

Течения Охотского моря по спутниковым данным и результатам численного моделирования

В.А. Дубина¹, П.А. Файман², И.А. Жабин¹, В.И. Пономарев¹, Ю.А. Кузлякина¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильчева ДВО РАН
690041, г. Владивосток, Балтийская, 43

²Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт
690990, г. Владивосток, ул. Фонтанская, 24
E-mail: dubina@poi.dvo.ru

Рассмотрены закономерности и приведены примеры проявления непериодических течений Охотского моря на спутниковых мультисенсорных изображениях. Спутниковые наблюдения сопоставлены с результатами численного моделирования течений. Для расчёта непериодических течений использовалась нестационарная численная модель океана, разработанной в Научно-исследовательском институте прикладной механики Университета Кюсю (Фукуока, Япония) с горизонтальным разрешением 1/18 градуса. Для валидации модельных расчётов были рассчитаны по последовательности спутниковых изображений методами маркеров вектора течений в разных районах моря и в различные сезоны.

Ключевые слова: Охотское море, течения, мультисенсорные спутниковые данные, численное моделирование.

Введение

Охотское море является одним из самых высокопродуктивных районов Мирового океана. Повышенная биологическая продуктивность моря в значительной степени обусловлена циркуляцией его вод (Гидрометеорология., 1993). Общий циклонический круговорот в северной части моря составляют Западно-Камчатское, Северо-Охотское и Восточно-Сахалинское течения (рис. 1). Одним из самых устойчивых элементов циркуляции Охотского моря является тёплое течение Соя, представляющее собой ветвь Цусимского течения. В южной части моря, в районе глубоководной Курильской котловины круглый год наблюдаются разнообразные вихревые образования, большей частью антициклоны синоптического масштаба. Важнейшими особенностями динамики Охотского моря являются также сильные приливные течения, сток одной из крупнейших рек мира – р. Амур и водообмен с Тихим океаном через многочисленные Курильские проливы.

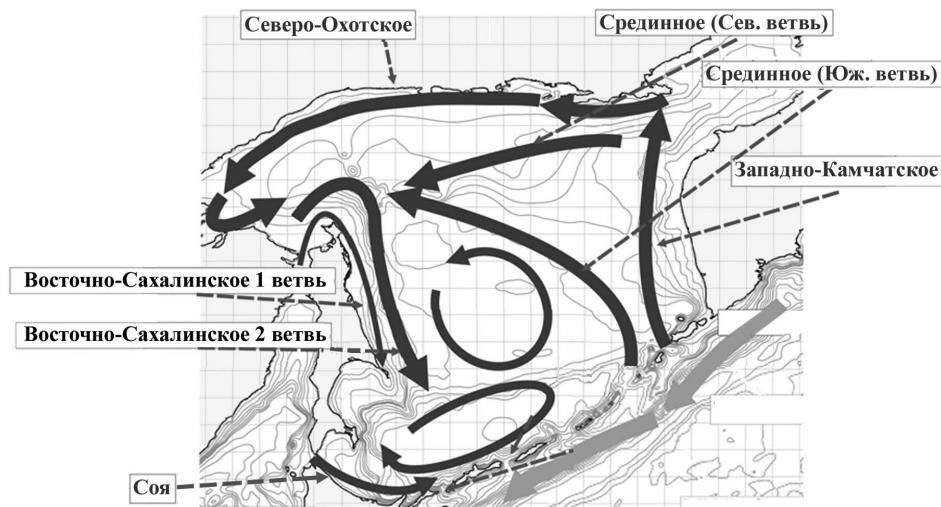


Рис. 1. Схема непериодических поверхностных течений Охотского моря

Начиная с конца семидесятых годов, для изучения циркуляции вод Охотского моря используют спутниковые изображения. С помощью изображений, полученных со спутников серии NOAA и Метеор в инфракрасном (ИК) диапазоне электромагнитного спектра, была зарегистрирована и исследована сложная вихревая динамика в южной части моря, представляющая собой совокупность многочисленных вихрей, диполей, стримеров и разнообразных грибовидных течений (Гинзбург и Фёдоров, 1984; Дарницкий и Булатов, 1997; Булатов и др., 1999). В холодное время года особенности вихревой структуры в этом районе хорошо прослеживаются в поле дрейфующего льда. В северной части моря и в районе Курильских островов на ИК-изображениях были обнаружены стационарные области с аномальными температурами, которые обусловлены сильным приливным перемешиванием (Жабин и др., 1990).

С запуском на орбиту Земли радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА) появилась возможность получать изображения морской поверхности с высоким пространственным разрешением в любое время суток и при наличии облачности. РСА-изображения послужили основой для изучения мезомасштабной динамики вод в южной части моря (Lobanov et al., 2000), в Курильских проливах (Mitnik et al., 2000), в проливе Лаперуз между островами Сахалин и Хоккайдо (Mitnik and Dubina, 2003; Митник и др., 2006), на северном шельфе Сахалина (Dubina and Mitnik, 2002). Ещё большие возможности для изучения Мирового океана из космоса представились после запуска спутников Envisat, Terra и Aqua. РСА-изображения, полученные в полосе шириной 405 км с пространственным разрешением 150 м и изображения в видимом диапазоне в полосе 2330 км с разрешением 250 м позволили исследовать мезомасштабные особенности динамики во все сезоны на всей акватории Охотского моря (Mitnik and Dubina, 2006, 2007, 2010). По смещению сигнатур на последовательных изображениях морской поверхности были получены скорости перемещения внутренних волн (Mitnik and Dubina, 2007) и поля скорости суммарных течений в проливе Лаперуз (Mitnik and Dubina, 2006) и Сахалинском заливе (Жабин и др., 2010).

В настоящей работе рассмотрены закономерности и приведены примеры проявления непериодических течений Охотского моря на спутниковых мультисенсорных изображениях. Спутниковые наблюдения сопоставлены с результатами численного моделирования течений. Для валидации модельных расчётов по последовательности спутниковых изображений методами маркеров были рассчитаны вектора течений в разных районах моря и в различные сезоны.

Результаты численного моделирования

Для расчёта непериодических течений использовалась нестационарная численная модель океана, разработанная в Научно-исследовательском институте прикладной механики Университета Кюсю (Фукуока, Япония) (Lee and Yoon, 1994) с горизонтальным разрешением 1/18 градуса. Область моделирования охватывает всю акваторию Охотского моря, северную часть Японского моря и северо-западную часть Тихого океана, прилегающую к полуострову Камчатка, Курильским островам и острову Хоккайдо. Внешние условия в приводном слое атмосферы задавались из базы данных глобального метеорологического реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis <http://www.cdc.noaa.gov>) с суточным разрешением. Распределение льда и ТПО задавались климатические, для учёта речного стока использовалась база данных Global River Discharge, а приливов – результаты расчёта по глобальной модели приливов. Интегрирование проводилось на временном интервале в 30 лет. Результаты интегрирования за последние пять лет были усреднены за каждый месяц и сезон.

Получены основные особенности сезонной изменчивости системы течений, основных круговоротов и крупномасштабной циклонической циркуляции Охотского моря. На рис. 2 представлены карты течений в верхнем слое 0–10 м для четырёх сезонов. Наибольший пере-

нос водных масс осуществляется над континентальным склоном моря. Основными течениями, присутствующими в течение всего года, являются Срединное, Западно-Камчатское, Северо-Охотское, Восточно-Сахалинское и течение Соя. Остальные течения, такие как Компенсационное, Пенжинское, Ямское, Северо-Охотское противотечение, Амурское течение, проявляются в отдельные сезоны.

Первая, прибрежная ветвь Восточно-Сахалинского течения интенсифицируется на шельфе острова Сахалин осенью при смене летнего муссона на зимний и усилении северного ветра. В ноябре скорость течения на поверхности в этой ветви достигает наибольших значений до 0,5 м/с. В начале холодного сезона в деятельном слое моря развивается термическая конвекция, но квазиоднородный верхний слой еще не достигает максимальных значений. Вторая ветвь, формирующаяся над континентальным склоном, имеет наибольший расход и скорость на поверхности зимой и весной при наибольшей циклонической завихренности напряжения трения ветра над впадиной Дерюгина. Однако скорость течения на поверхности в этой ветви (19–24 см/с) имеет существенно меньшую амплитуду годового хода, чем скорость прибрежной ветви течения (5–48 см/с). Вторая ветвь приближается к шельфу в мае, максимально отходит от шельфа в августе.

Объем вод, переносимый Западно-Камчатским, Срединным течениями и второй (мористой, склоновой) ветвью Восточно-Сахалинского течения максимален зимой и весной и минимален летом. Такую же сезонную изменчивость имеет расход вод через проливы Крузенштерна и Четвертый Курильский. Аналогичная корреляция была отмечена при проведении различных численных экспериментов, что позволило сделать вывод о значительном влиянии расходов через проливы на общую циркуляцию вод Охотского моря. Эффект захваченных топографических волн влияет на интенсификацию Ямского, Северо-Охотского и вдольбереговой ветви Восточно-Сахалинского течения в осенний период.

Анализ спутниковых наблюдений

По результатам моделирования и спутниковым данным течение Соя существует круглый год. В этом районе наблюдаются высокие градиенты ТПО и скорости течения. На ИК- и РСА-изображениях регистрируются граница течения, пояс холодных вод, примыкающий к границе, вихри и волны, возникающие на фронте течения (Mitnik and Dubina, 2006, 2010).

По спутниковым измерениям одни из самых больших скоростей суммарных течений наблюдаются в Сахалинском заливе. Значительные РЛ-контрасты на РСА-изображениях Амурского лимана и Сахалинского залива, как правило, совпадают с областями максимальных градиентов яркостной температуры в ИК-диапазоне. Воды стокового течения реки Амур, выходящие из Амурского лимана, формируют в Сахалинском заливе антициклоническую циркуляцию на периферии стоковой линзы. Во время весенне-летнего половодья скорости течения в основной струе, выходящей из лимана, достигают 1 м/с, а в струйном течении, проходящем по периферии линзы, скорость изменяется в диапазоне от 0,4 – до 1,5 м/с (Жабин и др., 2010). Как видно из результатов моделирования, на большей акватории Охотского моря скорости течений на поверхности круглый год не превышают 0,05 м/с. Из-за небольших скоростей и их низких градиентов на РСА-изображениях Западно-Камчатского, Срединного и Северо-Охотского течений почти не наблюдается сигнатур, обусловленных кинематическим эффектом. При слабых ветрах на РСА-изображениях и снимках, полученных в видимом диапазоне со спутников Landsat, в областях указанных течений благодаря ледяному салу или плёнкам ПАВ наблюдаются структуры из плотноупакованных мезомасштабных вихрей диаметром 2–4 км (Mitnik and Dubina, 2007). Вихри в большинстве своём циклонические и могут занимать области в несколько сот квадратных километров. На рис. 3 приведены изображения спектрорадиометра MODIS в ИК (вверху) и видимом (внизу) диапазонах спектра, полученные со спутника Terra соответственно 30 и 29 июня 2003 г. Стрелками на рисунке показаны вектора суммарных течений,

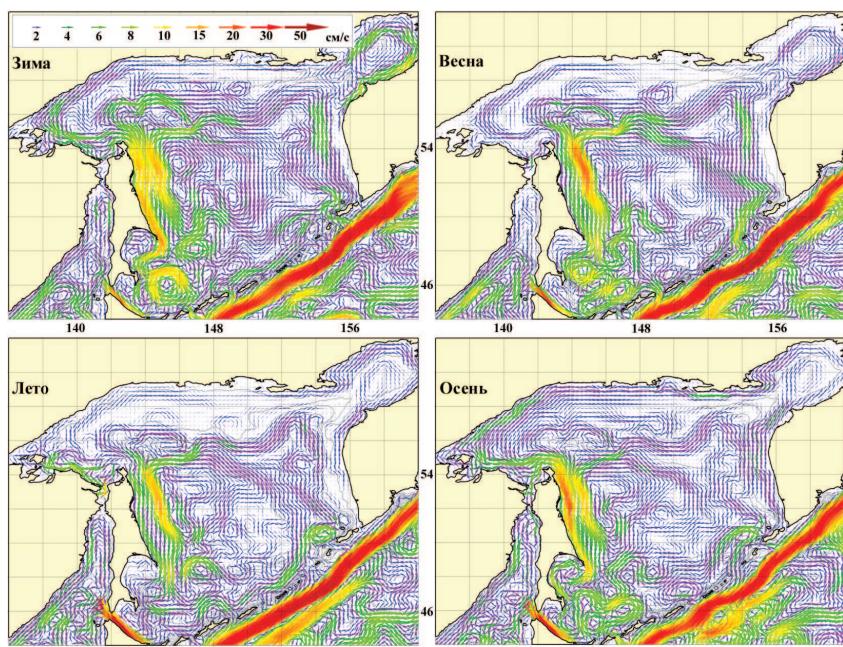


Рис. 2. Сезонная изменчивость циркуляции вод в поверхностном слое Охотского моря по результатам численного моделирования

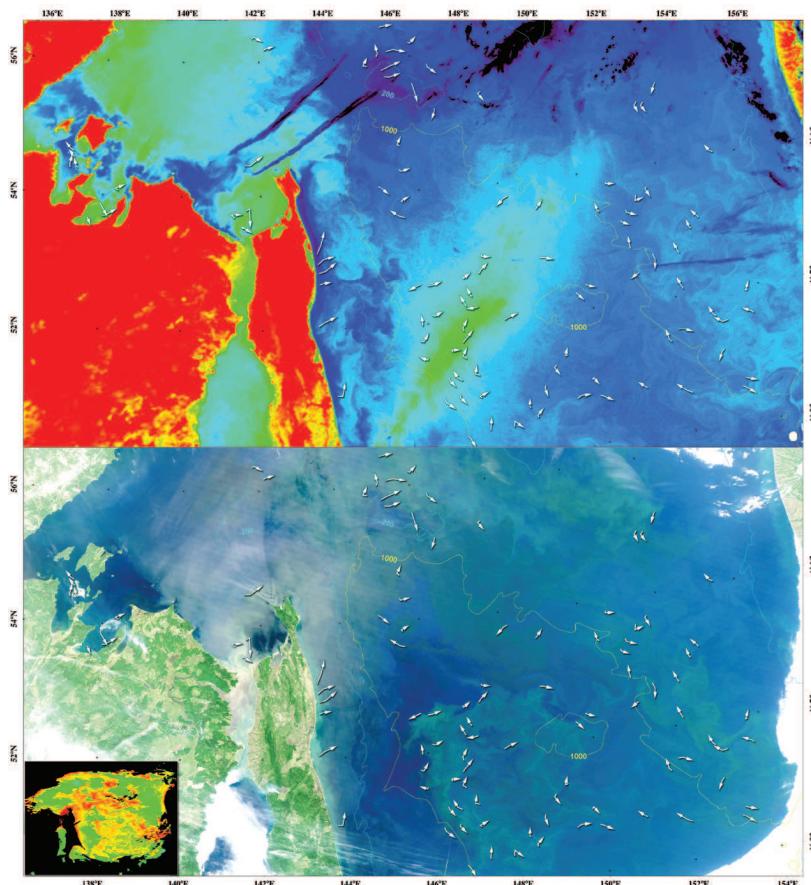


Рис. 3. Изображения спектрорадиометра MODIS в ИК (вверху) и видимом (внизу) диапазонах спектра, полученные со спутника Terra соответственно 30 и 29 июня 2003 г. Стрелками показаны вектора течений, рассчитанные методом маркеров по трём видимым изображениям за 29, 30 июня и 1 июля 2003 г. На врезке представлено распределение хлорофилла-а по измерениям со спутника Aqua 1 июля 2003 г.

рассчитанные методом маркеров по трём видимым изображениям за 29, 30 июня и 1 июля 2003 г. В эти дни в условиях маловетреной безоблачной погоды был зарегистрирован рекордный дневной прогрев поверхности моря. По измерениям микроволновых и ИК радиометров в области полного штиля дневной прогрев составлял 7–9 °С (Mitnik et al., 2006; Алексанин и Алексанина, 2010). Максимальная скорость течения зарегистрирована в Сахалинском заливе (0,25 м/с). В центральной части моря и в районах Западно-Камчатского и Срединного течения в видимом диапазоне наблюдаются вихревые структуры со средними скоростями 0,05 м/с и повышенным содержанием хлорофилла-а. На ИК-изображении у северо-восточного побережья Сахалина севернее области аномального прогрева отчётливо прослеживается апвеллинг. Скорости сгонного течения составляют 0,10–0,15 м/с.

Спутниковые данные, также как и результаты численных расчётов, показывают интенсификацию прибрежной ветви Восточно-Сахалинского течения осенью при смене летнего муссона на зимний и усилении северного ветра. Этот поток отчётливо прослеживается вдоль побережья Сахалина от мыса Елизаветы до мыса Терпения на видимых изображениях в полосе 25–65 км (рис. 4). Вторая ветвь, формирующаяся над континентальным склоном, в поле цвета моря не видна, но регистрируется на ИК-изображениях осенью в виде полосы более холодных вод (рис. 4) и зимой на видимых и ИК-изображениях как узкая область разреженного дрейфующего льда (Ковшов, Синюрин, 1982). Положения максимальных градиентов цвета и температуры поверхности моря в области Восточно-Сахалинского течения не совпадают, а граница между ветвями течения имеет волнистый характер с длиной волны примерно 20 км.

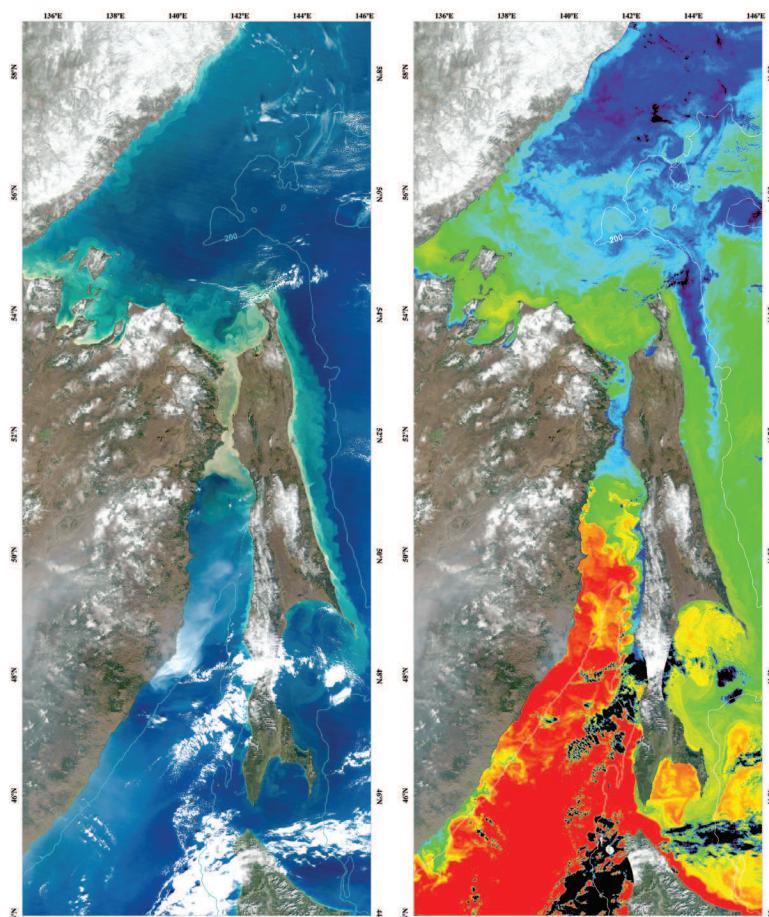


Рис.4. Изображения спектрорадиометра MODIS в видимом (слева) и ИК-диапазонах (справа) 16 октября 2007 г., 01:45 Гр.

Заключение

Численное моделирование в целом удовлетворительно восстановило качественную и количественную картину поверхностных течений, включая их сезонную изменчивость. На большей акватории Охотского моря скорости течений на поверхности круглый год не превышают 0,05 м/с. Максимальные скорости непериодических течений наблюдаются в Сахалинском заливе и в течении Соя и превышают 1 м/с. На ИК- и РСА-изображениях регистрируются граница течения Соя, пояс холодных вод, примыкающий к границе, вихри и волны, возникающие на фронте течения. На РСА-изображениях не наблюдаются границы Западно-Камчатского, Срединного и Северо-Охотского, но при слабых ветрах в областях указанных течений благодаря ледяному салу или плёнкам ПАВ проявляются структуры из плотноупакованных мезомасштабных вихрей. Восточно-Сахалинское течение состоит из двух ветвей. Температурные контрасты в области этого течения не совпадают с вариациями цвета. Прибрежная ветвь отчётливо прослеживается на видимых изображениях, а ветвь, формирующаяся над континентальным склоном, в поле цвета моря не видна, но наблюдается на ИК-изображениях осенью в виде полосы более холодных вод и зимой на видимых и ИК-изображениях как узкая область разреженного дрейфующего льда.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-05-12047-офи-м-2011 и 12-05-00822-а.

Литература

1. Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Погрешности спутниковых оценок температуры поверхности моря в штиль на примере аномально высокого прогрева в Охотском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С.217–227.
2. Булатов Н.В., Куренная Л.А. Муктепавел Л.С., Алексанина М.Г., Гербек Э.Э. Вихревая структура вод южной части Охотского моря и её сезонная изменчивость (результаты спутникового мониторинга) // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 36–45.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т.IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Б.Х. Глуховского, Н.П. Гоптарева, Ф.С. Терзиева. С.-П.: Гидрометеоиздат, 2003. 398 с.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т.IX. Охотское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / Под ред. Ф.С. Терзиева, Б.М. Затучной, Д.Е. Гершановича. С.-П.: Гидрометеоиздат, 1993. 168 с.
5. Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Некоторые закономерности развития грибовидных течений в океане, выявленные путем анализа спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса. 1984. № 6. С. 3–13.
6. Дарницкий В.Б., Булатов Н.В. Охотоморские вихри прикурильского района // Комплексные исследования экосистем Охотского моря. М.: ВНИРО, 1997. С. 36–39.
7. Жабин И.А., Абросимова А. А., Дубина В.А., Некрасов Д.А. Влияние стока реки Амур на гидрологические условия Амурского лимана и Охотского моря // Метеорология и гидрология. 2010. №4. С.93–100.
8. Жабин И.А., Дубина В.А., Некрасов Д.А., Дударев О.В. Структурные особенности зоны смешения речных и морских вод вблизи устья реки Амур по данным спутниковых и гидрологических наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 61–70.
9. Жабин И.А., Зуенко Ю.Й., Юрлов Г.И. Поверхностные холодные пятна в северной части Охотского моря по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 1990. 5. С. 25–28.
10. Ковшов В.А., Синюрин Ю.Н. Постоянные разряжения ледяного покрова в открытых районах Охотского моря // Метеорология и гидрология. 1982. № 11. С. 76–81.
11. Митник Л.М., Шевченко Г.В., Софиенко Ю.А., Дубина В.А. О приливном происхождении пояса холодных вод в районе скалы Камень Опасности в проливе Лаперуз // Исследование Земли из космоса. 2006. №. 5. С. 86–96.
12. Dubina V., Mitnik L. Sea surface features near Northern Sakhalin: study with satellite synthetic aperture radar imagery // Proc. 17th Intern. Symposium on the Okhotsk Sea and Sea Ice. 24-28 February 2002. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2002. P. 66–73.
13. Lee H. C., Yoon J. H. On the free surface OGCM. Proc. of fall meeting the Japan Oceanogr. Soc. 1994. P. 225–226.

14. Lobanov V.B., Mitnik L.M., Dubina V.A. Visualization of mesoscale and small-scale water dynamics in the Okhotsk Sea using satellite images // Proc. 15th Intern. Symposium on the Okhotsk Sea and Sea Ice, Mombetsu, Hokkaido, Japan 6-9 February 2000. P. 153–160.
15. Mitnik L.M., Alexanin A., Mitnik M., Alexanina M. Diurnal heating in the Okhotsk Sea under anticyclonic conditions: multisensor study // Proc. ISRS 2006 PORSEC, Busan, Korea, 2-4 November 2006. Busan, Korea . 2006. 4 p. CD ISSN 1598-6969.
16. Mitnik L., Dubina V. Features of surface circulation in the Aniva Bay and surrounding waters as seen by ERS synthetic aperture radar // In Proc. 18th Intern. Symposium on the Okhotsk Sea and Sea Ice. Mombetsu, Hokkaido, Japan. 2003. P. 257–264.
17. Mitnik L.M., Dubina V.A. Surface currents in the Japan and Okhotsk Seas: Study with satellite SAR // Proc. IGARSS'06, Denver, Colorado, 31 July-4 August 2006. P. 2394–2396.
18. Mitnik L., Dubina V. Spatial-temporal distribution and characteristics of internal waves in the Okhotsk and Japan Seas studied by ERS-1/2 SAR and Envisat ASAR // Proceedings of ENVISAT Symposium 2007, 23–27 April 2007, Montreux, Switzerland. ESA, 2006. SP-636.
19. Mitnik L. M., Dubina V.A. Satellite SAR sensing of the Okhotsk Sea: geographical and seasonal features // Proc. Living Planet Symposium, Bergen, Norway, 28 June- 2 July 2010.. ESA Publication SP-686.
20. Mitnik L.M., Dubina V.A., Lobanov V.B., Supranovich T.I. Water dynamics in the Kuril straits area: study with ERS SAR // ERS-Envisat Symposium “Looking down to Earth in the New . Millennium”, 16–20 October 2000. Gothenburg, Sweden. ESA CD SP-461.10 pp.

The Okhotsk Sea currents: Satellite imagery and numerical simulation

V.A. Dubina¹, P.A. Fayman², I.A. Zhabin¹, V.I. Ponomarev¹, Y.A. Kuzlyakina¹

¹ V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
690041, Vladivostok, Baltyskaya 43

² Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute (FERHRI) Far Eastern
690600, Vladivostok, Fontannaya 24
E-mail: dubina@poi.dvo.ru

The features of the manifestations of the nonperiodical and tidal currents of the Okhotsk Sea on the satellite images are studied. Satellite observations were compared with results of the numerical simulation. The circulation model with horizontal grid cells 1/18° developed at Research Institute for Applied Mechanics in Kyushu University was used for current simulation. The current vectors calculated with the markers on the satellite scenes sequences were used for validation of the simulations results in miscellaneous regions and in different seasons.

Keywords: Okhotsk Sea, currents, multisensory satellite data, numerical simulation.