

Оценка по спутниковым данным межгодовых и сезонных изменений температуры поверхности Атлантического океана и концентрации хлорофилла в поверхностном слое в период 1998-2008 гг.

О.В. Копелевич, С.В. Шеберстов

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: oleg@ocean.ru*

По данным спутниковых ИК-радиометров и сканеров цвета исследуются глобальные межгодовые и сезонные изменения температуры поверхности океана (ТПО) и концентрации хлорофилла (Хл) в Атлантическом океане в период 1998-2008гг. Анализируются их среднемесячные распределения для акватории от 60°ю.ш. до 60°с.ш.; рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения для различных широтных поясов, а также среднемесячные величины площадей, охватывающих разные диапазоны ТПО и Хл. Показано, что наблюдаемые изменения рассчитанных спутниковых значений ТПО и Хл могут быть обусловлены не только непосредственными изменениями ТПО или Хл, но и потерями данных из-за облачности, ледового покрытия и по другим причинам.

Ключевые слова: Атлантический океан, спутниковые данные, температура поверхности, концентрация хлорофилла, сезонный ход, межгодовые изменения, влияние облачности.

Введение

Глобальные климатические изменения, происходящие в Мировом океане, индицируются по изменениям «климатически значащих» параметров, в число которых входят температура поверхности океана (*SST*) и концентрация хлорофилла (*Chl*). Первая величина характеризует термическое состояние поверхностного слоя океана, вторая – биомассу фитопланктона. Концентрация хлорофилла – ключевая характеристика для расчета первичной продукции. Именно по этой причине ее следует включить в число климатически значащих параметров, поскольку первичная продукция создается в процессе фотосинтеза и может оказывать влияние на процесс обмена углекислым газом CO_2 между океаном и атмосферой и на проявление парникового эффекта, одного из наиболее мощных факторов, обуславливающих климатические изменения. Важно отметить, что оба указанных параметра доступны для измерений посредством спутниковых датчиков, а именно спутниковые измерения позволяют получить долговременные ряды наблюдений, охватывающие большие акватории.

Цель настоящей работы – исследование глобальных межгодовых и сезонных изменений *SST* и *Chl*, а также анализ взаимосвязи между их изменениями. С точки зрения поставленной задачи, нас интересуют крупномасштабные компоненты с масштабами поряд-

ка тысячи и десятка тысяч километров [1]. Объект наших исследований - Атлантический океан, который можно рассматривать как своеобразную «кухню» погоды в Европе и европейской части России.

В данной работе описана используемая методика расчетов и представлены полученные результаты для одиннадцатилетнего периода спутниковых наблюдений 1998-2008 гг. Ограниченный объем публикации не дает возможности показать все полученные результаты; мы постарались выбрать наиболее представительные из них. Краткий анализ результатов и перспектив их использования дан в Заключении.

Используемые данные и методика расчетов

Для расчетов использовались данные спутниковых сканеров AVHRR NOAA (<http://podaac.jpl.nasa.gov>), SeaWiFS и MODIS-Aqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), уровень Level 3 с разрешением 4 км для *SST* и 9 км для *Chl*. Глобальные файлы со среднемесячными распределениями концентрации хлорофилла-*a* содержат по 4096 x 2048 ячеек усреднения и построены в цилиндрической равнопромежуточной проекции, т.е. размер ячейки в градусах не зависит от ее положения, а площадь (км^2) пропорциональна косинусу широты. Файлы со среднемесячными распределениями поверхностной температуры содержат по 8192x4096 ячеек, и тоже построены в цилиндрической равнопромежуточной проекции.

Была разработана методика расчета и подготовлена программа обработки вышеуказанных спутниковых данных с целью построения карт среднемесячных распределений температуры и концентрации хлорофилла и расчета статистических характеристик этих распределений для акватории Атлантического океана от 60° ю.ш. до 60° с.ш. (рис.1).

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/data5/monthly/descending/4/). Данные конвертировались к формату, используемому для данных уровня обработки L3 сканеров цвета SeaWiFS и MODIS. При этом использовались файлы качества данных, содержащиеся на указанном сайте: отбирались только те элементы изображения, для которых значение параметра качества данных *quality* было не ниже 6. Кроме того, на исходные изображения накладывалась маска суши, из программного комплекса SeaDAS. Пример обработанного указанным образом файла данных для июня 2008 года показан на рис.1. Белым цветом на этом изображении отмечены пиксели, не учитываемые при обработке; черные линии – границы регионов.

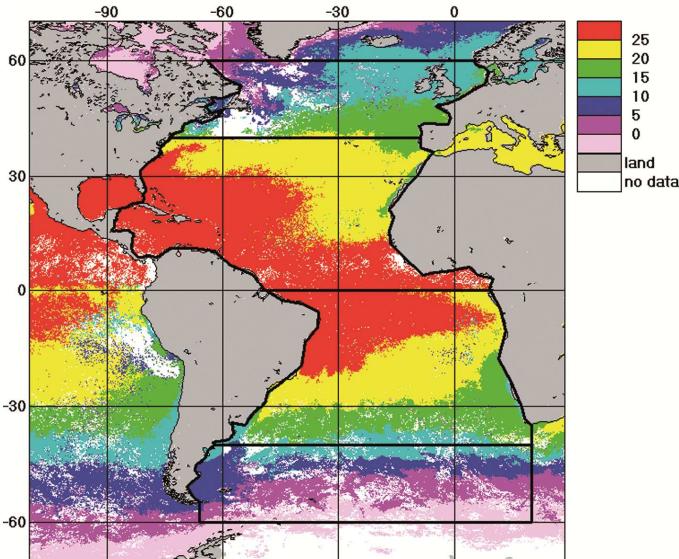


Рис.1. Контуры акватории Атлантического океана, для которой проводились оценки изменений среднемесячных распределений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла.
Черные линии – границы рассматриваемых широтных поясов

Для количественных оценок наблюдаемых изменений рассчитывались среднемесячные, сезонные и среднегодовые значения *SST* и *Chl* для северной и южной половин, а также для широтных поясов $0\text{--}40^{\circ}$ и $40\text{--}60^{\circ}$ в каждой из половин, аномалии изменений среднемесячных величин, гистограммы распределения значений *SST* и *Chl*, коэффициенты корреляции между изменениями этих величин, а также среднемесячные величины площадей, охватывающих разные диапазоны поверхностной температуры и концентрации хлорофилла, отдельно для северной и южной половин и для всей исследованной акватории. Были выбраны следующие градации: хлорофилла *Chl* - $< 0.15 \text{ mg m}^{-3}$ (олиготрофные воды), $0.15\text{--}0.5 \text{ mg m}^{-3}$ (мезотрофные), $> 0.5 \text{ mg m}^{-3}$ (эвтрофные); температуры *SST* - $< 10^{\circ}\text{C}$, $10\text{--}20^{\circ}\text{C}$, $> 20^{\circ}\text{C}$.

Обеспеченность покрытия разных регионов спутниковыми данными существенно различалась. Для широтных поясов $0\text{--}40^{\circ}$ в обоих полушариях покрытие было вполне удовлетворительно – в северном полушарии обычно выше 80% как по температуре поверхности океана, так по концентрации хлорофилла, в южном – в основном выше 80% по *Chl* и 70% по *SST*.

К сожалению, в широтных поясах $40\text{--}60^{\circ}$ покрытие в осенне-зимние сезоны в обоих полушариях явно неудовлетворительно. По *SST* оно обычно ниже 50% в декабре–феврале в северном полушарии и в сентябре–ноябре – в южном; по *Chl* оно может быть меньше 30% в декабре–январе в северном полушарии и в июне в южном. Различие покрытий по *SST* и *Chl* связано с разницей в процедуре отбраковки данных по их качеству для разных спутниковых датчиков. Проблему потери данных, имеющую наиважнейшее значение для построения долговременных рядов наблюдений и анализа межгодовых изменений, мы обсудим далее.

«Стыковка» данных сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua

Данные спутникового сканера цвета SeaWiFS успешно использовались для мониторинга различных биооптических характеристик морей и океанов с 1998 г., но в 2008 году возникли проблемы с получением данных этого сканера. В начале 2008 г. он был отключен из-за отсутствия данных по навигации и положению в пространстве. В начале апреля сканер возобновил работу и успешно функционировал с апреля по июнь. Но в июле он опять не работал, пропуски в его данных случались и в другие месяцы 2008 года. В то же время на орбите успешно функционирует другой американский сканер цвета MODIS-Aqua, данные которого по цвету, как указывалось выше, успешно обрабатываются программными обеспечениями SeaDAS и ИОРАН. Однако «стыковка» данных, получаемых от разных спутниковых датчиков, – это серьезная проблема, требующая специальных исследований.

Трудности объединения данных SeaWiFS и MODIS-Aqua связаны с различием спектральных каналов сенсоров, разнице во времени наблюдений, а так же с различием в обработке данных, в особенности в процедуре отбраковки «плохих» данных [<http://seadas.gsfc.nasa.gov/>].

Различие в спектральных каналах сканеров SeaWiFS и MODIS не критичны и учитываются в стандартных алгоритмах расчета концентрации хлорофилла. Результаты расчетов по этим алгоритмам хорошо совпадают в диапазоне концентраций $0\text{--}1 \text{ mg m}^{-3}$ и начинают существенно расходиться, когда концентрация хлорофилла превышает 5 mg m^{-3} .

Совместимость алгоритмов SeaWiFS и MODIS-Aqua обсуждалась ранее в [2]. Сравнение среднегодовых значений концентрации хлорофилла в 2005 году по данным SeaWiFS и MODIS-Aqua показало, что относительное различие не превышает 10%, если концентрация хлорофилла выше 0.25 mg/m^3 , за исключением некоторых высоколатитудных областей. Средняя концентрация по всему океану равнялась 0.452 mg/m^3 по данным SeaWiFS и 0.414 mg/m^3 по данным MODIS, т.е. относительное различие составляет 8.8%.

Верификация алгоритмов расчета концентрации хлорофилла по данным SeaWiFS проводилась ранее на трансатлантических разрезах [3] и показала удовлетворительное согласие между судовыми (метод высокоеффективной жидкостной хроматографии HPLC) и спутниковыми данными. Можно считать, что стандартные алгоритмы определения концентрации хлорофилла вполне пригодны для ее оценки в водах Атлантического океана.

В настоящей работе стыковка данных SeaWiFS и MODIS-Aqua по концентрации хлорофилла Chl выполнялась следующим образом. Сначала были рассчитаны среднемесячные значения Chl для северной и южной половин, а также для широтных поясов $0\text{--}40^\circ$

и 40-60° в каждой из половин, по всем имеющимся данным SeaWiFS и MODIS-Aqua. Затем рассчитывались уравнения регрессии между данными SeaWiFS и MODIS-Aqua в период с 2002 по 2007 год для каждого региона и для каждого месяца в отдельности. Полученные уравнения были использованы для пересчета значений по данным MODIS-Aqua в значения, подобные данным SeaWiFS, для периода с 2002 по 2008 год. Соответствие между измеренными данными SeaWiFS и пересчитанными из данных MODIS-Aqua посредством вышеупомянутых уравнений регрессии вполне приемлемое.

На рис.2 показан пример распределений среднемесячных значений концентраций хлорофилла в Атлантическом океане, полученных по данным SeaWiFS и MODIS-Aqua в январе 2003 года.

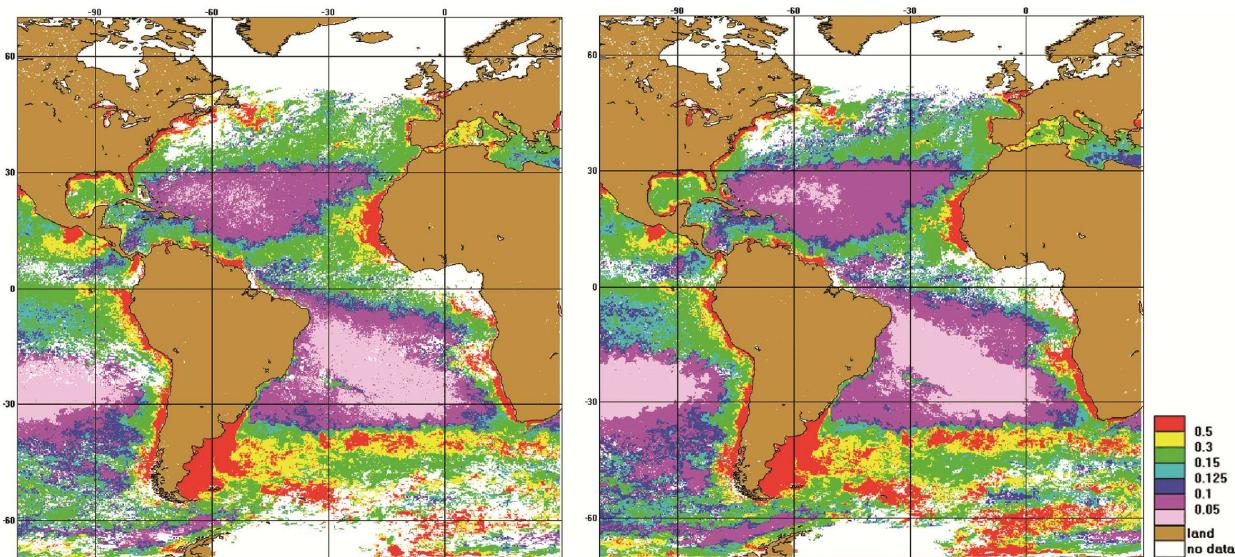


Рис.2. Распределения среднемесячных значений концентраций хлорофилла в Атлантическом океане в январе 2003 полученных по данным SeaWiFS (слева) и MODIS-Aqua (справа)

Из рисунка видно, что соответствие между распределениями концентрации хлорофилла по данным сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua вполне приемлемо, однако на представленных изображениях можно заметить различие в площадях «белых пятен», связанное с отмеченной выше разницей в процедурах отбраковки «плохих» данных.

Сезонные и межгодовые изменения SST и Chl

Среднемесячные распределения температуры поверхности океана и концентрации демонстрируют четко выраженную широтную и циркумконтинентальную зональность (см. рис.1-2). Сравнение среднемесячных распределений поверхностной температуры и концентрации хлорофилла показывает, что температура поверхности – отнюдь не единственный фактор, определяющий динамику изменения концентрации хлорофилла. Поми-

мо четко выраженной широтной зональности, на картах распределения концентрации хлорофилла хорошо видна пятнистость распределения областей повышенной концентрации хлорофилла, предположительно связанная с мезомасштабной динамикой вод. В первую очередь, это прибрежные апвеллинги – у побережья Африки и Южной Америки. В течение всего года можно видеть область выноса амазонских вод, увлекаемых на северо-запад Гвианским течением; эти воды могут затем увлекаться на восток Межпассатным противотечением и прослеживаться далеко в открытом океане. Пятна повышенных концентраций хлорофилла в открытых районах океана, предположительно, связаны с фронтальными зонами между течениями и мезомасштабными вихрями.

Между сезонными изменениями *SST* и *Chl* существует заметный сдвиг фаз. В северной Атлантике в широтном поясе 0-40°N наименьшие среднемесячные значения концентрации хлорофилла $\sim 0.19 \text{ мг м}^{-3}$ зафиксированы в сентябре-октябре, наибольшие $\sim 0.27 \text{ мг м}^{-3}$ – в апреле-мае (температуры, соответственно, в марте и сентябре).

В широтном поясе 40-60°N наименьшее значение *Chl* 0.43 мг м^{-3} – в январе, наибольшее значение 0.98 мг м^{-3} – в мае (температуры – в марте и августе).

В южной Атлантике в широтном поясе 0-40°ю.ш. наименьшие среднемесячные значения 0.18 мг м^{-3} были в феврале, наибольшие 0.30 мг м^{-3} – в сентябре (температуры – в сентябре и марте); в широтном поясе 40-60° ю.ш. наименьшее значение 0.26 мг м^{-3} – в августе, наибольшее 0.57 мг м^{-3} – в декабре (температуры – в августе и феврале).

На рис. 3 показаны изменения среднегодовых значений температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в разных широтных поясах с 1998 по 2008 гг. Видно, что южное полушарие, если говорить о среднегодовых значений, более холодное и бедное, с точки зрения биопродукции, чем северное. В широтном поясе 0-40° среднегодовые значения *SST* в северном полушарии превышают 25°C , в южном – ниже 23°C . Среднегодовые значения *Chl* в широтном поясе 0-40° в северном и южном полушариях примерно одинаковы ($0.22\text{-}0.25$ и $0.23\text{-}0.24 \text{ мг м}^{-3}$, соответственно), однако в широтном поясе 40-60° среднегодовые значения *SST* и *Chl* в северном полушарии заметно выше, чем в южном (*SST*: $12\text{-}13^{\circ}\text{C}$ и меньше 8°C , соответственно; *Chl*: больше 0.6 мг м^{-3} и меньше 0.5 мг м^{-3}).

В обоих полушариях наблюдаются заметные изменения среднегодовых значений температуры поверхности и, особенно, концентрации хлорофилла, но, если говорить о тренде, то внимание привлекает лишь возрастание *SST* в широтном поясе 40-60° с.ш. с 2004 по 2008 г. и *Chl* в широтном поясе 40-60° ю.ш. в этот же период. В первом случае среднегодовое значение *SST* возросло от 11.73° до 13.23°C , тогда как в предыдущие годы 1998-2003 изменения находились в диапазоне $11.76\text{-}12.15^{\circ}\text{C}$. Во втором случае среднегодовое значение *Chl* возросло от 0.39 до 0.46 мг м^{-3} , тогда как в предыдущие годы изменения были в пределах $0.38\text{-}0.42 \text{ мг м}^{-3}$.

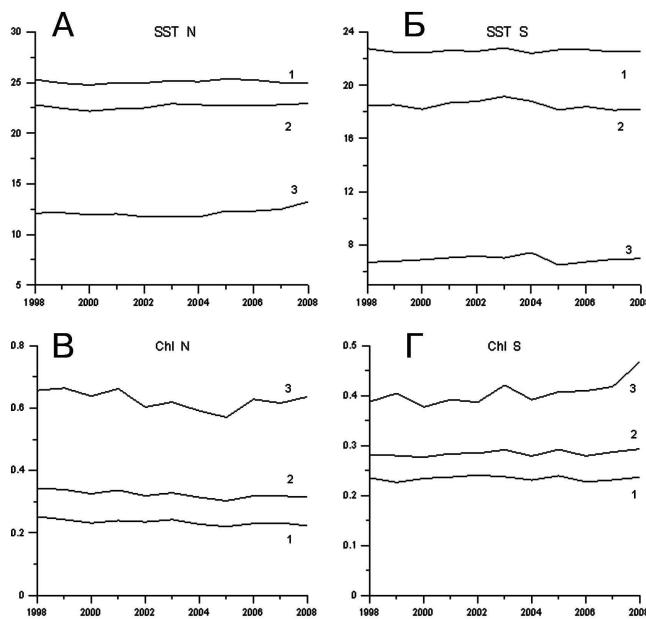


Рис.3. Изменение среднегодовых значений температуры поверхности океана (А-Б) и концентрации хлорофилла (В-Г) с 1998 по 2008 гг. в северном (левые рисунки) и южном (правые) полушариях.

На всех рисунках: 1 – широтный пояс $0-40^{\circ}$, 2 – $0-60^{\circ}$, 3 – $40-60^{\circ}$

Для более детального анализа межгодовых изменений рассмотрим в качестве примера отклонения среднемесячных значений температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в разные годы в широтном поясе $40-60^{\circ}$ с.ш. от соответствующих средних значений за период 1998-2007 гг. (рис.4).

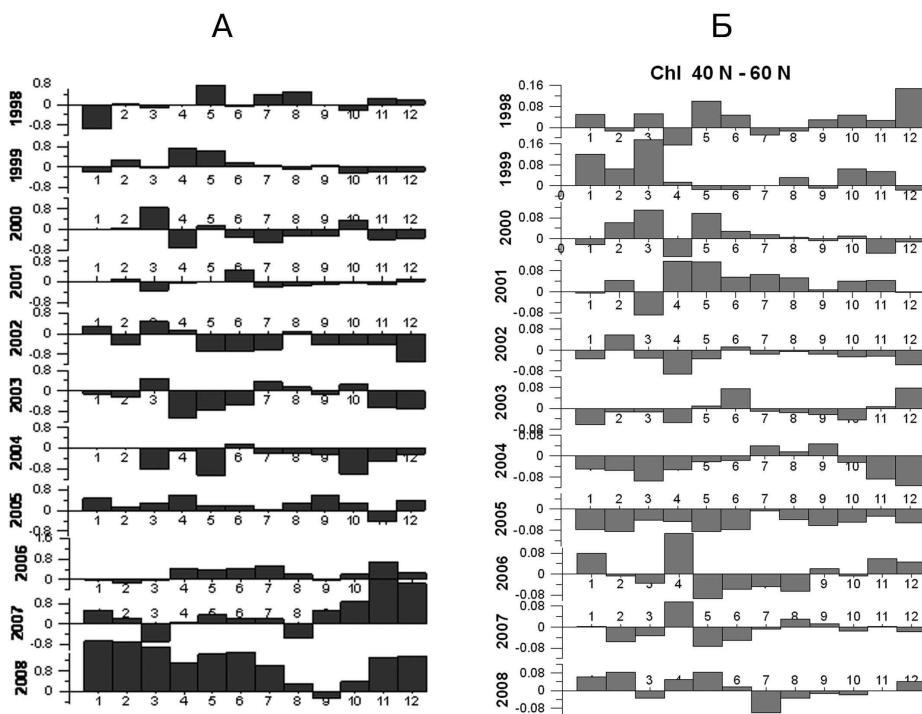


Рис.4. Отклонения среднемесячных значений температуры поверхности океана (А) и концентрации хлорофилла (Б) в разные годы в широтном поясе $40-60^{\circ}$ с.ш. от их средних значений за период 1998-2007 гг.

На рис.4 бросается в глаза ярко выраженная положительная аномалия SST начиная с осени 2007 г. до лета 2008 г. Чтобы понять, как она формируется, сравним среднемесячные распределения SST для февраля 2008 г. и февраля 2002 г., когда наблюдалась отрицательная аномалия, правда, не так ярко выраженная, как положительная в 2008 г. (рис.5).

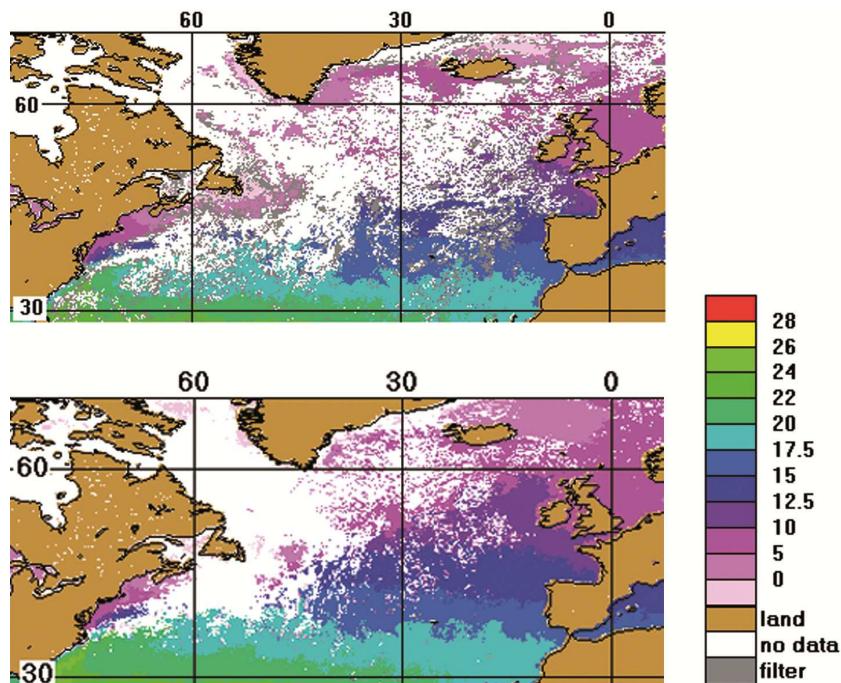


Рис.5. Среднемесячные распределения SST к северу от 30° с.ш. в феврале 2002 г. и феврале 2008 г.

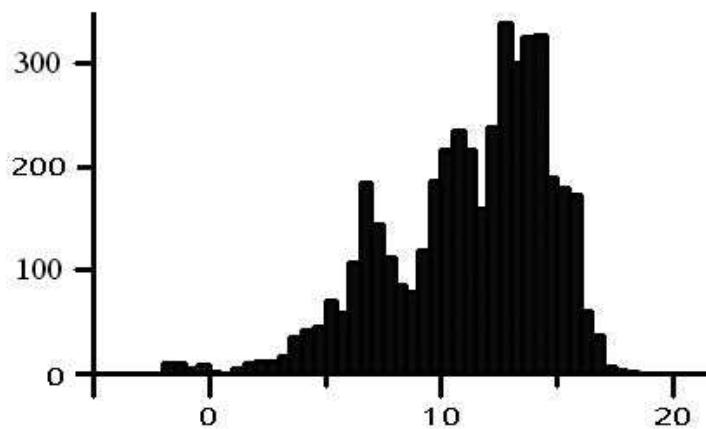
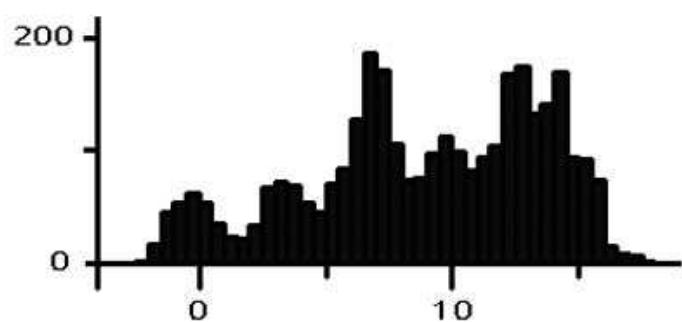


Рис.6. Гистограммы распределений значений SST в широтном поясе $40-60^{\circ}$ с.ш.

Анализируя распределения на рис.5, можно увидеть значительные потери данных в феврале 2002 г. в широтном поясе $40-60^{\circ}$ с.ш., очевидно из-за облачности, (покрытие было меньше 34%). В феврале 2008 г. по-прежнему были значительные потери данных (покрытие около 46%), однако эти потери были связаны в основном с более холодной западной частью этого широтного пояса. Это хорошо проявляется на гистограммах, приведенных на рис.6.

Видно, что представленные гистограммы существенно различаются: в феврале 2008 г. резко сократилось количество «холодных» пикселей с температурой $-2^{\circ} - +5^{\circ}\text{C}$, но зато возросло количество «теплых» с температурой от $+10^{\circ}$ до $+17^{\circ}\text{C}$. Причина произошедших изменений видна на рис.5 – это различие в потерянных данных.

Изменчивость покрытия исследуемых регионов спутниковыми данными оказывает существенное влияние на получаемые оценки средних значений. Эта изменчивость приводит к тому, что расчет средних значений происходит по разным площадям, и при анализе межгодовых изменений фактически сравниваются средние, рассчитанные для разных акваторий.

Заключение

В данной статье представлены результаты расчетов глобальных характеристик температуры поверхности Атлантического океана и концентрации хлорофилла и сделана попытка анализа их изменений. Наиболее интересный и актуальный вопрос, возникающий при таком анализе – существует ли тренд глобальных значений температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла? Ранее попытка совместного анализа глобальных изменений первичной продукции и других факторов, включая температуру, была предпринята в работе [4], в которой сравнивались усредненные значения, рассчитанные по данным сканера цвета CZCS (1979-1986 гг.), и по данным первых лет работы сканера SeaWiFS (1997-2002 гг.). Авторы обнаружили уменьшение глобальной годовой первичной продукции на 6.3%; глобальная температура выросла на 0.2°C , но вряд ли эти оценки можно считать достоверными.

К сожалению, наши одиннадцатилетние ряды наблюдений также слишком коротки, чтобы ответить на вопрос о тренде с достаточной уверенностью. Статистические оценки при анализе слабовыраженных трендов и относительно коротких рядах наблюдений можно получить методом сингулярного спектрального анализа, который активно используется в последние годы (см. [5] с библиографическими ссылками).

Однако первоочередная задача, которую необходимо решить прежде чем приступить к серьезному анализу глобальных изменений, – это коррекция полученных временных рядов, учитывающая искажения из-за потери данных. Очевидно, что для ее решения необходимо привлекать дополнительную информацию, в частности, доступные данные

измерений *in situ*; спутниковые данные микроволновых радиометров (для которых облака «прозрачны» [6]); данные по облачному покрытию, которые имеются в открытом доступе (<http://isccp.giss.nasa.gov/>).

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований Президиума РАН.

Литература

1. Каменкович В.М., Кошлияков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане // Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 264 с.
2. McClain C., Hooker S., Feldman G., Bontempi P. Satellite Data for Ocean Biology, Biogeochemistry, and Climate Research // Eos, Transactions, American Geophysical Union, 2006. V. 87. No.34. P.337-343.
3. Frouin R., Kopelevich, O.V., Burenkov, V.I. et al. Variability of the bio-optical characteristics on the Atlantic transect between 50°N and 55°S in two different seasons from satellite and ship data // Proceedings of II International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”. 8-12 September, 2003. St.Peterburg. 2003. P. 96-101.
4. Gregg W., Conkright M.E., Ginoux P., O'Reilly J.E., Casey N.W. Ocean primary production and climate: Global decadal changes // Geophys. Res. Letts, 2003. V. 30, No. 15. P.3-1 – 3-4.
5. Кацкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Исслед. Земли из космоса, 2009. № 4. С.9-16.
6. Donlon C. J., P. Minnett, C. Gentemann, T. J. Nightingale, I. J. Barton, B. Ward and J.Murray. Towards Improved Validation of Satellite Sea Surface Skin Temperature Measurements for Climate Research // J. Climate, 2002. V. 15. No. 4. P.353-369.

Assessment of inter-annual and seasonal changes in sea surface temperature and chlorophyll concentration in the Atlantic Ocean in 1998-2008 from satellite data

O.V. Kopelevich, S.V. Sheberstov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences
117997 Moscow, 36 Nakhimovsky prospect.
E-mails: oleg@ocean.ru

Global inter-annual and seasonal changes in sea surface temperature (SST) and chlorophyll concentration (*Chl*) in the Atlantic Ocean in 1998-2008 are studied with satellite data from IR-radiometers and ocean color scanners. Their monthly spatial distributions are analyzed for region from 60°S to 60°N; the monthly and annual means have been computed for different latitudinal zones as well as monthly areas occupied by different ranges of SST and Chl. It is demonstrated that the recorded changes of the SST and Chl values, derived from satellite data, can be resulted not only from real changes of SST and Chl but from losses of the data due to cloudiness, ice coverage and other reasons.

Keywords: Atlantic Ocean, satellite data, sea surface temperature, chlorophyll concentration, seasonal and inter-annual changes, cloudiness effect.