

Сезонные и межгодовые изменения биооптических характеристик Черного моря по спутниковым данным

В.И. Буренков, О.В. Копелевич, С.В. Шеберстов, С.В. Вазюля

Учреждение Российской Академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: bur-07@yandex.ru

Данные спутникового сканера MODIS-Aqua используются для исследования сезонных и межгодовых вариаций концентрации хлорофилла CHL и показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} в Черном море. Анализируются основные причины сезонных изменений биооптических параметров: влияние речного стока и цветение фитопланктона; исследуется связь между поверхностной температурой SST в зимний период и значениями биооптических параметров весной и летом. Спутниковые данные позволили выявить существование антикорреляции между SST в феврале и значениями CHL в марте и b_{bp} в июне. Приведены соответствующие карты распределения указанных параметров в Черном море. Обсуждаются возможные причины рассматриваемого явления.

Ключевые слова: спутниковый сканер MODIS, Черное море, концентрация хлорофилла, взвесь, речной сток, цветение фитопланктона, кокколитофориды, поверхностная температура.

Введение

На протяжении последних десяти лет Лаборатория оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН проводит систематические спутниковые (с использованием данных сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua) и судовые наблюдения за экологическим состоянием северо-восточной части Черного моря. Данные наблюдений указывают на существенные сезонные и межгодовые изменения биооптических параметров, определяемых по спутниковым данным (концентрация хлорофилла, показатель рассеяния назад взвесью). В статье рассматриваются полученные результаты и анализируются причины наблюдаемых вариаций.

Сезонные изменения концентрации хлорофилла и показателя рассеяния назад взвесью в Черном море по спутниковым данным

Для анализа использовались данные спутникового сканера MODIS-Aqua. Основное преимущество этого сканера по сравнению со сканером SeaWiFS состоит в том, что его данные доступны в течение примерно суток после выполнения наблюдений (для сканера SeaWiFS данные доступны после двух недель). Это обстоятельство очень важно при выполнении судовых наблюдений, поскольку позволяет по предварительно полученной спутниковой информации проводить целенаправленные эксперименты, выбирая наиболее интересные объекты исследований (Burenkov et al., 2004).

Для верификации алгоритмов обработки спутниковых данных использовались данные судовых измерений коэффициента яркости моря с помощью плавающего измерителя (Артемьев и др., 2000) и прямых определений концентрации хлорофилла и взвешенного вещества.

Основные анализируемые по спутниковым данным параметры – концентрация хлорофилла-а (CHL), величина показателя рассеяния назад взвесью b_{bp} на длине волны 555 нм и значения поверхностной температуры SST. Две первые величины определялись по алгоритмам, разработанным в Лаборатории оптики океана ИО РАН (Буренков и др., 2001; Kopelevich et al., 2009, <http://optics.ocean.ru>). Для определения концентрации хлорофилла использовалось соотношение, полученное по результатам одновременных судовых измерений коэффициента яркости моря и концентрации хлорофилла:

$$CHL = 0.83 [L_{WN}(531)/L_{WN}(551)]^{-4.36},$$

где L_{WN} – значения нормализованной яркости восходящего излучения для соответствующих спектральных каналов сканера цвета MODIS-Aqua, а концентрация хлорофилла измеряется в $\text{мг}/\text{м}^3$.

Для определения показателя рассеяния назад взвесью b_{bp} использовался алгоритм, аналогичный предложенному в работе (Буренков и др., 2001) для сканера SeaWiFS – последний был модифицирован применительно к спектральным каналам сканера MODIS-Aqua.

Основное внимание уделялось сезонным изменениям указанных биооптических параметров. Расчеты выполнялись для различных регионов Черного моря, выделенных в соответствии с работой (Kopelevich et al, 2004) (см. рис. 1); наиболее крупные из них – открытые районы западной и восточной частей моря (регионы 6 и 7). Рассматривались также прибрежные регионы, в частности, регион 8 (шельфовая зона восточного и южного побережий), где, как и в регионе 7, регулярно (2004-2009 гг.) выполнялись судовые наблюдения (Burenkov et al., 2007).

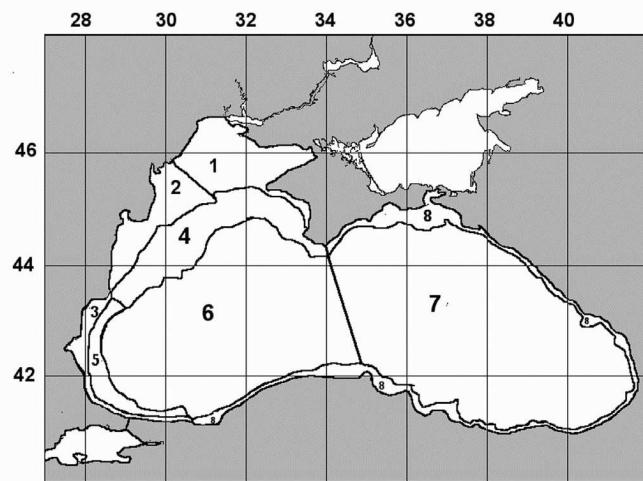


Рис. 1. Регионы Черного моря

На рис. 2 показаны сезонные изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла для различных районов Черного моря, рассчитанные по спутниковым данным за 2003-2009 гг. В открытых районах восточной и западной частей моря (регионы 7 и 6, рис. 2 А, Б), а также в шельфовой зоне восточного и южного побережий (регион 8, рис. 2 В) достаточно хорошо выделяются три периода заметного возрастания концентрации хлорофилла. Первый приходится преимущественно на март и связан с весенным цветением фитопланктона, хорошо известным по данным прямых определений концентрации хлорофилла. Второй, несколько меньшей амплитуды, наблюдается в осенний период (октябрь-ноябрь). Третий,

наиболее слабый, приходится на июнь и связан с цветением кокколитофорид, также хорошо известным по непосредственным определениям концентраций этого вида фитопланктона (Burenkov et al., 2004; Cokacar et al., 2001, 2004). Отметим, что в регионе 8 значения CHL заметно выше, чем в регионах 6 и 7. По-видимому, это связано с влиянием речного стока.

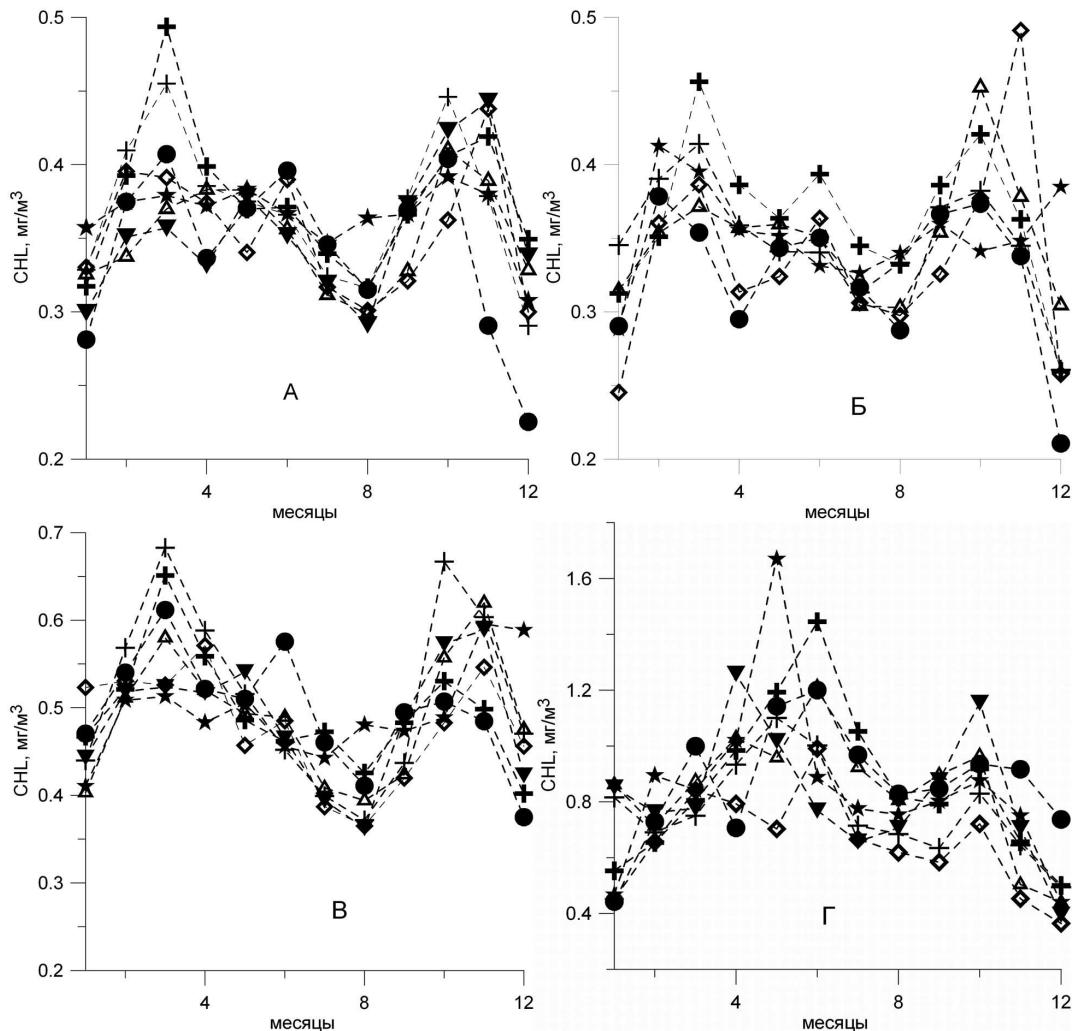


Рис. 2. Сезонные изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла в различных регионах (А – 7, Б – 6, В – 8, Г – 2) Черного моря в различные годы. 2003 г. – ромбы, 2004 г. – кружки, 2005 г. – треугольники, 2006 г. – «жирные» кресты, 2007 г. – перевернутые треугольники, 2008 г. – «тонкие» кресты, 2009 г. – звездочки. Данные сканера MODIS-Aqua

Существенно иной характер носят сезонные изменения CHL в регионе 2 (шельфовая зона западного побережья) (рис. 2 Г). Здесь весеннее и осенне цветение фитопланктона выражено слабо, а максимальные концентрации хлорофилла наблюдаются в апреле-июне. Это связано с тем, что воды этого региона подвержены существенному влиянию стока р. Дунай, максимальные значения которого приходятся примерно на этот период. Отметим, что значения концентрации хлорофилла в апреле-июне в этом регионе в несколько раз выше, чем в других регионах.

Обратим внимание на то, что при наличии указанных выше закономерностей, имеют место существенные межгодовые вариации величин концентрации хлорофилла. Четко выраженный максимум CHL в марте для региона 7 (рис. 2 А) наблюдается лишь в отдельные годы (2006, 2008 гг.), в 2009 г. он практически отсутствует. В равной мере это касается и максимума CHL в июне. В осенний период максимум CHL наблюдается регулярно, хотя

имеют место заметные смещения периода цветения. Сходная в целом картина наблюдается и в регионах 6, 8 (рис. 2 Б, В).

Совершенно иная сезонная изменчивость регистрируется по спутниковым данным для показателя рассеяния назад взвесью b_{bp} (рис. 3 А-Г). В регионах 6 – 8 ярко выраженный максимум b_{bp} приходится на июнь, а в период весеннего и осеннего цветения фитопланктона он практически отсутствует. Объяснить это можно тем, что цветение в эти периоды вызвано развитием главным образом диатомовых водорослей с характерными размерами порядка 20 мкм (частицы такого размера относительно слабо влияют на рассеяние взвесью назад). В июне происходит цветение кокколитофорид, размеры которых в несколько раз меньше. Но главное обстоятельство резкого повышения b_{bp} в июне состоит в отделении от кокколитофорид мелких карбонатных чешуек (кокколитов), составляющих оболочку клеток. Отметим также, что примерно на этот период приходится повышение речного стока, что дополнительно вызывает увеличение b_{bp} . Этим, в частности, объясняются повышенные значения показателя рассеяния назад взвесью в регионе 8 по сравнению с регионами 6 и 7 (не говоря уже о регионе 2, где речной сток гораздо больше, чем в регионе 8). Следует также отметить, как и для концентрации хлорофилла, заметные межгодовые вариации значений b_{bp} во всех регионах.

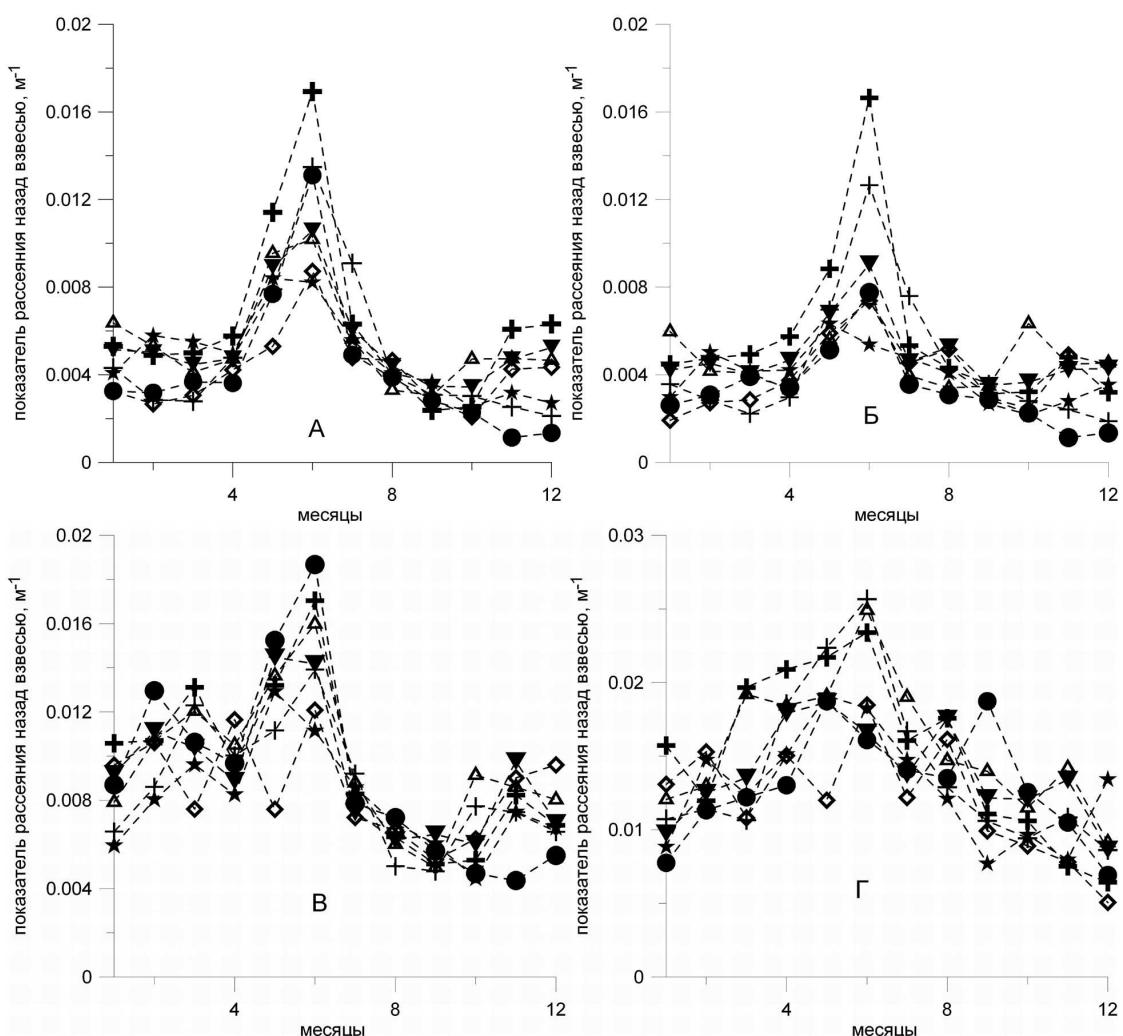


Рис. 3. Сезонные изменения среднемесячных значений показателя рассеяния назад взвесью в различных регионах (А – 7, Б – 6, В – 8, Г – 2) Черного моря в различные годы. 2003 г. – ромбы, 2004 г. – кружки, 2005 г. – треугольники, 2006 г. – «жирные» кресты, 2007 г. – перевернутые треугольники, 2008 г. – «тонкие» кресты, 2009 г. – звездочки. Данные сканера MODIS-Aqua

Межгодовые вариации концентрации хлорофилла и показателя рассеяния назад взвесью в Черном море по спутниковым данным и их связь с поверхностной температурой

Причины рассмотренных выше межгодовых вариаций концентрации хлорофилла и показателя рассеяния назад взвесью весьма разнообразны. К ним надо отнести гидрометеоусловия, изменчивость течений, вариации речного стока. К сожалению, в последние годы данные по речному стоку практически отсутствуют. Также почти нет данных по прямым наблюдениям течений, а использование спутниковых данных может дать лишь качественную картину.

Влияние речного стока достаточно очевидно из приведенных выше данных, согласно которым в прибрежной зоне Черного моря концентрация хлорофилла и величина показателя рассеяния назад взвесью заметно выше, чем в открытых районах. Помимо этого, в экспедиции 2004 г. в июне была обнаружена существенная зависимость показателя рассеяния назад взвесью от поверхностной солености (Burenkov et al., 2004).

Для анализа межгодовых изменений концентрации хлорофилла и показателя рассеяния назад взвесью использовались спутниковые данные по поверхностной температуре (SST). В Черном море сезонная изменчивость SST очень велика: перепады температуры достигают 15 и более градусов. Охлаждение поверхностных вод начинается в сентябре, а минимальные значения SST наблюдаются в феврале (иногда в марте). Охлаждение поверхностных вод приводит к интенсивной вертикальной конвекции, способствующей поступлению биогенных элементов в поверхностные слои. Сочетание этого фактора с увеличением уровня солнечной радиации обуславливает весеннее цветение фитопланктона.

Интенсивность вертикального перемешивания зависит от степени охлаждения поверхностных вод. Исходя из этих качественных соображений, должна наблюдаться антикорреляция между минимальными значениями SST в зимний период и концентрацией хлорофилла в период цветения. Результаты нашего анализа спутниковых данных дают основание полагать, что процесс вертикального перемешивания вследствие зимней конвекции – основной фактор, определяющий интенсивность цветения фитопланктона в весенний период.

На рис. 4 показана связь между величиной поверхностной температуры в феврале (как указывалось выше, в этом месяце в большинстве случаев наблюдаются минимальные за весь год величины SST) и концентрацией хлорофилла в марте в регионе 7 и для всей акватории Черного моря. На рис. 4 А (регион 7) видна четко выраженная антикорреляция указанных параметров: наиболее холодным зимам соответствует наибольшие концентрации хлорофилла. В той или иной степени эта зависимость наблюдается и других регионах моря (6 и 8) и для всего моря в целом (рис. 4 Б). Это указывает на то, что указанная закономерность свойственна всему району Черного моря, за исключением прибрежных районов, подверженных сильному влиянию речного стока (регион 2).

Квадрат коэффициента корреляции между вариациями концентрации хлорофилла в марте и поверхностной температуры в феврале для региона 7 (открытые районы восточной части моря) за все годы спутниковых наблюдений (2003-2009 гг.) весьма высок ($r^2=0.77$). В принципе, это позволяет прогнозировать интенсивность цветения фитопланктона в данном регионе по спутниковым данным о поверхностной температуре в зимний период. Несколько меньшие значения r^2 имеют место для региона 6 и всего моря в целом. Для региона 2 корреляция между указанными параметрами практически отсутствует.

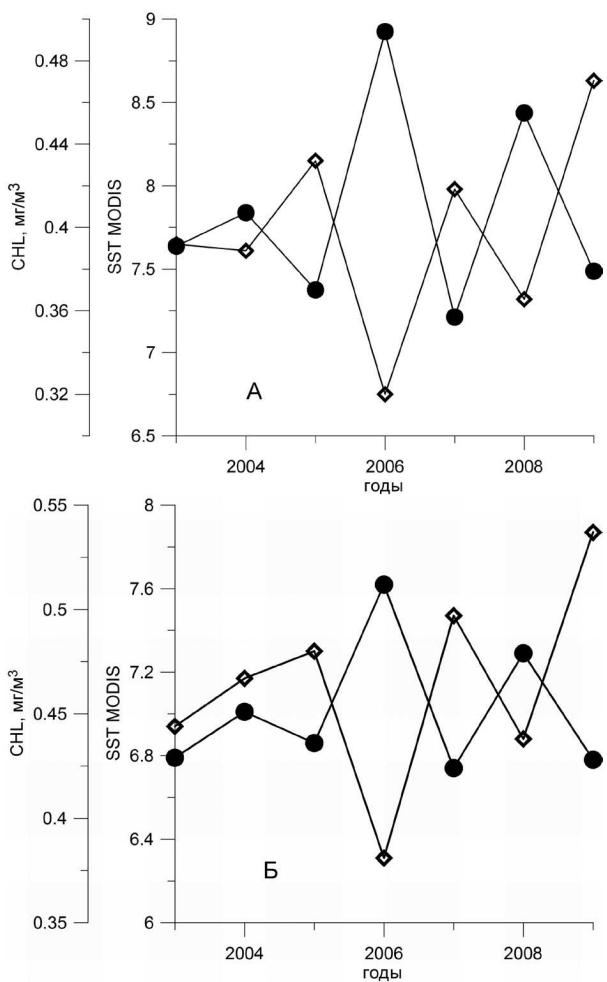


Рис. 4. Межгодовые вариации среднемесячных значений концентрации хлорофилла в марте (кружки) и поверхностной температуры в феврале (ромбы) для региона 7 (А) и всего Черного моря (Б).
Данные сканера MODIS-Aqua

На рис. 5 показаны карты среднемесячных пространственных распределений концентрации хлорофилла в Черном море в марте по данным сканера MODIS-Aqua для наиболее «холодных» и «теплых» зим (2006 и 2009 гг.). Хорошо видны значительные различия в концентрации хлорофилла практически на всей акватории Черного моря, что дополнительно подтверждает существенное влияние температурного режима на биопродуктивность поверхностных вод. Соответствующие отличия наблюдаются и для пространственных распределений поверхностной температуры.

Также обнаруживается связь между величиной поверхностной температуры в зимний период и величиной показателя обратного рассеяния взвесью b_{bp} в июне в различных регионах Черного моря. Наиболее вероятная причина состоит в регенерации биогенных элементов из фитопланктона, продуцированного в период его весеннего цветения. На рис. 6 показаны пространственные распределения b_{bp} в середине июня в наиболее «холодные» (2006 г.) и «теплые» (2009 г.) зимы. Как видно, в 2006 г. наблюдаются существенно более высокие величины b_{bp} в открытых районах моря по сравнению с 2009 г. На рис. 7 А, Б показана связь между величиной поверхностной температуры в феврале и величиной b_{bp} в июне в регионе 7 и для всей акватории Черного моря. Для региона 7 наблюдается отчетливая антикорреляция указанных параметров. В несколько меньшей степени эта зависимость имеет место для всего региона в целом. Это объясняется в первую очередь тем, что для северо-западной части моря, вследствие влияния речного стока, соответствующая зависимость существенно слабее или совсем отсутствует.

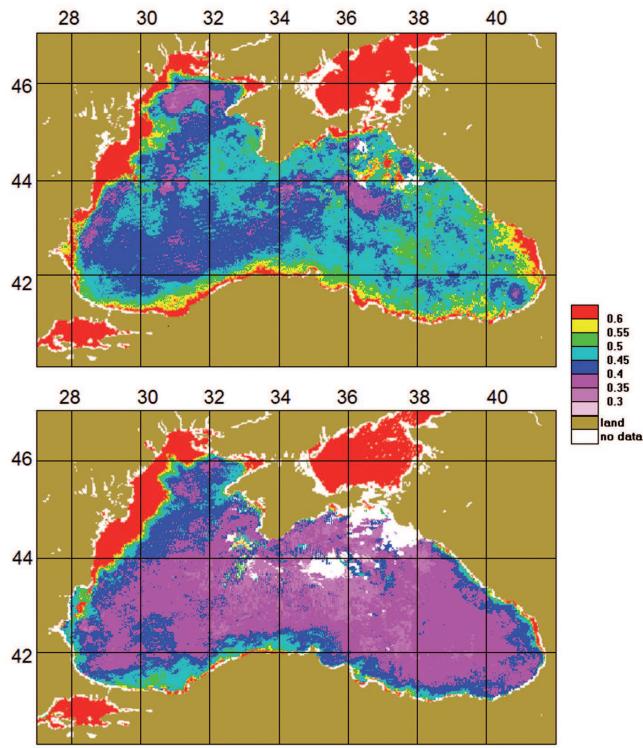


Рис. 5. Пространственные распределения концентрации хлорофилла в Черном море в марте по данным сканера MODIS-Aqua. Вверху – 2006 г. (аномально холодная зима, среднемесячная температура поверхности моря в феврале в восточной части моря (регион 7) – 6.75°). Внизу – 2009 г. (аномально теплая зима, среднемесячная температура в феврале в восточной части моря – 8.58°)

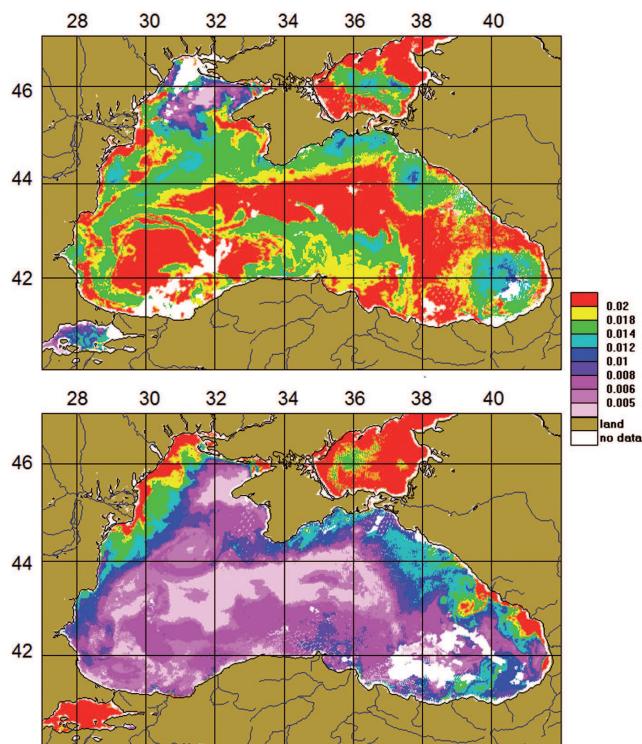


Рис. 6. Пространственные распределения показателя рассеяния назад взвесью в Черном море в июне по данным сканера MODIS-Aqua. Вверху – 2006 г. (аномально холодная зима, среднемесячная температура поверхности моря в феврале в восточной части моря (регион 7) – 6.75°). Внизу – 2009 г. (аномально теплая зима, среднемесячная температура в феврале в восточной части моря – 8.58°)

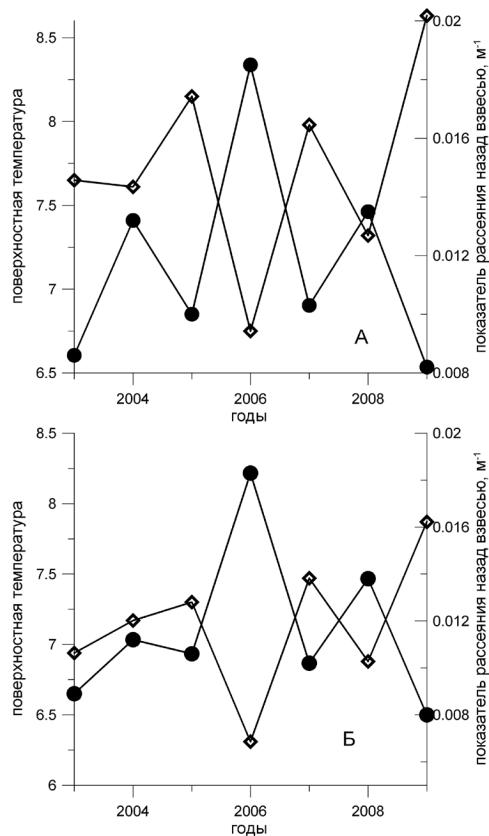


Рис. 7. Межгодовые вариации среднемесячных значений показателя рассеяния назад взвесью в июне (кружки) и поверхности температуры в феврале (ромбы) для региона 7 (А) и всего Черного моря (Б).
Данные сканера MODIS-Aqua

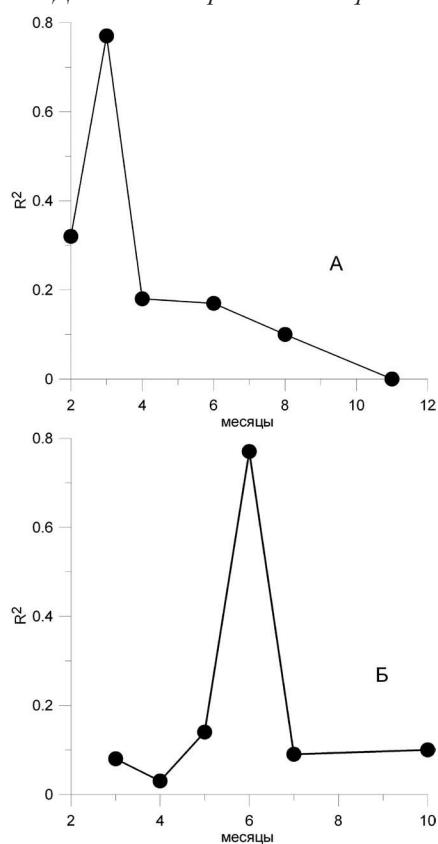


Рис. 8. Сезонные изменения квадрата коэффициента корреляции между годовыми вариациями SST в феврале и CHL (А), b_{bp} (Б) в разные месяцы для региона 7. Данные сканера MODIS-Aqua

На рис. 8 А, Б показаны сезонные изменения квадрата коэффициента корреляции r^2 для региона 7 между SST в феврале и значениями CHL (А) и b_{bp} (Б) в разные месяцы. Для CHL виден отчетливый максимум r^2 , приходящийся на март, свидетельствующий о том, что именно для периода весеннего цветения фитопланктона связь межгодовых вариаций SST и CHL наиболее тесная. Для b_{bp} аналогичный максимум приходится на июнь.

Выводы

Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования биооптических характеристик поверхностных вод Черного моря позволило получить новые важные данные о сезонных и межгодовых изменениях этих характеристик. В частности, показано различие сезонного хода изменений концентрации хлорофилла и показателя рассеяния назад взвешенными частицами, характеризующего содержание взвеси. Удалось выявить существенную зависимость интенсивности весеннего цветения фитопланктона и июньского «помутнения» поверхностных вод в различных регионах Черного моря от поверхностной температуры в зимний период. Объяснение наблюдаемым явлениям – изменение интенсивности зимней конвекции, способствующей поступлению биогенных элементов в верхний слой моря, в «холодные» и «теплые» зимы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 10-05-00936 и Программы фундаментальных исследований №20 Президиума РАН.

Литература

1. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И. и др. (2000) Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // Океанология, 2000. Т. 40. № 1. С. 148-155.
2. Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др. (2001) Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // Океанология, 2001. Т. 41. № 5. С. 653-659.
3. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Pautova L.A. et al. (2005) Possible causes of the increased content of suspended particles in the northeastern part of the Black Sea in June // Oceanology, 2005. Vol. 45. Suppl. 1. pp. 39-50.
4. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V. et al. (2007) The June maxima of the particle backscatter in the Black Sea: results of three years satellite and field studies // Proceedings of IV International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW’2007)”, 2007. Nizhny Novgorod. pp. 157-160.
5. Cokacar T., Kubilay N., Oguz T. (2001) Structure of *E. huxleyi* blooms in the Black Sea surface waters as detected by SeaWiFS imagery // Geophys. Res. Lett, 2001. Vol. 28, pp. 4607-4610.
6. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. (2004) Interannual variability of the early summer coccolithophore blooms in the Black Sea: impacts of anthropogenic and climatic factors // Deep Sea Research, 2004. Vol. 51, Part 1: Oceanographic Research Papers, pp. 1017-1031.
7. Kopelevich O.V. Burenkov V.I., Ershova S.V. et al. (2004) Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep-Sea Research II, 2004. Vol. 51, pp. 1063-1091.
8. Kopelevich O.V. Burenkov V.I., Sheberstov S.V. et al. (2009) Bio-optical et al. characteristics of the Barents, White, Black, and Caspian Seas from data of satellite ocean color scanners // 2009. Moscow, Russia.

Seasonal and interannual variations of the biooptical characteristics of the Black Sea from satellite data

V.I. Burenkov, O.V. Kopelevich, S.V. Sheberstov, S.V. Vazulya

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology
117997, Nakhimovskii pr. 36, Moscow, Russia
E-mail: bur-07@yandex.ru*

The MODIS-Aqua satellite data are used for study of seasonal and inter-annual variability of chlorophyll concentration and of the particle backscattering coefficient in the Black Sea. The main causes of seasonal variability of biooptical characteristics are analyzed, and connection between Sea Surface temperature (SST) in winter and the values of biooptical characteristics in spring and summer is studied. Satellite data have revealed the anticorrelation between the SST mean in February and the chlorophyll concentration in March as well as the particle backscattering coefficient in June. The appropriate satellite maps are presented. Possible causes of this phenomenon are considered.

Keywords: satellite scanner MODIS, Black Sea, chlorophyll, suspended matter, river runoff, coccolithophore bloom, sea surface temperature.