Оценка короткопериодных колебаний температуры поверхности Японского моря по спутниковым данным

О.О. Трусенкова

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН Владивосток, Россия E-mail: trolia@poi.dvo.ru

Короткопериодные колебания температуры поверхности (ТПМ) Японского моря исследованы путем разложения на эмпирические ортогональные функции полей за 1993–2011 гг., предварительно подвергнутых высокочастотной вейвлет-фильтрации с периодом отсечения четыре месяца. Три старшие моды учитывают около 70% общей дисперсии. С ними связаны малые (1–2% средней величины ТПМ) колебания, средние периоды которых составляют 90, 65–70 и 105–110 дней для первой–третьей мод соответственно. Максимальная мощность спектров, оцененных с помощью вейвлет-преобразования, приходится на июль – сентябрь, что соответствует сезонному усилению крупномасштабного меридионального градиента уровня Японского моря в период интенсификации общей циркуляции. Высокочастотная часть вейвлет-спектров временных функций мод аппроксимируется степенными функциями с наклонами –3 для первой и третьей мод и –2,6 для второй моды, что соответствует спектральным характеристикам двумерной турбулентности. Выявлено квазидвухлетнее усиление и ослабление короткопериодных колебаний ТПМ.

Ключевые слова: температура поверхности моря, вейвлет-преобразование, высокочастотная фильтрация, эмпирические ортогональные функции, короткопериодные колебания, квазидвухлетняя изменчивость.

Введение

Изменения температуры поверхности океанов и морей в первую очередь связаны с локальным теплообменом с атмосферой, который определяется состоянием климатической системы. Поэтому основное внимание направлено на межгодовую изменчивость и поиск взаимосвязей аномалий температуры воды с метеорологическими характеристиками, в первую очередь в холодный период года. Известными примерами являются внетропический сигнал климатического цикла Эль-Ниньо – Южное колебание, Северо-Тихоокеанское колебание (Pacific Decadal Oscillation – PDO), 50–60-летние колебания в системе океан-атмосфера. Подобные работы проводились и для Японского моря: были выявлены взаимосвязи температурных аномалий с изменчивостью сибирского антициклона, т.е. зимнего муссона северо-восточной Азии, а опосредовано – с арктическим и северо-атлантическим колебаниями (Minobe et al., 2004; Park, Chu, 2006).

Вместе с тем для формирования температурных аномалий важны динамические процессы, в первую очередь адвекция тепла крупномасштабными течениями и синоптическими структурами. Японскому морю свойственна интенсивная синоптическая динамика, во многих районах формируются часто повторяющиеся или квазистационарные вихри (Никитин, Юрасов, 2008). Ранее было показано существование крупномасштабных аномалий температуры поверхности Японского моря (ТПМ), обусловленных сезонными изменениями циркуляции вод под термическим воздействием (за счет поступления теплых вод через Корейский пролив) и под воздействием муссонных ветров (Трусенкова и др., 2008; Трусенкова, 2009). Эти аномалии ТПМ развиваются на временных масштабах от полугодового до 5–6-летнего,

тогда как время жизни большинства синоптических структур составляет от одной–двух недель до нескольких месяцев (Никитин, Юрасов, 2008). Анализ инфракрасных снимков высокого разрешения показал наличие изотропных структур с размером до 30 км или вытянутых структур шириной до 10 км и длиной до 100 км, обусловленных турбулентностью (Ostrovskii, 1995). По-видимому, короткоживущие аномалии ТПМ, связанные с синоптическими и субсиноптическими структурами, теряются на фоне долгопериодной изменчивости. Короткопериодные колебания (с периодами 60 суток и меньше) уже были выявлены в среднесуточных аномалиях ТПМ за 2006–2010 гг., осредненных по районам моря к югу и северу от субарктического фронта, пересекающего море на 39–41° с. ш. (Белоненко, Блошкина, 2012). Представляется актуальным детальный анализ короткопериодной изменчивости ТПМ на всей акватории Японского моря за длительный срок с помощью спутниковых полей ТПМ, доступных с начала 1990-х гг.

Данные и методы

Анализ короткопериодной изменчивости ТПМ Японского моря проводится по данным Японского метеорологического агентства, основанным на инфракрасных и микроволновых спутниковых измерениях, судовых и буйковых данных. Ежедневные поля (с пространственным разрешением 0,25°) в районе 35–48° с. ш., 127,5–142° в. д. в период с октября 1993 г. по март 2012 г. выбраны из базы данных международного проекта NEAR-GOOS (http://near-goos1.jodc.go.jp/). Колебания с периодами больше четырех месяцев удалены с помощью высокочастотной фильтрации, основанной на вейвлет-преобразовании с использованием материнского вейвлета Морле 6-го порядка (Torrence, Compo, 1998).

Выполнено разложение фильтрованных полей ТПМ на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ), основанные на оценке пространственных корреляций между точками поля. Спектральные характеристики оценены на основе вейвлет-преобразования временных функций трех старших, статистически значимых мод. Критерии статистической значимости обсуждаются в работе (Трусенкова, Каплуненко, 2013). Вклад k-той моды в ТПМ оценивался как $T_k = A_k \times B_k$, где A_k и B_k – пространственная и временная функции, соответственно. Следует отметить, что разложение на ЭОФ включает осреднение при расчете корреляций, поэтому ошибка вклада моды относится к ошибке исходных данных, не превышающей 1°C, как (N*)-1/2 ~ 0,07, где N* = 224 — число степеней свободы (из расчета одна степень свободы на месяц).

Моды короткопериодной изменчивости ТПМ Японского моря

В разложении фильтрованных аномалий ТПМ получены три статистически значимые моды, которые в сумме учитывают около 70% общей дисперсии ($maбл.\ 1$). Их пространственные функции соответствуют последовательности двумерных косинусов — функций географических координат, первая из которых является унимодальной, а две следующие представляют собой меридиональный и зональный диполи ($puc.\ 1$). Рыхлость пространственных функций

говорит о подсеточных размерах структур, определяющих аномалии ТПМ, и их распределении по всей акватории, что особенно справедливо для старшей моды, максимум которой лежит в центральной части моря. У второй и третьей мод нет симметрии между положительным и отрицательным ядрами, а наибольшая абсолютная величина пространственных функций приходится на северную и северо-западную (СЗ) части моря, соответственно, где сосредоточены связанные с ними аномалии.

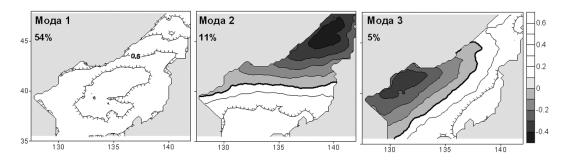


Рис. 1. Пространственные функции (°С) старших мод фильтрованной ТПМ, умноженные на стандартные отклонения соответствующих временных функций; засечки направлены в сторону понижения значений, ноль показан жирной линией

Временные функции характеризуются малыми колебаниями относительно больших средних значений, которые можно охарактеризовать отклонениями от средних вкладов в поле фильтрованной ТПМ. Средние вклады рассчитаны по средней абсолютной величине пространственных функций (рис. 2). В табл. 1 представлены средние вклады мод, дополнительно осредненные по времени, и медианы абсолютной величины отклонений вкладов от них. Несмотря на малость этих отклонений, они превосходят ошибки данных с учетом их уменьшения при разложении на ЭОФ. Колебания усиливаются в теплый период года, что ясно видно в вейвлет-спектрах их временных функций (рис. 3) и соответствует результатам работы (Белоненко, Блошкина, 2012).

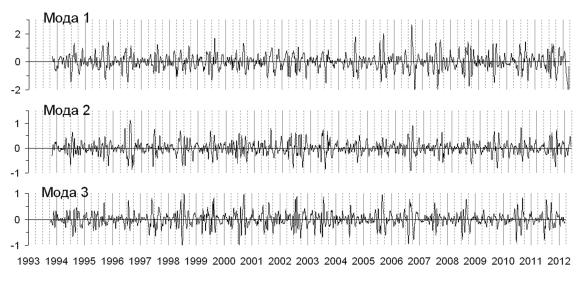


Рис. 2. Отклонения (°C) от среднего вклада старших мод в поле фильтрованной ТПМ

Таблица 1. Характеристики мод фильтрованной ТПМ Японского моря и степенных зависимостей, аппроксимирующих спектры их временных функций

	Номер моды		
	1	2	3
Собственное число (%)	$54,0 \pm 5,1$	10.8 ± 1.0	$5,6 \pm 0,5$
Средний вклад моды в ТПМ (°C)	24,3	7,9	9,1
Медиана абсолютной величины отклонения вклада моды от среднего (°C)	0,3	0,1	0,1
Частотный интервал аппроксимации спектров (циклы/сут.)	0,17–0,34		
Интервал периодов (сутки)	15–35		
Наклон аппроксимирующей степенной функции	-2,9989	-2,6253	-3,1156
Коэффициент детерминации	0,9781	0,9817	0,9848

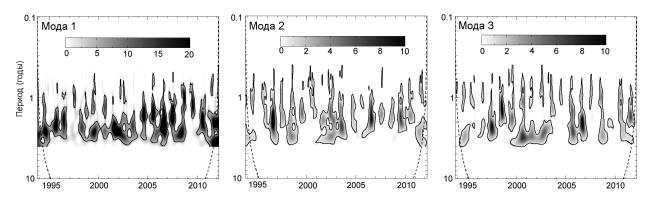


Рис. 3. Мощность (квадрат амплитуды) вейвлет-спектров, нормированных на стандартные отклонения временных функций старших мод ТПМ; пунктиром показан конус влияния, жирными линиями – 95%-й уровень статистической значимости по отношению к красному шуму

Спектральные максимумы всех трех временных функций, нормированных на стандартное отклонение, вытянуты вдоль оси периодов (*puc. 3*), несмотря на то что они основаны на мощности (квадрате амплитуды) комплексного вейвлета Морле, которому свойственно лучшее разрешение по оси времени (Torrence, Compo, 1998). Это отличает моды короткопериодной изменчивости ТПМ Японского моря от ранее рассмотренных (Трусенкова и др., 2008; Трусенкова, 2009), спектральные максимумы которых вытянуты вдоль оси времени. В холодные периоды года мощность спектров часто не достигает 95%-го уровня статистической значимости, а в теплое время года она статистически значима на масштабах 25–15 дней (*puc. 3*), которые соответствуют времени жизни синоптических вихрей Японского моря (Никитин, Юрасов, 2008). Более долгоживущие аномалии (со временем жизни больше двух месяцев) более интенсивны, но в отдельные временные периоды усиливаются короткоживущие аномалии со временем жизни меньше двух месяцев (*puc. 3*).

Максимумы глобальных (осредненных по времени) вейвлет-спектров достигаются на периодах 90, 65–70, 105–110 дней для первой–третьей мод соответственно (puc.~4a). Это означает, что в северной части моря (к северу от 44–45° с. ш.), где преобладает вторая

мода (*puc. 1*), время жизни аномалий ТПМ меньше, чем в других районах моря, что можно объяснить тонким пикноклином и малым бароклинным радиусом Россби. В СЗ части моря, где находится экстремум третьей моды, аномалии сохраняются дольше. Соответственно, синоптические вихри меньше в северной части моря и больше в СЗ районе (Никитин, Юрасов, 2008).

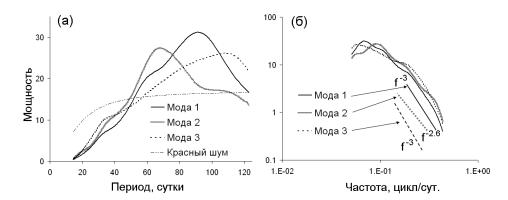


Рис. 4. Глобальные вейвлет-спектры нормированных временных функций старших мод ТПМ в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах; показан теоретический спектр красного шума (а) и степенная аппроксимация спектров в частотном диапазоне, указанном в таблице (б)

Высокочастотная (короткопериодная) часть глобальных спектров (с периодами от 15 до 35 суток) хорошо аппроксимируется степенными функциями f^{α} , где f – частота. В этой области наклоны спектров составляют $\alpha \approx -3$ для первой и третьей мод и $\alpha \approx -2,6$ для второй (maбn. I; puc. 46). Пространственные спектры ТПМ с наклоном $\alpha = -3$ были получены по свободным от облачности инфракрасным спутниковым снимкам высокого разрешения в апреле – мае 1994 г. (Ostrovskii, 1994), что говорит о соответствии пространственно-временных масштабов субсиноптической изменчивости ТПМ. Как известно из теории турбулентности, при аппроксимации зависимости пространственных спектров от волновых чисел k степенными функциями k^{α} , наклоны $\alpha = -3$ и $\alpha = -11/5$ соответствуют двумерной турбулентности (диапазону плавучести; Физика океана, 1978).

Предполагая соответствие спектральных характеристик пространственных и временных пульсаций, можно сделать вывод о том, что двумерная турбулентность вносит значительный вклад в короткопериодную (с периодами меньше полутора месяцев) часть изменчивости ТПМ Японского моря. Поскольку рассматриваемые колебания ТПМ существенно усиливаются в теплый период года, основной вклад в мощность спектров приходится именно на это время. Развитие сезонного пикноклина и уменьшение толщины верхнего квазиоднородного слоя во время весенне-летнего прогрева, толщина которого в Японском море с мая по август составляет 10–15 м (Lim et al., 2012), затрудняет вертикальное перемешивание. В северной части моря, где в поле фильтрованной ТПМ наиболее значителен вклад второй моды, спектр является более пологим, но остается в диапазоне плавучести (от –3 до –11/5; Физика океана, 1978). Соответствие спектров ТПМ теоретическим спектрам пульсаций скорости говорит о том, что эти колебания ТПМ связаны с динамическими структурами, размеры которых не дают возможности их явного воспроизведения на четвертьградусной сетке.

По данным спутниковой альтиметрии установлено, что меридиональный градиент уровня (перепад между субтропическим и субарктическим секторами моря), определяющий интенсивность циркуляции вод, обостряется в теплый период года, достигая максимума в октябре, и ослабляется в течение холодного периода года, достигая минимума в марте (Трусенкова, Каплуненко, 2013). Пространственная функция градиентной моды, учитывающая 9% дисперсии, положительна в субтропической части моря и отрицательна в субарктической, а нулевая изолиния соответствует субарктическому фронту (рис. 5а). Моды изменчивости скорости изменения уровня (частной производной по времени) соответствуют модам аномалий, в частности их пространственные функции практически совпадают. Временная функция градиентной моды, основанной на скорости изменения уровня, на три месяца опережает свой аналог, основанный на аномалиях: она достигает сезонных экстремумов в конце июня — начале июля и конце декабря — начале января соответственно (Трусенкова, Каплуненко, 2013). Таким образом, рассматриваемые аномалии ТПМ наиболее значительны во время наиболее быстрого изменения меридионального градиента уровня (и плотности вод) моря и интенсификации циркуляции вод.

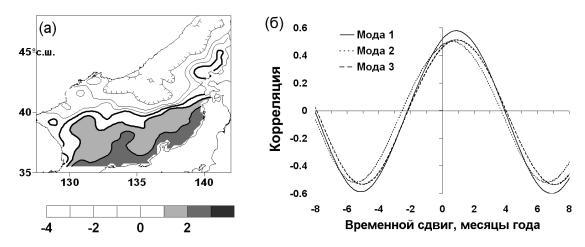


Рис. 5. Пространственная функция (см) градиентной моды уровня Японского моря (а). Зависимость от временного сдвига (мес.) коэффициента корреляции между временной функцией градиентной моды скорости изменения уровня моря и интегральной мощностью вейвлет-спектра временных функций старших мод ТПМ (б). Уровень предшествует ТПМ при положительных сдвигах и наоборот

Сходство с градиентной модой уровня Японского моря ясно проявляется в изменчивости проинтегрированной в интервале периодов от одного до четырех месяцев мощности вейвлет-спектров временных функций старших мод, которая достигает сезонного максимума в июле — сентябре (рис. 6). Для сравнения на рис. 6 показана временная функция градиентной моды уровня моря, основанной на скорости его изменения. Коэффициенты корреляции между этими временными рядами превышают 0,5. Статистические взаимосвязи наиболее тесны, когда скорость изменения уровня опережает интегральные спектры мощности для первой и третьей мод ТПМ на месяц, а для второй моды — на полмесяца: на этих временных сдвигах коэффициент корреляции достигает 0,58 (рис. 56).

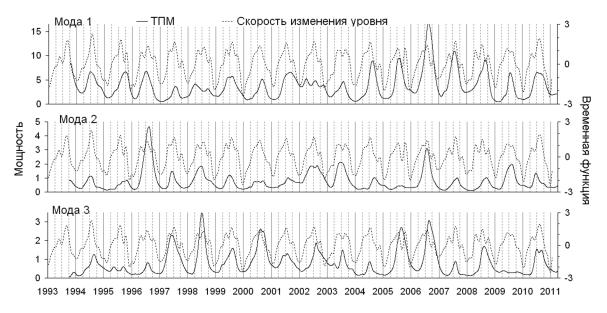


Рис. 6. Интегральная мощность вейвлет-спектра нормализованных временных функций старших мод ТПМ. Показана также нормализованная временная функция градиентной моды скорости изменения уровня

Умеренные корреляции объясняются значительной межгодовой изменчивостью, свойственной интенсивности короткопериодных колебаний ТПМ (рис. 2, 6), что отличает их от градиентной моды уровня моря, характеризуемой слабой изменчивостью на внутри- и в межгодовых масштабах (Трусенкова, Каплуненко, 2013). Наиболее интенсивные короткопериодные аномалии ТПМ в море в целом (связанные с первой модой) наблюдались в 2004—2008 гг., в северной части моря (вторая мода) — в 1996 и 2006 гг., а в СЗ районе (третья мода) — в 1997, 1998, 2000, 2005 и 2006 гг. (рис. 6). Для оценки межгодовой изменчивости интенсивности рассматриваемых аномалий ТПМ выполнено вейвлет-преобразование временных рядов интегральной мощности спектров (рис. 7).

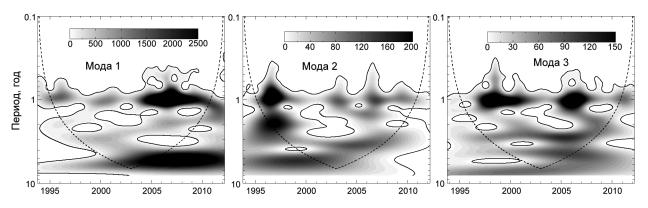


Рис. 7. Вейвлет-спектры интегральной мощности вейвлет-спектров нормализованных временных функций старших мод ТПМ

Во всех трех спектрах (рис. 7) годовой масштаб статистически значим, но его интенсивность существенно изменяется в период наблюдений, как обсуждалось выше. Квазидвухлетний масштаб статистически значим большую часть времени. Во всех трех спектрах присутствуют более долгопериодные колебания, частично лежащие в конусе влияния, что

препятствует их уверенной интерпретации, однако можно отметить наличие 3–4-летнего масштаба во второй моде (после 2003 г.) и 4–5-летнего масштаба в третьей моде, который усиливается после 2002 г. (рис. 7). В начале 2000-х гг. короткопериодные колебания, связанные со всеми тремя модами, ослабляются.

Заключение

Проведенный анализ ежедневных полей ТПМ с четвертьградусным пространственным разрешением показал наличие колебаний со средними периодами 90, 65–70 и 105–110 дней на всей акватории Японского моря, в его северной и СЗ частях, соответственно. Несмотря на то что термические контрасты на поверхности моря сглажены в период прогрева, эти колебания наиболее интенсивны в июле—сентябре, когда происходит усиление крупномасштабного меридионального градиента уровня моря и интенсификация циркуляции вод (Трусенкова, Каплуненко, 2013). В отличие от градиента уровня, изменчивость которого на масштабах вне годового незначительна, интенсивность рассматриваемых колебаний ТПМ подвержена существенной межгодовой изменчивости, в частности квазидвухлетней. Это позволяет предположить, что подсеточные пространственные структуры, которые порождают эти аномалии, генерируются воздействием ветра, поскольку квазидвухлетний масштаб присущ атмосферным процессам. Увеличение скорости течения во время летней интенсификации циркуляции является важным фактором развития гидродинамической неустойчивости.

Средние периоды колебаний, оцененные путем спектрального анализа, соответствуют характерным временам жизни синоптических вихрей Японского моря (Никитин, Юрасов, 2008). Высокочастотная часть спектров (с периодами от 15 до 35 суток) аппроксимируется степенными функциями с наклонами, характерными для двумерной турбулентности (в диапазоне плавучести; Физика океана, 1978), что соответствует пространственным спектрам ТПМ в период весеннего прогрева поверхности моря (Ostrovskii, 1994).

При сохранении внутригодовых периодов шесть месяцев и более полям фильтрованной ТПМ свойственна подобная модовая структура, однако во временной изменчивости преобладает полугодовой масштаб, на котором сосредоточена статистически значимая мощность вейвлет-спектров, а степенной аппроксимации их высокочастотной части не наблюдается. Противофазные полугодовые аномалии ТПМ были выявлены в районах западного участка субарктического фронта и к северу от 44° с. ш. (Трусенкова и др., 2008; Трусенкова, 2009), где они больше, чем на остальной акватории. Проявления короткопериодных процессов, в том числе характерные для турбулентности спектральные зависимости теряются на фоне полугодовой и более долгопериодной изменчивости.

Литература

1. *Белоненко Т.В., Блошкина Е.В.* Температура поверхности Японского моря по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 199–205.

- 2. *Никитин А.А., Юрасов Г.И*. Синоптические вихри Японского моря по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 2–57.
- 3. *Трусенкова О.О.* Сравнение мод изменчивости спутниковой и модельной температуры поверхности Японского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т 6. № 1. С. 484–492.
- 4. *Трусенкова О.О., Каплуненко Д.Д.* Оценка мод изменчивости уровня Японского моря по данным спутниковой альтиметрии // Океанология. 2013. № 3. С. 347–356.
- 5. *Трусенкова О.О., Лобанов В.Б., Каплуненко Д.Д.* Изменчивость температуры поверхности Японского моря и ее связь с полем завихренности ветра // Известия РАН. Физ. атм. и океана. 2008. № 4. С. 553–566.
- 6. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана / Под ред. А.С. Монина. М: Наука, 1978. 457 с.
- 7. *Lim S.-H., Jang C.J., Oh I.S., Park J.-J.* Climatology of the mixed layer depth in the East/Japan Sea // J. Mar. Sys. 2012. V. 96. No. 2. P. 1–14.
- 8. *Minobe S., Sako A., Nakamura M.* Interannual to interdecadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset // J. Phys. Oceanogr. 2004. V. 34. No. 11. P. 2382–2397.
- 9. *Ostrovskii A*. Signatures of strring and mixing in the Japan Sea surface temperature patterns in autumn 1993 and spring 1994 // Geophys. Res. Let. 1995. V. 22. No. 17. P. 2357–2360.
- 10. *Park S., Chu P.* Interannual SST variability in the Japan/East Sea and relationship with environmental variables // J. Oceanogr. 2006. V. 62. No. 2. P. 115–132.
- 11. *Torrence C., Compo G.P.* A practical guide to wavelet analysis // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79. No. 1. P. 61–78.

Assessment of short-period oscillations of surface temperature in the Japan Sea with the use of satellite data

O.O. Trusenkova

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia E-mail: trolia@poi.dvo.ru

Short-period oscillations of sea surface temperature (SST) in the Japan Sea are studied using data for the period from October 1993 through March 2012, high-pass filtered with the 4-month cut-off period. Three modes derived using empirical orthogonal functions (EOF) analysis account for about 70% of the total variance and feature weak oscillations of about 1–2% from mean SST values, with average periods of 90, 65–70, and 105–110 days. The spectral power of the temporal functions is largest from July through September when the meridional gradient of sea level sharpens and the mean currents strengthen in the Japan Sea. Their high-frequency parts are well approximated by power-law functions with the slopes of –3 to –2.6, corresponding to the 2D turbulence. Short-period SST oscillations strengthen and weaken quasi-biennially.

Keywords: sea surface temperature, wavelet transform, high-pass filtration, empirical orthogonal functions, short-period oscillations, quasi-biennial variability.