

Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море

Н.В. Евтушенко, С.В. Шеберстов

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: nevtushenko@ocean.ru

Для исследования циклов развития и затухания цветений в Балтийском море использовались данные спутникового сканера MODIS-Aqua с 2003 г. по 2014 г., по которым был выполнен расчет концентрации хлорофилла для трех регионов: центрального, юго-восточного и Финского залива. Расчет проводился по региональным алгоритмам, верифицированным по данным натурных измерений. Для выявления циклов пространственно-временного распределения хлорофилла, наиболее характерных для каждого из регионов, произведено усреднение данных по концентрации хлорофилла за 12 лет. Для центрального и юго-восточного регионов характерны 3 периода цветения: весна, лето и осень, для Финского залива осеннее цветение не типично. Сравнение средних сезонных распределений хлорофилла для каждого региона за период 2003–2014 гг. с данными по годам отдельно позволило выявить максимальные и минимальные сезонные значения концентрации хлорофилла в период активного цветения. Были рассмотрены факторы, влияющие на выявленную цикличность цветений фитопланктона, такие как температура воды, скорость ветра, концентрация азота и фосфора, установлены вероятные причины формирования пространственно-временного распределения хлорофилла в трех регионах Балтийского моря

Ключевые слова: Балтийское море, спутниковые данные, сезонные межгодовые изменения, концентрация хлорофилла

Одобрена к печати: 07.05.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-114-124

Введение

Цель работы – выявление и описание циклов цветения фитопланктона в Балтийском море по данным сканера цвета MODIS-Aqua в трех регионах Балтийского моря: юго-восточном, центральном и Финском заливе, анализ пространственно-временной изменчивости поверхностного слоя вод Балтийского моря.

Деление Балтийского моря на исследуемые регионы представлено на *рис. 1*.

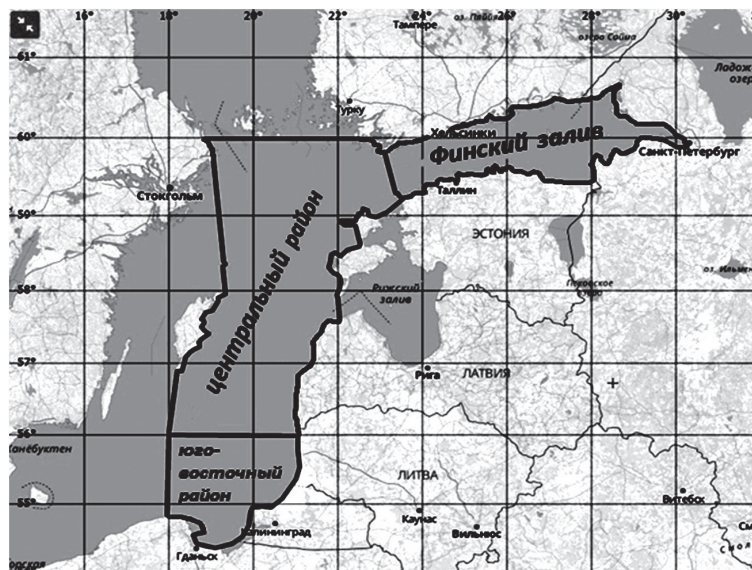


Рис. 1. Карта Балтийского моря с границами районов, выбранных для исследования

Как правило, интенсивное цветение фитопланктона в Балтийском море наблюдается весной, летом и осенью (Wasmund et al., 1998).

Весеннее цветение в Балтийском море развивается в марте – апреле и состоит из диатомовых водорослей и динофлагеллят (Thamm et al., 2004; Kahru, Elmgre, 2014).

Летом развивается цветение сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon sp.* и других) (Hobro, 1979; Kahru et al., 2007).

Осенью выравнивание температуры водных масс по вертикали и перемешивание вод приводят к развитию третьего годового максимума цветения фитопланктона. В этот период доминируют диатомовые водоросли, например, *Coscinodiscus granii* (Thamm et al., 2004).

Материалы и методы исследования

При расчете биооптических параметров поверхностного слоя использовались величины коэффициента яркости моря R_{rs} , измеренные спутниковым сканером MODIS-Aqua и предоставленные в свободном доступе на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.

В водах Балтийского моря стандартный алгоритм NASA расчета концентрации хлорофилла по данным сканера цвета MODIS дает значительно завышенные значения (Woźniak et al, 2008; Darecki et al., 2008; Darecki, Stramski, 2004), поэтому расчет концентрации хлорофилла производился по региональным алгоритмам для Финского залива: $chl_{fin} = 0.52 \times (Rrs_531/Rrs_547)^{-13.76}$ (Vazyulya et. al., 2014), и юго-восточной части Балтийского моря: $chl_pol_MODIS = 10^{(1.102 - 0.870 \times X - 0.3449 \times X \times X)}$, $X = [Rrs_490 - Rrs_665] / [Rrs_550 - Rrs_665]$ (Буканова и др., 2011).

Данные натурных измерений показали высокую эффективность региональных алгоритмов расчета для юго-восточной части Балтийского моря (Буканова и др., 2011) и в Финском заливе (Vazyulya et al., 2014). Для центральной части верификация не проводилась, но из-за сильных завышений стандартных алгоритмов, а также условной границы анализируемых регионов было принято проводить расчеты по алгоритму, разработанному для юго-восточной части Балтики (Буканова и др., 2011).

Для выявления циклов цветения использовались однодневные данные уровня обработки L3 с пространственным разрешением 9x9 км, взятые с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. С помощью программного обеспечения (Sheberstov, Lukyanova, 2007) для каждого региона (рис. 1) рассчитывались однодневные средние значения концентрации хлорофилла. Временная зависимость этих значений представляла собой сильно осциллирующую функцию с характерным периодом осцилляций «один день». Возможной причиной этих осцилляций могла оказаться изменчивость облачного покрытия пространственно-неоднородного по распределению концентрации хлорофилла региона. Действительно, облачность представляет серьезное препятствие для дистанционного зондирования Балтики: доля акватории региона, недоступная для ДЗЗ в оптическом диапазоне, составляет в июне 56% для центрального и юго-восточного регионов, и 74% – для Финского залива. Однако такие осцилляции наблюдаются и при полном отсутствии облачности в данном

регионе и могут быть объяснены или быстрой изменчивостью оптических свойств воды в Балтике, или зависимостью качества атмосферной коррекции от зенитных углов спутника и Солнца.

Для сглаживания краткосрочных колебаний и заполнения пробелов использовался метод экспоненциально взвешенного скользящего среднего (весовая функция $\exp(-t/t_0)$), после чего для каждого дня вычислялось многолетнее среднее за период 2003–2014 гг. Для параметра сглаживания t_0 выбрано значение «3 дня» – минимальное значение, при котором полученные кривые не содержали короткопериодных осцилляций.

Для установления взаимосвязи между периодами активного цветения хлорофилла и температурными изменениями использовались данные о температуре поверхности моря SST сканера MODIS-Aqua. Также были рассмотрены другие факторы, которые могли повлиять на пространственно-временное распределение хлорофилла в Балтийском море, а именно скорость ветра и концентрации азота и фосфора в море (Niemi, 1979).

Циклы цветения фитопланктона в Балтийском море

Анализ данных общей картины пространственно-временного распределения хлорофилла по данным MODIS-Aqua для каждого региона за период 2003–2014 гг. показал, что для всех трех регионов характерна сезонная изменчивость концентрации хлорофилла. Выделяется три основных периода цветения: весенний (с середины апреля по начало мая), летний (конец июня – июль) и осенний (конец августа – сентябрь). Осенний пик цветения чаще всего наблюдается в центральном регионе и юго-восточной Балтике, реже – в Финском заливе.

Сравнение средних значений сезонного распределения хлорофилла по каждому региону за период 2003–2014 гг. с данными за каждый год отдельно также позволило выявить периоды нетипичного распределения активности цветения в Балтийском море.

Центральный регион

Для центрального региона наиболее характерно следующее сезонное распределение максимальных значений концентрации хлорофилла: весенний максимум наблюдается в самом начале апреля и в 20-х числах месяца; летний приходится на первую декаду июля; для осеннего цветения наибольшие значения концентрации хлорофилла характерны для последней декады сентября и середины октября (*рис. 2a*).

При анализе данных о значениях концентрации хлорофилла за 12 лет выявлено, что максимальные значения концентрации хлорофилла весной отмечались в 2010 году (*рис. 2c*), летом – в 2005 и 2014 годах (*рис. 2b*) и осенью – в 2013 году (*рис. 2d*), а наименьшие годовые показатели концентрации хлорофилла в центральной части Балтийского моря наблюдались в 2004 году (*рис. 2e*).

Нетипичное распределение максимумов значений концентрации хлорофилла в центральном регионе было отмечено в 2008 году (рис. 2*ф*). В этот год высокие показатели наблюдались до середины последней декады июля, незначительно спадая в последние декады мая и июня, что может быть связано с облачностью над регионом. Максимум приходится на конец апреля – начало мая.

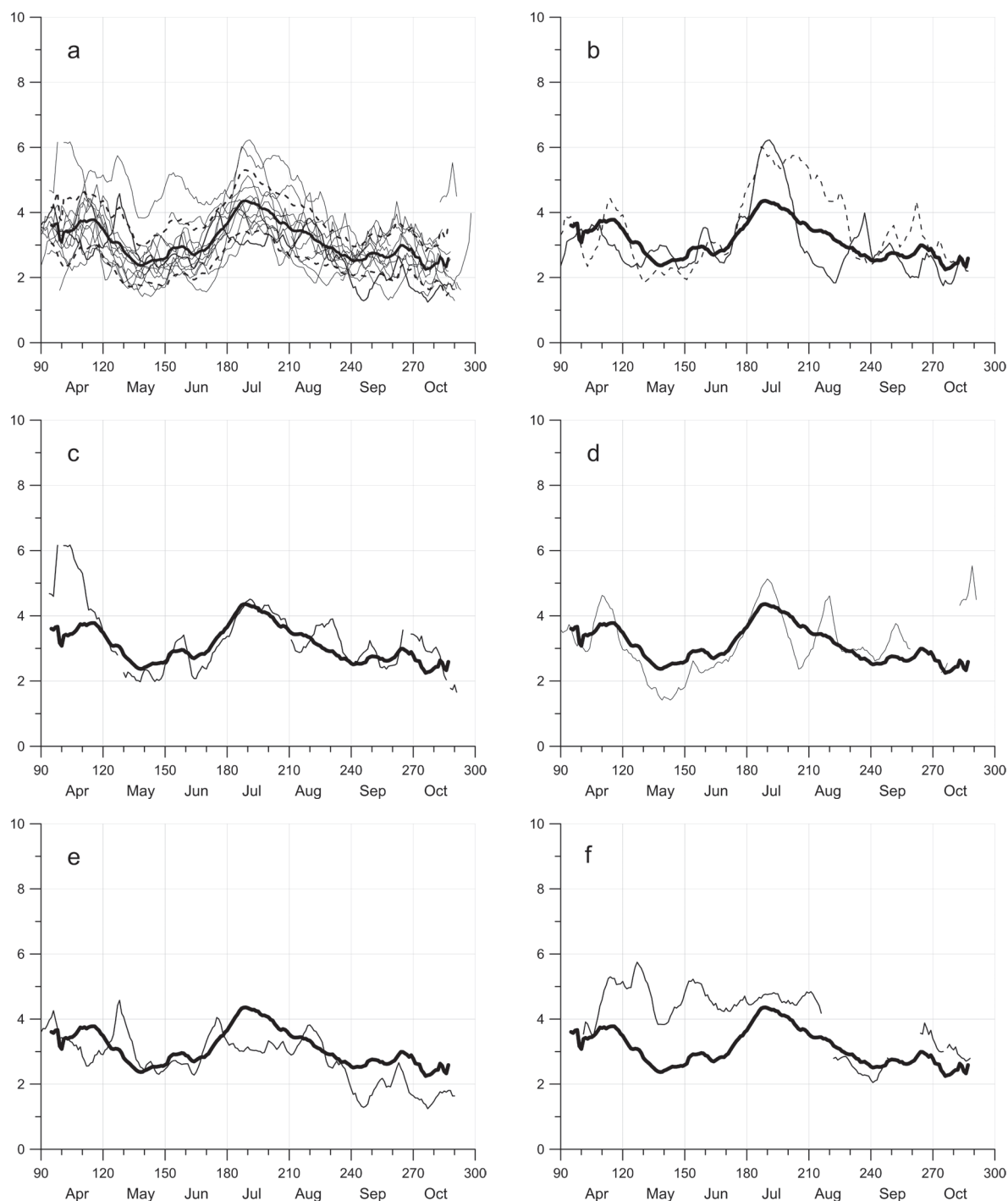


Рис. 2. Графики изменения средних однодневных значений концентрации хлорофилла в центральном регионе Балтийского моря. Жирной линией показано среднее значение за 12 лет, тонкими линиями показаны графики для каждого года: а – с 2003 г. по 2014 г. (среднеквадратическое отклонение обозначено пунктирными линиями); б – 2005 и 2014 года (пунктирная линия); в – 2010 год; д – 2013 год; е – 2004 год; ф – 2008 год

Юго-восточный регион

Сезонный ход концентрации хлорофилла в юго-восточной части моря сходен с таковым в центральном регионе. Весенний максимум приходится на первую и последнюю декаду апреля, летний наблюдается в начале июля и продолжается до начала августа, осенний максимум выделяется во второй и третьей декаде сентября и в конце октября (рис. 3а). Максимальные значения концентрации хлорофилла для весеннего и летнего цветений отмечены в 2005 году (рис. 3б), а для осеннего – в 2006 и 2008 годах (рис. 3с).

Как и в центральном регионе, в юго-восточной части Балтики в 2008 году отмечена нетипичная картина распределения концентрации хлорофилла. Высокие показатели наблюдались с начала апреля до середины последней декады июня и с конца июня по август. Невысокие показатели концентрации хлорофилла в середине июня могли быть связаны с облачностью над регионом. В 2004 году весенний максимум пришелся на середину мая, а летний оказался сдвинут на первую декаду августа, что также нетипично для данного региона (рис. 3д).

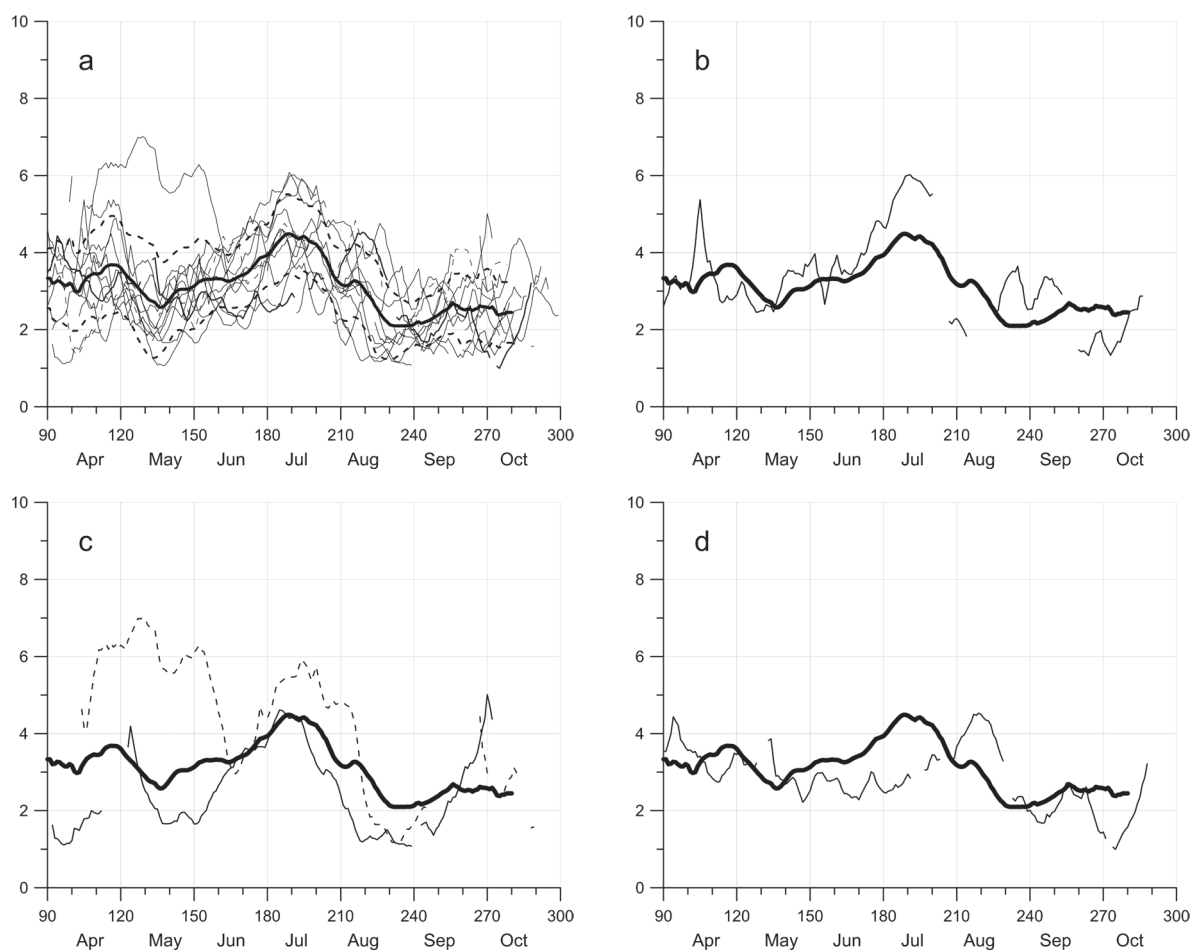


Рис. 3. Графики изменения средних однодневных значений концентрации хлорофилла в юго-восточном регионе Балтийского моря. Жирной линией показано среднее значение за 12 лет, тонкими линиями показаны графики для каждого года: а – с 2003 г. по 2014 г. (среднеквадратическое отклонение обозначено пунктирными линиями); б – 2005 год; с – 2006 и 2008 года (пунктирная линия); д – 2004 год

Анализ общей картины пространственно-временного распределения концентрации хлорофилла в Финском заливе за 12 лет показал, что для данного региона наиболее характерны два максимума: весной в конце апреля – начале мая и летом в первой декаде июля (рис. 4а). Осенью показатели концентрации хлорофилла в Финском заливе невысокие, отмечается лишь небольшое повышение к середине октября.

В данном регионе максимальные показатели концентрации хлорофилла весной были зафиксированы в 2012 году (рис. 4б), летом – в 2007 году (рис. 4с) и осенью – в 2013 году (рис. 4д).

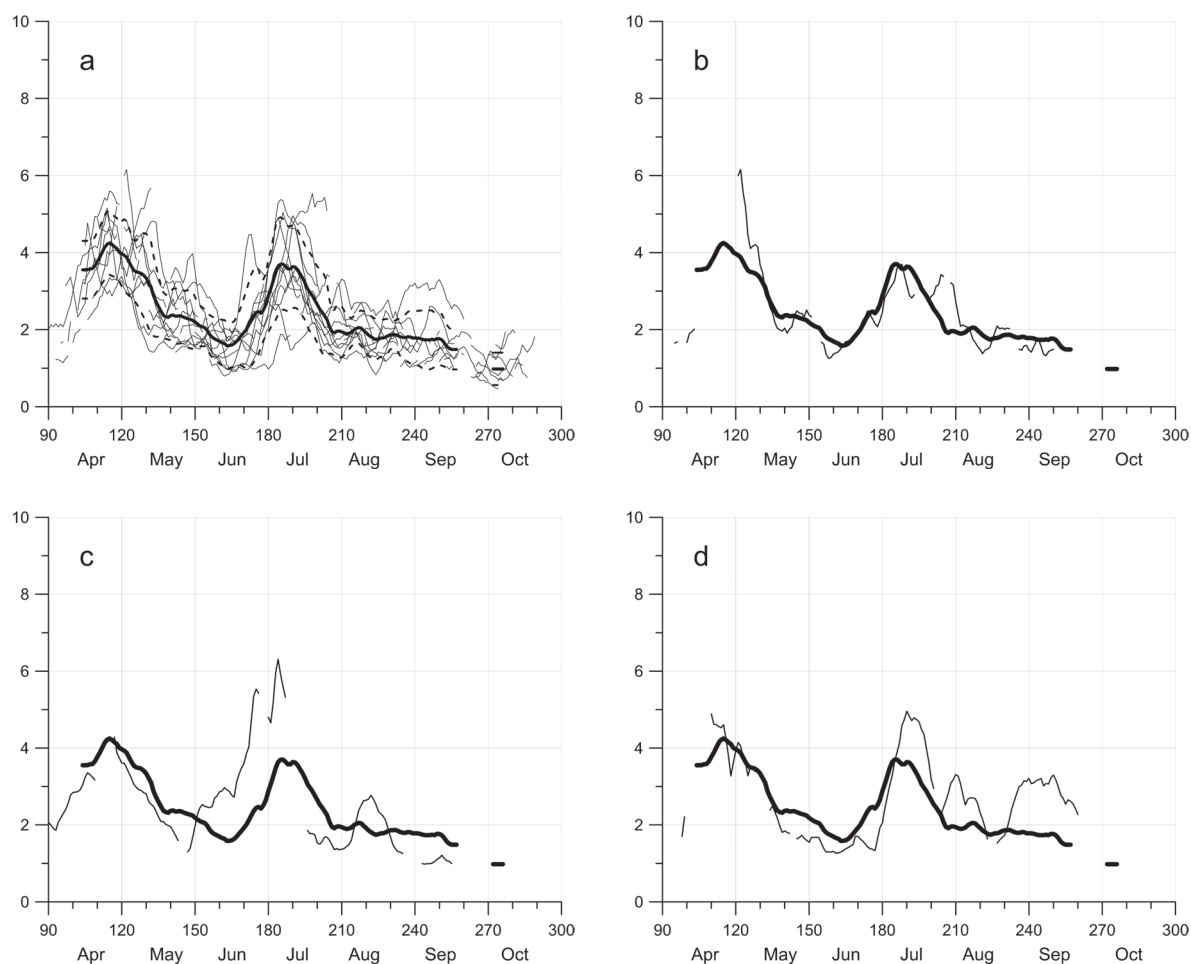


Рис. 4. Графики изменения средних однодневных значений концентрации хлорофилла в Финском заливе. Жирной линией показано среднее значение за 12 лет, тонкими линиями показаны графики для каждого года: а – с 2003 г. по 2014 г. (среднеквадратическое отклонение обозначено пунктирными линиями); б – 2012 год; с – 2007 год; д – 2013 год

На рис. 5 представлена карта распределения концентрации хлорофилла по данным MODIS-Aqua от 5 июля 2005 года. Она позволяет оценить пространственную структуру цветения сине-зеленых водорослей. На карте видны вихревые и грибовидные структуры, выделяются районы с максимальными значениями концентрации хлорофилла.

Более подробно такие структуры отображаются на данных LANDSAT-5 от 5 июля 2005 года. Изображение позволяет детально оценить размер мезомасштабных вихрей и различать вихревые структуры, которые из-за небольших размеров не отображаются на данных MODIS-Aqua. Стоит отметить, что скопление сине-зеленых водорослей на изображении LANDSAT-5, которые выглядят гораздо светлее морской поверхности, соответствуют районам с наибольшей концентрацией хлорофилла, а темным областям на снимке соответствуют районы на карте с наименьшей концентрацией хлорофилла.

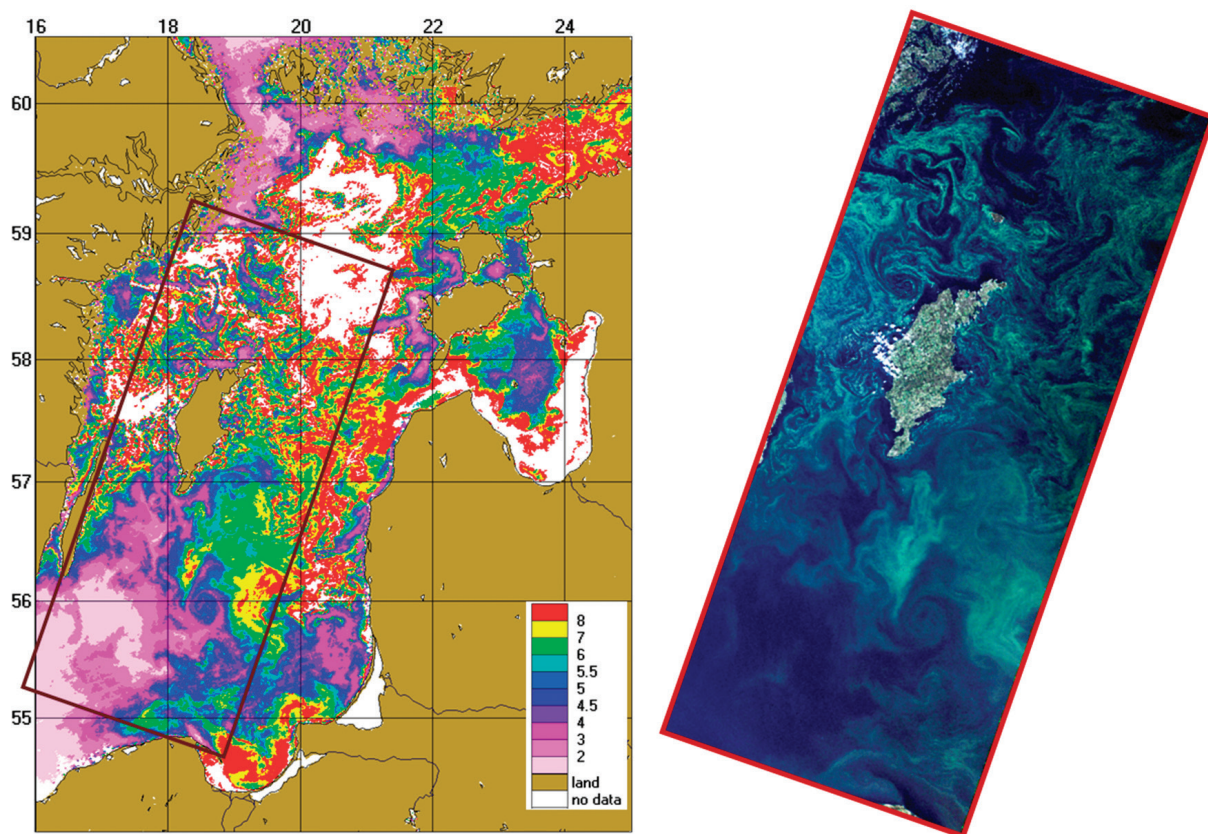


Рис. 5. Карта распределения концентрации хлорофилла (расчет произведен по алгоритму, разработанному для юго-восточной части Балтики) в Балтийском море от 5 июля 2005 года 11:02 UTC по данным MODIS-Aqua (слева) и данные LANDSAT-5 от 5 июля 2005 года 09:36 UTC (справа)

Факторы, влияющие на пространственно-временное распределение хлорофилла в Балтийском море

Известно, что на интенсивность цветения различных видов фитопланктона влияют соленость воды, температура, концентрация фосфора и азота, ветер и течения (Kahru et al., 2007).

Весной диатомовые водоросли и динофлагелляты развиваются за счет улучшения условий освещения, повышения температуры воды, а также в связи с поступлением питательных веществ в море от водосбора бассейна Балтийского моря и вследствие атмосферных осадков. В течение нескольких недель питательные вещества (главным образом азот) иссякают, и весенний период цветения заканчивается.

В период нехватки питательных веществ способность цианобактерий фиксировать азот стимулирует быстрое развитие летнего пика цветения фитопланктона (Thamm et al., 2004; Wasmund et al., 2001). Для этой стадии характерно массовое развитие сине-зеленых водорослей, образуется нехватка фосфора, которая наряду с другими факторами вызывает окончание периода летнего цветения фитопланктона.

Осенью выравнивание температуры водных масс по вертикали и перемешивание вод способствуют выносу питательных веществ из глубинного слоя в верхние слои, что может привести к развитию третьего годового максимума цветения фитопланктона. В этот период доминируют диатомовые водоросли (например, *Coscinodiscus granii*). В ноябре происходит уменьшение биомассы фитопланктона в море.

В ходе исследования были проанализированы некоторые факторы, оказывающие влияние на цветение фитопланктона: температура, скорость ветра, концентрация фосфора и азота в воде. Информация о концентрации фосфора и азота была взята из базы данных HELCOM (<http://www.helcom.fi>), данные о температуре поверхности моря получены по материалам MODIS-Aqua, а информация о скорости ветра – по материалам NOAA/NCDC (<http://www.ncdc.noaa.gov/thredds/OceanWinds.html>).

Данные о температуре морской поверхности показывают типичную картину прогрева воды в трех регионах: весной (март–май) прогрев поверхности моря и активное перемешивание вод способствуют началу цветения диатомовых (Thamm et al., 2004). Далее при температуре поверхности моря более 16°C наступает стадия июльского летнего максимума. Осеннее перемешивание вод и выравнивание температуры водных масс по вертикали способствуют развитию цветения водорослей в сентябре–октябре (Thamm et al., 2004).

Большое влияние на состояние биогенной пленки, которую образуют сине-зеленые водоросли, оказывает ветер. При скорости ветра больше 8–10 м/с пленка разрушается, и скопления водорослей на поверхности не наблюдается (Митягина, Лаврова, 2014). Расчет коэффициента корреляции между многолетними значениями скорости ветра и концентрации хлорофилла в июле, когда наблюдается активное цветение сине-зеленых водорослей, показал отрицательные значения ($<-0,43$). Это значит, что летний пик цветения приходится на период, когда скорости ветра малы и не могут разрушить биогенные пленки, образуемые сине-зелеными водорослями на поверхности моря.

В результате анализа данных о концентрации фосфора для центральной части Балтийского моря были получены значимые коэффициенты корреляции между концентрацией фосфора в марте и концентрацией хлорофилла в июне–июле ($>0,7$), а также концентрацией фосфора в августе и концентрацией хлорофилла в сентябре и октябре ($>0,5$). Примеры распределения концентрации фосфора и хлорофилла для центральной части Балтийского моря показаны на *рис. 6*.

В юго-восточной части Балтийского моря и Финском заливе корреляции между концентрацией фосфора и хлорофилла не наблюдается.

Значимые коэффициенты корреляции между концентрацией азота и хлорофилла в центральном регионе наблюдались в июне и июле ($>0,7$ и $>0,5$ соответственно).

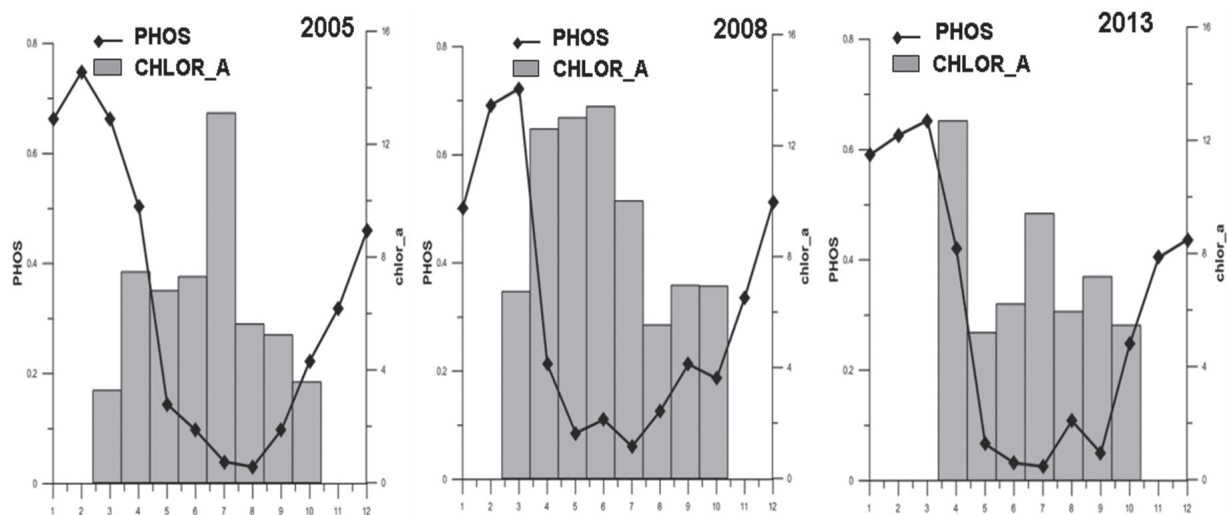


Рис. 6. Примеры распределения концентрации фосфора (линии) и хлорофилла (столбцы) в центральной части Балтийского моря в 2005, 2008 и 2013 годах по месяцам.

Также были получены значимые коэффициенты корреляции между концентрацией азота в апреле и хлорофилла в мае и июне ($>0,7$). Примеры распределения концентрации азота и хлорофилла для центральной части Балтийского моря показаны на рис. 7.

В юго-восточном регионе Балтики наблюдается связь между высоким содержанием азота в августе и цветением в сентябре ($>0,65$), а в Финском заливе корреляции между концентрацией азота и хлорофилла нет.

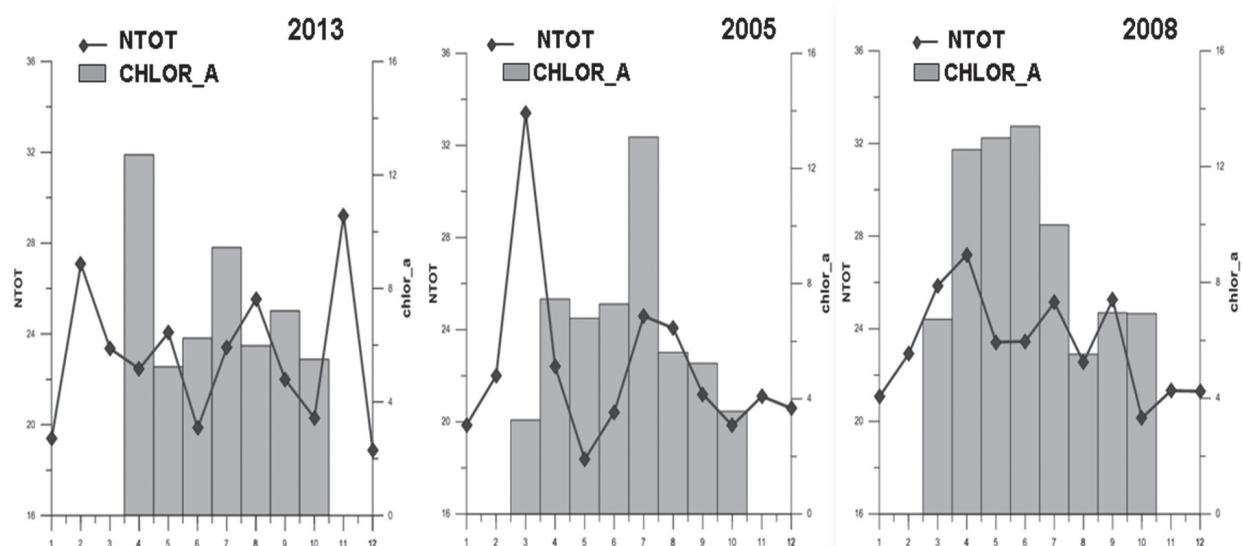


Рис. 7. Примеры распределения концентрации азота (линии) и хлорофилла (столбцы) в центральной части Балтийского моря в 2005, 2008 и 2013 годах по месяцам

Заключение

Анализ общей картины пространственно-временного распределения хлорофилла в каждом регионе за период 2003–2014 гг. показал, что для всех трех регионов характерна сезонная изменчивость концентрации хлорофилла. Выделяются три основных периода цветения: весенний (с середины апреля по начало мая), летний (конец июня – июль) и осенний (конец августа – сентябрь). Осенний пик цветения чаще всего наблюдается в центральном регионе и юго-восточной Балтике, реже – в Финском заливе.

Рассмотрены основные факторы, влияющие на пространственно-временное распределение концентрации хлорофилла в Балтийском море, установлена взаимосвязь между показателем концентрации хлорофилла и прогревом воды, наличием питательных веществ и ветром.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00800), предоставленного через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Литература

1. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Александров С.В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
2. Митягина М.И., Лаврова О.Ю. Особенности проявления на спутниковых радиолокационных изображениях корабельных следов в областях интенсивного цветения фитопланктона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 73–87.
3. Darecki M., Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Woźniak S.B., Bradtke K., Dera J., Woźniak B. Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: empirical validation // *Oceanologia*, 2008. V. 50. No. 4. P. 509–538.
4. Darecki M., Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea // *Remote Sens. Environ.* 2004. No. 89. P. 326–350.
5. Hobro R. Stages of annual zooplankton succession in the Asko area (northern Baltic sea) // *Acta Bot. Fennica*. 1979. No. 110. P. 79–80.
6. Kahru M., Elmgren R. Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. P. 3619–3633.
7. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R. Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability // *Marine ecology progress series*. 2007. V. 343. P. 15–23.
8. Niemi A. Blue-green algal blooms and N:P ratio in the Baltic Sea // *Acta Bot Fenn*. 1979. No.110. P. 57–61.
9. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaeva A. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data // *Oceanologia*. 2014. V. 56. No. 4. P. 737–756.
10. Sheberstov S.V., Lukyanova E.A. A System for Acquisition, Processing and Storage of Satellite and Field Biooptical Data // *Proceedings of IV International Conference: Current Problems in Optics of Natural Waters*. Nizhny Novgorod, 11–15 September 2007. P. 179–183.
11. Thamm R., Schernewski G., Wasmund N., Neumann T. Spatial phytoplankton pattern in the Baltic Sea. Coastline Reports // *Baltic Sea Typology*. 2004. No. 4. P. 85–109.
12. Wasmund N., Andrushaitis A., Lysiak-Pastuszek E., Müller-Karulis B., Nausch G., Neumann T., Ojaveer H., Olenina I., Postel L., Witek Z. Trophic status of the south-eastern Baltic Sea: a comparison of coastal and open areas // *Estuar. Coast. Shelf Sci*. 2001. No. 53. P. 849–864.
13. Woźniak B., Krężel A., Darecki M., Woźniak S.B., Majchrowski R., Ostrowska M., Kozłowski Ł., Ficek D., Olszewski J., Dera J. Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: mathematical apparatus // *Oceanologia*. 2008. V. 50. No. 4. P. 451–508.

Study of the cycles of phytoplankton blooms in the Baltic Sea from Aqua MODIS data

N.V. Evtushenko, S.V. Sheberstov

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia
E-mail: nevtushenko@ocean.ru

The cycles of the blooms in the Baltic Sea were studied by using satellite data from Aqua MODIS sensor from 2003 to 2014. Chlorophyll concentration derived from satellite data was used as the bloom parameter. Three regions in the Baltic Sea were considered: the central and south-eastern parts and the Gulf of Finland. The calculation was made using regional algorithms verified according to the in-situ measurements. The algorithms were applied to daily-averaged L3 remote sensing reflectances R_{rs} ; the resulting chlorophyll concentrations were averaged for each of the regions, and then smoothed using moving average method. For the central and southeastern region, 3 periods of bloom were found: in spring, in summer and in autumn; for the Gulf of Finland, the autumn bloom is not typical. Comparison of chlorophyll concentration time series for each region during 2003–2014 with data for every year separately allowed to reveal the maximum and minimum seasonal values during plankton blooms. The factors were examined that influence the identified cyclical phytoplankton blooms, such as sea surface temperature, wind speed, nitrogen, and phosphorus concentration. Probable causes of the revealed distribution of chlorophyll in three regions of the Baltic Sea were established.

Keywords: Baltic Sea, satellite data, phytoplankton, chlorophyll concentration

Accepted: 07.05.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-114-124

References

1. Bukanova T.V., Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Grigor'ev A.V., Khrapko A.N., Sheberstov S.V., Aleksandrov S.V., Regional'nye algoritmy otsenki kontsentratsii khlorofilla i vzvesi v yugo-vostochnoi Baltike po dannym sputnikovyykh skanerov tsveta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 64–73.
2. Mityagina M.I., Lavrova O.Yu., Osobennosti proyavleniya na sputnikovyykh radiolokatsionnykh izobrazheniyakh korabel'nykh sledov v oblastiakh intensivnogo cveteniya fitoplanktona (Radar manifestations of ship wakes in areas of intense phytoplankton bloom), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 73–87.
3. Darecki M., Ficek D., Krężel A., Ostrowska M., Majchrowski R., Woźniak S.B., Bradtke K., Dera J., Woźniak B., Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 2: empirical validation, *Oceanologia*, 2008, Vol. 50, No. 4, pp. 509–538.
4. Darecki M., Stramski D., An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea, *Remote Sens. Environ.*, 2004, No. 89, pp. 326–350.
5. Hobro R., Stages of annual zooplankton succession in the Asko area (northern Baltic Sea), *Acta Bot. Fennica*, 1979, No. 110, pp. 79–80.
6. Kahru, M., Elmgren R., Multidecadal time series of satellite-detected accumulations of cyanobacteria in the Baltic Sea, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, pp. 3619–3633.
7. Kahru M., Savchuk O.P., Elmgren R., Satellite measurements of cyanobacterial bloom frequency in the Baltic Sea: interannual and spatial variability, *Marine ecology progress series*, 2007, Vol. 343, pp. 15–23.
8. Niemi Å., Blue-green algal blooms and N:P ratio in the Baltic Sea, *Acta Bot Fenn*, 1979, No.110, pp. 57–61.
9. Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A., Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data, *Oceanologia*, 2014, Vol. 56, No. 4, pp. 737–756.
10. Sheberstov S.V., Lukyanova E.A., A System for Acquisition, Processing and Storage of Satellite and Field Biooptical Data, *Proceedings of IV International Conference: Current Problems in Optics of Natural Waters*, Nizhny Novgorod, 11–15 September 2007, pp. 179–183.
11. Thamm R., Schernewski G., Wasmund N., Neumann T., Spatial phytoplankton pattern in the Baltic Sea. Coastline Reports, *Baltic Sea Typology*, 2004, No. 4, pp. 85–109.
12. Wasmund N., Andrushaitis A., Łysiak-Pastuszek E., Müller-Karulis B., Nausch G., Neumann T., Ojaveer H., Olenina I., Postel L., Witek Z., Trophic status of the south-eastern Baltic Sea: a comparison of coastal and open areas, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2001, No. 53, pp. 849–864.
13. Woźniak B., Krężel A., Darecki M., Woźniak S.B., Majchrowski R., Ostrowska M., Kozłowski Ł., Ficek D., Olszewski J., Dera J., Algorithms for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: mathematical apparatus, *Oceanologia*, 2008, Vol. 50, No. 4, pp. 451–508.