

## Наблюдения волн Россби в северо-западной части Тихого океана

Т.В. Белоненко

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199178, Санкт-Петербург, В.О., 10 линия, 33–35,  
e-mail: btvlisab@yandex.ru

Анализировались аномалии уровня океана (массив SLA, предоставленный AVISO) для акватории Северо-западной части Тихого океана, представляющие собой комбинированные альтиметрические данные трех спутников: Topex/Poseidon, ERS-1 и ERS-2, охватывающие период времени с 14.10.1992 г. по 31.03.2010 г. По данным, из которых предварительно отфильтровывался сезонный ход, строились графики изоплет уровня океана (пространственно-временные разрезы), на основе которых определялись эмпирические характеристики волн Россби (длина, период и фазовая скорость). Для зональных изоплет по 30, 35, 40, 45, 50 и 55° с.ш. строились графики дисперсионных кривых, с которыми сравнивались полученные эмпирические характеристики волн Россби. Построены графики изоплет вдоль шельфа Курило-Камчатского желоба, получены эмпирические характеристики топографических волн Россби, для которых шельф Курило-Камчатского желоба является волноводом.

**Ключевые слова:** волны Россби, изоплеты, топографические волны Россби, уровень моря, Северо-западная часть Тихого океана.

### Введение

Волны Россби играют важную роль в формировании крупномасштабной циркуляции океана. Они ответственны за западную интенсификацию циркуляционных круговоротов, являясь динамическим механизмом приспособления океана к крупномасштабным изменениям атмосферных воздействий. Совместно с береговыми захваченными волнами волны Россби представляют собой один из важнейших механизмов передачи возмущений из тропических зон океана в средние и высокие широты. Предполагается, что волны Россби, генерированные течением Эль-Ниньо, ответственны за аномалии океанской циркуляции, которые происходят с 10-летним запаздыванием в средних широтах северной части Тихого океана. Их исследование — одна из главных задач познания причин изменчивости крупномасштабной океанской циркуляции (Ле Блон, Майсек, 1981; Фукс, 1977).

С появлением спутниковых альтиметрических измерений возникает замечательная возможность исследования градиентно-вихревых волн, и в частности, волн Россби, на основе этих данных. Начало этих исследований связано с запуском спутника Topex/Poseidon в сентябре 1992 г., альтиметр которого измерял уровень морской поверхности с великолепной точностью около 2...4 см, что соответствует относительной ошибке в  $3 \cdot 10^{-8}$  с круговой орбиты на высоте 1336 км. По спутниковым наблюдениям за уровнем океана можно построить глобальные карты топографии морской поверхности с точностью, необходимой для исследования волн Россби в океане. Это стало возможным благодаря совместному анализу данных Topex/Poseidon и альтиметрических измерений возвышений уровня с европейских спутников ERS-1 и ERS-2 за продолжительный период наблюдений, начиная с сентября 1992 г. (Atmospheric..., 1998).

Теоретическое изучение волн Россби проводилось многими отечественными и зарубежными исследователями (см. обзоры литературы по этой теме в работах: Белоненко и др., 1997, 2004, 2012; Каменкович и др., 1982; Коняев, Сабинин, 1992; Ле Блон, Майсек, 1981; Монин, Жихарев, 1990; Педлоски, 1984; Фукс, 1977). Анализ спутниковых альтиметрических данных обнаружил ожидаемое западное распространение наблюдавшихся волн во всех бассейнах (Chelton, Schlax, 1996; Chelton, de Szoeke, 1998; Cipollini et al., 2006; Castruccio

et al., 2008; Killworth et al., 1997; Koblinsky et al., 1998; Qiu et al., 1997; The impact..., 1998; Zang, Wunsch, 1999). Д. Челтон с соавторами (Chelton et al., 1997) приводит подробный анализ исследований волн Россби, основанный на наблюдениях с различных спутников.

При анализе натурных наблюдений за уровнем океана часто предполагается присутствие волн Россби в тех или иных океанологических явлениях, однако до сих пор остаются ограниченными попытки их выделения на основе эмпирических данных. Целью данной статьи является описание на основе альтиметрических измерений эмпирических характеристик волн Россби.

В данной работе на основе исследования альтиметрических наблюдений за уровнем в северо-западной части Тихого океана для 30, 35, 40, 45, 50 и 55° с.ш. представлены эмпирические оценки характеристик распространяющихся на запад волн Россби (длина, период и фазовая скорость).

Известно также, что вграничных областях океана существенный вклад в изменчивость уровня вносят топографические или шельфовые волны, также принадлежащие к классу градиентно-вихревых волн, на распространение которых помимо гирокосмических сил влияют эффекты топографии дна. В этом случае шельф играет роль волновода, вдоль которого распространяются волны, быстро затухая за его пределами. Для Курило-Камчатского шельфа распространяющиеся вдоль волновода волны ранее исследовались методом взаимно-спектрального анализа. Использовались уровенные наблюдения, взятые на различных метеографических постах, расположенных вдоль Курило-Камчатского шельфа (Белоненко, 2001; Белоненко и др., 2004; Ефимов и др., 1985; Huthnance, 1975). Сдвиг фаз в наступлении максимумов уровня на различных постах давал возможность определить характеристики распространяющихся шельфовых волн (Ефимов и др., 1985; Лаппо и др., 1978). В данной работе этот класс волн рассматривается на основе спутниковой альтиметрической информации.

## Материалы и методы

Исследования проводились для акватории Северо-западной части Тихого океана, ограниченной 30 и 55° с.ш., 145 и 170° в.д. Использовался массив полей аномалий уровня моря с сайта AVISO (<http://atoll-motu.aviso.oceanobs.com>), представляющий собой комбинированные данные трех спутников: Topex/Poseidon, ERS-1 и ERS-2, охватывающие период времени с 14.10.1992 г. по 31.03.2010 г. (массив SLA — Sea Level Anomaly). Дискретность альтиметрических данных составляет семь суток, вдольтрековые данные интерполированы в узлы сетки 0,25×0,25°.

Массив данных был использован для построения зонально-временных и меридионально-временных распределений значений аномалий уровня моря для исследования особенностей пространственно-временной изменчивости волн Россби. Было построено шесть зональных (вдоль 30, 35, 40, 45, 50 и 55° с.ш.) и шесть меридиональных (вдоль 145, 150, 155, 160, 165, 170° в.д.) изоплет уровня за период с 1992 по 2010 г., всего 12 изоплет. На зональных изоплетах отмечается очевидное распространение гребней волновых систем на запад. Перепады уровня моря в волнах составляют в основном от 20 до 60 см. Вдольмеридиональные временные разрезы выявляют в большинстве случаев сезонный ход изменений уровня: летом — высокое стояние уровня, зимой — низкое; доминируют, таким образом, стericеские эффекты, волновые движения не выделяются.

Изменчивость уровня и на зональных, и на меридиональных изоплетах в большей степени определяется вкладом стericеской составляющей, дающей существенный вклад в сезонную изменчивость. Этот вклад является достаточно существенным (от 5 до 20 см), поэтому из исходных данных был удален сезонный ход (вычитались среднемноголетние среднемесячные значения), после чего на зональных изоплетах волновая структура становится гораз-

до более отчетливой. В то же время после удаления сезонного хода на меридиональных изоплетах картина существенно не изменилась, что дополнительно свидетельствует о том, что наблюдаемые на зональных изоплетах изменения уровня океана являются именно волнами Россби, распространяющимся в западном направлении.

## Результаты

При феноменологическом анализе зональных изоплет фиксировались гребни волн (рис. 1) и рассчитывались соответствующие эмпирические характеристики — длина и период волн. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Характеристики волн Россби по спутниковым зональным альтиметрическим изоплетам уровня Северо-западной части Тихого океана

30° с.ш.		35° с.ш.		40° с.ш.		45° с.ш.		50° с.ш.		55° с.ш.	
Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут	Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут	Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут	Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут	Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут	Длина волны $L$ , км	Период $T$ , сут
620	110	905	284	522	162	385	284	109	110	143	122
425	73	862	243	522	162	370	243	315	219	103	81
425	73	905	284	427	122	385	284	576	365	103	81
680	110	905	284	617	284	385	284	360	292	168	162
890	146	905	284	474	203	385	284	274	183	168	162
540	73	774	162	332	162	294	162	360	292	113	122
540	73	949	284	617	162	389	284	159	110	103	81
480	73	949	284	522	243	389	284	245	219	103	81
720	110	774	243	522	162	364	243	576	365	168	162
720	110	862	243	522	162	322	243	360	292	168	162

Далее, для района Курило-Камчатского желоба исследовались топографические волны Россби, которые также принадлежат классу градиентно-вихревых волн. Эти волны обязаны своим происхождением совместному эффекту вращения и сферичности Земли и уклонов дна. Существование таких градиентно-вихревых волн в районе Курило-Камчатского желоба подтверждается результатами исследований колебаний уровня в синоптическом диапазоне частот (Белоненко и др., 2004; Ефимов и др., 1985; Лаппо и др., 1978). Для выделения топографических волн Россби в районе шельфа вдоль Курило-Камчатского желоба из исходного массива данных были отобраны временные ряды в 46 пунктах, расположенных вдоль шельфа Курильской гряды, между пунктами с координатами 42° с.ш., 143° в.д. и 52° с.ш., 158° в.д. Как и ранее, использовались данные, из которых также предварительно был удален сезонный ход. На рис. 2 представлены соответствующие изоплеты уровня океана, можно отметить волновой характер пространственно-временной структуры изменчивости уровня, которая представлена последовательностью гребней и впадин с генеральным направлением распространения волн на юго-запад. Такое направление (вдоль шельфа, оставляя берег справа) характерно для топографических волн Россби (Ефимов и др., 1985; Ле Блон, Майсек, 1981). Перепады уровня моря в рассматриваемых волнах невелики, диапазон их изменчивости от 5 до 30 см.

Выделенная волновая структура (13 гребней) позволяет оценить характеристики наблюдаемых волн: периоды 162, 122 и 81 сут; длины волн 162, 122 и 81 км; фазовая скорость составляет 1,2 см/с. Таким образом, получены эмпирические характеристики и для топографических волн Россби, распространяющихся на юго-запад вдоль шельфа Курило-Камчатской гряды.

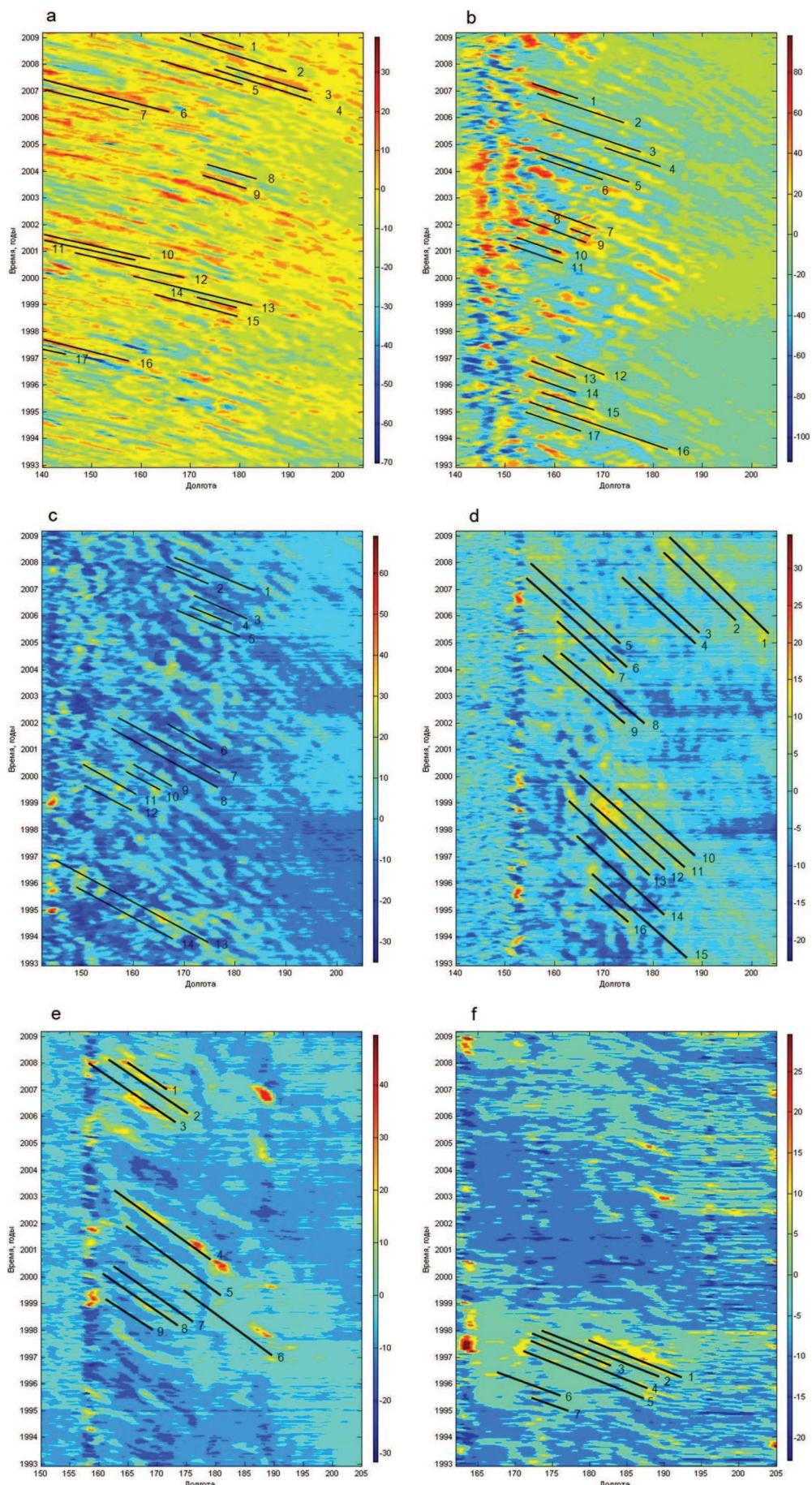


Рис. 1. Изоплеты уровня моря (в см) с выделенными перемещениями гребней волн:  
a — 30° с.ш.; b — 35; c — 40; d — 45; e — 50; f — 55° с.ш.

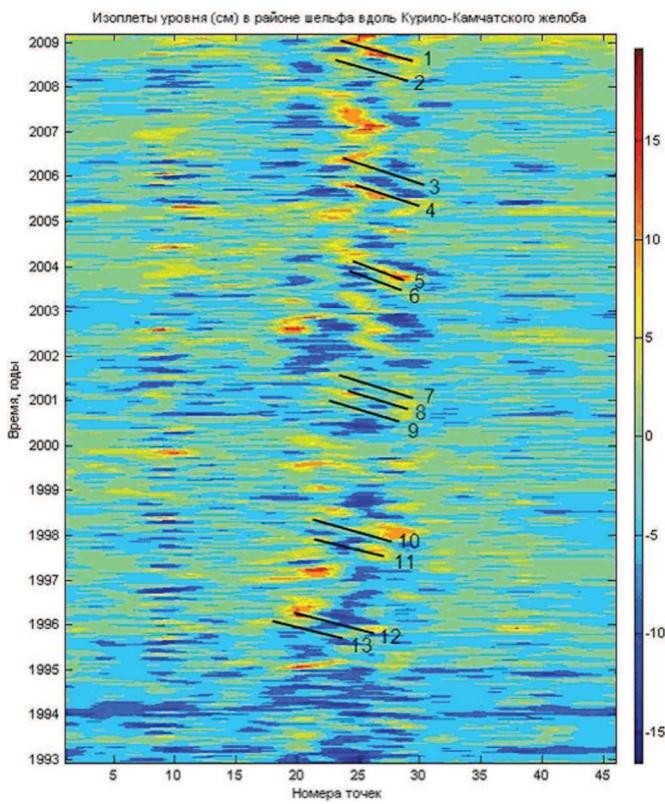


Рис. 2. Изоплеты уровня моря (в см) вдоль Курило-Камчатского шельфа, построенные по массиву данных с удаленным сезонным ходом.

На оси абсцисс нанесены номера точек, расположенных на северо-востоке шельфа Курило-Камчатского желоба на прямой, соединяющей точку 1 ( $42^{\circ}$  с.ш.,  $143^{\circ}$  в.д.) и точку 46 ( $52^{\circ}$  с.ш.,  $158^{\circ}$  в.д.).

### Обсуждение и выводы

На зональных изоплетах отчетливо выражен волновой характер пространственно-временной структуры изменчивости уровня, которая представлена последовательностью гребней и впадин, с западным направлением распространения колебаний. Эти волновые движения достаточно устойчивы во времени и наблюдаются на изоплетах без существенных изменений иногда до 3-5 лет. На меридиональных изоплетах четко выражен сезонный ход изменений уровня: летом — высокое стояние уровня, зимой — низкое, а волновые движения не выделяются.

Теоретические дисперсионные соотношения зональных баротропных волн Россби

имеют вид:  $\sigma = -\frac{\beta k}{k^2 + R^{-2}}$ , где  $\sigma$  — частота волны;  $k$  — волновое число;  $R^{-2} = \frac{f^2}{g H}$  —

баротропный радиус деформации Россби;  $f = 2w\sin\phi = f_0 + \beta y$  — приближение  $\beta$ -плоскости;  $w$  — угловая скорость вращения Земли;  $\phi$  — географическая широта;  $f_0, \beta$  — некоторые константы, зависящие от широты;  $H$  — глубина океана.

Для сопоставления эмпирических характеристик волн Россби с дисперсионными соотношениями нами были построены шесть дисперсионных кривых, на которые были нанесены точки, координаты которых соответствуют характеристикам волн Россби, выделенным при анализе изоплет уровня океана. Анализ полученных рисунков показал хорошее соответствие эмпирических характеристик волн Россби дисперсионным кривым, при этом оказалось, что подавляющее большинство выделенных волн соответствует бароклинным модам, но на каждом из дисперсионных графиков выделяются волны Россби, относящиеся также и к баротропным модам.

Полученные при анализе изоплеты параметры волн Россби являются характерными для волн этого класса:  $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  и 81 сут;  $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  и 109 сут;  $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  и 162 сут. При этом значения зональной составляющей длин волн изменяются в диапазоне от 174 до 1075 км. Отметим, что не наблюдается значимой концентрации волновой энергии на годовых и полугодовых периодах.

На изоплетах аномалий уровня океана в районе шельфа вдоль Курило-Камчатского желоба выделены топографические волны Россби, распространяющиеся в юго-западном направлении. Анализ перемещений гребней топографических волн Россби показал, что они распространяются с фазовой скоростью, равной 1,2 см/с.

Также можно сделать вывод о закономерностях распространения волн Россби. С продвижением на север волновая структура претерпевает значительные изменения, а именно: увеличивается наклон изоплет на графиках и, соответственно, уменьшается фазовая скорость волн — с 7,4 до 1,3 см/с (табл. 2).

**Таблица 2.** Средние характеристики волн Россби в зависимости от широты

Широта, ° с.ш.	30	35	40	45	50	55
<b>Средняя длина волны (км)</b>	604	879	508	367	333	134
<b>Средний период (сут)</b>	95	259	182	259	245	121
<b>Фазовая скорость (см/с)</b>	7,4	3,9	3,2	1,6	1,5	1,3

Полученные данные позволяют оценить промежуток времени, за который волны Россби пересекают Тихий океан. Д. Челтон с соавторами (Chelton et al., 2007), анализируя спутниковые альтиметрические измерения за десятилетний период с сентября 1992 по август 2002 г., на  $30^\circ$  с.ш. (“Owing to the rotation and spherical shape of the Earth, Rossby waves propagate only in a westerly direction with phase speeds of  $1\dots 50 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$  (decreasing with increasing latitude), requiring a decade to cross the Pacific Ocean along  $30^\circ \text{ N}$ ”) этот промежуток оценивает в десять лет. В нашем исследовании, основанном на детальном анализе изоплет, фазовая скорость волн Россби на  $30^\circ$  с.ш. составляет 7,4 см/с, и, следовательно, волны Россби на этой широте пересекают Тихий океан за пять лет.

Очевидно, проявляющиеся на изоплетах перемещающиеся гребни относятся к группе волн Россби, сложным образом взаимодействующих между собой. Отметим, что для волн различных длин и периодов фазовая скорость остается постоянной, несмотря на то, что для каждой широты существует свой набор характеристик распространяющихся волн Россби (см. табл. 1). Это говорит о том, что волны Россби не имеют дисперсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-05-00009-а) и в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы».

## Литература

1. Белоненко Т.В. Градиентно-вихревые волны в северо-западной части Тихого океана // Вестн. С.-Петербургского ун-та. 2001. Сер. 7. Вып. 3. № 23. С. 93–98.
2. Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Градиентно-вихревые волны в океане. СПб., 2004. 215 с.
3. Белоненко Т.В., Колдунов В.В., Фукс В.Р. О стояче-поступательных волнах Россби в море и океане // Вестн. С.-Петербургского ун-та. 2012. Сер. 7. Вып. 2. С. 91–103.
4. Белоненко Т.В., Фукс В.Р. Годовые и полугодовые волновые возмущения уровня северо-западной части Тихого океана по альтиметрическим данным // Метеорология и гидрология. 2001. № 8. С. 57–63.

5. Белоненко Т.В., Фукс В.Р., Старицын Д.К. и др. Истоки Ойясио. СПб., 1997. 248 с.
6. Ефимов В.В., Кулаков Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Волны в пограничных областях океана. Л., 1985. 280 с.
7. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане. Л., 1982. 264 с.
8. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб., 1992. 272 с.
9. Лаппо С.С., Скрипник А.В., Рабинович А.Б. О связи атмосферного давления и уровня северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. 1978. № 12. С. 50–55.
10. Ле Блон П., Майсек Л. Волны в океане. М., 1981. Т. 1. 480 с.; Т. 2. 365 с.
11. Монин А.С., Жихарев Г.М. Океанские вихри // Успехи физических наук. 1990. Т. 160. № 5. С. 1–47.
12. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М., 1984. Т. 1. 398 с.; Т. 2. 416 с.
13. Фукс В.Р. Планетарные волны в океане. Л., 1977. 176 с.
14. Atmospheric forcing and large-scale fluctuations in the Pacific ocean // AVISO altimetry, 1998. N. 6. P. 60.
15. Castruccio F., Verron J., Gourdeau L., Brankart J.-M., Brasseur P. Joint altimetric and in-situ data assimilation using the GRACE mean dynamic topography: a 1993–1998 hindcast experiment in the Tropical Pacific Ocean // Ocean Dynamics. 2008. V. 58. Iss. 1. P. 43–63.
16. Chelton D., de Szoeke R. The dynamics of low-frequency variability of the large-scale ocean circulation // AVISO. 1998. N. 6.
17. Chelton D., Schlax M. Global observations of oceanic Rossby waves // Science. 1996. V. 272. N. 5259. P. 234–238.
18. Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M., De Szoeke R.A. Global observations of westward energy propagation in the ocean: Rossby waves or nonlinear eddies? // American Geophysical Union Fall Meeting. 2007. V. 87. N. 52.
19. Cipollini P., Challenor P.G., Colombo S. A method for tracking individual planetary waves in remotely sensed data // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. P. 159–166.
20. Huthnance J. On trapped waves over continental shelf // J. Fluid Mechanics. 1975. V. 69. P. 689–704.
21. Killworth P., Chelton D., de Szoeke R. The speed of observed and theoretical long extratropical planetary waves // J. Physical Oceanography. 1997. V. 27. Iss. 9. P. 1946–1966.
22. Koblinsky C., Wang L., Howden S. Mid-latitude seasonal-to-interannual variability observed by Topex/Poseidon // AVISO altimetry. 1998. N. 6. P. 65.
23. Qiu B., Miao W., Muller P. Propagation and decay of forced and free baroclinic Rossby waves in off-equatorial oceans // J. Physical Oceanography. 1997. V. 27. P. 2405–2417.
24. The impact of first mode baroclinic planetary waves on western boundary currents // AVISO altimetry. 1998. N. 6. P. 40.
25. Zang X., Wunsch C. The observed dispersion relationship for North Pacific Rossby wave motions // J. Physical Oceanography. 1999. V. 29. Iss. 9. P. 2183–2190.

## Rossby waves observation in the Northwestern Pacific

T.V. Belonenko

Saint Petersburg State University,  
199178, St. Petersburg, 10<sup>th</sup> Line, 33/35,  
e-mail: btvlisab@yandex.ru

A combined collection of altimetry data from three satellites - Topex/Poseidon, ERS-1 and ERS-2, covering the time span 14.10.1992 through 31.03.2010, was analyzed in the form of sea level anomalies (SLA set provided by AVISO) over the northwestern Pacific water area. After the seasonal course was filtered out, the data were mapped as sea level isopleths (spatial-temporal sections) which allow determining empirical characteristics of Rossby waves such as length, period and phase speed. For the zonal isopleths along 30°, 35°, 40°, 45°, 50° and 55° N, dispersion curves are graphed and used as a reference at comparison with the obtained empirical characteristics of Rossby waves. From the patterns of isopleths pictured along the Kuril-Kamchatka Deep shelf, we obtain empirical characteristics of topographical Rossby waves, for which the shelf is a waveguide..

**Keywords:** Rossby waves, isopleths, topographical Rossby waves, sea level anomaly data, Northwestern Pacific, hovmoller diagram.