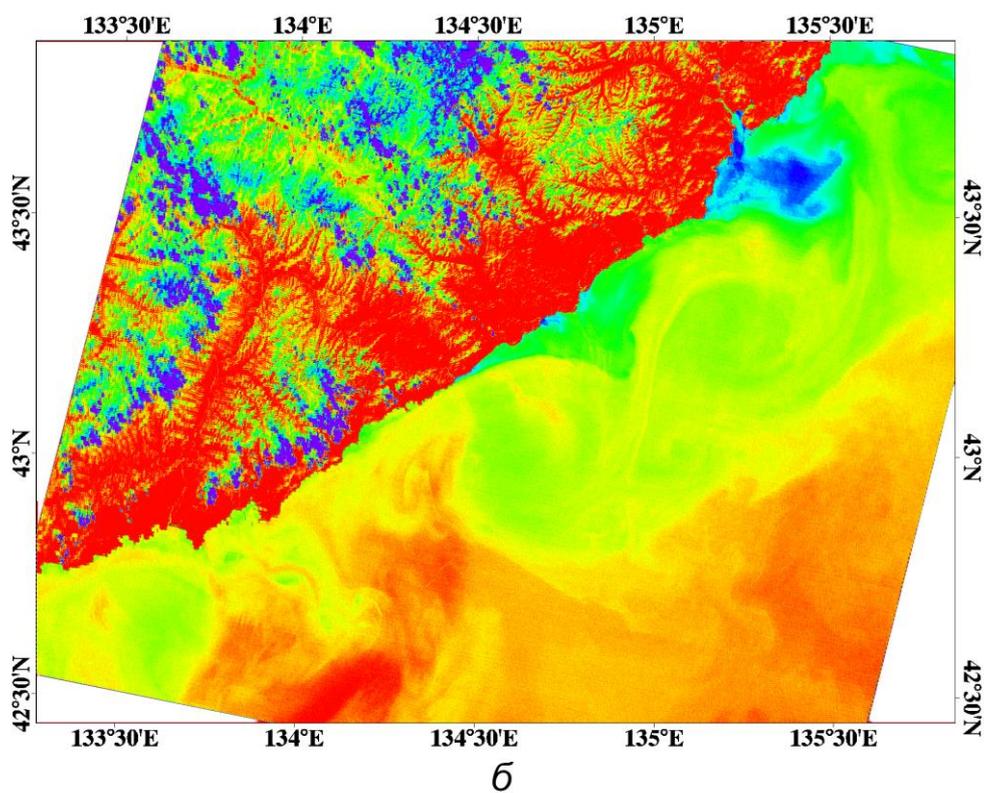
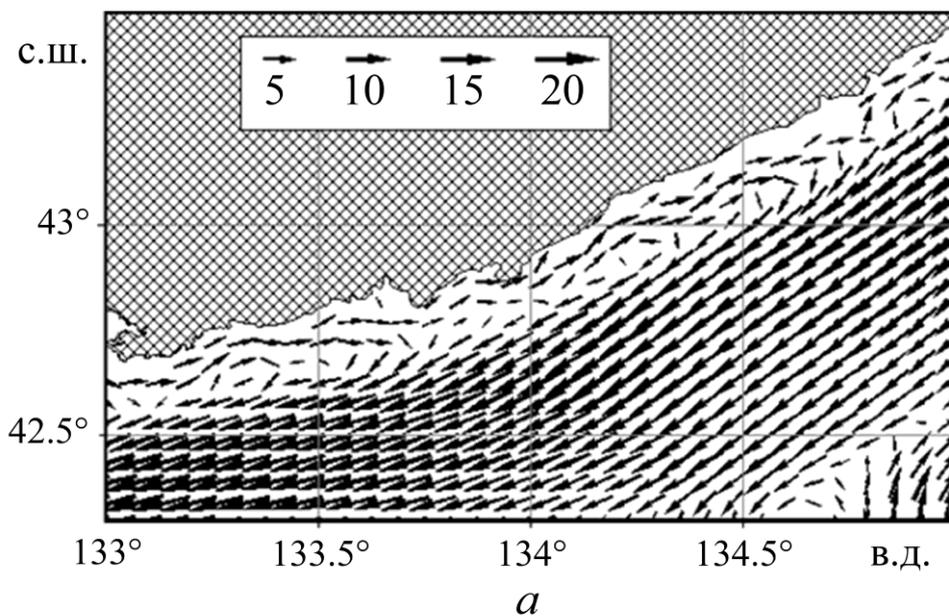
внешних метеорологических характеристик в узлах регулярной сетки осреднялись за каждые сутки года за период с 1980 по 2000 г. Начальными условиями для температуры и солёности в каждом модельном слое морской воды являлись горизонтально-неоднородные крупномасштабные поля температуры и солёности на изопикнических поверхностях. Эти начальные поля получены на основе анализа океанографических *CTD*-съёмок всего моря в конце июля – начале августа 1999 г. по международному проекту *CREAMS2* [13].

Вихревые структуры северо-западной части Японского моря

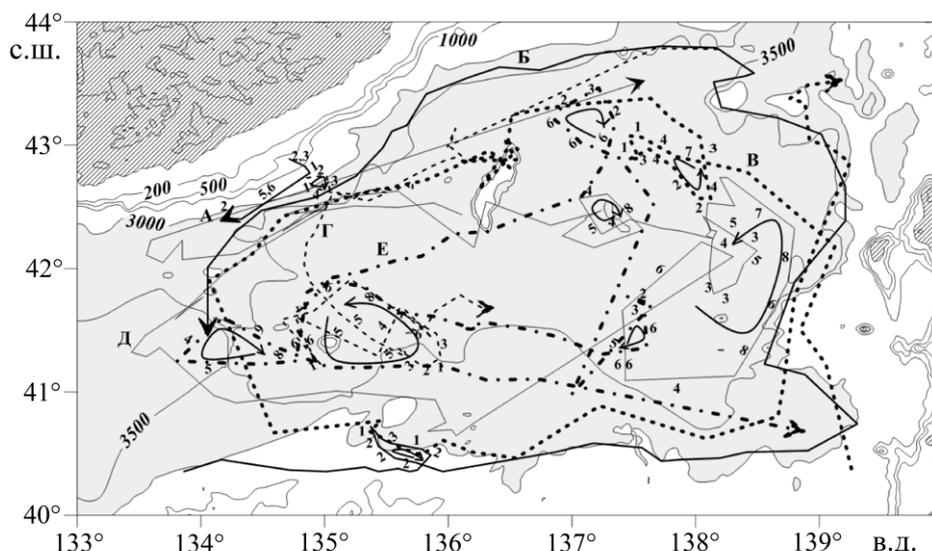
Моделируемый в эксперименте 1 крупномасштабный циклонический круговорот над Японской котловиной хорошо выражен в масштабах всей котловины в ВКС, главном пикноклине моря и верхнем слое глубинных вод. Течения этого круговорота интенсифицируются вдоль склонов Японской котловины. Это следует из численных экспериментов, выполненных для всего Японского моря [11, 12], и эксперимента 1, результаты которого приведены в данном разделе. На рис. 2, *a* показано холодное Приморское течение в ВКС на северо-западной периферии циклонического круговорота. В пределах субарктического круговорота над котловиной как на его периферии (рис. 2), так и в центральной части присутствуют вихревые структуры синоптического и крупного масштабов, полученные в численном эксперименте 1 и при анализе траекторий дрейфа буев *Argo* (А, Б, В, Г, Д, Е) в слое глубинных вод (рис. 3). Горизонты, на которых дрейфовали буи, средние и максимальные скорости их дрейфа приведены в таблице.

Характеристики дрейфа буев *Argo*

Буй	Период	Глубина, дбар	$V_{\text{ср}}$, см/с	$V_{\text{макс}}$, см/с	Траектория
А	21.11.2001 – 06.01.2002	700	2,72	5,6	в районе отрыва Приморского течения от материкового склона
Б	21.03.2008 – 26.03.2009	700	3,98	10	в районе отрыва Приморского течения от материкового склона
В	29.09.1999 – 04.08.2000	500	3,69	8,54	в районе отрыва Приморского течения от материкового склона
Г	27.04.2000 – 14.11.2001	800	2,84	7,75	в циклоническом вихре в южной части северного циклонического круговорота над наиболее глубокой частью Японской котловины
Д	04.10.1999 – 17.10.2001	800	4,19	14	41° с.ш., 135 – 136° в.д.
Е	03.10.1999 – 06.06.2001	800	3,98	8,76	в антициклоническом вихре в южной части северного циклонического круговорота



Р и с. 2. Система прибрежных вихрей в поле скорости (см/с) течения в ВКС 14 сентября в численном эксперименте 1 (а) и на ИК-изображении (б) со спутника *Landsat-7* за 14 сентября 2008 г. в области 42°10' – 44°10' с.ш., 133°7' – 136°10' в.д. (темный тон соответствует низкой температуре воды)



Р и с. 3. Траектории и скорости дрейфа шести буев *Argo* (А, Б, В, Г, Д, Е) в верхнем слое глубинных вод (500 – 800 дбар) над Японской котловиной и ее материковым склоном (А, Б – выделенная сплошная линия, В – выделенная пунктирная, Г – штриховая, Д – тонкая сплошная, Е – выделенная штрихпунктирная; цифры на изолиниях – глубина, м; цифры вдоль траекторий – скорость дрейфа, см/с)

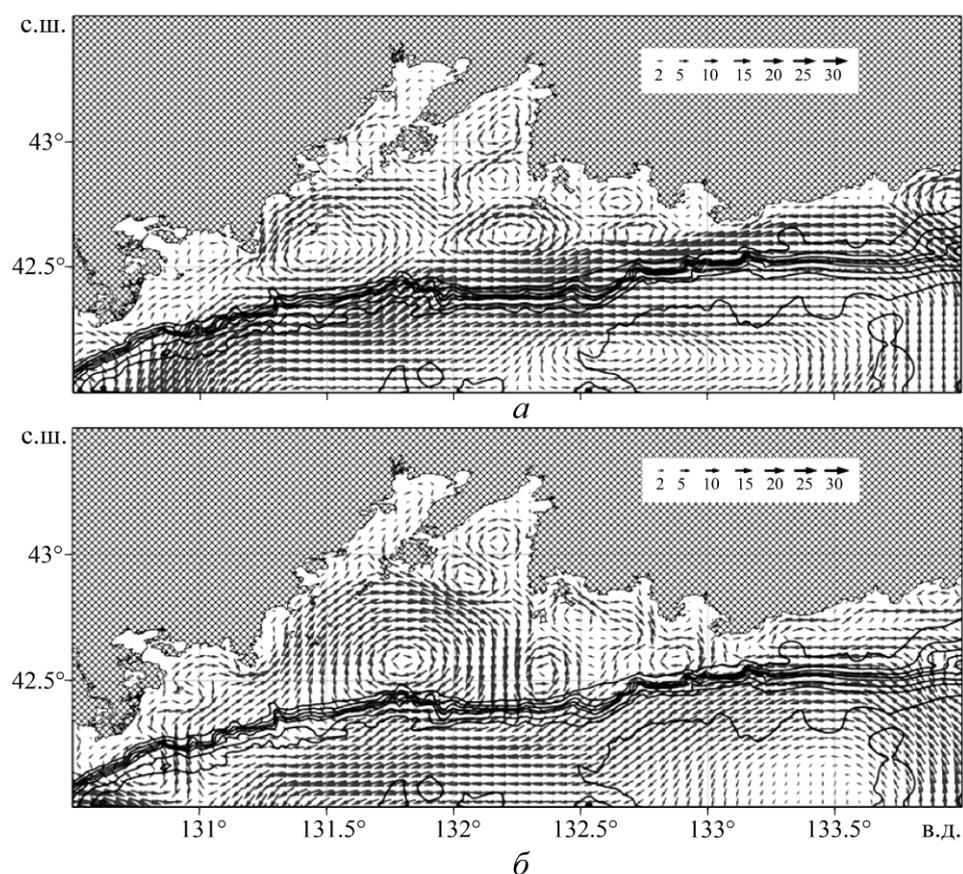
Осредненные за сезон рассчитываемые скорости течения в верхних и глубинных слоях моря показывают наличие системы циклонических круговоротов в Японской котловине. В пределах области интегрирования модели один из циклонических круговоротов расположен в южной части котловины, второй находится к северо-востоку от первого над наиболее глубокой центральной частью Японской котловины, ограниченной изобатой 3500 м. Северный круговорот представлен на рис. 3 по данным дрейфа буев *Argo* в слое 500 – 800 дбар. Приморское течение в верхнем слое моря (до 300 м), как и течение глубинных вод, как правило, отрывается от склона котловины на юго-западной периферии круговоротов.

Горизонтальный масштаб синоптических циклонов увеличивается с глубиной. В слое глубинных вод как в численных экспериментах, так и по данным дрейфующих буев *Argo* (рис. 3) он изменяется от 60 до 220 км. В одном из таких циклонов в районе 41,1 – 42,6° с.ш., 137,4 – 138,85° в.д. дрейфовал буй Д на востоке северного циклонического круговорота над наиболее глубокой частью Японской котловины (рис. 1, 3).

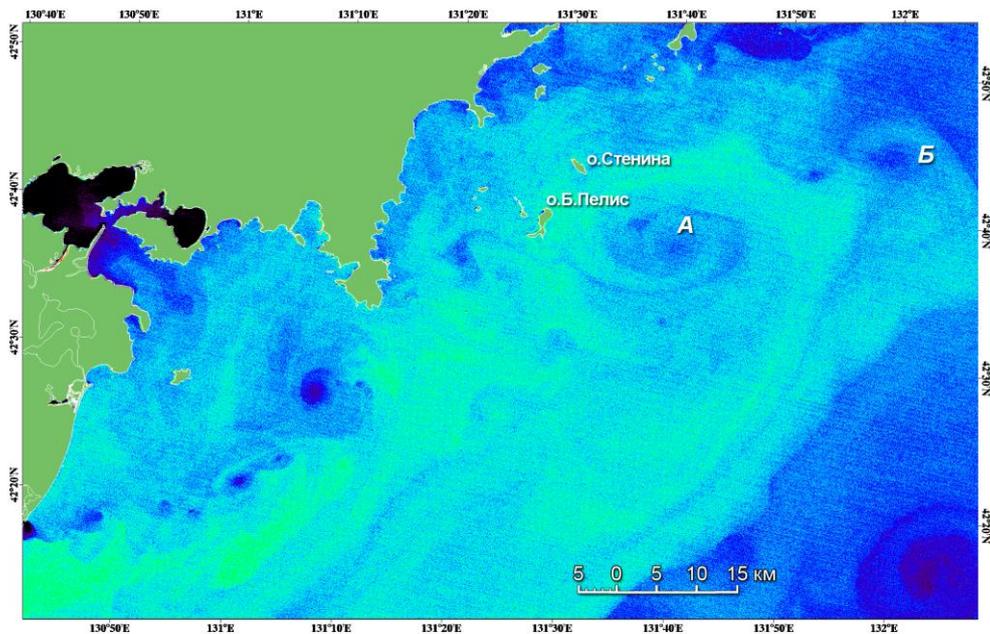
Масштаб изменения скорости Приморского течения (5 – 20 см/с) в ВКС в модельных экспериментах (рис. 2, а), по крайней мере для теплого периода года, соответствует изменениям, оцениваемым по двум изображениям с шагом 1 сут при анализе спутниковой информации. Скорость Приморского течения в глубинном слое (ниже главного пикноклина), рассчитанная с помощью модели, сравнивалась с оценками скорости дрейфа буев *Argo* на горизонтах 500 – 800 дбар в разные годы (рис. 3). Оказалось, что скорость в глубинном слое моря, полученная в численных экспериментах, как правило, в

1,5 – 2 раза меньше скорости дрейфа буев (1 – 9 см/с) (таблица), что объясняется недостаточным вертикальным разрешением модели в этом слое моря.

В отличие от крупномасштабной циркуляции вихревая динамика синоптического масштаба над континентальным шельфом и склоном Японской котловины не связана с начальными условиями модели, в которых учитывались только крупномасштабные особенности структуры вод. Все неоднородности синоптического масштаба удалялись из начальных полей температуры и солености путем фильтрации. После согласования начальных условий, их адаптации к рельефу дна и минимизации горизонтальной вязкости и диффузии между струей Приморского течения и берегом образуются цепочки пар антициклонических вихрей синоптического масштаба (рис. 2, б), как и по данным спутникового мониторинга [6, 8]. Центральные части этих вихрей расположены непосредственно над кромкой шельфа (изобаты 200 – 300 м). На северной периферии антициклонических вихрей синоптического масштаба в эксперименте 2 (рис. 4, а, б) образуются, как и в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря [5], короткоживущие циклонические вихри субсиноптического масштаба, хорошо идентифицируемые на спутниковых изображениях (рис. 5).



Р и с. 4. Скорость (см/с) течения в ВКС залива Петра Великого и прилегающей части Японской котловины 11 августа (а) и 28 октября (б) в численном эксперименте 2 для малой области на рис. 1 (изолиниями рельефа дна от 200 до 3500 м показан материковый склон Японской котловины)



Р и с. 5. Мезомасштабные циклонические вихри в юго-западной части залива Петра Великого на ИК-изображении со спутника *Landsat-7* 25 сентября 2001 г. (темный тон соответствует низкой температуре воды)

Южнее струи Приморского течения образуются циклонические вихри синоптического масштаба. Часто их образование связано с меандрированием или образованием южной ветви, отрывающейся от основной струи течения, как это видно на рис. 2, *a* и 3. Буй В (рис. 3) в районе $42,5 - 43^\circ$ с.ш., $137,5 - 138,2^\circ$ в.д. дрейфовал в циклоническом вихре, диаметр которого составлял около 62,5 км. Этот буй дрейфовал в пределах вихря с 29.09.1999 г. по 27.01.2000 г. на глубине 500 дбар, а наибольшая скорость дрейфа в этом вихре достигала 7 см/с. Отмеченные циклонические вихри не видны на спутниковых изображениях поверхности моря из-за слабых температурных контрастов и небольших масштабов этих вихрей у поверхности.

Антициклонические вихри перемещаются вдоль материкового склона со скоростью около 2 – 5 см/с на юго-запад вниз по потоку Приморского течения, средняя скорость которого в верхнем перемешанном слое заметно выше и изменяется от 8 до 20 см/с. Средняя по глубине скорость Приморского течения в главном пикноклине моря примерно соответствует отмеченной скорости перемещения вихрей вдоль континентального склона. По вертикали вихри прослеживаются до 400 – 500 дбар для заданного вертикального разрешения слоистой модели циркуляции (10 квазиизопикнических слоев, первые 9 из которых расположены в пределах главного пикноклина моря). Нижняя граница 9-го слоя является нижней границей главного пикноклина и не заглубляется ниже 500 м. Самый нижний 10-й слой включает глубинные и придонные воды Японского моря. Согласно анализу измерений с помощью

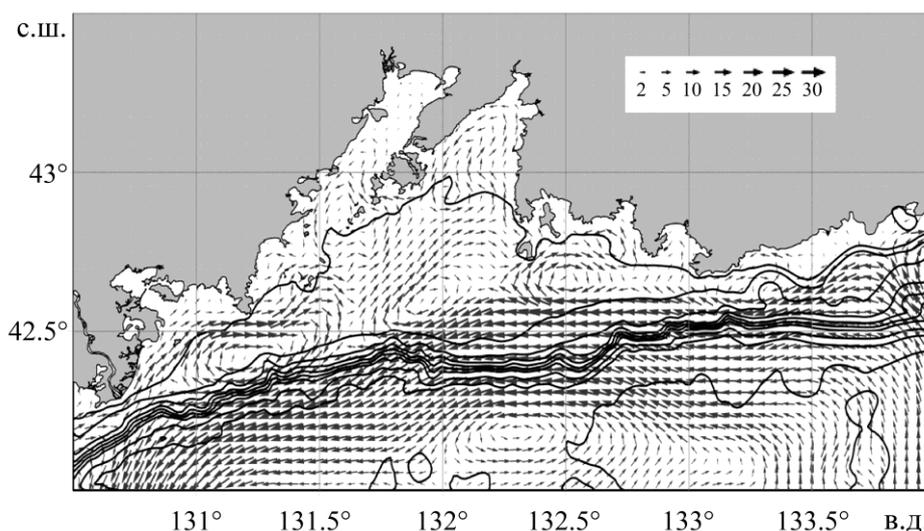
дрейфующих на глубинах 500 – 800 дбар буев *Argo* (буй В, рис. 3) антициклонические вихри над континентальным склоном или у его подножья проявляются и на этих глубинах, где их горизонтальный масштаб, оцениваемый по траектории дрейфа буя В, составляет 10 – 15 км, а орбитальная скорость – от 2 до 4 см/с (рис. 3). Наличие циклонических и антициклонических вихрей синоптического масштаба в глубинных и придонных водах Японской котловины позволяет объяснить значительную неоднородность придонного слоя моря при распространении в течение года в юго-западной части котловины новых донных вод, образовавшихся в феврале 2001 г. у материкового склона, прилегающего к заливу Петра Великого.

В теплый период года наиболее активная генерация цепочки взаимосвязанных пар антициклонических вихрей синоптического масштаба над кромкой шельфа и материковым склоном Японской котловины отмечается в августе – октябре, когда толщина главного пикноклина глубокой части моря увеличивается и превышает характерную глубину внешнего шельфа (100 м). Вместе с тем в численных экспериментах цепочки антициклонических вихрей синоптического масштаба генерируются и в холодный период года, особенно в ноябре и декабре, когда пикноклин ослаблен за счет конвекции, но заглублен и слой с наибольшим вертикальным градиентом плотности расположен существенно ниже характерной глубины внешнего шельфа. В начале теплого периода года (май – июнь), когда сезонный пикноклин тонкий и глубина залегания сезонного слоя скачка плотности меньше глубины кромки шельфа, упорядоченные цепочки антициклонических вихрей синоптического масштаба над кромкой шельфа не образуются. Таким образом, условие генерации отмеченной упорядоченной системы вихрей синоптического масштаба в прибрежной зоне Северного Приморья соответствует критерию бароклинной неустойчивости течения над крутым континентальным склоном и узким шельфом [14].

Разномасштабная вихревая динамика в заливе Петра Великого

В районе залива Петра Великого антициклонические вихри синоптического масштаба захватываются широким шельфом залива. Один или несколько таких вихрей, увеличивая свой пространственный масштаб, становятся квазистационарными (рис. 4, а, б), периодически усиливаясь и ослабляясь в течение 1 – 3 мес. Центр наиболее устойчивого квазистационарного антициклонического вихря, как правило, смещается к западу с июня по сентябрь (рис. 4, а) и к востоку в октябре – ноябре (рис. 4, б) с усилением северо-восточного течения вдоль западного берега залива. Полученный в модели (эксперимент 2) горизонтальный масштаб (60 км) квазистационарного антициклонического вихря в заливе в августе и сентябре (рис. 4, а) несколько превышает его диаметр, оцениваемый по спутниковым измерениям в августе и сентябре 2009 г. [7].

В численном эксперименте 3 с наиболее реалистичным (несглаженным) рельефом дна горизонтальные размеры устойчивых антициклонических вихрей в заливе в ВКС (рис. 6) оказываются несколько меньшими, чем в эксперименте 2, и наиболее близкими к наблюдаемым. Центры этих вихрей в эксперименте 3, как правило, расположены непосредственно над кромкой шельфа (рис. 6). Положение центра устойчивого антициклона и его смещение со временем также оказываются наиболее близкими к наблюдаемым дистанционными методами [7]. Горизонтальный масштаб этих антициклонов на поверхности изменяется от 20 до 60 км и уменьшается с глубиной до 8 – 10 км. Ось антициклона имеет наклон в сторону шельфа и вниз по потоку. В глубоких слоях моря антициклонические вихри расположены над крутым материковым склоном Японской котловины и часто достигают его подножья.



Р и с. 6. Скорость (см/с) течения в ВКС залива Петра Великого и прилегающей части Японской котловины 11 августа в численном эксперименте 3 с несглаженным рельефом дна (изолиниями рельефа дна от 200 до 3500 м показан материковый склон Японской котловины)

В конце теплого периода года при заглублении и усилении сезонного пикноклина, а также с увеличением скорости северо-восточного течения вдоль западного берега залива на северо-западной периферии квазистационарного антициклонического вихря образуются масштабные циклонические вихри (рис. 4, б) диаметром около 10 км. Эти циклонические вихри перемещаются по часовой стрелке вдоль периферии антициклонического вихря со скоростью до 25 см/с и диссипируют у его юго-восточной границы. Характерное время жизни мезомасштабных циклонических вихрей в численных экспериментах 2 и 3 с разрешением 1,25 км составляет 1 – 2 сут. Аналогичные мезомасштабные циклонические вихри (рис. 5) обнаруживаются на северо-западной периферии крупного синоптического антициклона и при анализе

спутниковой информации [4]. Горизонтальный масштаб циклонических вихрей увеличивается с глубиной.

Вектор скорости течения в антициклоническом вихре и на его северной периферии рассчитывался с использованием пар спутниковых изображений. Как температурные контрасты, так и построенные векторы скорости течений показывают наличие короткоживущих циклонических вихрей в центральной части залива с характерным горизонтальным масштабом 8 – 10 км и меньшим – около 3,5 км [4]. Рассчитывать эволюцию вихрей диаметром 3,5 км не позволяет горизонтальное разрешение модели. При смене летнего муссона на зимний циркуляция вод и система течений на поверхности в заливе Петра Великого заметно изменяются (рис. 4, *а*, *б*). На внутреннем шельфе Уссурийского и Амурского заливов завихренность течения в ВКС изменяется с циклонической на антициклоническую, в то время как в нижележащем слое остается устойчивая циклоническая завихренность скорости течения, слабо зависящая от преобладающего направления и завихренности ветра.

Заключение

Полученные с помощью гидродинамической модели МГИ НАН Украины изменчивость скорости Приморского течения на поверхности моря, пространственно-временные масштабы антициклонических и циклонических вихрей, их эволюция, вариации направления и скорости перемещения вдоль узкого шельфа Северного Приморья и кромки шельфа залива Петра Великого хорошо согласуются с оценками этих характеристик, выполненными на основе анализа данных спутниковых измерений в ИК-диапазоне. Основные особенности моделируемой синоптической и сезонной изменчивости циркуляции, включая вариации струйных течений и вихрей на шельфе залива Петра Великого, также подтверждаются спутниковыми наблюдениями. Особенности моделируемых течений крупного и синоптического масштабов в глубинных слоях моря согласуются с результатами анализа данных измерений, проведенных с помощью дрейфующих буев *Argo*.

Таким образом, используемая слоистая гидродинамическая модель в целом адекватно воспроизводит основные особенности циркуляции синоптического масштаба, а также мезомасштабные вихри над северо-западным материковым шельфом и склоном Японской котловины. Важнейшим фактором для наиболее точного моделирования элементов динамики синоптических и мезомасштабных вихрей является не только пространственно-временное разрешение модели, но и соответствие заданного рельефа дна фактическому при используемом горизонтальном разрешении.

Поля скорости течения в ВКС моря для теплого периода года с суточным разрешением, полученные в численных экспериментах 1 и 2, использовались в статьях [2, 3]. В этих работах в рамках лагранжева подхода исследуются процессы перемешивания и переноса в заливе Петра Великого и прилегаю-

шей части Японского моря [3], а также в районе протяженного шельфа Приморья и прилегающей части моря [2]. Показаны особенности водообмена между шельфом и глубоким морем. Выделены застойные зоны, зоны перемешивания на шельфе, коридоры интенсивного выноса вод из залива в глубокую часть моря, а также поступления вод открытого моря в зону шельфа [3].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-05-12047-офи-м-2011 и 12-05-00822-а, а также инициативного гранта ДВО РАН 12-III-A-07-062.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. et al.* Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, № С8. – P. 3246 – 3273.
2. *Prants S.V., Budyansky M.V., Ponomarev V.I. et al.* Lagrangian study of transport and mixing in a mesoscale eddy street // *Ocean Model.* – 2011. – 38, № 1 – 2. – P. 114 – 125.
3. *Пранц С.В., Пономарев В.И., Будянский М.В. и др.* Лагранжов анализ перемешивания и переноса вод в заливе Петра Великого // Тр. региональной конференции «Океанография залива Петра Великого». – Владивосток: ДВНИГМИ, 2012. – С. 665 – 669.
4. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin A.G. et al.* Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea // *J. Mar. Syst.* – 2002. – 32. – P. 91 – 108.
5. *Митягина М.И., Лаврова О.Ю.* Спутниковые наблюдения вихревых и волновых процессов в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 5. – С. 72 – 79.
6. *Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г.* Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Там же. – 1998. – № 1. – С. 66 – 83.
7. *Дубина В.А., Митник Л.М., Фищенко В.К. и др.* Совместное использование наземных видеонаблюдений и спутниковых данных в задаче мониторинга залива Петра Великого // Открытое образование. – 2010. – Вып. 5. – С. 30 – 40.
8. *Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салюк А.Н. и др.* Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России (отв. ред. В.А. Акуличев). В 4 кн. Кн.1: Океанологические исследования. – М.: Наука, 2007. – С. 450 – 473.
9. *Ladychenko S.Y., Lobanov V.B., Salyuk A.N.* Formation and evolution of mesoscale anticyclonic eddies in the northwestern Japan Sea // *Proc. 2nd Int. Workshop Remote Sens. Marine Environ. Northwest Pacific Reg.* (Toyama, Japan, 25 – 26 March). – 2002. – P. 177 – 181.
10. *Шапиро Н.Б., Михайлова Э.Н.* Параметризация диапикнического обмена в квазиизопикнической модели океана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. – С. 31 – 47.
11. *Ponomarev V., Trusenkov O.* Circulation patterns of the Japan Sea // *La Mer.* – 2000. – 38, № 4. – P. 189 – 198.
12. *Trusenkov O., Ishida H., Ratner Yu. et al.* Numerical modeling of heat and freshwater fluxes, temperature, and salinity at the Japan Sea surface // *J. Hydraul. Coast. Envir. Eng.* – 2005. – № 789. – P. 125 – 142.

13. Talley L.D., Min Dong-Ha, Lobanov V.B. et al. Japan / East Sea water masses and their relation to the sea's circulation // Oceanography. – 2006. – 19, № 3. – P. 32 – 49.
14. Ikeda M., Zhanga L.-Q. Mesoscale stability of an ocean current over the continental slope in the Bryan – Cox primitive equation model // J. Mar. Syst. – 1992. – 3, № 6. – P. 519 – 527.

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток
E-mail: pvi711@yandex.ru
** Дальневосточный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт,
Владивосток

Материал поступил
в редакцию 22.06.12
После доработки 13.08.12

АНОТАЦІЯ На основі чисельного моделювання циркуляції, аналізу супутникових ІЧ-зображень та даних дрейфуючих буїв *Argo* досліджуються особливості циркуляції синоптичного масштабу в північно-західній частині Японського моря. Використовується квазіізопікнічна модель циркуляції океану, розроблена Н.Б. Шапіро та Е.М. Михайловою в МГІ НАН України. Визначаються особливості виникнення та еволюції системи вихорів і струменевих течій в районах шельфу, материкового схилу і прилеглої частини глибокого моря.

Ключові слова: Японське море, чисельне моделювання, циркуляція, синоптичні вихори, субсиноптичні вихори, супутникові дані, дрейфуючі буї *Argo*, бароклінна нестійкість над крутим континентальним схилом.

ABSTRACT Basic features of mesoscale circulation in the northwestern Japan Sea are studied based on numerical simulation of circulation, analysis of satellite infra-red images and *Argo* drifters' data. The quasi-isopycnal ocean circulation model developed by N.B. Shapiro and E.N. Mikhailova in Marine Hydrophysical Institute, NAS of Ukraine is applied. Features of formation and evolution of the eddies and jets system on the shelf, continental slope and in the adjacent deep sea area are determined.

Keywords: Japan Sea, numerical simulation, circulation, synoptic eddies, sub-synoptic eddies, satellite data, *Argo* drifters, baroclinic instability over steep continental slope.