

Конвергенция потоков в поле градиентно-вихревых волн в котловине Уллын Японского моря

А.Е. Зверева¹, В.Р. Фукс²

¹ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова
Санкт-Петербург, 199397, Россия

E-mail: Anastasia.eug.zvereva@gmail.com

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: victorvf1285@yandex.ru

Для объяснения пространственно-временной изменчивости океанологических полей в районах глубоководных котловин в замкнутых морях на основе анализа спутниковых альтиметрических измерений была предложена феноменологическая модель «котловинных волн», представляющих собой стояче-поступательные топографические волны Россби (Volkov et al., 2013; Зверева, Фукс, 2014). В поле уровня такие волны могут быть выделены благодаря зонам конвергенции и дивергенции течений, являющимися также зонами высокой продуктивности. Такая модель позволяет объяснить многие, ранее не объяснявшиеся, явления в Японском море, такие как скачкообразное изменение фазы при перемещении неоднородностей в поле уровня, ячеистая структура возмущений уровня и течений с выраженными амфидромиями в центрах этих ячеек. Для описания кинематики движения вод в предложенной модели и оценки величин возвышения уровня и скорости его изменения в работе показаны результаты тестовой реализации полной модели стояче-поступательной волны. Также приведены выводы уравнений для полных потоков количества движения и свойств (температура, соленость, плавучесть, концентрация хлорофилла и пр.).

Ключевые слова: волны Россби, кинематика, альтиметрия, стояче-поступательные волны, Японское море, Котловина Цусимская/Уллын

Одобрена к печати: 02.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-25-33

Пространственная изменчивость полей аномалий уровня Японского моря может быть охарактеризована как ячеистая, с плотной упаковкой циклонических и антициклонических структур. Многие авторы также обращают внимание на наличие отдельных ячеек циклонического и антициклонического вращения на масштабах глубоководных котловин (Teague et al., 2005). Arruda et al. (2004) показали, что наличие антициклонического вращения в котловине Уллын (Цусимской), находящейся на юго-западе Японского моря (рис. 1), обусловлено балансом между направленным на север импульсом, вызванным отрывом западного пограничного (Восточно-Корейского) течения, и направленным на юг вектором силы Кориолиса. Однако при малом расходе воды через Корейский пролив основной поток вод идет на восток, а малая нелинейность Восточно-Корейского течения не генерирует антициклоническую структуру (Gordon et al., 2002; Arruda et al., 2004). В это время котловину занимает преимущественно холодная вода, а циклонический характер вращения в вершине меандры от субарктического фронта перемещается на запад и наблюдается в области предыдущего действия антициклонической структуры. Такая смена знака выражена на картах математического ожидания аномалий уровня и зональных изоплет, построенных по данным спутниковой альтиметрии (рис. 3).

Японскими исследователями предполагается, что антициклоническое обтекание острова (Японских островов) набегающим потоком (ветвью Куроисио) связано с планетарным бета-эффектом, а наличие островного склона, крупномасштабная антициклоническая завихренность ветра над прилегающей частью океана и термический контраст между холодной акваторией моря и теплым океаном к востоку от острова способствуют развитию

восточного пограничного течения и захваченных краевых волн (Tsuji no et al., 2008). Имеются свидетельства о распространении захваченных волн в придонном слое вдоль склонов котловин и поднятия Ямато (Senjyu et al., 2005).

Челтоном и коллегами (Chelton et al., 2011) было показано, что параметры циклонов и антициклонов в поле уровня скорее соответствуют параметрам волн Россби, а не синоптических вихрей.

Эти же авторы считают, что вихреобразные структуры в большей степени воздействуют на концентрацию биоты, перераспределяя хлорофилл, нежели создавая благоприятные условия для его развития. На основе спутниковых данных о концентрации хлорофилла и уровне моря они показывают, что мезомасштабные структуры генерируют большую часть изменчивости концентрации хлорофилла в открытом океане.

В работе Charria et al. (2008) предложен механизм влияния волн Россби на локальное увеличение и уменьшение концентрации первичной продукции на $\sim \pm 20\%$ от фонового содержания. Kawamiya and Oeschlies (2001) также, в свою очередь, считают, что увеличение в поверхностном слое хлорофилла вызвано не локальным ростом вследствие притока питательных веществ, а благодаря подъему хлорофилла с нижней границы перемешанного слоя (Kawamiya, Oeschlies, 2001; Charria et al., 2008). Killworth et al. (2004) исследовали горизонтальную адвекцию хлорофилла и показали наличие южного и северного направления потоков поверхностного хлорофилла относительно фоновой концентрации, что может быть связано с волновой динамикой (Killworth et al., 2004).

Однако интерпретация наблюдаемых возмущений в полях уровня и концентрации хлорофилла как чисто поступательных волн или локальных вихрей все же в недостаточной мере раскрывает механизм формирования ячеистой структуры с резкими скачками фаз колебаний. Этому также противоречит наличие выраженных амфидромических точек и стационарных и нестационарных узловых линий в поле колебаний уровня моря (Белоненко и др., 2012). Становится очевидной необходимость иного подхода к интерпретации наблюдаемых возмущений в полях океанологических параметров.

Для феноменологического описания изменчивости поля уровня моря в терминах волновой динамики в геострофическом приближении предлагается следующая модель стояче-поступательной волны в виде:

$$\xi = A \cos(mx) \cos(ly) \cos(\sigma t - kx - ny), \quad (1)$$

где ξ – возвышение уровня, A – амплитуда стояче-поступательной волны, t – время, x и y – переменные прямоугольной системы координат, σ – частота, k и n – зональное и меридиональное волновые числа, m и l – параметры модуляции, являющиеся величинами, которые обратно пропорциональны пространственным размерам ячейки между узлами огибающей волны. Траектории движения частиц в предложенной модели замкнуты, что напоминает движение вод в вихревых структурах, где имеются стационарные и нестационарные узловые линии. Модулированная волна распространяется между узлами стоячей волны (рис. 2).

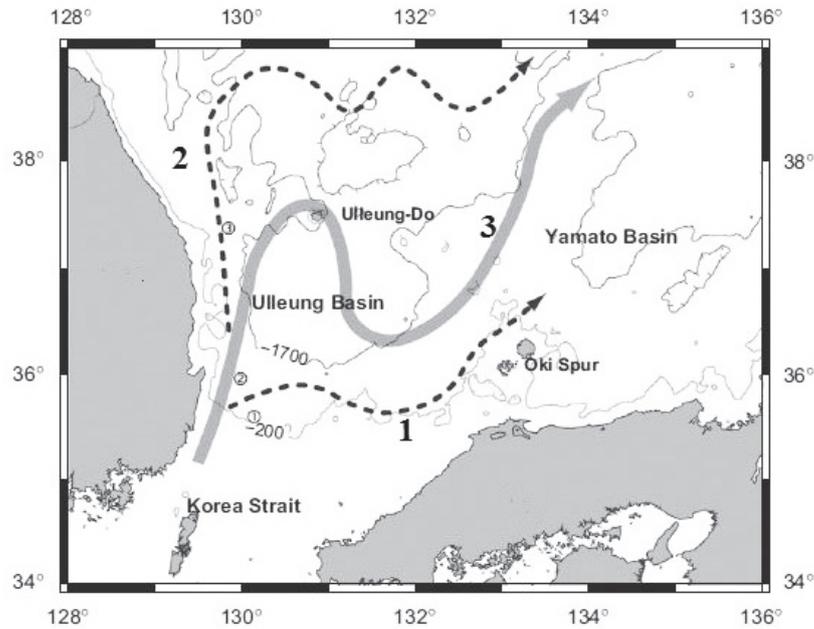


Рис. 1. Юго-западная часть Японского моря и схема поверхностных течений (Lee, Niiler, 2010).
1 – Цусимское течение, 2 – Восточно-Корейское течение, 3 – мористая ветвь

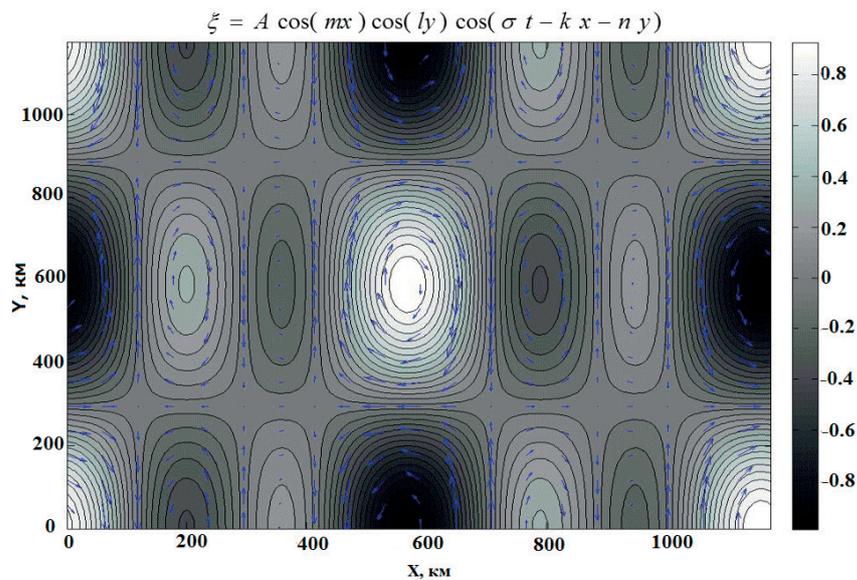


Рис. 2. Схема движения частиц в поступательно-стоячей волне

Для анализа изменчивости динамических условий в котловине Уллы (35°–38° с.ш., 128°–133° в.д.) был выбран массив альтиметрических данных за временной интервал 14.10.1992 – 08.02.2012 с дискретностью 7 суток, полученный из проекта AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*) в рамках проекта DUACS (*Data Unification and Altimeter Combination System*). Он является частью сегмента обработки данных с нескольких спутников (*SSALTO-Segment Sol multimissions d'Altimétrie, d'Orbitographie et de localisation précise*), функционирующего при поддержке Французского Космического Агентства (*CNES-The Centre National d'Études Spatiales*) (www.aviso.altimetry.fr/duacs/).

Уже при анализе изоплет аномалий уровня на разрезе, проходящем по 38° с.ш., видно наличие как положительных, так и отрицательных экстремумов на крайних западных и крайних восточных долготах котловины, что говорит о явной резкой смене знака аномалий уровня в этих точках (рис. 3). По долготно-временному сдвигу можно заметить некое подобие антициклонического вращения ячеек.

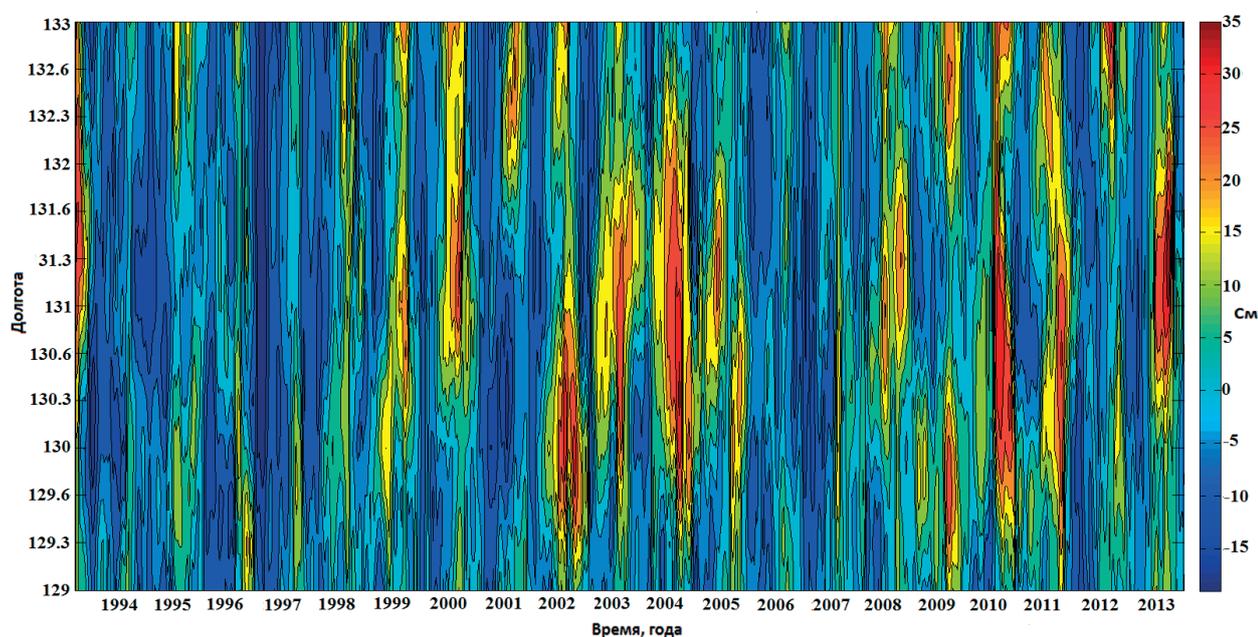


Рис. 3. Изоплеты аномалий уровня на разрезе 38°с.ш. (котловина Уллын Японского моря). Цветом показан уровень моря

В результате анализа Фурье были оценены амплитуды и начальные фазы аномалий уровня всего моря с периодами 0,5 и 1 год. На карте распределения амплитуд годовой гармонике (рис. 4б) имеются замкнутые области с повышенными значениями амплитуды в южной части Японского моря. Они отделены друг от друга областями с существенным сгущением линий изофаз, где происходит смена фазы на противоположную, и минимальными значениями амплитуды. Таким образом, они являются ячейками, связанными между собой зонами вергенций. Карты полугодового периода (рис. 4а) имеют подобное распределение на всей области моря, где также наблюдается преимущественно локализованное сгущение линий равных значений фаз. Положение описанных областей имеет общее сходство с положением термических фронтов, представленных на рис. 5, с некоторым южным сдвигом последних. Эта особенность пространственной изменчивости вод в Японском море была замечена ранее: по отношению к зонам дивергенций и конвергенций температурные фронты расположены к югу вследствие сложной динамики вод и приблизительно повторяют очертания динамических зон (Никитин, 2006).

Для объяснения пространственно-временной изменчивости океанологических полей в районах глубоководных котловин в замкнутых морях в статье Зверевой и Фукса (2014) на основе анализа спутниковых альтиметрических измерений была предложена феноменологическая модель «котловинных волн», представляющих собой частный

случай стояче-поступательных градиентно-вихревых волн (Volkov et al. 2013; Зверева, Фукс, 2014).

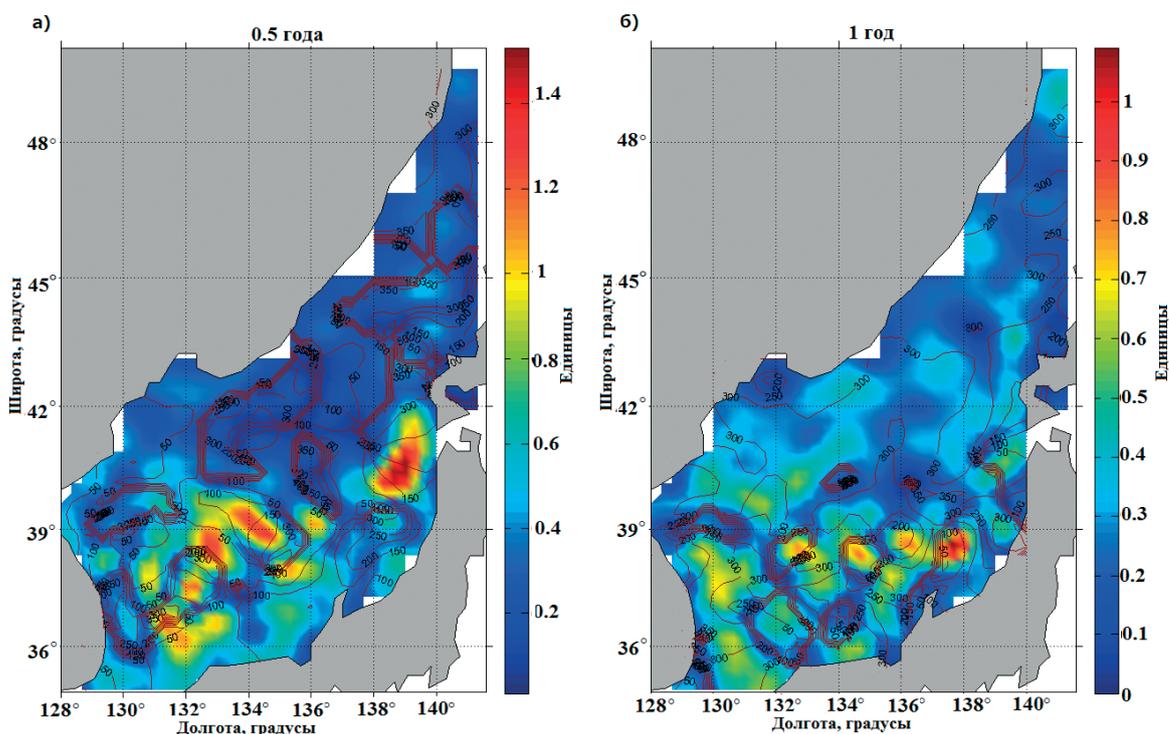


Рис. 4. Амплитуды, (условные единицы выделены цветом) и начальные фазы (градусы, изолинии) аномалий уровня Японского моря на периодах 0,5 года (а) и 1 год (б)



Рис. 5. Обобщенная схема термических фронтов в Японском море (Никитин, 2006)

В поле уровня такие волны могут быть выделены благодаря зонам конвергенции и дивергенции течений, являющимся также зонами высокой продуктивности.

Для описания кинематики подобных движений можно использовать проинтегрированное по глубине уравнение неразрывности (2):

$$\frac{\partial \bar{U}H}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}H}{\partial y} = -\frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad (2)$$

где H – глубина моря, а $\bar{U}H$ и $\bar{V}H$ имеют смысл полных потоков. При $\frac{\partial \xi}{\partial t} > 0$ происходит конвергенция полных потоков, при $\frac{\partial \xi}{\partial t} < 0$ – дивергенция полных потоков, которые определяют соответствующий перенос пассивных примесей, в том числе первичной продукции. В узловых точках, где $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$, колебания отсутствуют. Между узловыми точками на запад распространяется волна Россби с составляющими фазовой скорости $c_x = \frac{\sigma}{k}$, $c_y = \frac{\sigma}{n}$. При этом гребни и подошвы (области дивергенции и конвергенции) вращаются внутри ячеек. Обычно отмечается плотная упаковка таких ячеек из 2–4 волн. Это достаточно хорошо прослеживается на картах уровенных возмущений над котловинами (Зверева, Фукс, 2014).

С другой стороны, адекватная модель волны (1), а, следовательно, и дивергенции полного потока, путем простых тригонометрических преобразований может быть представлена в виде суммы длинной (разница волновых чисел) и короткой (сумма волновых чисел) гармонических волн:

$$\begin{aligned} \xi = \frac{1}{4} & \left[\cos((m-k)x - (n+l)y + \sigma t) + \cos(-(m+k)x - (n+l)y + \sigma t) + \right. \\ & \left. + \cos(-(m+k)x - (n-l)y + \sigma t) + \cos((m-k)x - (n-l)y + \sigma t) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Привлечем далее уравнения движения в квазигеострофическом приближении (Ле Блон, Майсек, 1981) с учетом действия внешних массовых сил аномобарического происхождения и, ограничившись временными масштабами, значительно превышающими период инерционных колебаний ($\frac{\partial^2}{\partial t^2} \ll \omega^2; T^2 \gg T_p^2$), получим уравнение (4), где $R^2 = \frac{gH}{\omega^2}$, R – баротропный радиус деформации, F_1 и F_2 – составляющие внешних массовых сил по осям с учетом влияния переменной глубины:

$$\begin{aligned} UH &= R^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t \partial x} + R^2 \omega \frac{\partial \xi}{\partial y} + F_1; \\ VH &= R^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial t \partial y} - R^2 \omega \frac{\partial \xi}{\partial x} + F_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Тогда уравнение для дивергенции полного потока будет иметь следующий вид:

$$\text{div} \bar{V}H = -\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = R^2 \Delta \frac{\partial \xi}{\partial t} - R^2 \beta \frac{\partial \xi}{\partial x} + \text{div} \vec{F}. \quad (5)$$

Последнее слагаемое уравнения (5) – дивергенция составляющих внешних массовых сил. Максимальная дивергенция (конвергенция) будет достигаться тогда и там, когда и где будут совпадать начальные фазы длинных и коротких волн. Представление стояче-поступательной волны в виде суперпозиции прогрессивных волн с различными длинами и частотами позволяет предполагать возможность широкого спектра прогрес-

сивных волн с различными частотно-волновыми параметрами, с которыми вероятен резонанс внешних массовых сил.

Для иллюстрации особенностей подобных волн построим тестовую реализацию полной модели стояче-поступательной волны (рис. 6). Для оценки величин возвышения уровня и скорости его изменения, входящих в уравнения (1) и (3), задаются следующие входные параметры исследуемой модели: $\lambda_k = 150$ км для короткой волны (характерный пространственный масштаб ячейки) и $\lambda_d = 300$ км для длинной волны (масштаб котловины), годовой период колебаний и пространственный масштаб, равный длине «длинной» волны, совпадающей по величине с расстоянием между узлами огибающей волны. Результаты таких оценок представлены на рис. 6, где максимальные значения горизонтальной скорости полных потоков соответствуют центральной точке 150 км с нулевым значением уровня (суммарная волна) во все моменты времени.

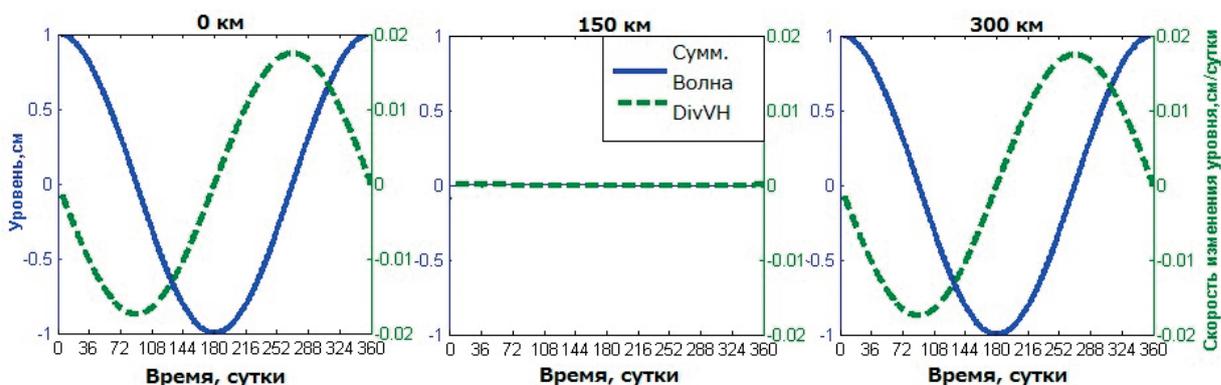


Рис. 6. Тестовая реализация поступательно стоячей волны. Временная изменчивость уровня (сплошная линия) и скорость его изменения в фиксированных точках пространства (пунктирная линия)

Очевидно, что именно в этой точке можно ожидать максимальную горизонтальную адвекцию и соответствующую интенсификацию полных потоков количества движения и свойств (температура, соленость, плавучесть, концентрация хлорофилла и пр.). Именно это и наблюдается в проливах и узостях вблизи узлов стояче-поступательной волны в центре амфидромических областей.

Таким образом, феноменологический анализ альтиметрических карт южной части Японского моря показал, что в полях возвышения уровня в диапазонах сезонной изменчивости, наряду с известными квазистационарными потоками в виде струй Цусимского течения, океанографические особенности района во многом определяются стояче-поступательными волнами. С помощью тестовой реализации было показано, что предложенная волновая модель позволяет объяснить многие, ранее не объяснявшиеся явления в Японском море, такие как скачкообразное изменение фазы при перемещении неоднородностей в поле уровня, ячеистая структура возмущений уровня и течений с выраженными амфидромиями в центрах этих ячеек.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 12-05-00008, 12-05-00009 и гранта СПбГУ № 18.37.140.2014.

Литература

1. Белonenко Т.В., Колдунов В.В., Фукс В.Р. О стояче-поступательных волнах Россби в море и океане // Вестн. С.-Петерб. ун-та. 2012. Сер. 7. Вып. 2. С. 91–103.
2. Зверева А.Е., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в котловине Уллын Японского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 19–27.
3. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане // Пер. с англ. под ред. Городцева В.А., Леонтьева А.И. М.: Мир, 1981. Т. 1, 2. 853 с.
4. Никитин А.А. Основные черты пространственного распределения поверхностных термических фронтов в водах Японского моря и их изменчивость // Исследования Земли из космоса. 2006. Т. 5. С. 49–62.
5. Arruda W. Z., Nof D., O'Brien J.J. Does the Ulleung eddy owe its existence to β and nonlinearities? // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2004. Vol. 51. No. 12. P. 2073–2090.
6. Charria G., Dadou I., Cipollini P., Drevillon M., Garçon V. Influence of Rossby waves on primary production from a coupled physical-biogeochemical model in the North Atlantic Ocean // Ocean Science. 2008. Vol. 4. No. 3. P.199–213.
7. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // Progress in Oceanography. 2011. Vol. 91. No. 2. P. 167–216.
8. Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C.M., Furey H.H., Bower A., Talley L. Japan/East Sea intrathermocline eddies // Journal of Phys. Oceanography. 2002. Vol. 32. No. 6. P. 1960–1974.
9. Kawamiya M. and Oschlies A. Formation of a basin-scale surface chlorophyll pattern by Rossby waves // Geophysical Research Letters. 2001. Vol. 28. P. 4139–4142.
10. Killworth P.D., Cipollini P., Uz B.M., Blundell J.R. Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in satellite-derived chlorophyll // Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012). 2004. Vol. 109. No. C7.
11. Lee D.-K., Niiler P.P. Eddies in the southwestern East/Japan Sea // Deep-Sea Res. I., 2010, Vol. 57. No. 10, P. 1233–1242.
12. Senju T., Shin H.-R., Yoon J.-H., Nagano Z., An H.-S., Byun S.-K., Lee C.-K., Deep flow field in Japan/East Sea as deduced from direct current measurements // Deep-Sea Research II. Vol. 52. No. 11. 2005. P. 1726–1741.
13. Teague W.J., Tracey K.L., Watts D.R., Book J.W., Chang K.-I., Hogan P.J., Mitchell D.A., Suk M.-S., Wimbush M., Yoon J.-H. Observed deep circulation in the Ulleung Basin // Deep-Sea Research II Vol. 52. No. 11. 2005. P.1802–1826.
14. Tsujino H., Nakano H., Motoi T. Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: mean state and seasonal variation // Journal of oceanography. 2008. Vol. 64. No. 1. P. 141–161.
15. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R. Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. No. 4. P. 738–743.

Fluxes convergence in gradient vorticity waves field in the Japan/East Sea Tsushima/Ulleung Basin

A.E. Zvereva¹, V.R. Foux²

¹N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Saint Petersburg 199397, Russia
E-mail: Anastasia.eug.zvereva@gmail.com

²Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199178, Russia
E-mail: victorvf1285@yandex.ru

In order to explain spatiotemporal variability of oceanographic fields in abyssal basins of closed seas we previously proposed the phenomenological model of so-called ‘basin’ waves that are, basically, the standing-progressive topographic planetary waves (Volkov et al., 2013; Zvereva, Foux, 2014). This kind of waves can be detected in the sea-level fields, specifically in zones of convergence and divergence of currents, which are the high productivity zones as well. The new approach explains such observed oceanic phenomena as abrupt phase shift in sea-level oscillations, cell structure and apparent nodal points in the middle of these cells. To describe the kinematics of the proposed wave motion and assess sea level spatial variation and speed of sea level change (negative divergence), test model calculations were conducted. The equation for full fluxes of the momentum and water properties (temperature, salinity, buoyancy, chlorophyll-a concentration, etc.) was derived.

Keywords: Rossby waves, kinematics, altimetry, static-progressive waves, Sea of Japan/ East Sea, Ulleung/Tsushima Basin

Accepted: 02.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-25-33

References

1. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Foux V.R., O ctoyache-postupatel'nykh volnakh Rossbi v more i okeane (On static-progressive Rossby waves in seas and oceans), *Vestn. S.-Peterb. un-ta*, 2012, Ser. 7, Vol. 2, pp. 91–103.
2. Zvereva A.E., Foux V.R., Gradientno-vikhrevye volny v kotlovine ullyn Yaponskogo morya (Gradient-vorticity waves in the Ulleung Basin of the Sea of Japan), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 19–27.
3. Le Blon P., Maissek L., *Volny v okeane* (Oceanic Waves), Moscow: Mir, 1981, Vol. 1, 2, 853 p.
4. Nikitin A.A., Osnovnye cherty prostranstvennogo raspredeleniya poverkhnostnykh termicheskikh frontov v vodakh Yaponskogo morya i ikh izmenchivost' (The Japan Sea surface thermic front distribution and variability), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 5, pp. 49–62.
5. Arruda W.Z., Nof D., O'Brien J.J., Does the Ulleung eddy owe its existence to β and nonlinearities?, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2004, Vol. 51, No. 12, pp. 2073–2090.
6. Charria G., Dadou I., Cipollini P., Drevillon M., Garçon V., Influence of Rossby waves on primary production from a coupled physical-biogeochemical model in the North Atlantic Ocean, *Ocean Science*, 2008, Vol. 4, No. 3, pp. 199–213.
7. Chelton D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M., Global observations of nonlinear mesoscale eddies, *Progress in Oceanography*, 2011, Vol. 91, No. 2, pp.167–216.
8. Gordon A.L., Giulivi C.F., Lee C.M., Furey H.H., Bower A., Talley L., Japan/East Sea intrathermocline eddies, *Journal of Phys. Oceanography*, 2002, Vol. 32, No. 6, pp.1960–1974.
9. Kawamiya M. and Oschlies A., Formation of a basin-scale surface chlorophyll pattern by Rossby waves, *Geophysical Research Letters*, 2001, Vol. 28, pp. 4139–4142.
10. Killworth P.D., Cipollini P., Uz B.M., Blundell J.R., Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in satellite-derived chlorophyll, *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2004, Vol. 109, No. C7.
11. Lee D.-K., Niiler P.P., Eddies in the southwestern East/Japan Sea, *Deep-Sea Res. I.*, 2010, Vol. 57, No. 10, pp. 1233–1242.
12. Senjyu T., Shin H.-R., Yoon J.-H., Nagano Z., An H.-S., Byun S.-K., Lee C.-K., Deep flow field in Japan/East Sea as deduced from direct current measurements, *Deep-Sea Research II*, Vol. 52, No. 11, pp. 1726–1741.
13. Teague W.J., Tracey K.L., Watts D.R., Book J.W., Chang K.-I., Hogan P.J., Mitchell D.A., Suk M.-S., Wimbush M., Yoon J.-H., Observed deep circulation in the Ulleung Basin, *Deep-Sea Research II*, Vol. 52, No. 11, pp. 1802–1826.
14. Tsujino H., Nakano H., Motoi T., Mechanism of currents through the straits of the Japan Sea: mean state and seasonal variation, *Journal of oceanography*, 2008, Vol. 64, No. 1, pp. 141–161.
15. Volkov D.L., Belonenko T.V., Foux V.R., Puzzling over the dynamics of the Lofoten Basin – a sub-Arctic hot spot of ocean variability, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 4, pp. 738–743.