

## **Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений)**

**В.И. Пономарев, П.А. Файман, В.А. Дубина,  
С.Ю. Ладыченко, В.Б. Лобанов**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
690041, г. Владивосток, Балтийская, 43  
E-mail: pvi711@yandex.ru*

На основе спутниковых ИК-изображений и численного моделирования исследованы особенности вихревой динамики вод над шельфом и континентальным склоном северо-западной части Японского моря. Получены характеристики формирующихся в этом районе упорядоченных антициклонических вихревых образований, перемещающихся на юго-запад вдоль побережья Приморья (типичные размеры, время существования, траектории движения). Проанализированы условия их зарождения и характер эволюции.

**Ключевые слова:** синоптические вихри, циркуляция Японского моря, топографические волны Кельвина, спутниковые инфракрасные измерения.

### **Введение**

Одним из наиболее устойчивых элементов циркуляции Японского моря является холодное Приморское течение (ПТ). Рассчитанный по недельным измерениям скорости течений критерий устойчивости, почти на всём протяжении ПТ от 45,5° до 41,5° с.ш. превышает 90% (Юрасов, Яричин, 1991). Течение следует вдоль кромки шельфа (между изобатами 200 и 300 м) на расстоянии 18-30 км от берега и имеет максимум скорости на горизонте около 100 м (ниже слоя скачка 25-50 м) в летний сезон. Несмотря на устойчивый характер течения, уже в первых исследованиях отмечалась сложность его структуры, особенно в тёплый период года (Юрасов, Яричин, 1991). Во время летнего муссона вдоль побережья Приморья над шельфом и материковым склоном наблюдаются разномасштабные вихревые структуры, перемещающиеся как вдоль, так и поперёк изобат. Подобная вихревая циркуляция прибрежных вод наблюдается во многих районах Мирового океана, особенно в глубоководных бассейнах с узким шельфом, например, вдоль кавказского побережья Чёрного моря (Коновалова, Лагутин, 1968; Митягина, Лаврова, 2009; Ginsburg et al. 2002). В отдельные годы в августе-сентябре месяце вихревая структура течений у побережья Приморья имеет организованный характер, проявляющийся в образовании цепочки антициклонических вихрей диаметром порядка 50 км, наблюдаемых на спутниковых ИК-изображениях (Гинзбург и др., 1998). Подобные вихревые структуры должны играть существенную роль в водообмене между прибрежными водами и открытой частью моря. В настоящей работе приведены результаты исследования этих вихревых образований на основе численного гидродинамического моделирования циркуляции вод Японского моря и анализе инфракрасных измерений с различных спутников.

## Анализ спутниковых измерений

Для исследования изменчивости динамики прибрежных вод в северо-западной части Японского моря были использованы ИК-изображения, полученные радиометрами AVHRR, MODIS, TM и ETM+ летом и осенью 2000-2010 гг. Цепочка взаимосвязанных антициклонических образований синоптического масштаба появляется в отдельные годы у побережья Приморья в августе и прослеживается до октября. Наиболее длинные ряды изображений, надёжно зафиксировавших вихри, получены за 2007 и 2008 гг. В другие годы вихри синоптического масштаба либо не наблюдались, либо их регистрация была затруднена из-за пониженных температурных контрастов, тумана и облачности. В цепочке вихрей наблюдалось от двух до семи антициклонов диаметром 30-80 км (рисунок 1). В большинстве случаев вихри располагались своими центрами между изобатами 200-300 м (рисунок 2), вплотную прижатые к берегу и друг другу. Однако наблюдались ситуации, когда вихри «расходились», отходя от береговой черты на расстояние около 10 км (рисунок 1 г). Вихри существуют от нескольких суток до двух месяцев, смещаясь на юго-запад со скоростью 0,1-0,2 м/с (рисунок 2 а). В процессе эволюции синоптических антициклонов на их периферии зарождаются нестационарные мезомасштабные циклонические образования с холодным ядром и диаметром порядка 10 км (рисунок 2б). Как правило, антициклоны разрушались в районе 132-133° в.д., но наблюдались случаи, когда одиночный вихрь до двух месяцев стационарировал в районе залива Петра Великого. В сентябрях тех лет, когда вихри образовывались и тех, когда они отсутствовали (например, в 2009-2010 гг.), на прибрежных метеостанциях зарегистрированный среднесуточный ветер не превышал 5 м/с. Несмотря на слабый ветер между вихрями на шельфе наблюдался интенсивный апвеллинг синоптического масштаба.

## Численное моделирование динамики вод Японского моря

Для расчета течений использовалась численная квазиизопикническая гидродинамическая модель циркуляции океана, основанная на системе примитивных уравнений с параметризации верхнего квазиоднородного слоя, взаимодействующего с атмосферой (Шапиро, 1998). Модель была разработана Н.Б. Шапиро и Э.Н. Михайловой в 1997 г. в Морском гидрофизическом институте (Севастополь, Украина) и первоначально использовалась для моделирования крупномасштабной циркуляции в Черном море (Шапиро, 1998) и океане. Для моделирования динамики вод Японского моря модель была адаптирована с учетом характерных для этого моря особенностей водообмена в мелководных проливах, речного стока, а также пересеченного рельефа дна с крутыми склонами котловин (Ponomarev V., Trusenkova O., 2000; Trusenkova O. et al.).

Численные эксперименты с моделью нестационарной вихревой динамики синоптического масштаба проводились для района Японской глубоководной котловины с пространственным разрешением около 2 км с учётом реалистичного рельефа дна. Внешние метеорологические условия задавались из базы данных глобального реанализа метеорологических полей (NCEP/NCAR Reanalysis <http://www.cdc.noaa.gov/>) с суточным разрешением. Эти условия включают поля потока коротковолновой радиации, падающей на поверхность моря, температуру воздуха в приводном слое моря, скорость выпадения атмосферных осадков, относительную влажность, облачность, скорость приводного ветра и напряжение трения ветра.

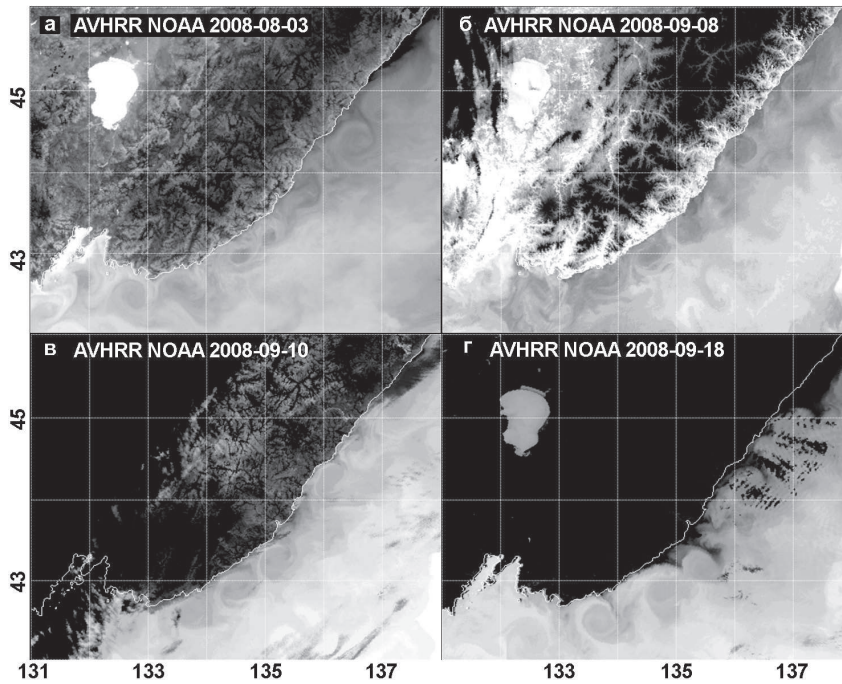


Рис. 1. Синоптические антициклонические вихри у побережья Приморского края на ИК-изображениях, полученных радиометром AVHRR, со спутников серии NOAA в августе-сентябре 2008 г.  
Холодные воды - более тёмные

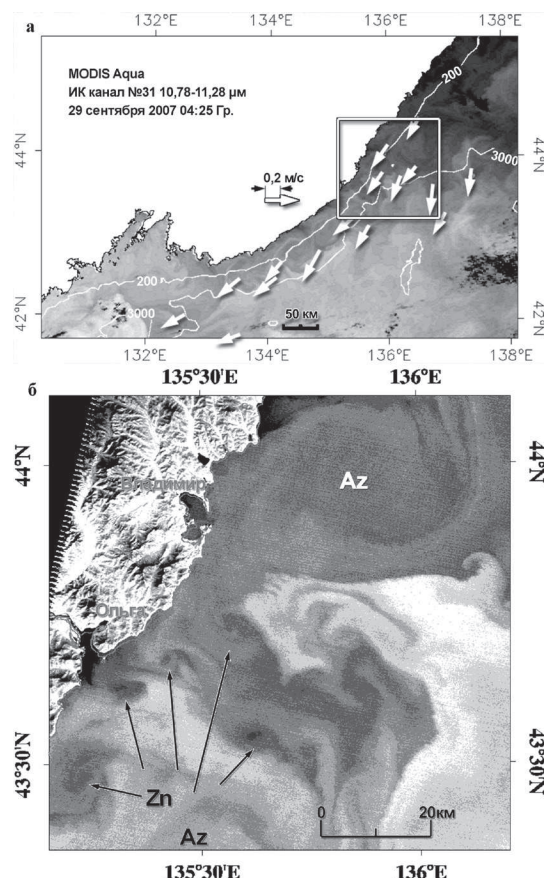


Рис. 2. Вихревая структура вод у побережья Приморского края 29 сентября 2007 г.  
(а) - ИК-изображение, полученное спектрорадиометром MODIS со спутника Aqua в 04:25 Гр. Белый четырёхугольник показывает границы фрагмента ИК-изображения, полученного со спутника Landsat-5 в 01:31 Гр. и представленного на рисунке (б). Символами Az и Zn отмечены центры соответственно антициклонов и циклонов. Стрелками на рисунке (а) показаны вектора поверхностных течений построенные по двум изображениям, принятым с интервалом в сутки

Численные эксперименты с минимизированными коэффициентами горизонтальной и вертикальной вязкости показали наличие вихрей и стримеров синоптического масштаба (10 – 100 км). В численных экспериментах в течение короткого времени интегрирования (~ 1 часа) вдоль северного материкового склона Центральной глубоководной котловины моря формировалась группа антициклонических вихрей (рисунок 3). Эти вихри перемещаются со скоростью около 2-3 см/с на юго-запад в потоке, средняя скорость которого в верхнем перемешанном слое заметно выше и составляет 8-10 см/с, а средняя по глубине скорость Приморского течения в главном пикноклине составляет 2-3 см/с. Центральные части вихрей расположены непосредственно над кромкой шельфа в районе изобаты 200м. По вертикали вихри прослеживаются до 500-600 м.

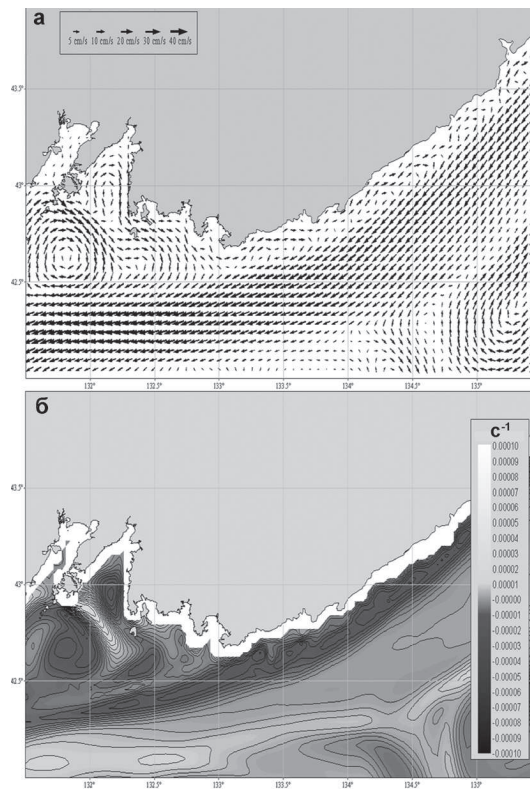


Рис. 3. Результаты численного гидродинамического моделирования нестационарной вихревой динамики синоптического масштаба в северо-западной части Японского моря.

(а) – Скорости течений в верхнем квазиоднородном слое (0-6 м).  
 (б) – Завихренность поля течений в верхнем квазиоднородном слое в с-1

## Обсуждение

Полученные по спутниковым данным и в численных экспериментах с моделью циркуляции характерные особенности перемещающихся вдоль Приморского края упорядоченных антициклонических вихрей позволяют предположить, что их природа связана с бароклинными волнами Кельвина, генерируемыми внешними возмущениями при благоприятных условиях. В северо-западной части Японского моря ширина шельфа составляет 20-30 км. Шельф переходит в крутой материковый склон примерно такой же ширины. При условии узких шельфа и склона генерируются преимущественно бароклинные топографические волны Кельвина (Ефимов, Куликов и др., 1985), для которых крутой континентальный склон

Центрально глубоководной котловины может считаться «стенкой». В зимних условиях возможно образование баротропных волн. Фазовая скорость бароклинных волн Кельвина составляет 2-8 см/с для условий северо-западной части Японского моря.

Отсутствие упорядоченных перемещающихся склоновых вихрей в конце летнего сезона в отдельные годы (2009, 2010 г.г.) возможно обусловлено ослаблением южной и центральной ячеек субарктического циклонического круговорота Японского моря. Последнее, в свою очередь, может быть вызвано ослаблением бароклинных эффектов и предшествующей циклонической завихренности напряжения трения ветра в масштабе отмеченных ячеек.

### Литература

1. Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев) // Исследование Земли из космоса, 1998. С.66-83.
2. Ефимов И.И., Куликов У.А., Рабинович А.Б. и др. Волны в пограничных областях // Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
3. Коновалова И.З., Лагутин Б.Л. Некоторые статистические характеристики прибрежных течений по результатам аэрофотосъемки // Тр. ГОИН. Динамика моря, 1968. Вып. 95. С. 35-44.
4. 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.
5. Шатирио Н.Б. Формирование циркуляции в квазиизопикнической модели Черного моря с учетом стохастичности напряжения ветра // Морской гидрофизический журнал, 1998. №6, с. 26 – 40.
6. Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря // Владивосток: Изд. ДВО АН СССР, 1991. 174 с.
7. Ginsburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G. et al. Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea // J. Marine Systems, 2002. № 32(1–3). P. 71–90.
8. Ponomarev V., Trusenkova O. Circulation patterns of the Japan Sea // La Mer (De la Societe Franco-Japonaise' oceanographique) , 2000. V.38. № 4. P. 189-198.
9. Trusenkova O., Ishida H., Ratner Yu. et al. Numerical modeling of heat and freshwater fluxes, temperature, and salinity at the Japan Sea surface // J. Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering (JSCE), 2005. № 789/II-71. P. 125-142.

## Mesoscale eddy dynamic over northwest Japan Sea continental slope and shelf (Simulation and remote sensing results)

V.I. Ponomarev, P.A. Fyman, V.F. Dubina, S.Y. Ladychenko, V.B. Lobanov

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences  
690041, Vladivostok, Baltyskaya 43,  
E-mail: pvi711@yandex.ru*

The main features of the mesoscale dynamics over the shelf and continental slope in the Northwest Japan Sea are studied based on satellite infrared images data analyses and numerical modeling. Different characteristics such as scale in time and space, moving direction, and vertical structure of the regular anticyclonic eddies generated in this area and propagated southwestward along the Primorye shelf break are revealed. Evolution of the anticyclonic eddies are described, and their nature is noted.

**Keywords:** Mesoscale eddies, Japan Sea circulation, topographical Kelvin waves, satellite infrared images.