

Анализ межгодовых трендов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в Атлантическом океане по спутниковым данным

С.В. Шеберстов, О.В. Копелевич, Е.А. Лукьянова

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИОРАН)
Нахимовский пр., 36, Москва, Россия 117997
E-mail: sheberstov@ocean.ru

Цель выполненных исследований – корректная оценка по спутниковым данным межгодовых трендов изменения глобальных характеристик температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации хлорофилла (Хл) для различных широтных поясов Атлантического океана от 60°ю.ш. до 60°с.ш. Исследовалось влияние потерь данных из-за облачности и по другим причинам (особенно существенное в широтных поясах 40-60°), анализировались возможности учета этих потерь. Использовались разные подходы к решению проблемы: привлечение данных микроволнового радиометра AMSR-E, для которого облачность «прозрачна»; данных по облачному покрытию; расчеты пространственных распределений с разным пространственным осреднением. Показан положительный эффект осреднения с увеличенным размером ячеек сетки для уменьшения потери данных; этот подход применим как к данным ТПО, так и Хл. Различными методами выполнены расчеты глобальных трендов изменения температуры поверхности, концентрации хлорофилла и площади облачного покрытия для разных широтных поясов Атлантического океана; приведены полученные результаты с оценкой возможных ошибок.

Ключевые слова: спутниковые данные, температура поверхности, концентрация хлорофилла, Атлантический океан, сезонный ход, межгодовой тренд, влияние потери данных.

Введение

В предыдущей публикации (Копелевич, Шеберстов, 2010) представлены методика и результаты расчетов по спутниковым данным глобальных характеристик температуры поверхности (ТПО) и концентрации хлорофилла (Хл) как параметров, отражающих термическое состояние поверхностного слоя океана и его биопродуктивность. Расчеты выполнены для разных широтных поясов Атлантического океана: 0-40° и 40-60° в северном и южном полушариях. Один из важных результатов выполненных исследований – выявление влияния вариаций покрытия исследуемых регионов спутниковыми данными (которое особенно значительно в широтных поясах 40-60°) на получаемые оценки средних значений и их межгодовых изменений. Решение этой проблемы имеет важнейшее значение для корректной оценки трендов рассматриваемых характеристик.

Данная работа является продолжением вышеупомянутых исследований. Рассматривались две основные задачи: (1) разработка методики учета влияния потери данных; (2) корректная оценка трендов с указанием ошибок полученных оценок. В предыдущей работе анализировались одиннадцатилетние ряды наблюдений (1998-2008гг.); в настоящей работе ряды наблюдений расширены в обе стороны: добавлены новые данные за 2009 г. и частично за 2010 г., включены доступные архивные данные ТПО с 1985 г. Последнее было сделано для более полной и достоверной оценки глобального тренда. Для решения проблемы учета потери данных ТПО из-за облачности собраны и анализированы данные микроволнового радиометра AMSR-E, для которого облачность не является препятствием.

Используемые данные и методика их обработки

Данные AVHRR, сканеров цвета и проекта ISCCP

Как и ранее (Копелевич, Шеберстов, 2010), для расчетов использовались данные спутниковых сканеров AVHRR NOAA (<http://podaac.jpl.nasa.gov>), SeaWiFS NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) и MODIS-Aqua, уровень Level 3 с разрешением 4 км для ТПО и 9 км для Хл. Однако для уменьшения потери данных также проводилось осреднение с размером ячеек сетки 72x72 км (см. далее).

Глобальные файлы со среднемесячными распределениями концентрации хлорофилла-а содержат по 4096 x 2048 ячеек усреднения каждый и построены в цилиндрической равнопромежуточной проекции, т.е. размер ячеек в градусах не зависит от ее положения, а площадь (км²) пропорциональна косинусу широты. Файлы со среднемесячными распределениями поверхностной температуры содержат по 8192x4096 ячеек, и тоже построены в цилиндрической равнопромежуточной проекции.

По разработанной ранее методике строились карты среднемесячных распределений температуры и концентрации хлорофилла и рассчитывались статистические характеристики этих распределений для четырех широтных поясов Атлантического океана: 40° – 60° с.ш., 0° – 40° с.ш., 0° – 40° ю.ш., 40° – 60° ю.ш.

Среднемесячные значения поверхностной температуры с пространственным разрешением 4км для ночного времени взяты из архива AVHRR Ocean Pathfinder Data JPL NOAA/NASA (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/sea_surface_temperature/avhrr/pathfinder/data-5/monthly/descending). Данные конвертировались к формату, используемому для данных уровня обработки L3 сканеров цвета SeaWiFS и MODIS. При этом использовались только те элементы изображения, для которых значения параметра качества данных quality, приведенные в файлах качества данных, были не ниже 6. Кроме того, на исходные изображения накладывалась маска суши из программного комплекса SeaDAS.

Концентрация хлорофилла рассчитана по данным сканера цвета SeaWiFS с сентября 1997 по июль 2010 г. Для заполнения пробелов в данных SeaWiFS использовались уравнения регрессии, полученные с использованием данных MODIS Aqua с июля 2002 по декабрь 2009 г. (см. Копелевич, Шеберстов, 2010).

Данные по облачному покрытию взяты из архива проекта ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project). Они находятся в открытом доступе (<http://isccp.giss.nasa.gov/>) и охватывают временной интервал с 1983 г. по июнь 2008 г. Использовались данные типа D2, содержащие глобальный набор 130 продуктов низкого разрешения (размер элемента изображения 280x280 км). Анализировались усреднённые по месяцам доли наблюдаемой площади, занятой облаками (Mean Cloud Amount, MCA).

Данные пассивной микроволновой радиометрии

Пассивная микроволновая радиометрия, в отличие от ИК-радиометрии, дает возможность получать данные о температуре океана через облака. Это позволяет надеяться, что привлечение данных микроволновой радиометрии позволит оценить влияние потери данных на изменение глобальных средних значений SST и в дальнейшем разработать алгоритмы учета этих потерь.

Мы использовали данные микроволнового радиометра AMSR-E на спутнике NASA Aqua, запущенном в мае 2002 года. Использованные данные скачаны с сайта <ftp://ssmi.com>, на котором имеются файлы, усредненные за 1 день, за 3 дня, за одну неделю и за месяц. Размерность массивов данных 1440x720, т.е. размер ячейки усреднения (элемента изображения) составляет $\frac{1}{4} \times \frac{1}{4}$ градуса или $27,8 \times 27,8 \text{ км}^2$ на экваторе; данные распределены в узлах равномерной градусной сетки. Однодневные файлы содержат по отдельности данные для восходящих (дневных) и нисходящих (ночных) витков спутника Aqua, остальные файлы содержат по одному набору, полученному усреднением какочных, так и дневных данных. Хотя у радиометра AMSR-E также имеются потери данных из-за солнечных бликов в дневное время, дождя, скорости ветра $> 20 \text{ м/с}$, льда и близости берега, потери из-за этих факторов гораздо меньше, чем AVHRR, особенно в широтных поясах $40^\circ\text{-}60^\circ$. Это иллюстрирует рис. 1, на котором даны распределения площадей с разными диапазонами значений ТПО в широтном поясе $40^\circ\text{-}60^\circ$ с.ш. в феврале 2008 г. по данным ИК-радиометра AVHRR и микроволнового радиометра AMSR-E. Хорошо видна потеря данных для «холодных» пикселей у AVHRR, на которую уже обращалось внимание в предыдущей публикации (Копелевич, Шеберстов, 2010); у AMSR такая потеря отсутствует.

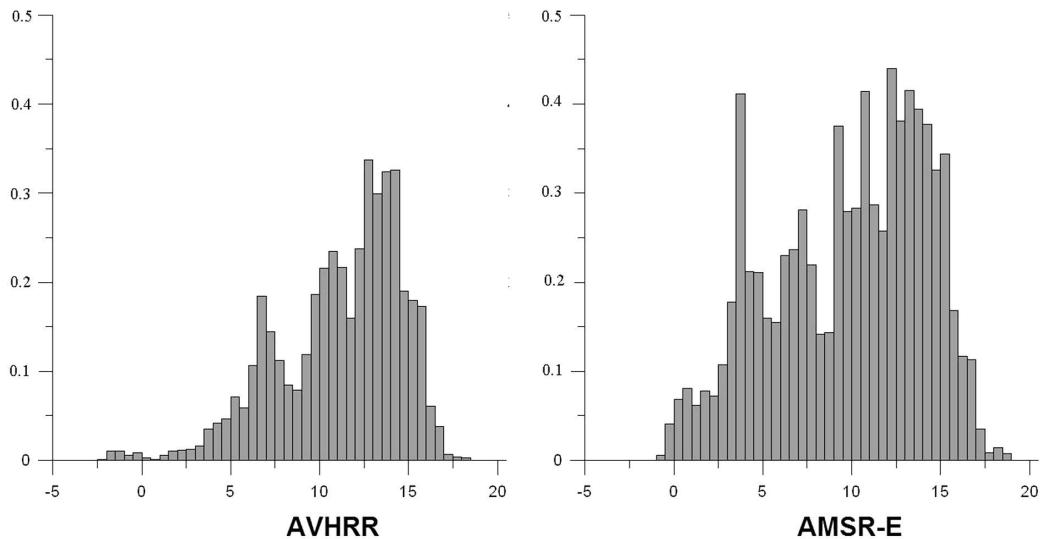


Рис. 1. Распределение площадей (по вертикальной оси – млн. км²) с разными диапазонами значений ТПО (ширина диапазонов 0.5°C) в широтном поясе $40^\circ\text{-}60^\circ$ с.ш. в феврале 2008 г. по данным ИК-радиометра AVHRR (слева) и микроволнового радиометра AMSR-E (справа)

Возможности уменьшения влияния потерь данных

Радиометр AMSR-E уступает AVHRR по ширине полосы сканирования (~ 1450 и 2400 км) и пространственному разрешению (~ 50 и $1,1$ км), однако их точность примерно одинакова (систематическая ошибка $\leq 0,03$ К и $0,02$ К, случайная – $\leq 0,4$ К и $0,53$ К). Поэтому межгодовые изменения (и, соответственно, оценки глобального тренда) по данным AVHRR можно, в принципе, корректировать по данным AMSR-E. Пример такой коррекции показан на рис. 2. Видно, что среднегодовые значения ТПО по данным AMSR-E практически всегда выше, чем по данным AVHRR, что объясняется вышеупомянутой потерей «холодных» пикселей у AVHRR. Максимальные различия наблюдались в широтном поясе $40\text{-}60^\circ$ с.ш. в 2003-2004 гг. и составляли $\sim 0,5^\circ\text{C}$; в остальные годы различия в широтных поясах $40\text{-}60^\circ$ с.ш. были незначительны.

60° находились в пределах 0,2-0,3°C. В широтных поясах 0-40° различия гораздо меньше, а в 2005-2006 гг. в обоих полушариях практически отсутствовали. Данные AMSR-E показывают гораздо меньшие различия между максимальными и минимальными среднегодовыми значениями ТПО в широтных поясах 40-60°, чем AVHRR: 0,62 и 0,79°C в северном полушарии, 0,47 и 0,54°C в южном.

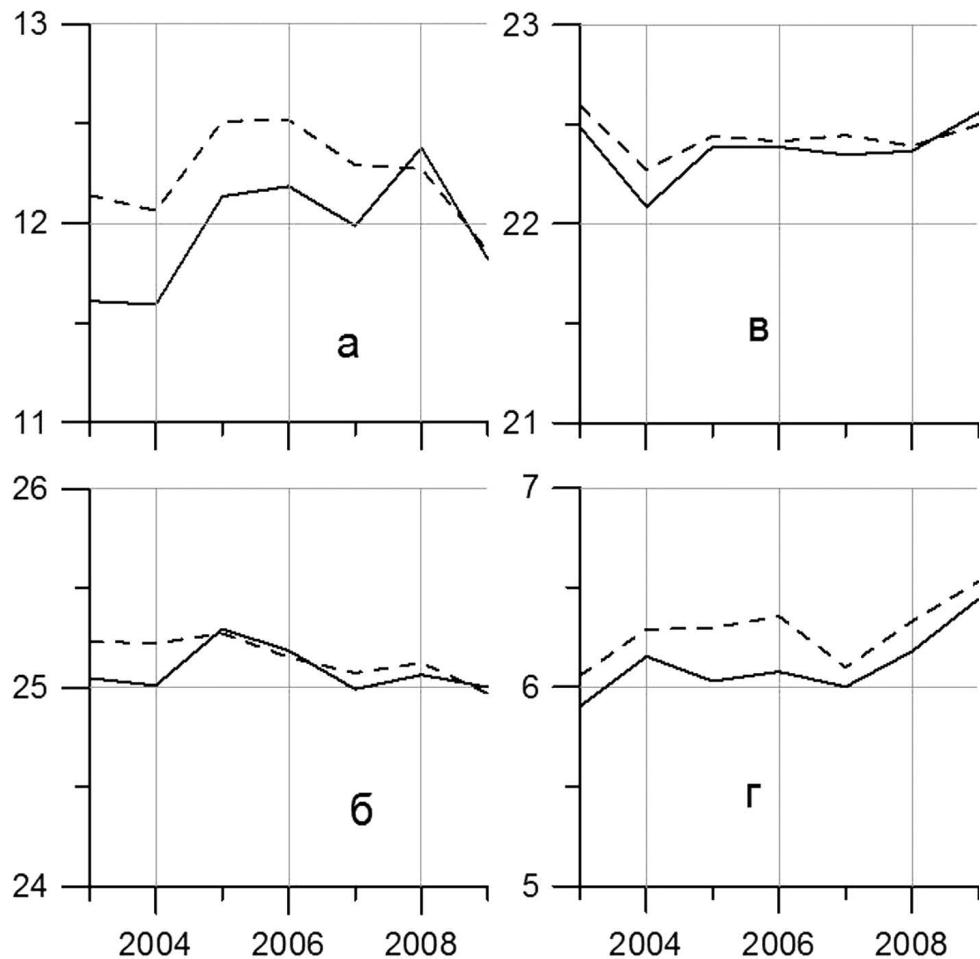


Рис. 2. Изменение среднегодовых значений температуры поверхности океана по данным AVHRR (сплошные кривые) и AMSR-E (пунктир) с 2003 по 2009 гг.: а – широтный пояс 40-60° с.ш., б – 0-40° с.ш., в – 0-40° ю.ш., г – 40-60° ю.ш.

К сожалению, данные AMSR-E доступны лишь с июня 2002 г., кроме того, они применимы лишь к ТПО и не дают возможности коррекции изменений концентрации хлорофилла. Поэтому рассматривался и другой подход – осреднение с увеличенным размером ячеек осреднения. Вероятность того, что в большой ячейке окажется хотя бы один пиксель, свободный от облаков, гораздо выше чем для маленькой, и это подтверждается практическими расчетами. При осреднении с размером ячейки 72x72 км² величины среднемесячного покрытия разных широтных поясов Атлантического океана данными радиометра AVHRR возрастили, по сравнению с осреднением 4 км, в широтных поясах 0-40° – от 80-85% до почти 100%, в поясах 40°-60° – от порядка 60% (в среднем) до 90-95% (следует иметь в виду, что в зимний сезон потеря данных существует не только из-за облачности, но и из-за ледового покрытия). Наилучшее совпадение среднемесячных значений ТПО по данным AVHRR с данными AMSR-E получается при осреднении 72 км и при использовании параметра качества $q \geq 6$ (рис. 3).

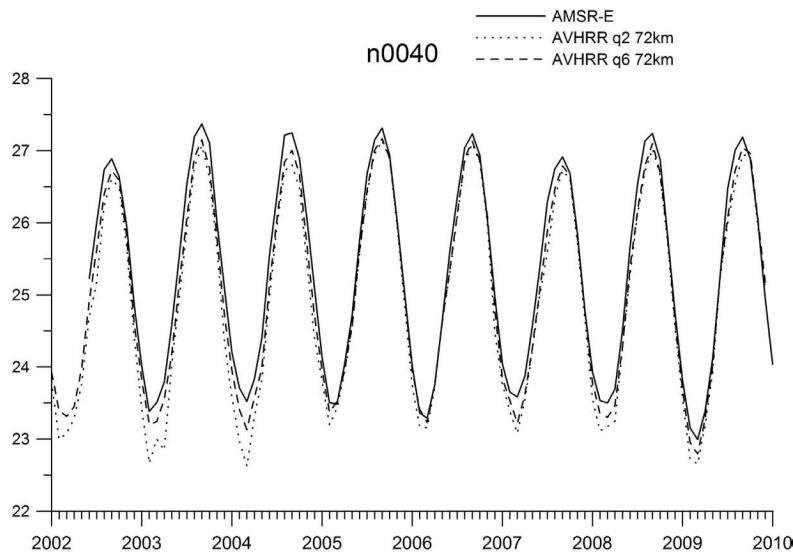


Рис. 3. Сравнение среднемесячных значений ТПО по данным AMSR-E (сплошная кривая) и по данным AVHRR с осреднением 72 км и разными параметрами качества (параметр качества $q \geq 6$ – пунктир, $q \geq 2$ – точки)

Оценка глобальных трендов

В настоящее время разнообразные данные (ТПО, повышение уровня поверхности моря, уменьшение площади ледового покрытия и др.) практически однозначно указывают на то, что в последние 20 – 30 лет наблюдается глобальное потепление. Очевидно, однако, что это потепление происходит отнюдь не монотонно и не однородно по поверхности. Спутниковые данные позволяют оценить достаточно достоверно (с оговоркой на влияние потерь данных) наличие межгодового тренда в разных регионах.

Ниже представлены результаты наших расчетов глобальных трендов вариаций температуры поверхности для разных широтных поясов Атлантического океана, а также концентрации хлорофилла и площади облачного покрытия, выполненных различными методами (Витязев, 2001; Голяндина, 2004).

Вычисление линейных трендов

Вычисление основано на разбиении исходных временных рядов на три части: периодическая (сезонная) компонента, медленно меняющаяся компонента (тренд) и остаток (шум). Для нахождения периодической части построены периодограммы $D(\nu)$ временных рядов SST, Chl и MCA.

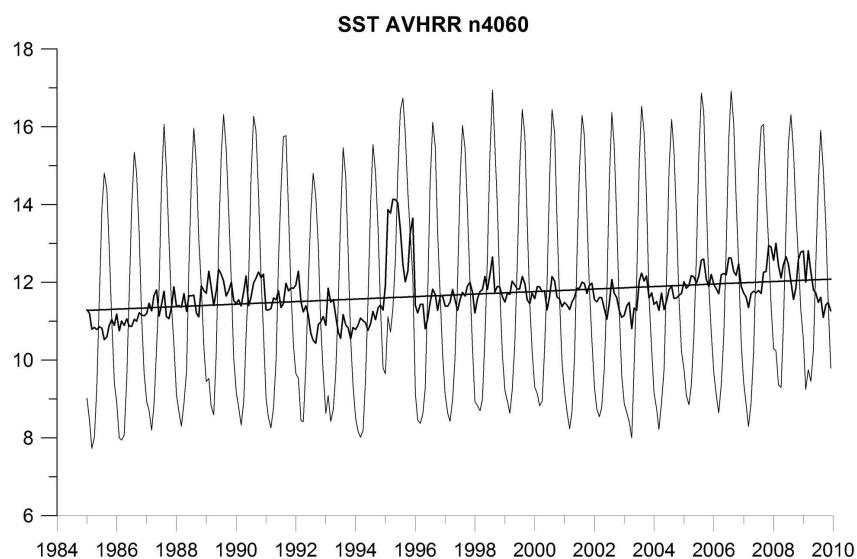
После вычитания периодических компонент из исходных рядов, к остаточному ряду применяется метод наименьших квадратов для определения параметров a и b линейного тренда $y = a t + b$. Примеры представлены на рис. 4.

Метод сингулярного спектрального анализа

Метод сингулярного спектрального анализа (SSA) основан на преобразовании исходного временного ряда в матрицу X , столбцами которой являются скользящие отрезки

ряда длиной L . Параметр L выбирается достаточно произвольно: если его значение велико, результат от него не зависит. В нашем случае, когда временным шагом является один месяц, требуется выполнение условия $L \gg 12$. В приведенных ниже расчетах везде $L = 48$. Целью процедуры SSA в нашем случае является разложение ряда на три компоненты – медленно меняющееся слагаемое (“тренд”), периодическую компоненту, в основном обусловленную сезонным фактором и остаток (“шум”). Детали процедуры описаны в книге (Голяндина, 2004), здесь мы покажем лишь полученные результаты.

Пример выполненного разложения для ТПО в широтном поясе $40\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$ показан на рис. 5.



*Рис. 4. Временные ряды ТПО AVHRR, тренд и остаток для широтного пояса $40\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$
Аномалия 1995 г. обусловлена значительной потерей данных*

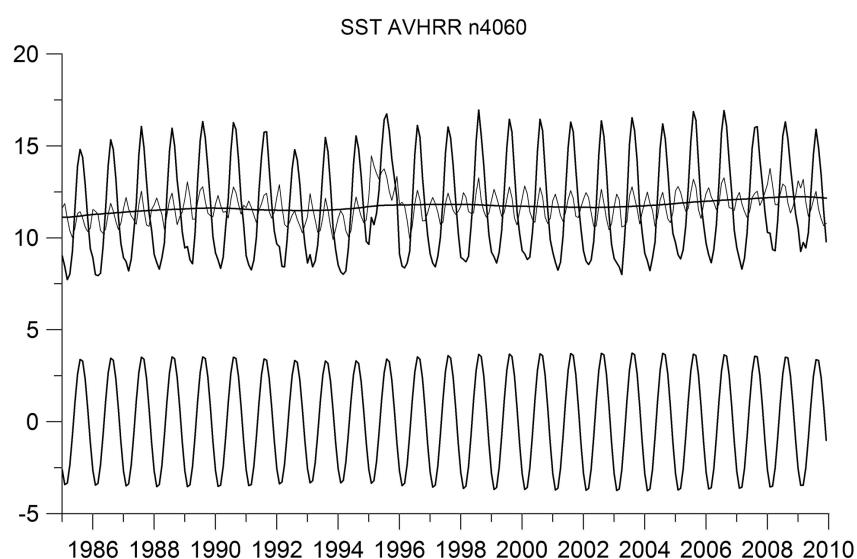
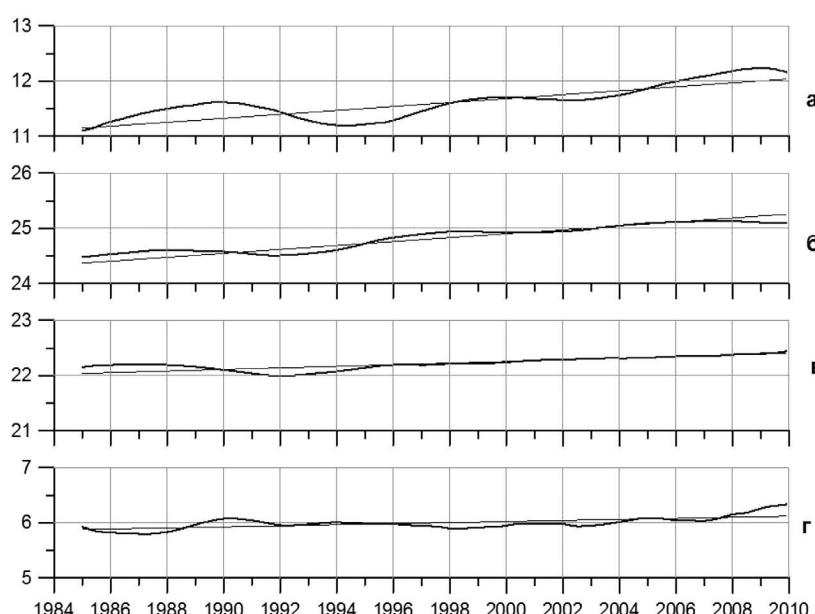


Рис. 5. Метод SSA применительно к ТПО: разложение временного ряда на тренд, периодическую компоненту и остаток. Широтный пояс $40\text{--}60^\circ\text{с.ш.}$ Аномалия 1995 г. обусловлена значительной потерей данных. Временной ряд, тренд (медленно меняющаяся кривая) и остаток (тонкая линия) – три верхние кривые; периодическая компонента – нижняя кривая

Сравнение линейных трендов и трендов, полученных методом сингулярного спектрального анализа

Результаты сравнения трендов среднегодовых величин температуры поверхности океана по данным AVHRR, концентрации хлорофилла по данным сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua, облачного покрытия по данным проекта ISCCP, рассчитанных двумя разными методами, для четырех широтных поясов Атлантического океана показаны на рис. 6-8. При расчетах тренда ТПО год 1995-й с большой потерей данных из-за сбоев в работе аппаратуры был исключен, и вместо него использовались среднемесячные значения, рассчитанные как средние между 1994 и 1996 гг.

Как видно на рисунках 6-7, совпадение трендов ТПО и Хл., рассчитанных разными способами, можно признать вполне приемлемым, а совпадение трендов среднего балла облачности во всех широтных поясах (рис. 8) можно считать почти идеальным.



*Рис. 6. Межгодовые тренды ТПО в разных широтных поясах Атлантического океана:
а – 40-60° с.ш., б – 0-40° с.ш., в – 0-40° ю.ш., г – 40-60° ю.ш. (тонкие линии – линейные тренды,
толстые – метод SSA)*

В Таблице 1 представлены параметры линейных трендов для температуры поверхности океана (ТПО) по данным ИК-радиометра AVHRR и микроволнового радиометра AMSR-E, концентрации хлорофилла по данным сканера цвета SeaWiFS с привлечением данных MODIS-Aqua (Хл) и облачного покрытия по данным проекта ISCCP. Тренд характеризуется параметром наклона a , который показывает годовое изменение рассматриваемой характеристики. В третьей строке для каждой характеристики даны доверительные интервалы параметра a с 95%-ной доверительной вероятностью.

Из Таблицы видно, что наибольшие значения наклонов 0,035 и 0,032 град/год получены по данным AVHRR (1985-2010 гг., разрешение 72 км, флаг качества не менее 6) в северном полушарии в поясах 0-40° и 40-60°, тогда как в южном полушарии они равны лишь 0,014 и 0,004 град/год, соответственно.

По данным AMSR-E тренд практически отсутствует, но ряд наблюдений здесь самый короткий – с июля 2002 по апрель 2010 г.

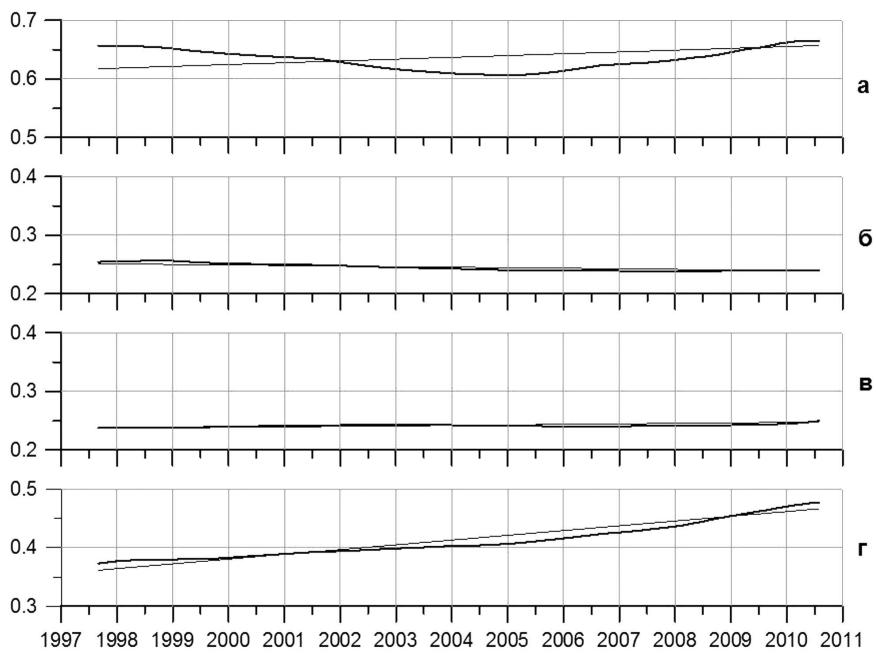


Рис. 7. Межгодовые тренды Хл в разных широтных поясах Атлантического океана:
а – 40-60° с.ш., б – 0-40° с.ш., в – 0-40° ю.ш., г – 40-60° ю.ш. (тонкие линии – линейные тренды,
толстые – метод SSA)

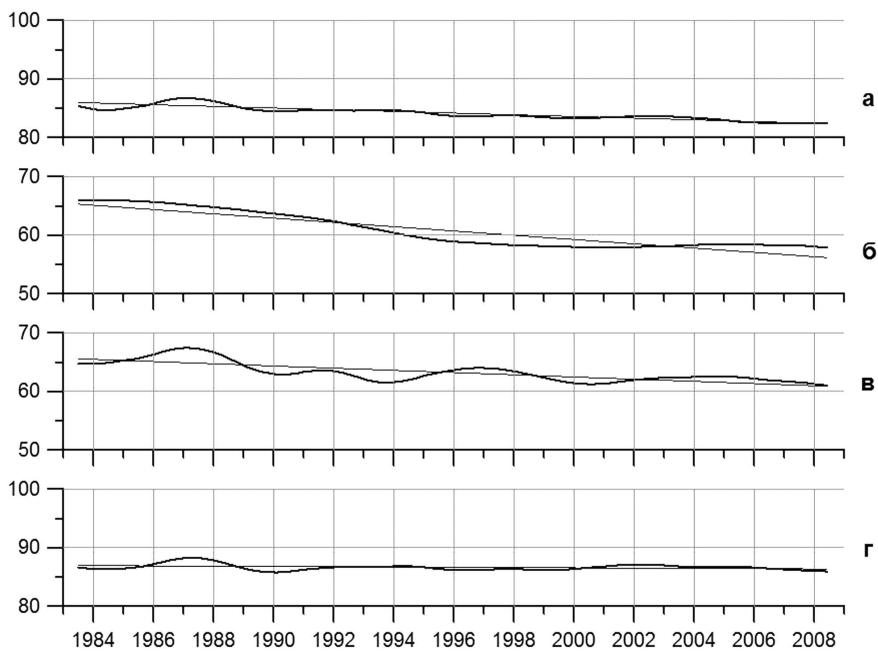


Рис. 8. Межгодовые тренды среднего балла облачности в разных широтных поясах Атлантического океана: а – 40-60° с.ш., б – 0-40° с.ш., в – 0-40° ю.ш., г – 40-60° ю.ш. (тонкие линии – линейные тренды,
толстые – метод SSA)

Для концентрации хлорофилла значащий положительный тренд наблюдается лишь в широтном поясе 40-60° ю.ш.

Для облачного покрытия значимый отрицательный тренд обнаружен во всех рассмотренных регионах, кроме широтного пояса 40-60° ю.ш. Согласно полученным оценкам, облачное покрытие над Атлантическим океаном от 40° ю.ш. до 60° с.ш. сокращается на 0,14 – 0,37% в год.

Таблица 1. Параметры линейных трендов $a + b$

		40-60° с.ш.	0-40° с.ш.	0-40° ю.ш.	40-60° ю.ш.
ТПО AVHRR 1985-2009	<i>a</i>	0.035	0.030	0.014	0.004
	<i>b</i>	11.2	24.4	22.0	5.9
	95% д.и.	0.024 – 0.041	0.026 – 0.034	0.011 – 0.018	-0.009 – 0.017
ТПО AMSR 2002-2010	<i>a</i>	0.017	-0.011	0.016	0.046
	<i>b</i>	12.3	25.3	22.4	6.2
	95% д.и.	-0.056 – 0.090	-0.037 – 0.014	-0.033 – 0.065	0.012 – 0.082
Хл. SeaWiFS 1998-2009	<i>a</i>	0.0030	-0.0009	0.0009	0.0081
	<i>b</i>	0.617	0.2513	0.2364	0.3615
	95% д.и.	0.000 – 0.006	-0.002 – 0.000	0.000 – 0.002	0.006 – 0.010
ISCCP 1984-2008	<i>a</i>	- 0.14	-0.37	-0.176	-0.023
	<i>b</i>	86.0	65.3	65.4	86.9
	95% д.и.	-0.17 – -0.12	-0.410 – -0.32	-0.22 – -0.13	-0.046 – 0.00

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Глобальные межгодовые изменения климатически значащих параметров океана по спутниковым данным» Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

1. Витязев В.В. (2001) Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов // Сб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2001.
2. Голяндина Н.Э. (2004) Метод «Гусеница» – SSA: анализ временных рядов // Сб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2004.
3. Копелевич О.В., Шеберстов С.В. (2010) Оценка по спутниковым данным межгодовых и сезонных изменений температуры поверхности Атлантического океана и концентрации хлорофилла в поверхностном слое в период 1998-2008 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 238-247.

Analysis of inter-annual trends of sea surface temperature and chlorophyll concentration in the Atlantic Ocean from satellite data

S.V. Sheberstov, O.V. Kopelevich, E.A. Lukyanova

*Shirshov Institute of Oceanology RAS (IORAS)
Nakhimovsky Prospect, 36, Moscow 117997 Russia
e-mail: sheberstov@ocean.ru*

A goal of the studies performed is a correct assessment of inter-annual trends of sea surface temperature (SST) and chlorophyll concentration (ChL) in different climatic zones of the Atlantic Ocean from 60°S to 60°N from satellite data. Effect of the data losses due to cloudiness and for other reason (that is most considerable in the latitudes of 40-60°) is studied; the possibilities of taking into account of the above mentioned losses are analyzed. Various approaches to the problem are applied: use of data from a microwave radiometer AMSR-E which are not influenced by cloudiness; use of data on cloud coverage; calculation of spatial distributions with different spatial averaging. The averaging with enhanced size of bins has a positive effect reducing the data losses; such an approach can be applied both to SST and Chl data. The global trends have been estimated by different methods for SST, Chl and the cloud coverage; the obtained results are given with the estimated errors.

Keywords: satellite data, sea surface temperature, chlorophyll, Atlantic Ocean, seasonal changes, inter-annual trend, effect of data losses.