

**НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ
В СИСТЕМЕ ТЕЧЕНИЙ ГОЛЬФСТРИМ
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

(Работа выполнена при финансовой поддержке
ФЦП «Научно-педагогические кадры на 2009–2013 гг.»)

Целью настоящей работы является исследование на основе спутниковых альтиметрических наблюдений межгодовой изменчивости уровня океана в системе вод Гольфстрима. Предпринята попытка выделения местоположения струи Гольфстрима по графикам вейвлет-изоплет. Выделены квазидвухлетние, квазитрёхлетние (3–4 года), квазисемилетние (6–8 лет) колебания. Колебания всех выделенных масштабов имеют достаточно ярко выраженные региональные особенности и значительную нестационарность.

Было обнаружено, что в зоне Гольфстрима происходит интенсификация колебаний, выражающаяся в значительном увеличении амплитуд рассматриваемых колебаний, но характер их нестационарности практически не изменяется. Также было обнаружено уменьшение амплитуд колебаний по ходу Гольфстрима.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Гольфстрим, Северная Атлантика, Северо-Атлантическое течение, межгодовые колебания.

А. Вууну

**LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS OF THE SEA LEVEL
IN THE GULF STREAM AREA**

The purpose of this research is to study the inter-annual variability of sea level in the Gulf Stream zone on the base of satellite altimetry observations. The attempt to highlight the location of the Gulf Stream on the base of wavelet isopleths method was made. Quasi-biennial, quasi-three-year (3–4 years), quasi-seven-year (6–8 years) oscillation were highlighted. The highlighted oscillations have regional differences and significant unsteadiness. It was found that there is an intensification of fluctuations in the Gulf Stream zone. This intensification is expressed in a significant increase of the amplitude of oscillation. But the nature of the temporal variability of the oscillation within and outside the flow is almost unchanged. There was also found a spatial attenuation of the Gulf Stream, which is expressed in the diminution of amplitudes along the direction of the flow.

Keywords: satellite altimetry, Gulf Stream, North Atlantic, North-Atlantic Current, inter-annual oscillations.

В доспутниковую эпоху исследование пространственно-временной изменчивости колебаний уровня моря было ограничено из-за отсутствия наблюдений в открытых частях моря и океана. Данные были фрагментарны и ограничивались разрезами и футшточными измерениями. И лишь с началом спутниковой эпохи, с запуском альтиметров, обеспечивающих измерения глобальной топографии поверхности моря с высоким временным и пространственным разрешением, появилась возможность получать данные о картине изменчивости уровня моря в широких пространственных масштабах, существенно расширились представления о Мировом океане.

Изменчивости уровня Мирового океана по данным спутниковых наблюдений посвящено немало литературы. Так, в 1985 году вышла монография Р. К. Клиге «Изменения глобального водообмена» [3], где по футшточным наблюдениям реконструирован глобальный уровень за столетний период (1881–1981 гг.), осуществлен прогноз глобального уровня на основе его корреляционной связи с температурой воздуха Северного полушария на 1982–1995 гг. и даны оценки вкладов различных факторов в колебания уровня Мирового океана. В 1998 г. была издана фундаментальная монография «История гидросферы» [4], в которой на основе многочисленных геологических и палеоклиматических данных восстановлен глобальный уровень океана за исторический период. В 2012 г. В. Н. Малининым был создан труд «Уровень океана: настоящее и будущее» [7], в котором автор рассматривает современное состояние изученности и закономерностей межгодовых колебаний уровня Мирового океана в условиях современных изменений климата и приводит сравнительный анализ вкладов уровнеобразующих факторов в колебаниях уровня Мирового океана. Согласно его мнению, в России до последнего времени исследования морского уровня выполнялись, как правило, на региональном уровне, за исключением описанного в работах [3, 4].

Изменчивость уровня Северной Атлантики по данным спутниковых измерений рассматривалась многими авторами, обзор исследований по этой теме можно найти в работах [9–11].

Целью данной работы является исследование на основе спутниковых альтиметрических наблюдений нестационарности и пространственной неоднородности межгодовой изменчивости уровня океана в системе вод Гольфстрима. Была предпринята попытка выделения местоположения струи Гольфстрима по графикам вейвлет-изоплет, которые также позволили рассмотреть пространственно-временную изменчивость Гольфстрима вдоль фиксированного меридиана.

Для достижения этой цели привлекались данные SLA — аномалии уровня океана относительно его средних значений, с дискретностью $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ проекции Меркатора. Используемый в работе массив альтиметрической информации был получен из банка данных AVISO¹. Наблюдения охватывают период с октября 1992 года по май 2012 года, временная дискретность составляет 7 суток. Исследуемый район охватывает акваторию $20\text{--}80^\circ$ с. ш. и 45° з. д. — 60° в. д.

На первом этапе в пределах выделенной акватории были выбраны 27 пунктов, их пространственное расположение представлено на рисунке 1. На рисунке также показано местонахождение Гольфстрима и продолжающих его течений.

Для каждой точки сетки рассматриваемой акватории были построены временные ряды уровней измерений и проведен спектральный фурье-анализ и вейвлет-анализ, позволяющий исследовать нестационарности в изменчивости уровня океана.

На рисунке 2 в качестве примера приведены графики спектра Фурье и вейвлет-коэффициентов для уровня океана в пункте с координатами 75° с. ш. 10° в. д. На графике спектра Фурье по оси абсцисс отложен период колебаний — в днях, по оси ординат — значения функции Фурье-преобразования ($\text{см}^2 \cdot \text{нед.}$).

Фурье-анализ позволил выделить основные энергонесущие максимумы, соответствующие периодам в 1 год, 2,5 года, 5 лет. На вейвлет-изображении по оси абсцисс отложено время, в годах, по оси ординат — масштабы колебаний; более насыщенным цветом выделены большие значения вейвлет-коэффициентов, характеризующие интенсивность колебаний. В отличие от преобразования Фурье, локализирующего частоты, но не дающего вре-

менного разрешения процесса, вейвлет-преобразование, обладающее самоадаптирующимся подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо выявляет как низкочастотные, так и высокочастотные характеристики сигнала на разных временных масштабах. По этой причине вейвлет-анализ часто сравнивают с «математическим микроскопом», вскрывающим внутреннюю структуру существенно не однородных объектов, поскольку он позволяет исследовать каждый масштаб с необходимой и достаточной для него разрешающей способностью. Для вейвлет-анализа применялись вейвлеты Морле, позволяющие исследовать вклад составляющих различных временных масштабов [1; 2]. Вейвлет-анализ позволил выделить колебания масштабов в 1; 2-2,5; 3-4 года; 7-8 лет. В отличие от квазисемилетних колебаний, которые относительно стабильны в течение всего периода наблюдений, квазидвухлетние и квазитрёхлетние колебания существенно нестационарны — квазидвухлетние колебания наиболее выражены с 1993 по 2003 г., квазитрёхлетние — с 2000 по 2007 г.

Такие графики были построены для всех рассматриваемых пунктов акватории. Анализ их позволил выделить основные энергонесущие колебания в поле уровня в северной Атлантике — это годовые колебания, а также 2-летние (квазидвухлетние), 3-4-летние (квазитрёхлетние), и 6-8-летние (квазисемилетние) колебания.

Вейвлет-анализ показал, что, по сравнению с годовыми колебаниями, колебания больших масштабов отличаются гораздо более выраженной нестационарностью. Такие колебания, которые выделяются не для всей реализации, а только для отдельной ее части, некоторые авторы называют квазидвухлетними, квазитрёхлетними и т. д. колебаниями [8].

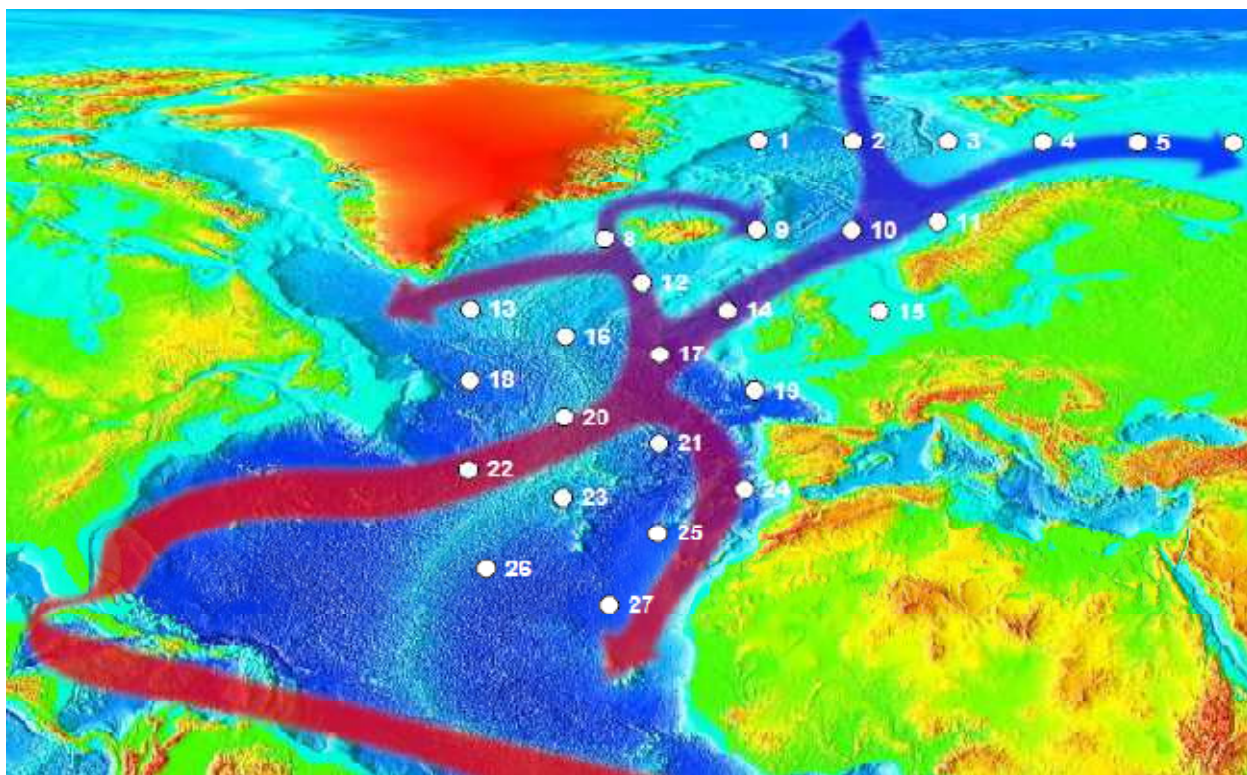


Рис. 1. Схема течения Гольфстрим1 и расположение пунктов, в которых проводился временной анализ уровня океана

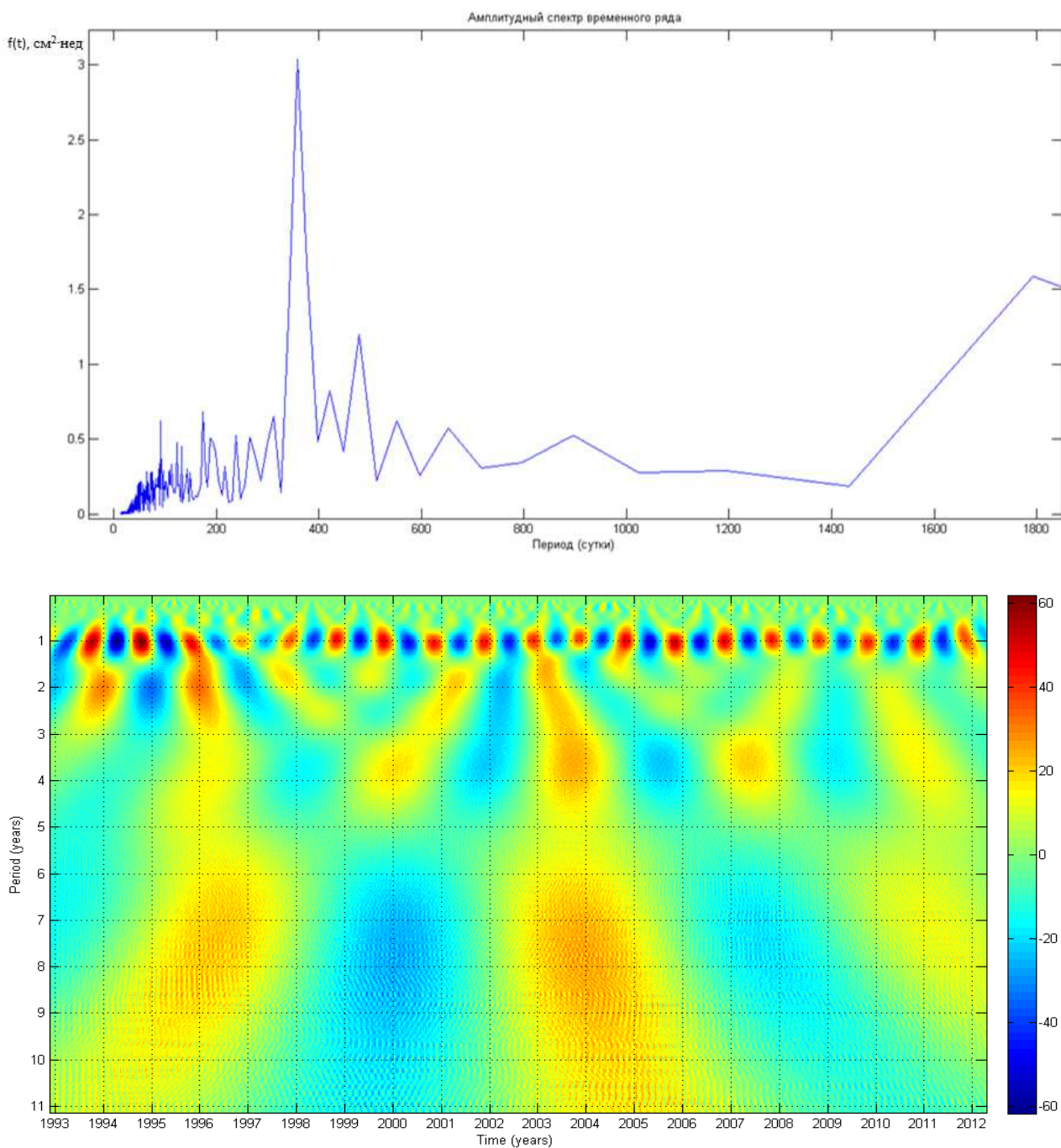


Рис. 2. Амплитудный спектр (вверху) и вейвлет-изображение (внизу) колебаний в пункте 1 (75° с. ш. 10° в. д.)

Реальная изменчивость морского уровня создается в результате совместного действия гидрометеорологических, геолого-геодинамических и космогеофизических факторов, изучение колебаний уровня Мирового океана представляет собой сложную геофизическую проблему, решение которой возможно только в результате синтеза всех наук о Земле: океанологии, метеорологии, гидрологии и гляциологии. Квазидвухлетние колебания в океане определяются квазидвухлетними колебаниями в атмосфере, которые могут отра-

жать как глобальные климатические изменения, так и локальные структурные особенности климатической системы Земли, поскольку они проявляются в различных атмосферных и климатических параметрах: в скорости зонального ветра, в распределении озона, температуры и давления воздуха, облачности и др. Семилетний цикл — это составляющая нутационного периода, с этим и могут быть связаны квазисемилетние колебания. Согласно И. В. Максимову [5; 6], наложение свободных (14 мес.) и вынужденных (12 мес.) колебаний полюсов Земли вызывает явление резонанса, в результате чего возникает так называемый «полюсный» прилив с периодом 6-7 лет, амплитуда которого может достигать нескольких сантиметров.

Вейвлет-анализ в точках показал, что долгопериодные колебания уровня моря имеют некоторую зональность. По результатам построения вейвлет-изображений можно сделать вывод, что временная изменчивость и выраженность колебаний имеют сходства в следующих пунктах:

Квазидвухлетние колебания в точках 1, 2, 3 выражены с 1993 по 2003 г.; в 5, 6-й — с 1993 по 1996 и с 2009 по 2012 г.; в 8, 9-й — с 1993 по 1996 и с 2001 по 2004 г.; в 12, 13, 14, 15-й — с 1993 по 2005 г.; в 17, 19, 20, 21, 24-й — с 2001 по 2012 г.; в 22, 23-й — с 1993 по 2001 г.; в 25, 26, 27-й — с 1998 по 2003 г.

Квазитрёхлетние колебания в точках 1, 2, 3 выражены с 2000/01 по 2007/08 г.; в 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12-й — с 2003 по 2012 г.; в точках 19, 20, 21, 25-й — с 1993 по 2001 г.

Квазисемилетние колебания выражены в точках 3, 11 с 1993 по 2003 г.; в точках 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 19-й — с 1993 по 2012 г. (в течение всего периода наблюдений); в 12, 13-й — с 1993 по 2006 г.; в 17, 20, 21, 23-й — с 1993 по 2001–2003 г.

Все указанные колебания наиболее выражены в пунктах, расположенных в струе Гольфстрима, в то время как в других пунктах, не включенных в систему вод Гольфстрима, они практически отсутствуют.

Вейвлет-анализ, проведенный для всех пунктов акватории, позволил разделить ее на три основных района. В I район входят пункты 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11 — район Северного Ледовитого океана. Он может быть географически привязан к Гренландской и Лофотенской котловинам, к шельфу Баренцева моря. Границу между первым и вторым районами можно провести приблизительно по 70–72° с. ш., по Ян-Майенской зоне разлома. Во II районе находятся пункты 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15. Данный район протягивается от юго-восточного побережья Гренландии до юго-западного побережья Скандинавского п-ова, от Северного моря, до побережья о-вов Великобритания и Ирландия. Он может быть привязан к Ирмингерской, к Исландской котловинам, к шельфу Северного моря. Граница между II и III районами может быть проведена по 52–53° с. ш., по разлому Чарли-Гиббса. III район с юга ограничен 23° с. ш., географически он может быть привязан к Западно-Европейской и Канарской котловинам.

Для каждого из трех районов на вейвлет-изображениях выделяются характерные признаки, связанные с нестационарностью межгодовой изменчивости уровня. Для каждого из выделенных районов вейвлет-изображения имеют схожие черты.

Рассмотрим это на примере вейвлет-изображений для колебаний уровня океана, построенных для пунктов, расположенных непосредственно в струе Гольфстрима или его продолжения — Северо-Атлантического течения. Были выбраны следующие пункты: для I района — 4-й пункт, для II — 14-й пункт, для III — 22-й.

В пункте 4 (рис. 3) выражены квазидвухлетние, квазитрёхлетние, квазисемилетние колебания. Помимо описанной выше временной нестационарности колебаний, по вейвлет-изображению можно выделить «переходы» между колебаниями разных масштабов, кото-

рые можно трактовать как перераспределение энергии между колебаниями разных масштабов. Подобные перераспределения часто встречаются, но особо яркие имеют место в 1996–1999 гг. между колебаниями квазидвухлетнего и квазисемилетнего масштабов и в 2001–2004 гг. — в обратном направлении. Перераспределения энергии между колебаниями разных масштабов можно трактовать следующим образом: от большого масштаба к меньшему — как диссипацию энергии, от меньшего масштаба к большому — как явление отрицательной вязкости.

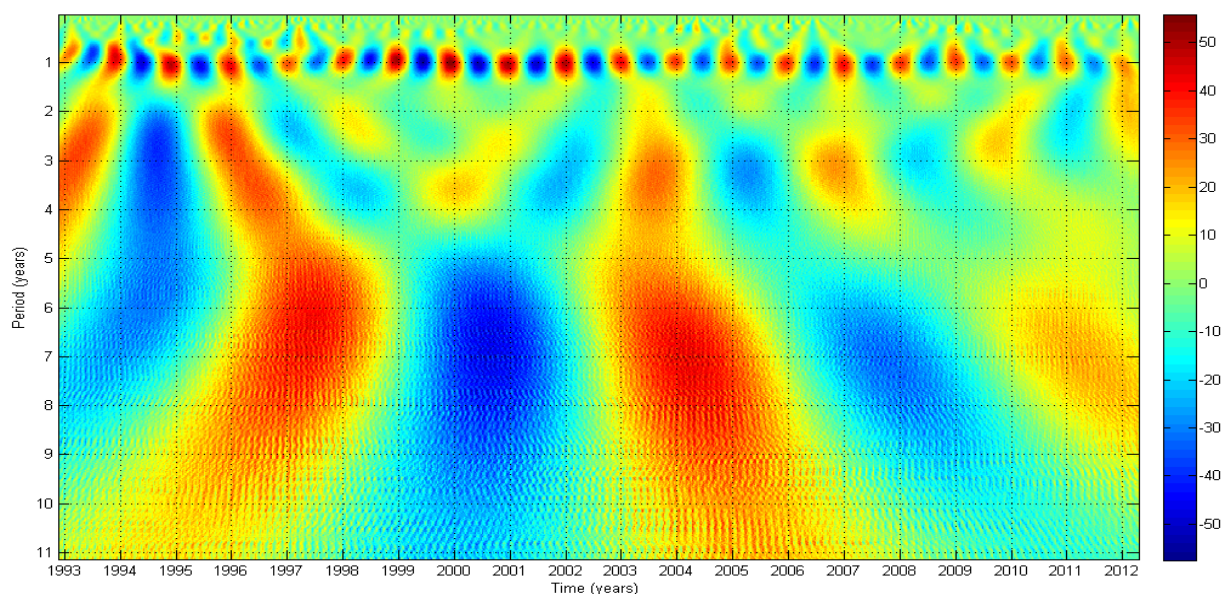


Рис. 3. Вейвлет-изображение колебаний уровня для I района:
в пункте 4 (75° с. ш. 20° в. д.)

Максимальные значения вейвлет-коэффициентов, характеризующих интенсивность колебаний, составляют 40–50, коэффициенты квазисемилетних колебаний — порядка 40, квазитрёхлетних — 30, квазидвухлетних — 35, годовых — 56.

В пункте 14 (рис. 4) значения вейвлет-коэффициентов для годовых колебаний — от 20 до 65, квазидвухлетних — 40, квазитрёхлетних — до 65, но в среднем — 35; квазисемилетних — порядка 30.

Перераспределение энергии также встречается на вейвлет-изображении в пункте 4. Наиболее заметным является переход энергии от годовых колебаний к квазисемилетним в 1994–1999 гг.

В пункте 22 (рис. 5) значения вейвлет-коэффициентов для годовых колебаний — порядка 100–130, квазидвухлетних — 70, квазитрёхлетних — до 60; квазисемилетних — порядка 50. Отмечаются области перераспределения энергии между колебаниями различных масштабов. Самым значительным является перераспределение энергии в 1998–2001 гг. от квазидвухлетних к квазисемилетним колебаниям и между квазисемилетними и квазидвухлетними — в 1995–1997 гг.

Годовые колебания в большинстве пунктов относительно стационарны, однако отличаются существенной пространственной неоднородностью, которая отражается, в частности, на графиках вейвлет-изоплант годового масштаба изменчивости.

Вейвлет-изопланты строились следующим образом: в каждой точке 1/3 градусной сетки широты и долготы был проведен вейвлет-анализ и рассчитаны вейвлет-коэффициенты.

Значения вейвлет-коэффициентов для годового масштаба фиксировались в матрице, состоящей из нескольких столбцов: время, широта, долгота, значение вейвлет-коэффициента. Далее фиксировалось направление, меридиональное или зональное, для которого строились вейвлет-изоплеты.

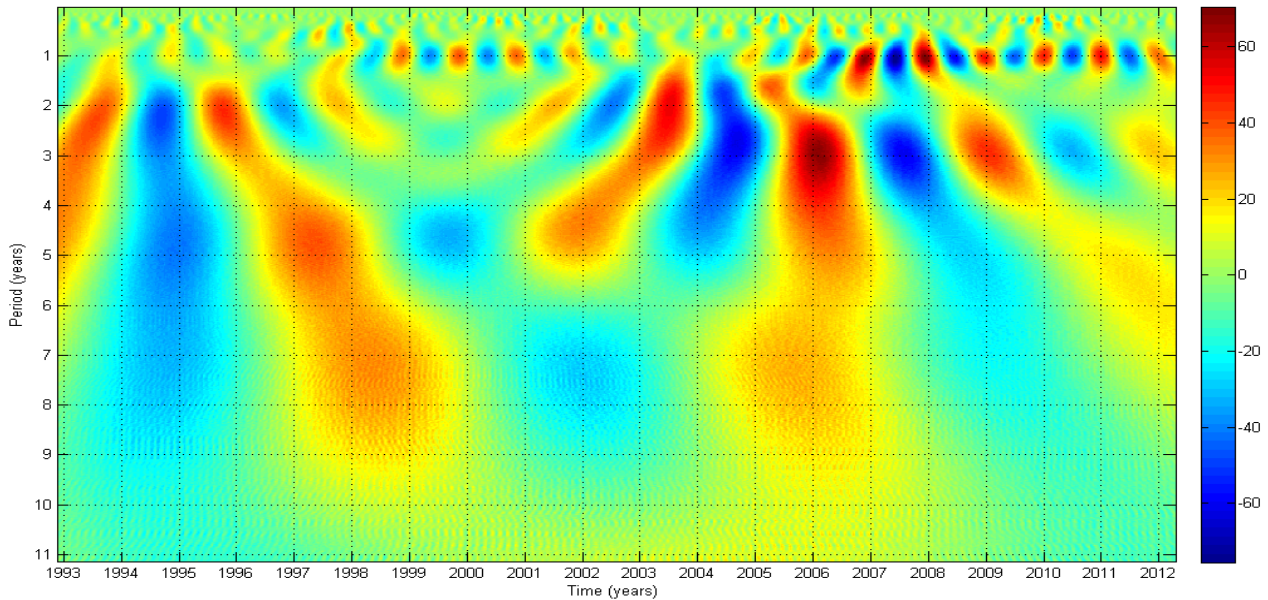


Рис. 4. Вейвлет-изображение колебаний уровня для II района в пункте 14 (56° с. ш. 13° з. д.)

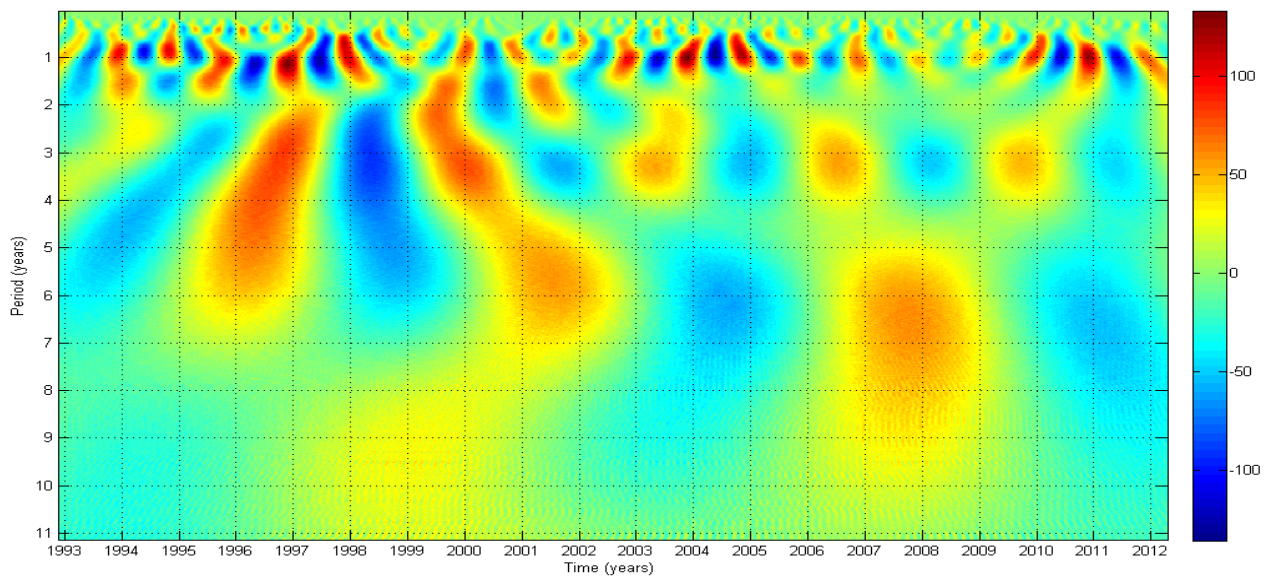


Рис. 5. Вейвлет-изображение колебаний уровня для III района в точке 22 (38° с. ш. 40° з. д.)

На рисунке 6 представлены меридиональные вейвлет-изоплеты (изоплеты вейвлет-коэффициентов для выделенного масштаба изменчивости) вдоль 30° з. д.: по оси абсцисс

отложено время (годы), по оси ординат — широты, более насыщенным цветом выделены большие значения вейвлет-коэффициентов, соответствующие интенсивности колебаний.

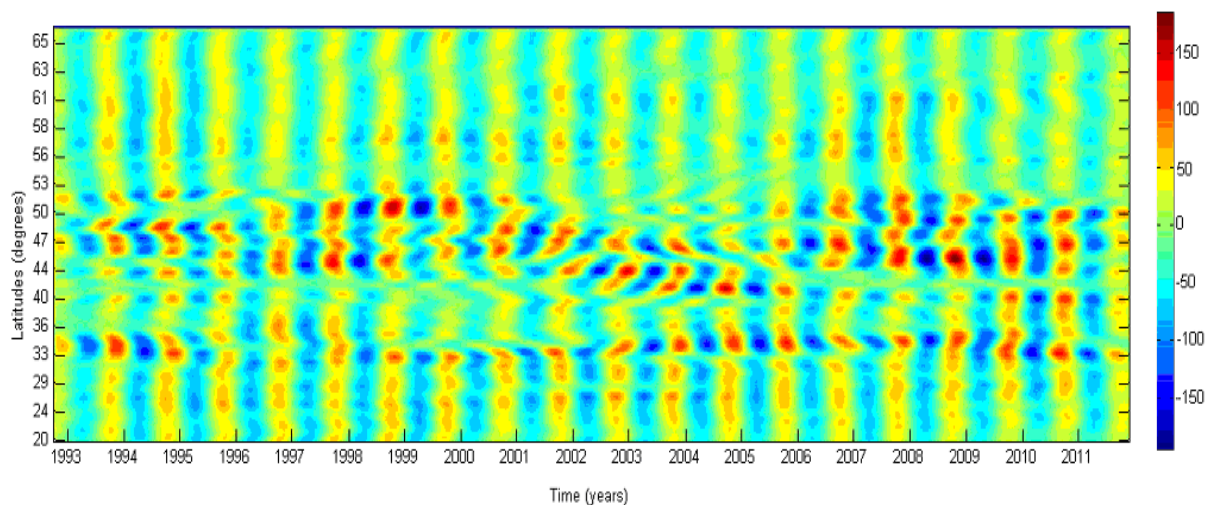


Рис. 6. Вейвлет-изоплеты годовых колебаний на меридиональном разрезе вдоль 30° з. д.

На рисунке 6 значения вейвлет-коэффициентов годового масштаба колебаний в среднем изменяются от -50 до $+50$. Однако выделяются области, где амплитуда изменчивости этих коэффициентов превышает 200. Интенсификация колебаний в районе $33-36^\circ$ и $44-53^\circ$ с. ш., очевидно, связана с проходящими здесь водами Гольфстрима. Обращает на себя внимание неоднородность и нестационарность этих колебаний в Гольфстриме, в то время как на других широтах 30-го меридиана, в частности, $20-30$ и $55-65^\circ$ с. ш. годовой ход в колебаниях более равномерен.

Еще один меридиональный разрез — вейвлет-изоплеты вдоль 20° з. д. (рис. 7) показывает усиление годовых колебаний в Гольфстриме в районе $33-53^\circ$ с. ш., начиная приблизительно с 2001 г., и, в особенности, в период с 2005 по 2011 г.

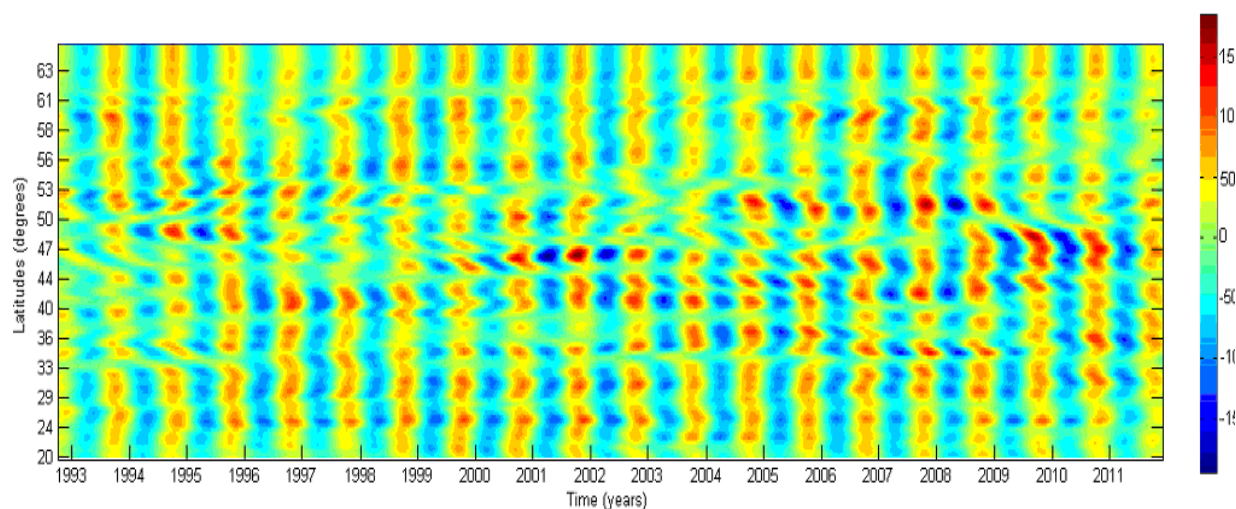


Рис. 7. Вейвлет-изоплеты годовых колебаний на меридиональном разрезе вдоль 20° з. д.

Выводы

Для всех пунктов, расположенных в Северной Атлантике, проанализирована изменчивость уровня по данным спутниковых измерений; методами Фурье и вейвлет-анализа определены масштабы изменчивости уровня океана: годовые, квазидвухлетние, квазитрёхлетние (3-4 года), квазисемилетние (6-8 лет) циклы. Рассматриваемая низкочастотная изменчивость уровня океана существенно не стационарна во времени. Для каждого пункта описаны характерные особенности этой нестационарности.

Сравнение вейвлет-коэффициентов, характеризующих интенсивность колебаний уровня для пунктов, расположенных непосредственно в струе Гольфстрима и вне ее, показало, что на течении колебания уровня интенсифицируются, и значения вейвлет-коэффициентов многократно превышают таковые в пунктах, расположенных вне струи. Этот факт также подтверждается и меридиональными вейвлет-изоплетами (вейвлет-коэффициенты, картированные в виде изоплет вдоль выделенного меридиана, проходящего через Гольфстрим). Указанное свойство вейвлет-коэффициентов позволяет проследить нестационарность и локализацию течения Гольфстрим на меридиональном разрезе.

При сравнении вейвлет-коэффициентов в точках в струе Гольфстрима и вне её было обнаружено, что Гольфстрим влияет лишь на амплитуды колебаний, практически не изменяя характера их нестационарности.

При удалении Гольфстрима от места его возникновения, то есть при продвижении на северо-восток по Атлантике, наблюдается ослабление действия течения на колебания уровня моря, воспринимаемое как уменьшение значений вейвлет-коэффициентов для всех рассматриваемых периодичностей колебаний.

ПРИМЕЧАНИЯ

¹ <http://www.avisio.oceanobs.com>

² <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/2minrelief.html>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоненко Т. В., Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р., Шилов И. О. Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана. СПб.: Из-во СММО-ПРЕСС, 2009. 309 с.
2. Белоненко Т. В., Колдунов В. В. Межгодовая изменчивость альтиметрических измерений уровня океана на восточно-сахалинском шельфе // Вестник СПбГУ. 2007. Вып. 2. Сер. 7. С. 128–135.
3. Клиге Р. К. Изменения глобального водообмена. М.: Наука, 1985. 247 с.
4. Клиге Р. К., Данилов И. Д., Конищев В. Н. История гидросферы. М.: Научный мир, 1998. 368 с.
5. Максимов И. В. Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
6. Максимов И. В., Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Океан и космос. Л.: Гидрометеиздат, 1970.
7. Малинин В. Н. Уровень океана: настоящее и будущее. СПб.: РГГМУ, 2012. 260 с.
8. Хайруллина Г. Р., Астафьева Н. М. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования. М.: Ин-т. космич. исследований РАН (ИКИ РАН), 2011 (Препринт 2163. 60 с. <http://www.twirpx.com/file/822608/>).
9. Volkov D. L. Monitoring the variability of sea level and surface circulation with satellite altimetry // Thesis dissertation. 2004. P. 152.
10. Volkov D. L., H. M. van Aken. Annual and interannual variability of sea level in the northern North Atlantic Ocean, J. Geophys. Res., 108, 3204.
11. Volkov D. L., H. M. van Aken. Low frequency change of sea level in the North Atlantic Ocean as observed with satellite altimetry, In: Satellite altimetry for geodesy, geophysics and oceanography / Eds. C. Hwang, C. Shum and L. Jiangcheng // International Association of Geodesy Symposia. Vol. 126. P. 167–174. Springer-Verlag, 2003.

REFERENCES

1. *Belonenko T. V., Koldunov V. V., Staritsyn D. K., Fuks V. R., Shilov I. O.* *Izmenchivost' urovnja severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana.* SPb.: Izd-vo SMIO-PRESS, 2009. 309 s.
2. *Belonenko T. V., Koldunov V. V.* *Mezhgodovaja izmenchivost' al'timetriceskikh izmerenij urovnja okeana na vostochno-sahalinskom shel'fe // Vestnik SPbGU.* 2007. Vyp. 2. Ser. 7. S. 128–135.
3. *Klige R. K.* *Izmenenija global'nogo vodoobmena.* M.: Nauka, 1985. 247 s.
4. *Klige R. K., Danilov I. D., Konishchev V. N.* *Istorija gidrosfery.* M.: Nauchnyj mir, 1998. 368 s.
5. *Maksimov I. V.* *Geofizicheskie sily i vody okeana.* L.: Gidrometeoizdat, 1970. 447 s.
6. *Maksimov I. V., Saruhanjan E. I., Smirnov N. P.* *Okean i kosmos.* L.: Gidrometeoizdat, 1970.
7. *Malinin V. N.* *Uroven' okeana: nastojashchee i budushchee.* SPb.: RGGMU, 2012. 260 s.
8. *Hajrullina G. R., Astafeva N. M.* *Kvazidvuhletnie kolebanija v atmosfere Zemli. Obzor: nabljudenie i mehanizmy formirovanija.* M.: In-t. kosm. issledovanij RAN (IKI RAN), 2011 (Preprint 2163. 60 s. <http://www.twirpx.com/file/822608/>).
9. *Volkov D. L.* *Monitoring the variability of sea level and surface circulation with satellite altimetry // Thesis dissertation.* 2004. P. 152.
10. *Volkov D. L., H. M. van Aken.* *Annual and interannual variability of sea level in the northern North Atlantic Ocean, J. Geophys. Res.,* 108, 3204.
11. *Volkov D. L., H. M. van Aken.* *Low frequency change of sea level in the North Atlantic Ocean as observed with satellite altimetry, In: Satellite altimetry for geodesy, geophysics and oceanography / Eds. C. Hwang, C. Shum and L. Jiangcheng // International Association of Geodesy Symposia. Vol. 126. P. 167–174. Springer-Verlag, 2003.*