

Связь низкочастотной изменчивости адвекции тепла и уровня в Северо-западной части Тихого океана

Т.В. Белоненко

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

В статье обсуждается вопрос, почему волны Россби проявляются не только в изоплетах альтиметрических наблюдений за уровнем океана, но также и в спутниковых наблюдениях за температурой поверхности и наблюдениях за концентрацией хлорофилла-а. Выдвигается и проверяется гипотеза об адвективном переносе свойств воды меридиональными течениями волн Россби. Показано, что характеристики распространяющихся на запад волн Россби являются также и характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и характеристиками волновых возмущений в поле температуры. Этот факт позволяет отождествлять оценки волновых возмущений в поле температуры с оценкой соответствующих волновых возмущений в поле скорости течения или возвышения уровня. Рассматривается низкочастотная изменчивость уровня для Северо-западной части океана на основе спутниковых альтиметрических измерений. Анализируются данные ADT и SLA с 14.10.1992 г. по 17.10.2007 г. с дискретностью 1/3 ° широты и долготы, временная дискретность – 7 суток. Исследуемый район охватывает акваторию 30 – 60°с.ш. и 135 – 200°в.д. Полученные оценки масштабов изменчивости уровня океана являются также оценками низкочастотной изменчивости температуры воды.

Ключевые слова: волны Россби, температура воды, адвекция тепла, Куросио, уровень моря, Северо-западная часть Тихого океана, изоплеты.

Введение

В последние годы появились множество исследований, в которых отмечается, что волны Россби, обусловленные совместным эффектом сферичности и вращения Земли, обнаруживаются не только в изоплетах альтиметрических наблюдений, но также и в спутниковых наблюдениях за температурой поверхности и наблюдениях за концентрацией хлорофилла-а. Об этом говорится в исследованиях последних лет, обзоры по этим вопросам можно найти в работах (Cipollini et al., 1997; 2000; 2001; Hill et al., 2000; Challenor et al.; 2004; Killworth et al., 2004; Quartly et al., 2003). Авторы, анализируя спутниковые данные, полученные с использованием различных сенсоров, показывают, что низкочастотная изменчивость различных океанологических полей имеет общие черты, проявляющиеся, в частности, на зональных пространственно-временных разрезах спутниковых измерений уровня океана, температуры поверхности воды и концентрации хлорофилла. Судя по всему, в их низкочастотной изменчивости присутствует общий механизм, определяющий указанное сходство, и этот механизм проявляется через волны Россби.

Волны Россби – это низкочастотные волны, их частота значительно меньше частоты инерционных колебаний: период инерционных колебаний составляет на полюсе 12 часов, в средних широтах равен 1 суткам. Параметры волн Россби могут изменяться в широком диапазоне пространственно-временных масштабов: длины – от нескольких километров до нескольких тысяч километров, а периоды – от нескольких суток до нескольких лет. В то же время собственные амплитуды волн Россби невелики и не превышают несколько десятков сантиметров. Вот почему спутниковые наблюдения являются основным источником эксперимен-

тальных данных о волнах Россби в океане. Волны Россби являются продольно-поперечными и проявляются в орбитальных течениях, вытянутых в меридиональном направлении.

Волны Россби, обязанные своим происхождением вращению и сферичности Земли, проявляются в поле уровня океана, а низкочастотная изменчивость уровенных полей в океане характеризует свойства волн Россби. Однако до сих пор остается загадкой, почему, например, низкочастотная изменчивость температурных аномалий также обнаруживает подобные свойства. Авторы выдвигают различные гипотезы, но ни одна из них не является окончательно обоснованной. Ниже предлагается одно из возможных объяснений, почему волны Россби проявляются не только в уровне океана, но также и в низкочастотной изменчивости температуры.

Основные уравнения

Рассмотрим уравнение распространения тепла в океане, проинтегрированное для верхнего квазиоднородного слоя:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = A \Delta \theta + \frac{q}{h}$$

Здесь θ – температура воды в верхнем квазиоднородном слое, u и v составляющие скорости течения на параллель и меридиан, A – коэффициент горизонтальной турбулентной теплопроводности; q – поток теплоты через поверхность океана; h – толщина верхнего квазиоднородного слоя. Каждый член рассматриваемого уравнения вносит весомый вклад в уравнение

распространения тепла в океане, и суммарный вклад определяет изменчивость $\frac{\partial \theta}{\partial t}$.

Есть основания полагать, что для низкочастотного диапазона в океане (периоды больше года) доминирующий вклад в изменчивость температурных полей вносит адвекция волнами Россби.

В работе Белоненко и др. (2011) рассматривалась задача адвекции хлорофилла волнами Россби и модель переноса, диффузии и биотической трансформации концентрации хлорофилла. Данный подход позволяет трансформировать сделанные выводы и применить их также для уравнения теплопроводности.

Рассмотрим проинтегрированное по глубине уравнение теплопроводности в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} = F, \quad (1)$$

где θ – функция температуры воды, t – время, x , y – декартовы координаты, u , v – соответственно проекции скоростей течения на координатные оси, F – заданная функция координат x , y и времени t , включающая внешние факторы. Ограничимся пока однородным случаем: $F=0$.

Пусть поля течений и температуры воды представляют собой суммы некоторого усредненного невозмущенного состояния \bar{u} , \bar{v} , $\bar{\theta}$ и возмущений u' , v' , θ' относительно этого среднего состояния:

$$\begin{aligned} u(t, x, y) &= \bar{u}(t, x, y) + u'(t, x, y), \\ v(t, x, y) &= \bar{v}(t, x, y) + v'(t, x, y), \\ \theta(t, x, y) &= \bar{\theta}(t, x, y) + \theta'(t, x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

Подставим выражения (2) в уравнение (1):

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + u' \frac{\partial \theta'}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + v' \frac{\partial \theta'}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

Предположим, что выполняется уравнение переноса для среднего поля $\bar{\theta}(t, x, y)$. Исключая квадратичные нелинейности и предполагая, что флюктуационные поля не влияют на средние значения, тогда получаем:

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

В уравнении (4) первое слагаемое – временная изменчивость возмущений температуры, второе слагаемое – перенос средним зональным течением зональных градиентов поля возмущений этой характеристики, третье слагаемое – перенос флюктуационным течением зональных градиентов в поле средних значений характеристики, четвертое слагаемое – перенос средним меридиональным течением меридиональных градиентов поля возмущений характеристики, пятое (последнее) слагаемое – перенос флюктуационным течением меридиональных градиентов в поле средних значений характеристики.

Для распространяющихся на запад волн Россби на зональном потоке ($\bar{v}(t, x, y) = 0$),, которые, как известно, проявляются в поперечных течениях, можно принять:

$$u'(t, x, y) = 0, v'(t, x, y) = A(y) \cdot e^{i(\sigma t - kx)}.$$

Тогда уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{\partial \theta'}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \theta'}{\partial x} + u' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \theta'}{\partial y} + v' \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Для постоянного среднего зонального течения решение уравнения (5) может быть записано в следующем виде:

$$\theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ i(\sigma - \bar{u} k) \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t e^{i(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases}$$

Или, в соответствии с формулой Эйлера,

$$\operatorname{Re} \theta(t, x, y) = \begin{cases} -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} \\ \frac{(\sigma - \bar{u} k)}{\sin(\sigma t - kx)} + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k \neq 0, \\ -A(y) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} t \cos(\sigma t - kx) + \Phi(\bar{u} t - x), & \sigma - \bar{u} k = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Условие $\sigma - \bar{u} k = 0$ в формуле (6) означает равенство средней зональной скорости фазовой скорости волн Россби c : $\bar{u} = c$. При $t=0, x=0$ функция $\Phi(0) = \theta(0, 0, y) = \theta_0(y)$ задает начальное поле температуры, изменяющееся в меридиональном направлении.

Таким образом, при поставленных нами условиях показано, что частоты, волновые числа и, соответственно, фазовые скорости волн в поле температуры совпадают с соответствующими значениями частот, волновых чисел и фазовых скоростей в поле меридиональной составляющей скорости течения $v'(t, x, y)$.

Дополнительно оценим связь волновых возмущений в поле температуры с волновыми возмущениями уровня океана, непосредственно регистрируемые спутниковыми альтиметрами.

Уравнение неразрывности для постоянной глубины имеет вид:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + H \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) = 0$$

Для волн Россби, распространяющихся в западном направлении и проявляющихся в течениях (перпендикулярно направлению распространения), можно положить $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} = 0$, то есть зональная составляющая скорости изменяется только в меридиональном направлении, тогда имеем:

$\frac{\partial \xi}{\partial t} + H \frac{\partial v'}{\partial y} = 0$, а для меридиональной составляющей примем ту же волновую структуру:

$v' = A(y) \cdot e^{i(\sigma t - kx)}$, где $A(x, y, t)$ – амплитуда.

Тогда

$$\xi(t, x, y) = - \int H(x, y) \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - kx)} dt = - \frac{H(x, y)}{i\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot e^{i(\sigma t - kx)} \text{ и}$$

$$\operatorname{Re} \xi(t, x, y) = - \frac{H(x, y)}{\sigma} \frac{\partial A(y)}{\partial y} \cdot \sin(\sigma t - kx).$$

Из последней формулы следует, что регистрируемое альтиметрами периодическое изменение уровня $\xi(t, x, y)$ происходит с теми же частотой и волновым числом, как и изменение меридиональной составляющей скорости $v'(t, x, y)$. Следовательно, характеристики перемещающихся волн Россби являются и характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и, как показано выше, характеристиками волновых возмущений в поле температуры.

Очевидно, что в рамках подобной модели нельзя объяснить, несомненно, играющие большую роль эффекты, связанные, например, с горизонтальными турбулентными потоками тепла и потоками тепла на границе воздух-вода. Помимо этого весьма существенными могут оказаться эффекты нелинейного взаимодействия, приводящие к остаточным явлениям типа переноса тепла в определенных зонах. Однако здесь получен важный вывод, заключающийся в том, что, во-первых, низкочастотная изменчивость температуры воды в океане связана с низкочастотной адвекцией волн Россби, а во-вторых, эта связь дает возможность оценить характеристики изменчивости адвекции тепла в океане. Для нахождения этих оценок привлекались спутниковые данные об уровне океана.

Изменчивость уровня в Северо-западной части Тихого океана

Для анализа привлекались спутниковые данные абсолютной динамической топографии (ADT) и относительной динамической топографии (SLA) – аномалии высоты морской поверхности относительно средних значений, – данные за промежуток с 14.10.1992 г. по 17.10.2007 г. с дискретностью $1/3^{\circ}$ широты и долготы, временная дискретность – 7 суток. Исследуемый район охватывает акваторию $30 - 60^{\circ}\text{с.ш.}$ и $135 - 200^{\circ}\text{в.д.}$ На сегодняшний день спутниковые измерения являются наиболее точными регулярными последовательными и охватывающими наибольшую акваторию поверхности Мирового океана.

В каждой точке сетки рассматриваемой акватории были построены временные ряды уровенных измерений и проведен спектральный Фурье анализ и вейвлет-анализ, позволяющий исследовать нестационарности. Эти методы позволили выделить основные энергонесущие низкочастотные колебания в поле уровня. Подробное описание результатов можно найти в недавно вышедшем «Атласе изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана» (Белоненко и др., 2011).

Для значений абсолютной динамической топографии (ADT) показано, что основная энергия изменчивости этой характеристики сосредоточена на масштабах 10, а также 6 лет (см. пример на рис. 1). Отметим, что величины вейвлет-коэффициентов для масштабов 6 лет в среднем в два раза меньшие, чем для 10 лет.

Указанные масштабы выделяются во всех рассмотренных пунктах акватории, очевидно, соответствующие максимумы энергии обусловлены крупномасштабными глобальными процессами взаимодействия океана и атмосферы. Не исключено, что квазидесятилетние колебания в уровне океана, проявляющиеся в большинстве пунктов акватории Северо-западной части Тихого океана, связаны с десятилетними циклами Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO), а 6-летние циклы могут определяться соответствующими колебаниями в атмосфере, которые отражают как глобальные климатические изменения, так и локальные структурные особенности климатической системы Земли.

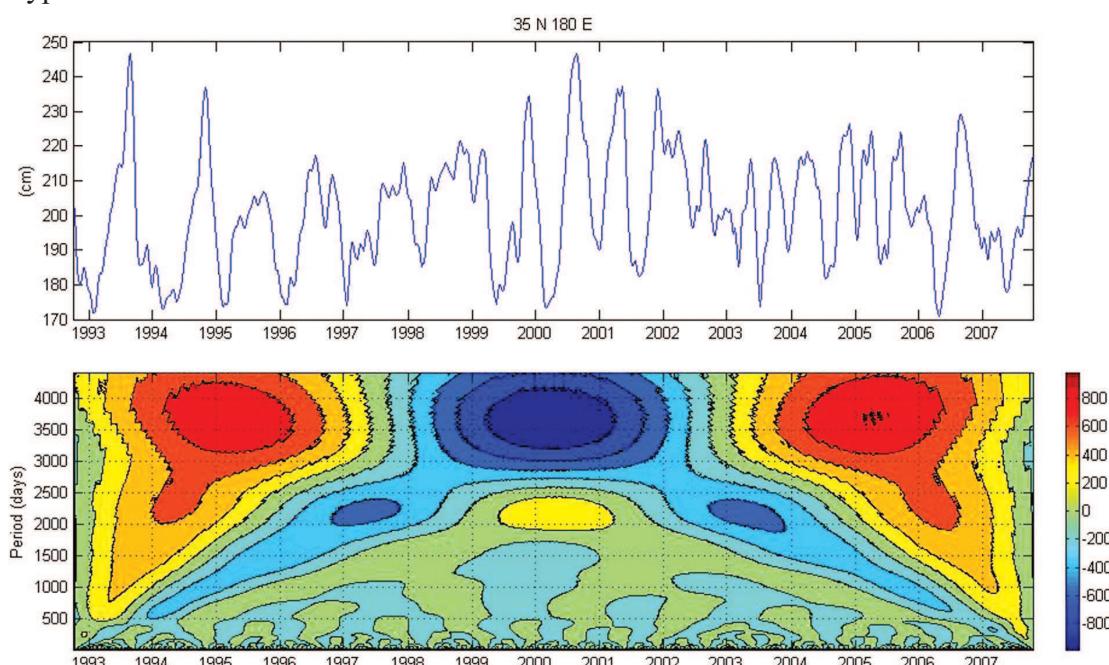


Рис. 1. Временной ход уровня океана – данные массива абсолютной динамической топографии (ADT) и его вейвлет-изображение для пункта с координатами $35^{\circ}\text{с.ш.}, 180^{\circ}\text{в.д.}$

Годовой цикл ADT выделяется лишь для динамически активных областей Северо-западной части Тихого океана:

- в течении Куросио $35\text{-}40^\circ \text{N}$ с 145 до 180°E , причем для широты 35° характерны еще и полугодовые масштабы изменчивости;
- для северной ветви Северо-Тихоокеанского течения (45°N , $160\text{-}180^\circ \text{E}$);
- для 50°N , где проходит с востока на запад Аляскинское течение.

Для Камчатского течения и системы течений Берингова моря годовой цикл выражен слабо. Для пункта 40°N 150°E выделяется 3-летний цикл.

Существенной особенностью колебаний годового и полугодового циклов в полях абсолютной динамической топографии является их нестационарность: в отдельные годы колебания уровня годового цикла вообще отсутствуют.

Изменчивость аномалий уровня океана (массив SLA), в отличие от абсолютной динамической топографии, отличается значительным разнообразием и происходит в широком диапазоне масштабов (см. пример на рис. 2). В отличие от ADT, изменчивость характеристики SLA невозможно соотнести с региональными особенностями циркуляции океана. Для многих пунктов акватории также выделяются масштабы изменчивости в 10 лет, причем в некоторых пунктах наблюдается перераспределение энергии по масштабам: максимумы энергии колебаний перемещаются от масштабов 10 лет к 4-летним.

Локализованные максимумы энергии на вейвлет-изображении, очевидно, означают области энергоснабжения от внешних источников. Вытянутые области максимальной энергии на вейвлет-изображении дают возможность проследить во времени перераспределение энергии по масштабам. Если область высоких значений вейвлет-коэффициентов смещается из области больших периодов в область меньших – идет поток энергии от крупномасштабных движений к мелкомасштабным, связанный с нелинейной генерацией турбулентности, обусловленной динамической неустойчивостью крупномасштабных движений. Если наблюдается смещение от меньших масштабов к большим, то происходит энергоснабжение крупномасштабных движений от мелкомасштабных, такие процессы получили в физике название «движений с отрицательной вязкостью». Соответствующие коэффициенты турбулентного обмена имеют отрицательный знак. Подобные явления хорошо известны в метеорологии, когда энергоснабжение крупномасштабных струйных течений в высоких слоях атмосферы происходит от циклонов. В океане явления, связанные с отрицательной вязкостью, изучены плохо, однако этот факт всегда учитывается при решении обратных задач, в которых коэффициенты турбулентного обмена имеют отрицательное значение. На рис. 2 мы видим примеры перераспределения энергии по масштабам как от больших масштабов к малым, так и в другую сторону.

Наблюдаются также квазишестилетние и квазидвухлетние колебания, а также почти во всех пунктах выделяются циклы с годовым периодом. Нестационарные полугодовые колебания отмечаются лишь в нескольких пунктах, причем интенсивность этих колебаний значительно уступает колебаниям годового цикла. Как годовые, так и полугодовые колебания SLA проявляются ярче всего в системе течений Куросио, где значения вейвлет-коэффициентов в несколько раз больше, чем значения коэффициентов для пунктов, расположенных вне струи течения.

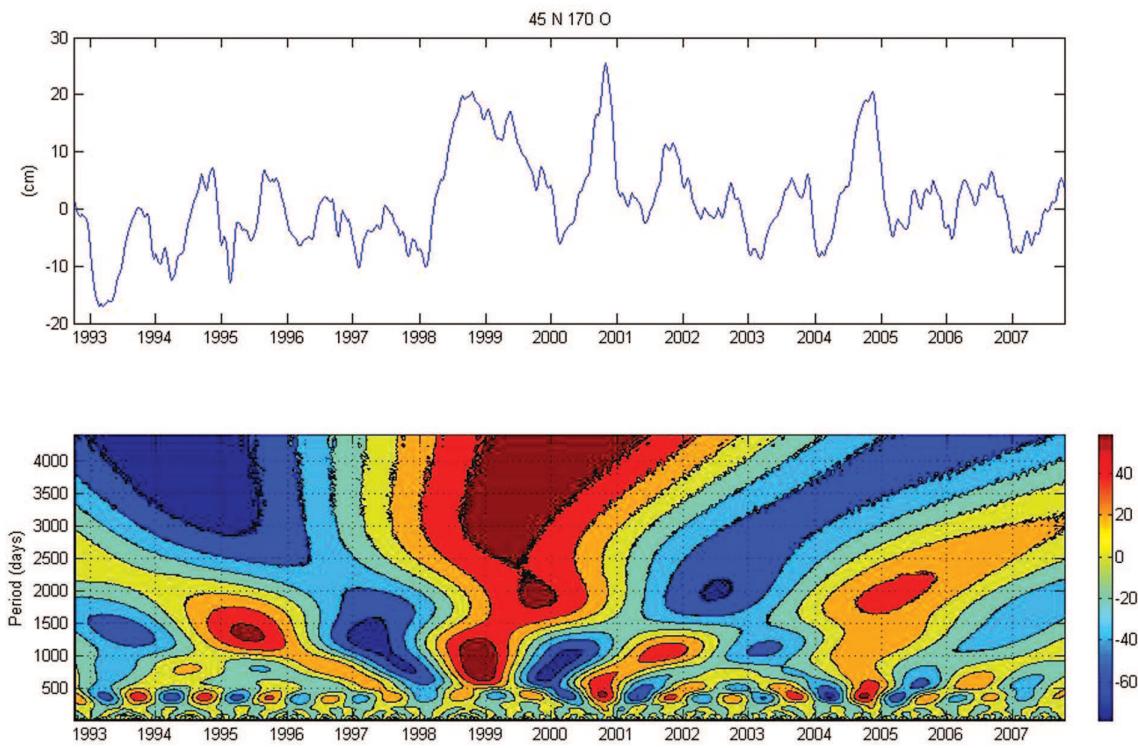


Рис. 2. Временной ход уровня океана – данные массива относительной динамической топографии (SLA) и его вейвлет-изображение для пункта с координатами 45° с.ш., 170° в.д.

Выводы

В низкочастотном диапазоне изменчивости температурных полей перенос тепла в океане при помощи волн Россби является доминирующим механизмом, а соответствующие слагаемые дают основной вклад в уравнении распространения тепла в океане, проинтегрированное для верхнего квазиоднородного слоя.

Об этом косвенно свидетельствуют в исследования последних лет, в которых говорится, что волны Россби, обнаруживаются не только по альтиметрическим наблюдениям за уровнем океана, но также и спутниковым наблюдениям за температурой поверхности (Cipollini et al., 1997; 2000; Hill et al., 2000 и др.).

На основе упрощенной математической модели нами показано, что характеристики распространяющихся на запад волн Россби, являются также и характеристиками меридиональной составляющей скорости течения и характеристиками волновых возмущений в поле температуры. Этот факт позволяет отождествлять оценки волновых возмущений в поле температуры с оценкой соответствующих волновых возмущений в поле скорости течения или возвышения уровня.

Таким образом, характеристики волн Россби, которые можно оценить на основе спутниковых альтиметрических наблюдений за уровнем океана, например, из анализа изоплет, в низкочастотном диапазоне изменчивости могут служить оценками временных масштабов для температурных полей.

Сделанный вывод позволяет оценить масштабы низкочастотной изменчивости температуры в Северо-западной части Тихого океана. Методами Фурье и вейвлет-анализа нами были проанализированы временные ряды уровня океана в различных пунктах акватории.

Выделены квазидвух-трех-летние, квазишестилетние циклы и 10-летние циклы, которые через адвективный механизм в волнах Россби характеризуют также и низкочастотную изменчивость температуры воды в акватории.

Рассматриваемая низкочастотная изменчивость уровня океана существенно нестационарна во времени. На основании сделанных математических выводов можно предполагать, что подобная нестационарность в низкочастотном диапазоне изменчивости имеет место и для температурных процессов.

Сравнение вейвлет-коэффициентов, характеризующих интенсивность колебаний уровня для пунктов, расположенных непосредственно в струе Курисио и вне ее, показало, что на течении колебания уровня интенсифицируются, а амплитуда вейвлет-коэффициентов многократно превышает таковые в пунктах, расположенных вне струи.

Литература

1. Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Фукс В.Р. Адвекция хлорофилла волнами Россби // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география. 2011. Вып. 4. С. 106-109.
2. Белоненко Т.В., Колдунов А.В., Колдунов В.В., Май Р.И., Рубченя А.В., Старицын Д.К., Фукс В.Р. Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана / Санкт-Петербург. Издательство СМИО-ПРЕСС. 2011. 304 с.
3. Хайруллина Г.Р., Астафьевы Н.М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования // Инст. косм. исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, 2011, Препринт 2163, 60 с. <http://www.twirpx.com/file/822608/>.
4. Challenor P.G., P. Cipollini, D. Cromwell, K. L. Hill, G. D. Quartly, I. S. Robinson. Global characteristics of Rossby wave propagation from multiple satellite datasets // International Journal of Remote Sensing, 2004. V. 25. no. 7-8. P. 1297-1302.
5. Cipollini, P., Cromwell, D., Jones, M. S., Quartly, G. D., & Challenor, P. G. Concurrent altimeter and infrared observations of Rossby wave propagation near 34°N in the Northeast Atlantic // Geophysical Research Letters, 1997. 24. P. 889–892.
6. Cipollini, P., Cromwell, D., Quartly, G. D., & Challenor, P. G. Remote sensing of oceanic extratropical Rossby waves / In David Halpern (Ed.), Satellites, oceanography, and society (pp. 99–123). New York: Elsevier. 2000.
7. Cipollini, P., D. Cromwell, P. G. Challenor and S. Raffaglio. Rossby waves detected in global ocean colour data // Geophysical Research Letters, 2001. V. 28. No. 2. P. 323-326.
8. Hill, K. L., Robinson, I. S., & Cipollini, P. Propagation characteristics of extratropical planetary waves observed in the ASTR global sea surface temperature record // Journal of Geophysics Research, 2000. 105. P. 21927–21945.
9. Killworth, P. D., P. Cipollini, B. M. Uz, J. R. Blundell. Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in sea-surface chlorophyll//J. Geophys. Res., 109, C07002, doi:10.1029/2003JC001768, 2004.
10. Quartly, G. D., P. Cipollini, D. Cromwell, P. G. Challenor. Rossby waves: synergy in action / Phil. Trans. R. Soc. London A, 10.1098/rsta.2002.1108, 2003.

The relationship between low-frequency variability of the heat advection and of the sea level in the NW Pacific ocean

T.V. Belonenko

*Saint Petersburg State University
199178, St. Petersburg, 33/35 10th Line
E-mail: btvlisab@yandex.ru*

This article discusses why the Rossby waves are not confined to isopleths of altimetry observations of the sea level, but also present in satellite observations of the sea surface temperature and of the chlorophyll-a concentration. A hypothesis is stated and checked about advective transport of the water characteristics by longitudinal currents of Rossby waves. It is shown that characteristics of the Rossby waves propagating to west are likewise the features of the longitudinal component of the current velocity and of the features of the wave disturbances in the temperature field. Then estimates of the wave disturbances in the temperature field may be treated as the wave disturbances in the current velocity field or that of the sea level height. We consider the low-frequency variability of the sea level in the NW Pacific ocean according to satellite altimetry data. Analyzed data are the ADT and the SLA for a period 14.10.1992 till 17.10.2007 at increments of 1/3 ° of the latitude and longitude and the time step 7 days. The study area extends over 30-60°N and 135-200°E. The resulting estimates of the sea level variability scales are also the estimates of the low-frequency temperature variability.

Keywords: Rossby waves, water temperature, heat advection, Kuroshio, the sea level, the NW Pacific ocean, isopleths.