

Градиентно-вихревые волны в котловине Уллын Японского моря

А.Е. Зверева¹, В.Р. Фукс²

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

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199178, Россия

E-mail: victor1285@yandex.ru

В этой статье выдвигается и проверяется гипотеза о существовании в акватории Уллын Японского моря нового класса топографических волн – «котловинных» волн (Volkov, Belonenko, Foux, 2013). Есть основания полагать, что в Котловине Уллын Японского моря происходит топографический захват энергии этих волн. «Котловинные» волны принадлежат классу градиентно-вихревых волн, они обязаны своим происхождением совместному эффекту вращения и сферичности Земли, а также топографическим особенностям акватории. «Котловинные» волны, наряду с шельфовыми, склоновыми и «желобовыми» волнами (двойными волнами Кельвина), можно также отнести к классу топографических волн Россби. Для выяснения особенностей динамики были подготовлены массивы альтиметрических данных с 1992 г. по 2013 г. и оценены статистические характеристики изменчивости альтиметрического рельефа поверхности моря при различных масштабах пространственно-временного осреднения. Подтвердилось предположение о доминировании стояче-поступательных волн, что 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.

Ключевые слова: волны Россби, кинематика, альтиметрия, вейвлет-анализ, комплексные естественные ортогональные функции, стояче-поступательные волны, Японское море, Котловина Уллын.

Котловина Уллын (рис. 1), находящаяся в юго-западной части Японского моря, с глубинами до 2300 м, является полузамкнутой благодаря мелководным топографическим особенностям дна.

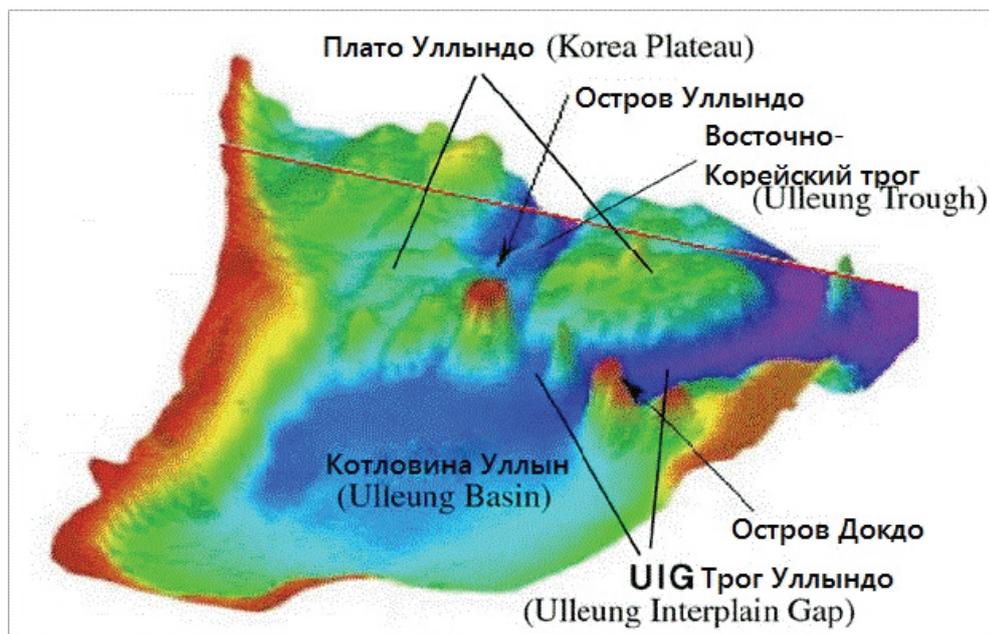


Рис. 1. Донная топография котловины Уллын (dokdocenter.org)

Цусимское течение, переносящее теплую, соленую воду Восточно-Китайского моря и Куроисио и направленное на север, разветвляется на 3 рукава после прохождения Цусимского пролива. Первая ветвь идет из восточного канала пролива вдоль Японского шельфа. Вторая ветвь, мористая, и третья, Восточно-Корейское теплое течение, исходят из западного канала. Когда Теплое Восточно-Корейское течение отрывается от Корейского побережья, оно поворачивает по часовой стрелке и вносит вклад в Теплый вихрь Уллын. Существует предположение, что этот вихрь является всего лишь меандрой течения, огибающей остров Уллындо, а основной поток идет на северо-восток по субарктическому фронту.

Согласно работам многих исследователей (Kim, Yoon, 1999; Senju et al., 2005, Трусенкова, 2007), во всех котловинах Японского моря наблюдается доминирующая циклоническая глубинная циркуляция. Некоторые авторы все же считают, что циркуляция котловины Уллын состоит как из циклонической, так и из антициклонической ячеек (Teague et al., 2005). В последние годы была выполнена серия работ, посвященных поверхностной и донной циркуляциям, на основе результатов двухлетних инструментальных измерений с помощью заякоренных измерителей течений и эхолотов, оборудованных датчиками давления, установленных в июне 1999 г. в рамках исследовательской программы Университета Род-Айленда и Морской исследовательской лаборатории, и другой приборной базы Корейского океанологического исследовательского института и Исследовательского института прикладной механики Университета Кюсю (Chang et al., 2002; Mitchell et al., 2005). Несмотря на сезонный характер всех гидрометеорологических процессов в Японском море, результаты наблюдений за течениями не содержали сезонного сигнала (Teague et al., 2005). Пренебрежимо малая сезонная изменчивость говорит о том, что глубинные течения не вызваны напрямую ни поверхностным ветром, ни сильными локальными изменениями в стратификации верхнего слоя из-за притока Цусимского течения, ни дальней зимней конвекцией (Kim et al., 2008). Напротив, в результатах численного эксперимента циркуляции глубинных вод на основе прогностической гидродинамической модели Н.Б. Шапиро и Э.Н. Михайловой, был обнаружен сезонный сигнал, возникновение которого связали с циклонической завихренностью ветра над акваторией (Трусенкова, 2007).

В работе (Mitchell et al., 2005) были построены карты среднего течения за период 2 года и каждого года измерений в отдельности, который подтвердили наличие циклонической структуры. За период с июня 1999 по июль 2001 г. в циркуляции верхнего слоя котловины Уллын доминировали 5 квазиустойчивых структур. Первая и вторая структуры были выявлены в первый год расчетов, когда вода в котловине была, в основном, теплой, а Восточно-корейское течение шло по северному и северо-восточному путям. Структуры

3, 4 и 5 наблюдались во второй год, когда вода стала холоднее, а субарктический фронт обнаруживался в котловине. В эти периоды отмечались локализация теплого вихря Уллын вокруг острова Уллындо и перемещение на запад холодного вихря Док.

Для анализа изменчивости динамических условий в котловине Уллын нами был выбран массив альтиметрических данных Японского моря, полученный из банка данных AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*), который реализует Французское Космическое Агентство (*CNES-The Centre National d'Études Spatiales*), за временной интервал 1992.10.14 – 2012.02.08 с дискретностью 7 суток. Анализируются временные альтиметрические ряды в 169 точках, находящихся между 35° и 38° с.ш., 128° и 133° в.д, данные из которых были организованы в матрицу. (aviso.oceanobs.com) Далее, исходя из предположений многих авторов о значительном вкладе стерических колебаний (Hirose, Ostrovskii, 2000; Белоненко и др., 2009), массив был подвергнут фильтрации среднемноголетнего сезонного хода (Фукс, 2003).

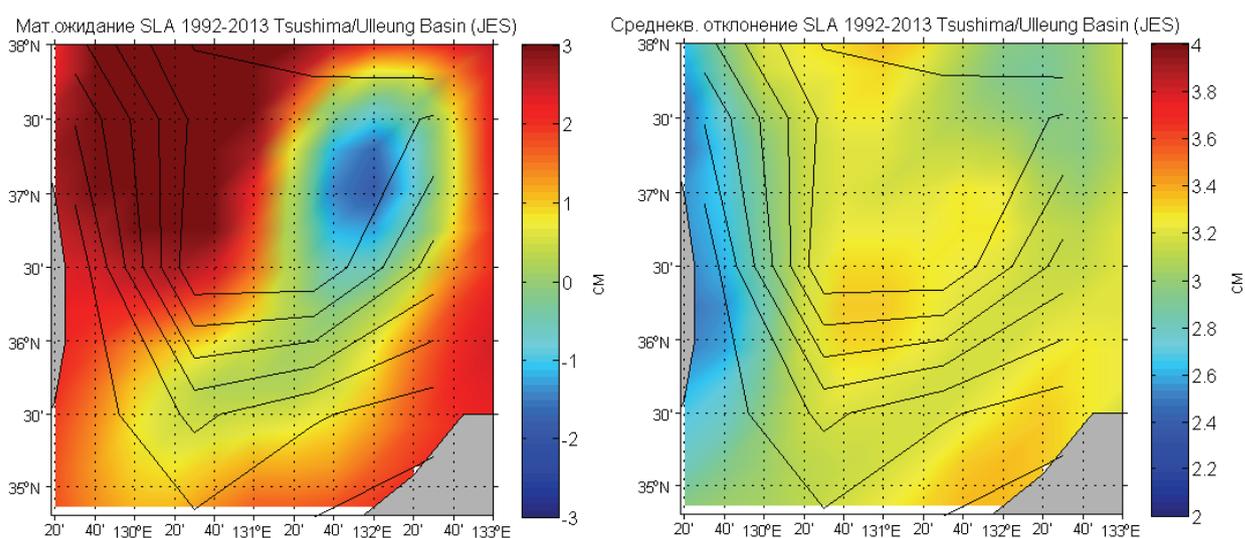


Рис. 2. Изображения (а) математического ожидания и (б) среднеквадратического отклонения аномалий уровня в котловине Уллын

Математическое ожидание аномалий уровня фиксирует наличие двухмодовой, двухузловой структуры с уровневой депрессией в восточной части котловины, где минимальные значения достигают -1,8 см (рис. 2). Данные об аномалиях уровня SLA описывают изменчивость уровня относительно средних значений, и как мы видим на рис. 2, на северо-западе циркуляция преимущественно антициклонического типа, в то время как к востоку наблюдается слабо выраженная циклоническая циркуляция. Дипольный характер распределения математического ожидания сохраняется также и после фильтрации среднемноголетнего сезонного хода, что может говорить о динамическом происхождении возмущений.

Наибольшее наблюдаемое значение среднеквадратического отклонения уровня составляет 3,4 см в самой котловине Уллын и свидетельствует об увеличении кинетической энергии в акватории (рис. 2). После фильтрации максимальные значения дисперсии соответствуют дипольной структуре с пониженными значениями между экстремумами на северо-востоке. Увеличение кинетической энергии колебаний в котловине свидетельствуют о том, что существуют физический механизм, аккумулирующий эту энергию в котловине (Volkov, Belonenko, Fouх, 2013). Покажем, что одним из таких физических механизмов являются «котловинные» стояче-поступательные топографические волны Россби (Белоненко и др., 2004).

Оценим, прежде всего, распределение полученных дисперсий изменчивости уровня по частотам. С этой целью для оценки нестационарности низкочастотных колебаний уровня в котловине были получены вейвлет-спектры во всех пунктах измерений (исходные данные и отфильтрованные), взаимные вейвлет-спектры и изображения вейвлет-когерентности и разности фаз (исходные данные) для меридионального и зонального разрезов, проходящих по 131°в.д. и 36°30'с.ш., соответственно.

Практически во всех пунктах доминирует годовой период. В то же время, только на северной границе котловины наблюдаем хорошо выраженные максимумы и на других частотах. Полугодовые колебания выражены в 1993, 1997, 2002 и 2008-2011 гг. Годовые колебания как передают энергию полугодовому масштабу, так и получают от него вследствие так называемой отрицательной вязкости. Другой важной особенностью нестационарных спектров является отсутствие максимумов годового масштаба в начальной части реализаций для долгот близких к 130°в.д., где доминируют квазидвухлетние колебания. На этой долготе наблюдается переход от области с малыми значениями дисперсии (вдоль Корейского побережья) к области с высокими (центрально-восточная часть котловины).

Ограничимся в рамках этой работы более подробным анализом годового и полугодового периодов для временных рядов, центрированных относительно среднесезонного сезонного хода уровня.

В пространственных распределениях амплитуд и начальных фаз четко выделяются области с пониженными значениями амплитуд и существенным сгущением линий изофаз (рис. 3). Согласно кинематике стоячих и стояче-поступательных волн в теории приливов, данные области являются амфидромическими.

Годовой период отличается повышенной амплитудой уровня моря в области Теплого вихря Уллын на северо-западе области с относительно низкими значениями на юго-востоке, где отмечается холодный вихрь Док. Эти две зоны окружены кольцевыми кот-

дальными линиями. Полугодовой период имеет обратную картину распределения максимумов: положительная аномалия амплитуды находится юго-восточнее «отрицательной».

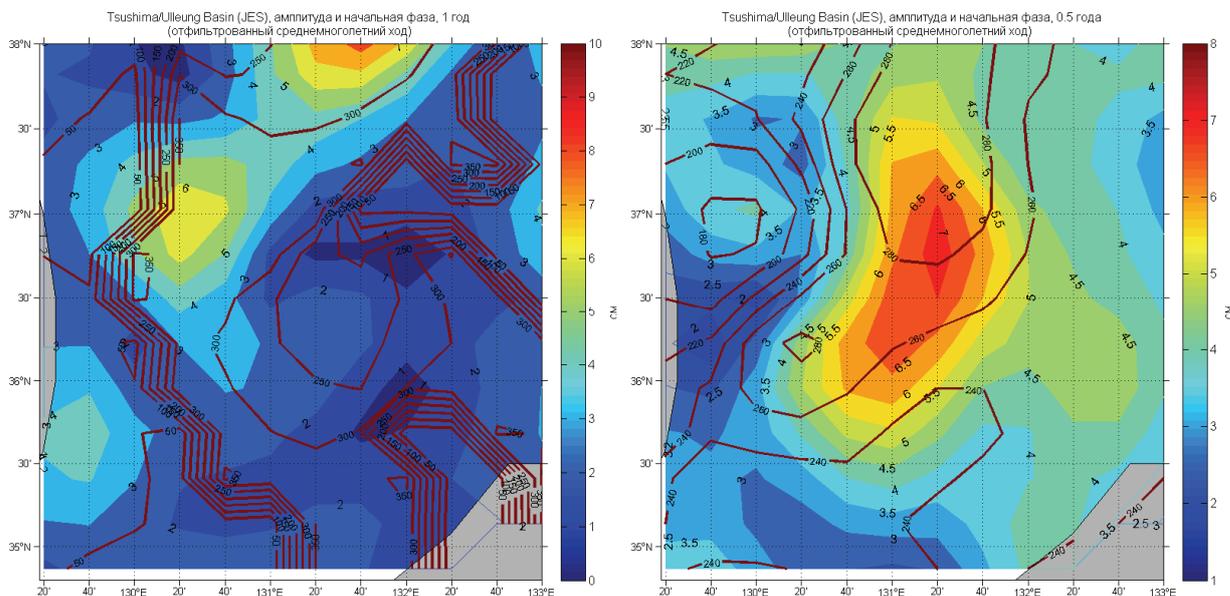


Рис. 3. Карты амплитуд и начальных фаз аномалий уровня для (а) годового и (б) полугодового периода

Покажем далее, что сложное сочетание колебаний уровня отмеченных периодов формирует картину, свойственную стояче-поступательным низкочастотным волнам. На основе комплексного сингулярного разложения нам удалось подобно (Mitchell et al., 2005) проанализировать пространственную фазовую структуру первых двух мод колебания уровня Японского моря и высказать предположение о наличии в исследуемом районе стояче-поступательных волн (Susanto et al., 1998).

Были построены карты уровня по результатам свертки второй моды (13,3% от общей дисперсии) разложения альтиметрических полей аномалий уровня на комплексные естественные ортогональные функции. Было обнаружено формирование области положительно аномалии уровня в западной части котловины с последующим ее перемещением и усилением в районе острова Уллындо. В тоже время отмечалось перемещение отрицательных аномалий уровня из восточной части котловины на запад и четко выраженное антициклоническое вращение аномалий во времени и пространстве с нулевым значением уровня между ними.

Пространственное распределение отклонений, объясненное аномалиями уровня моря, восстановленное с помощью Моды-2 (рис. 4), показывает, что эти вращающиеся моды ответственны за большую часть изменчивости высоты поверхности моря в центральной части котловины. Расстояние между гребнями вращающейся Моды-2 составляет

примерно 250 км. Мода-2 отображает вращение неоднородностей по часовой стрелке. Пространственная амплитуда второй моды характеризуется дипольной структурой, что отражает стояче-поступательные волновые движения (Белоненко, Фукс и др., 2012). Максимальное среднеквадратическое отклонение реконструированного значения уровня составляет ~ 3 см.

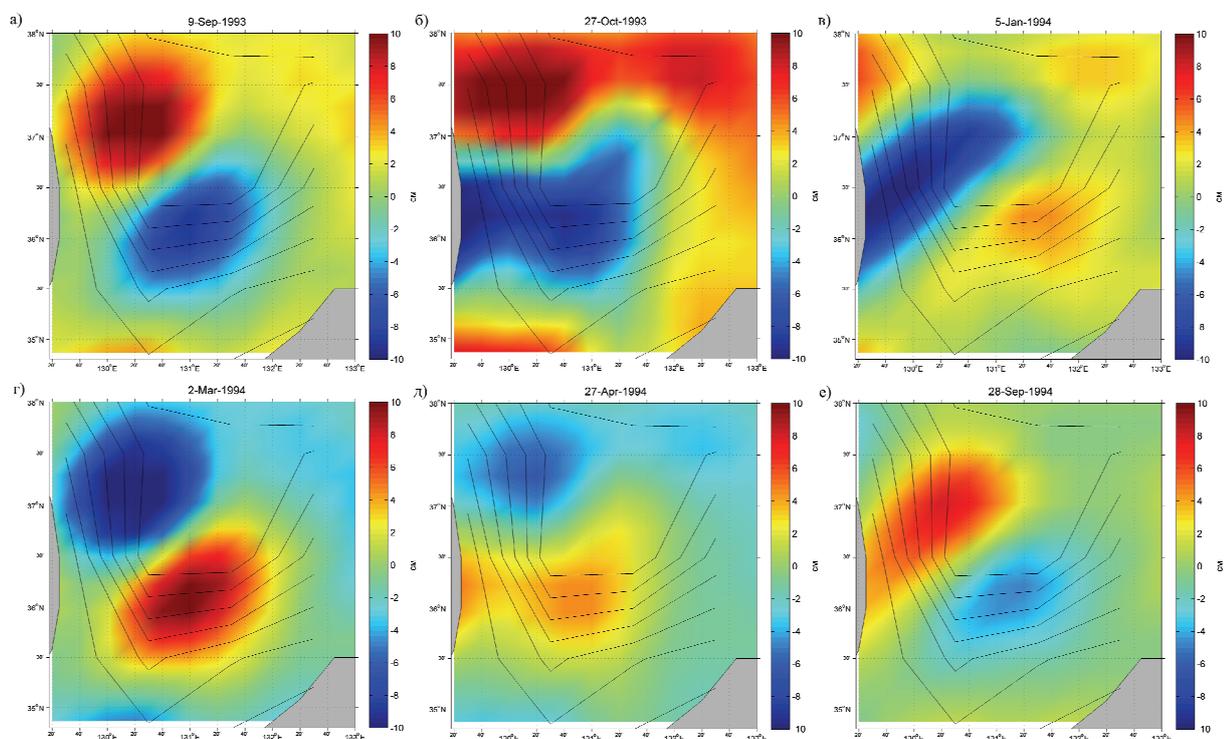


Рис. 4. 8 этапов цикла вращения аномалий уровня, восстановленного из второй моды разложения на КЕОФ

В интересующей нас области в центре впадины находятся пучности стояче-поступательной волны, не выходящие за пределы 500-м изобат. На всей периферии этой области, где среднеквадратическое отклонение не превышает 2-3 см, находятся узлы стоячей волны.

Для феноменологического описания изменчивости поля уровня моря в геострофическом приближении рассмотрим следующую модель стояче-поступательной волны в виде:

$$\zeta = A \cos(mx) \cos(ly) e^{i(\sigma t - kx - ny)}.$$

Здесь 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, A – амплитуда стояче-поступательной волны.

В некотором смысле подобные волновые движения получаются в гидродинамической теории волн Россби в замкнутых бассейнах. Теория баротропных волн Россби в

замкнутом бассейне изложена в монографиях (Педлоски, 1984; Майсек, Ле Блон, 1981) в приближении теории мелкой воды. Дж. Педлоски показывает, что моды колебаний в бассейнах произвольных геометрических форм имеют одну и ту же структуру - распространяющиеся на запад несущие волны, амплитудно-модулированные огибающей в виде стоячей волны.

Для динамической интерпретации волновых движений в котловине Уллын рассматривались дисперсионные соотношения для топографических волн Россби. В приближении теории «мелкой воды» система уравнений движения и неразрывности может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} U = \frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ V = -\frac{g}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где U и V – средние по вертикали скорости течения, ζ - возвышение уровня моря, g – ускорение силы тяжести, f - параметр Кориолиса.

Из системы (1) получаем уравнения для возвышения уровня моря:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gH}{f} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{gH}{f} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 .$$

Будем искать решение этого уравнения в виде стояче-поступательной волны:

$$\zeta = A \cos(mx) \cos(ly) e^{i(\sigma t - kx - ny)}, \quad (2)$$

где m и l – зональный и меридиональный параметры модуляции, имеющие размерность волнового числа и являющиеся обратными расстояниям между узлами стоячей волны.

Подставив (2) в (1), получим два выражения:

$$\sigma = n \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{gH}{f} \right) - k \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{gH}{f} \right), \quad (3)$$

$$l \frac{\partial H}{\partial x} \cos(mx) \sin(ly) = m \left(\frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\beta H}{f} \right) \sin(mx) \cos(ly),$$

или

$$\frac{tgly}{tg lx} = \frac{m \left(\frac{\partial \ln H}{\partial y} - \beta \right)}{l \frac{\partial \ln H}{\partial x}}. \quad (4)$$

Выражение (3) является дисперсионным соотношением, а (4) будет являться условием существования стояче-поступательных волн и определять размеры и конфигурацию огибающей стоячей волны, в частности, позволять определить местоположение узловых линий, амфидромических точек, гребней и подошв различных мод огибающей стоячей волны. Это, по существу, условие захвата стояче-поступательных волн, описываемых дисперсионным уравнением (3), и условие их резонансного возбуждения.

Феноменологический анализ альтиметрических карт южной части Японского моря показывает, что в полях возвышения уровня в диапазонах синоптической и сезонной изменчивости, наряду с известными квазистационарными потоками в виде струй Цусимского течения, термодинамические особенности района во многом определяются стояче-поступательными волнами, названные нами котловинными волнами.

Литература

1. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р., Шилов И.О. Изменчивость уровня Северо-западной части Тихого океана. Издательство СММО-ПРЕСС, СПб, 2009. 309 с.
2. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Фукс В.Р. О стояче-поступательных волнах Россби в море и океане. // Вестн. СПбГУ, 2012. Сер.7. Вып. 2. С. 91-103.
3. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане, Изд. СПбГУ, 2004. 215 С.
4. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. Пер. с англ. под ред. Городцева В.А., Леонтьева А.И. Москва. Мир, 1981. Т.1, 2. 853 с.
5. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. Т.1, 2. М.: Мир, 1984. С.811.
6. Трусенкова О.О. Сезонные и межгодовые изменения циркуляции вод Японского моря // Дальневосточные моря. Т.1. Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С.280-306.
7. Фукс В.Р. Гидродинамические основы интерпретации альтиметрических съёмки морской поверхности. Колебания уровня в морях, сб. науч. трудов. СПб: Гидрометеиздат, 2003.
8. Chang K.-I., Hogg N.G., Suk M.-S., Byun S.-K., Kim Y.-G., Kim K. Mean flow and variability in the southwestern East Sea // Deep-Sea Research I 49. 2002. 2261-2279.
9. Dwi Susanto R., Zheng Q., Yan X.-H. Complex Singular Value Decomposition Analysis of Equatorial Waves in the Pacific observed by TOPEX/Poseidon Altimeter // Jour. of Atm. and Oceanic Tech. American Meteor. Society. 1998. Vol. 15. P.764-774.
10. Hirose N., Ostrovskii A.G. Quasi-biennial variability in the Japan Sea // J. Geophys. Res.2000. V. 105. C12028. P. 14011-14027.
11. Kim C.-H., Yoon J.-H. A numerical modeling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea // J. of Oceanography. 1999. Vol. 55. P. 327-345.
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 52. 2005. 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 52. 2005. 1802-1826.
14. 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 // Geophys. Res. Let. 2013. Vol. 40. P. 738-743.

Gradient-vorticity waves in the Ulleung Basin of the Sea of Japan

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: victor1285@yandex.ru

Phenomenological analysis of Southern JES (the Japan/East Sea) SLA altimetry maps show that in sea level fields in synoptic and seasonal variability range along with known quasi-stationary fluxes of the Warm Tsushima Current regional thermo-dynamical features are mostly defined by static-progressive waves. For dynamics features study altimetry sea level relief data from 1992 to 2013 was statistically assessed. The Ulleung Basin sea level oscillations mean, dispersion and spectra spatiotemporal distributions as well as wavelet spectra in terms of high nonstationarity were derived. Studies have shown that low-frequency oscillations mostly belong to the seasonal, annual, quasi-biennial and 4 year spectra bands. Harmonic and spectral analyses allowed to assess regional large-scale wave perturbations parameters and to find out that in the range of synoptic and seasonal variability of the hydrodynamic

fields water regime is determined by static-progressive waves that are generated by capturing the energy of the main currents due to the topography of this region.

Keywords: Rossby waves, kinematics, altimetry, wavelet analysis, complex empirical orthogonal functions, static-progressive waves, Sea of Japan/ East Sea, Ulleung/Tsushima Basin.

References

1. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Staritsyn D.K., Foux V.R., Shilov I.O., *Izmenchivost' urovnya Severo-Zapadnoy chasti Tikhogo okeana* (North-Western Pacific Ocean sea-level variability) SMIO press, St.Petersburg, 2009, 309 p.
2. Belonenko T.V., Koldunov V.V., Foux V.R., O stoyache-postupatelnykh volnah Rossbi v more i okeane (On static-progressive Rossbi waves in seas and oceans), *Vestnik SPSU*, 2012, S.7, Vol.2, pp. 91-103.
3. Belonenko T.V., Zakharchuk E.A., Foux V.R., *Gradientno-vikhrevye volny v okeane* (Ocean gradient-vorticity waves), St.Petersburg: SPSU, 2004, 215 p.
4. Le Blond P., Mysak L., *Volny v okeane* (Waves in the ocean), Moscow: Mir, 1981, vol.1, 2, 853 p.
5. Pedlosky J., *Geofizicheskaya gidrodinamika* (Geophysical hydrodynamics), Moscow: Mir, Vol.1, 2, 1984, 811 p.
6. Trusenkov O.O., Sezonnnye i mezhgodovye izmeneniya zyrkulyazii vod Yaponskogo moray (seasonal and interannual variation of the Sea of Japan water circulation), *Dalnevostochnye morya, Vol.1, Okeanologicheskie issledovaniya*, Moscow: Nauka, 2007, pp. 280-306.
7. Foux V.R., Gidrodinamicheskiye osnovy interpretazii altimetricheskikh s'emok morskoy poverkhnosti (Hydrodynamical basics of sea surface altimetry data interpretations), *Sea level oscillations*, St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003.
8. Chang K.-I., Hogg N.G., Suk M.-S., Byun S.-K., Kim Y.-G., Kim K., Mean flow and variability in the southwestern East Sea, *Deep-Sea Research I* 49, 2002, pp. 2261-2279.
9. Dwi Susanto R., Zheng Q., Yan X.-H., Complex Singular Value Decomposition Analysis of Equatorial Waves in the Pacific observed by TOPEX/Poseidon Altimeter, *Jour. of Atm. and Oceanic Tech. American Meteor. Society*, 1998, Vol. 15, pp. 764-774.
10. Hirose N., Ostrovskii A.G. Quasi-biennial variability in the Japan Sea, *J. Geophys. Res.* 2000, Vol. 105, C12028, pp. 14011-14027.
11. Kim C.-H., Yoon J.-H. A numerical modeling of the upper and the intermediate layer circulation in the East Sea, *J. of Oceanography*, 1999, Vol. 55, pp. 327-345.
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* 52, 2005, 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* 52, 2005, pp. 1802-1826.
14. 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, *Geophys. Res. Let.*, 2013, Vol. 40, pp. 738-743.