

УДК 551.465,551.463.8

ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2016 г. О. В. Копелевич¹, С. В. Вазюля¹, С. В. Шеберстов¹, Т. В. Буканова^{2,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва
e-mail: oleg@ocean.ru, svershova@mail.ru, sheberst@yandex.ru

²Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Шишова РАН, Калининград
e-mail: tatiana.bukanova@gmail.com

³Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград

Поступила в редакцию 16.06.2015 г.

После доработки 02.07.2015 г.

Пространственная и временная изменчивость содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики анализируется по спутниковым данным. Используются данные спутникового сканера MODIS-Aqua; концентрация взвеси рассчитывается посредством регионального алгоритма, разработанного на основе данных натурных измерений в исследуемом регионе. Рассчитаны среднемесячные пространственные распределения концентрации взвеси в период март–сентябрь с 2003 по 2014 г. Анализируется влияние различных источников поступления взвешенного вещества с привлечением данных спутникового сканера Landsat-8 с разрешением 30 м. Рассматриваются сезонные и межгодовые изменения концентрации взвеси в различных районах и для всего исследуемого региона. Показано отсутствие значимого тренда в изменении средней концентрации взвешенного вещества за рассматриваемый период.

DOI: 10.7868/S0030157416010068

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – исследование пространственной и временной изменчивости содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным. Использование спутниковых данных – единственная возможность получить достаточно полную совокупность данных, охватывающих всю исследуемую акваторию с пространственным разрешением порядка 1 км и временным разрешением порядка суток на протяжении более 10 лет. Необходимость их использования в настоящее время общепризнана, при этом важность контактных измерений под сомнение не ставится, а наоборот, подчеркивается необходимость оптимального сочетания контактных и спутниковых измерений [8]. Контактные измерения необходимы, прежде всего, для разработки региональных алгоритмов, учитывающих специфические особенности исследуемого региона. Подобная работа была недавно выполнена для концентрации хлорофилла в юго-восточной части Балтийского моря, в результате которой по спутниковым данным удалось оценить тенденции эвтрофирования вод этого региона [1].

Эвтрофикация – одна из важнейших экологических проблем Балтийского моря, в частности вод его юго-восточной части, и взвешенное веще-

ство – один из существенных факторов в исследовании этой проблемы. Благодаря возможности дистанционного наблюдения за ее содержанием в поверхностном слое, взвесь является эффективным индикатором распространения и трансформации примесей, выносимых в море речным стоком и поставляемых другими источниками. Кроме того, это фактор, который оказывает непосредственное влияние на проникновение солнечного излучения в водную толщу, на световой режим и процесс фотосинтеза, альbedo водной толщи и баланс солнечного излучения.

В работе рассматривается район, ограниченный с севера широтой 56° с.ш., с запада – долготой 18° в.д.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИХ ОБРАБОТКИ

Для исследования сезонной, межгодовой изменчивости и пространственного распределения концентрации взвеси использовались данные спутникового спектрометра MODIS-Aqua 2-го уровня, доступные через сайт НАСА <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. Периодичность наблюдения составляет 1–2 раза в сутки.

Для расчета концентрации взвеси использовался региональный алгоритм определения кон-

сти региона средние значения в ячейке осреднения рассчитываются по данным за 5–15 дней.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ, ЕГО СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Чтобы лучше показать главные особенности пространственного распределения взвешенного вещества в поверхностном слое исследуемого региона, были рассчитаны среднемесячные пространственные распределения, осредненные за период 2003–2014 гг. (рис. 2). Видно, что во все рассматриваемые месяцы существует достаточно резкая граница между концентрациями взвеси в прибрежной зоне и в открытом море; наибольшие концентрации по всему региону наблюдаются в июле, наименьшие – в марте и сентябре.

Для оценки межгодовых изменений пространственных распределений на рис. 3 сравниваются распределения по месяцам в годы, когда содержание взвеси было минимальным и максимальным. Можно отметить, что в разные месяцы как минимумы, так и максимумы наблюдались в разные годы. Например, рекордно низкие значения концентрации наблюдались в марте 2006 г. и сентябре 2007 г., но в эти же годы наблюдались самые высокие значения в сентябре и июне, соответственно. Как правило, высокие (низкие) значения в экстремальные годы наблюдались по всему региону.

Самые высокие значения TSM зарегистрированы в июле 2005 г. – почти на всей акватории рассчитанная концентрация превышала 1.5 мг/л; для сравнения, в марте 2006 г. и сентябре 2007 г. она не превышала 0.5 мг/л.

Можно предполагать, что высокие значения концентрации в июле 2005 г. обусловлены в значительной степени цветением сине-зеленых водорослей (цианобактерий); в частности, именно в июле регистрируются самые высокие значения концентрации хлорофилла – около 5 мкг/л в среднем [1]. Биогенная составляющая взвешенного вещества в весенне-летний период имеет в Юго-Восточной Балтике существенное значение.

Что касается терригенной составляющей взвеси, то главные источники ее поступления находятся, в основном, в южной, и в меньшей степени, в восточной части региона [6].

Их проявление можно увидеть на рис. 4, где представлены изображения со сканера Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м (<http://landsat.usgs.gov/>) 23 июля и 18 сентября 2014 г. Цифры в квадратах на рис. 4 указывают источники поступления взвеси.

Самый мощный из источников на рис. 4а – это сток Вислы (1), который, по разным данным, оценивается как 0.7–2.2 млн. т взвешенного ве-

щества в год; сопоставимый вклад может давать ежегодный дампинг с учетом польских портов Гданьск и Гдыня [6].

К востоку от устья Вислы видно довольно интенсивное поступление взвеси из Вислинского залива через Балтийский пролив (2), и далее к северу – поступление взвеси из карьеров Калининградского янтарного комбината (3), которое оценивается 0.6–0.9 млн. т в год [6].

Еще выше на север (рис. 4б) видно поступление взвеси через Клайпедский пролив из Куршского залива (4), в который впадает одна из крупнейших рек Балтийского моря Неман. Ежегодное поступление взвеси через Клайпедский пролив оценивается 0.23 млн. т.

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ В РАЗНЫХ РАЙОНАХ

На рис. 5 показаны изменения среднемесячных значений TSM в четырех различных районах: напротив устья Вислы (примерно на 54.4° с.ш., 19° в.д.), вблизи мыса Таран Самбийского п-ова (примерно на 55° с.ш., 20° в.д.), в открытой части моря (примерно 55.6° с.ш., 18.3° в.д.) и вблизи Клайпедского пролива (примерно на 55.7° с.ш., 20.9° в.д.).

Как видно из графиков, представленных на рис. 5, средняя концентрация взвеси во всех трех прибрежных районах примерно одинакова: 1.2 ± 0.5 мг/л вблизи устья Вислы, 1.1 ± 0.3 мг/л около Самбийского полуострова, 1.2 ± 0.4 мг/л вблизи Клайпедского пролива; в открытой части моря он в 2.2–2.4 раза ниже – 0.5 ± 0.4 мг/л.

Во всех четырех районах наблюдаются значительные сезонные колебания. В прибрежной зоне обычно четко проявляются весенний и летний максимумы: вблизи устья Вислы и около Клайпедского пролива первый чаще наблюдается в апреле, у Самбийского полуострова – в марте. Летний максимум во всех прибрежных районах проявляется в июле; вблизи устья Вислы и около Самбийского полуострова иногда наблюдались три максимума – третий в сентябре.

Летний максимум, как правило, заметно превосходил по величине весенний, а сентябрьский максимум, если наблюдался, был самым слабым. Рекордный по величине июльский максимум наблюдался вблизи устья Вислы в 2010 г. – 3.0 мг/л (в указанном году он был единственным – см. рис. 5а).

В открытой части моря весенний максимум, если и проявлялся, то слабо; сентябрьский не наблюдался вообще. Летний максимум обычно приходился на уровне 0.8–1.1 мг/л; выделяются три пика – наибольший в 2005 г. 2.3 мг/л, в 2010 – 1.9 мг/л, в 2012 – 1.8 мг/л. Все они были связаны с

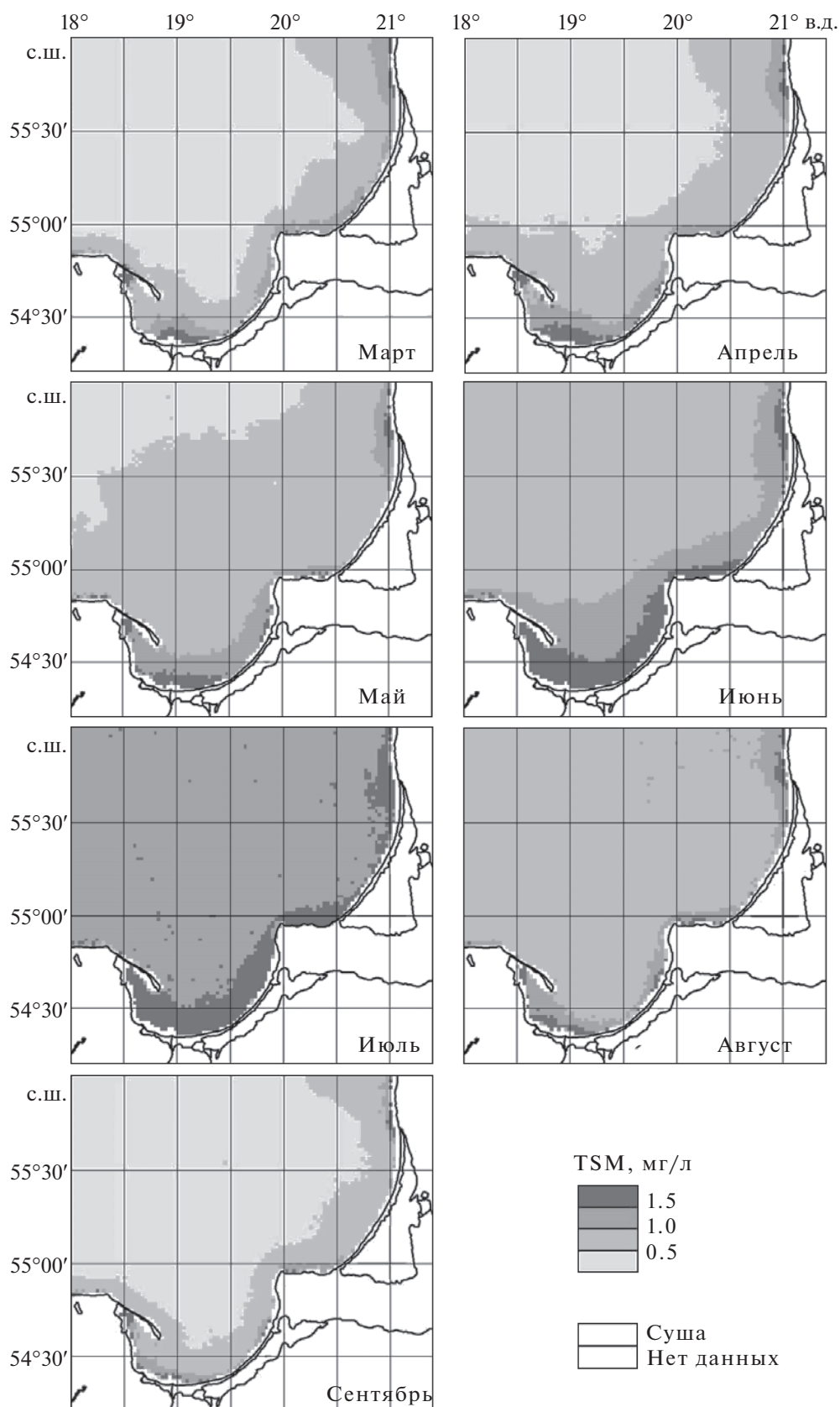


Рис. 2. Среднемесячные пространственные распределения концентрации взвеси (мг/л) с марта по сентябрь, осредненные за период 2003–2014 гг.

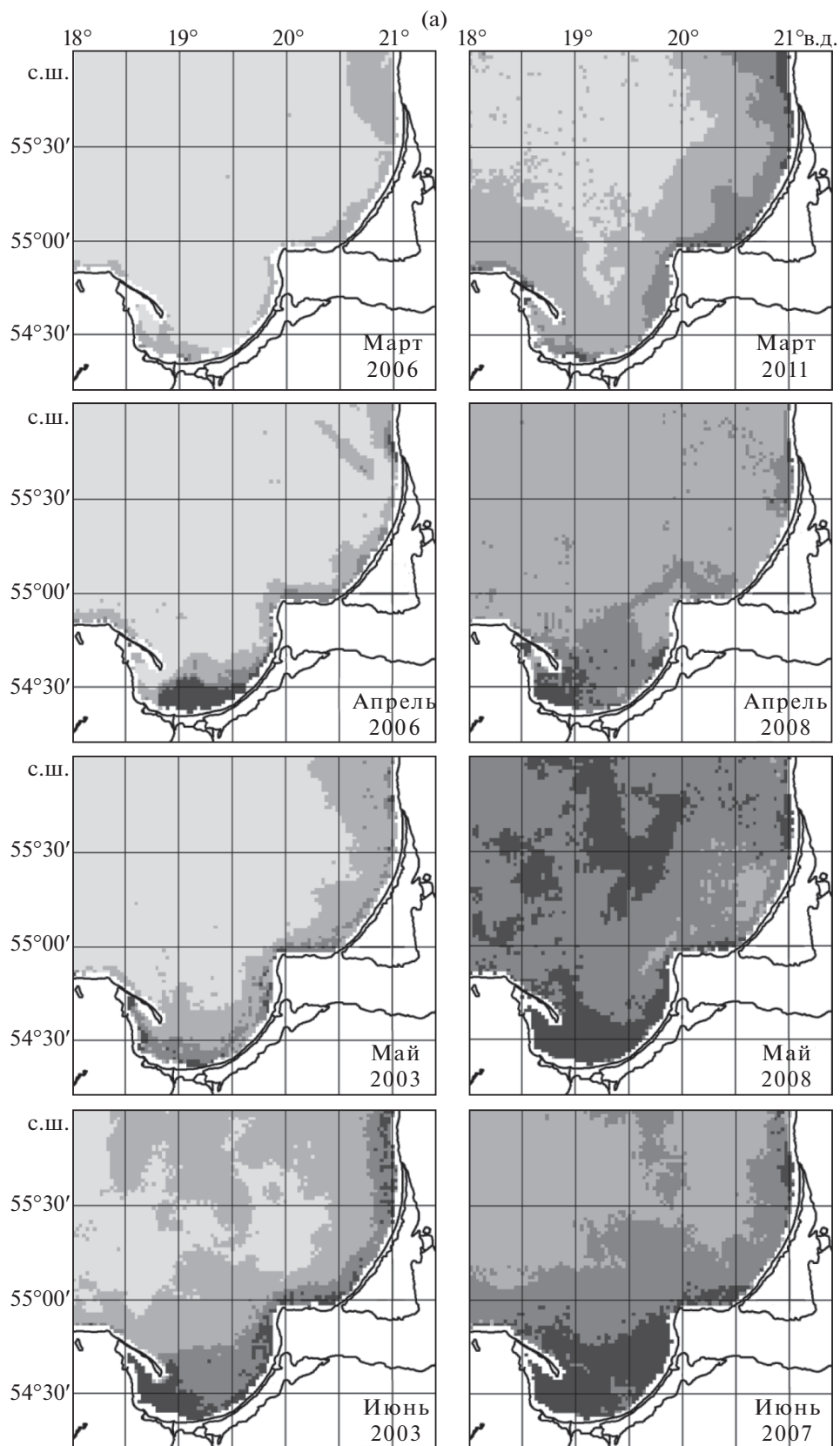


Рис. 3. Среднемесячные распределения концентрации взвеси (мг/л) с наименьшим (слева) и наибольшим (справа) содержанием взвеси: (а) – в марте–июне; (б) – в июле–августе. Значения концентрации – как на рис. 2.

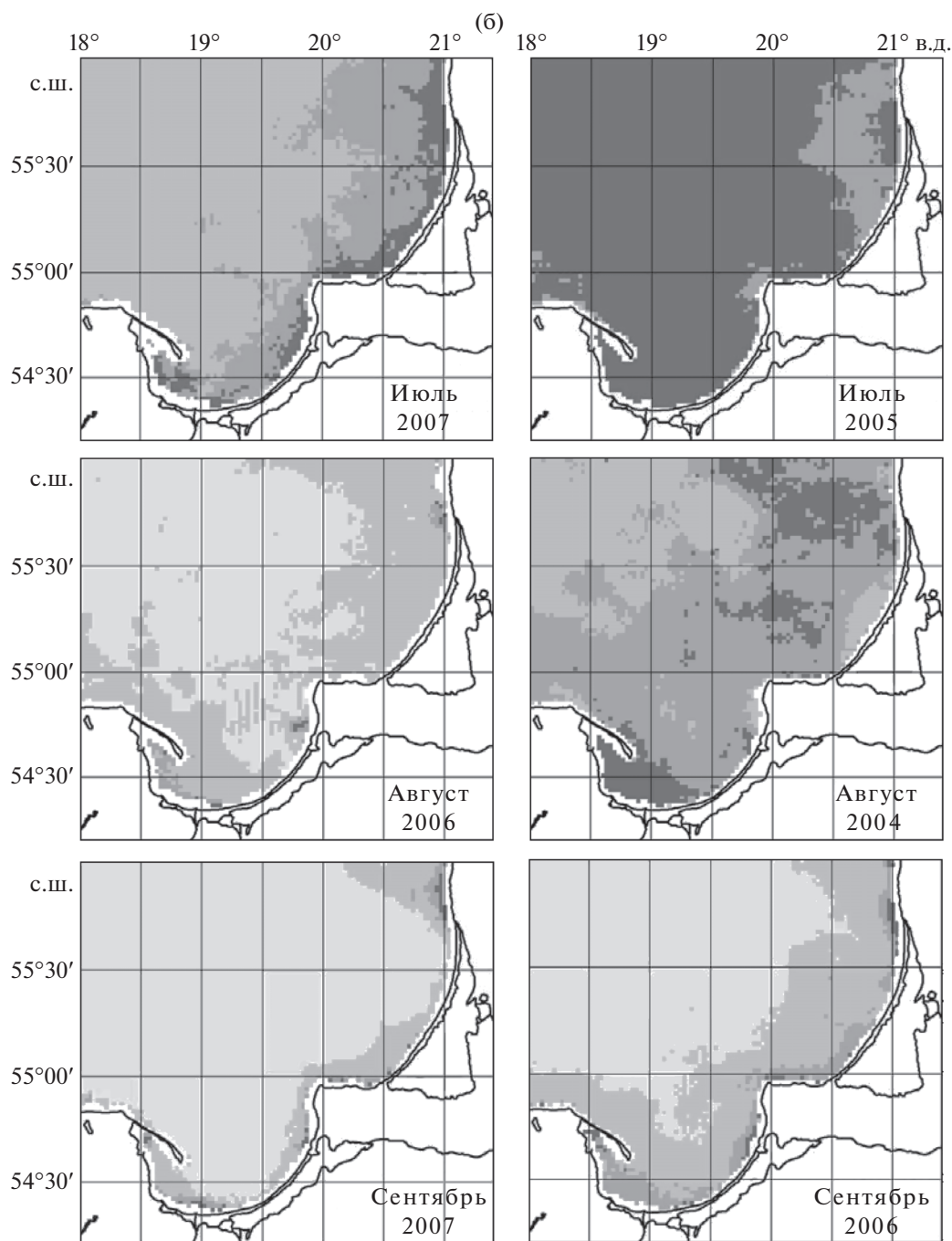


Рис. 3. Окончание

интенсивными цветениями сине-зеленых водорослей.

ОЦЕНКА ТRENDA В МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ СРЕДНЕГО СОДЕРЖАНИЯ ВЗВЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ

Анализируемый период наблюдений — всего лишь 12 лет. Тем не менее, мы сделали попытку

оценить наличие тренда в межгодовых изменениях средней концентрации взвеси в поверхностном слое исследуемого региона, используя метод сингулярного спектрального анализа, позволяющий анализировать короткие временные ряды [4]. На рис. 6 показаны исходные изменения среднемесячных значений TSM и результаты оценки тренда двумя методами (методика расчетов описана в [7]), которые, как видно, хорошо соответствуют друг другу.

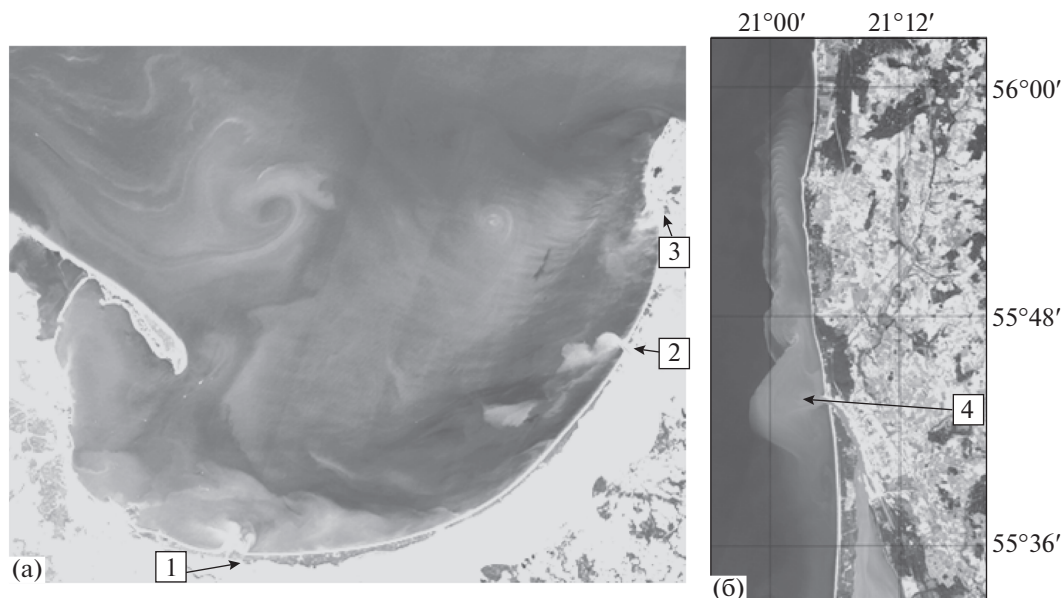


Рис. 4. Изображения в видимом цвете со сканера Landsat-8: (а) – 23.07, (б) – 18.09.2014 г. Цифры в квадратах указывают источники поступления взвеси (пояснения в тексте).

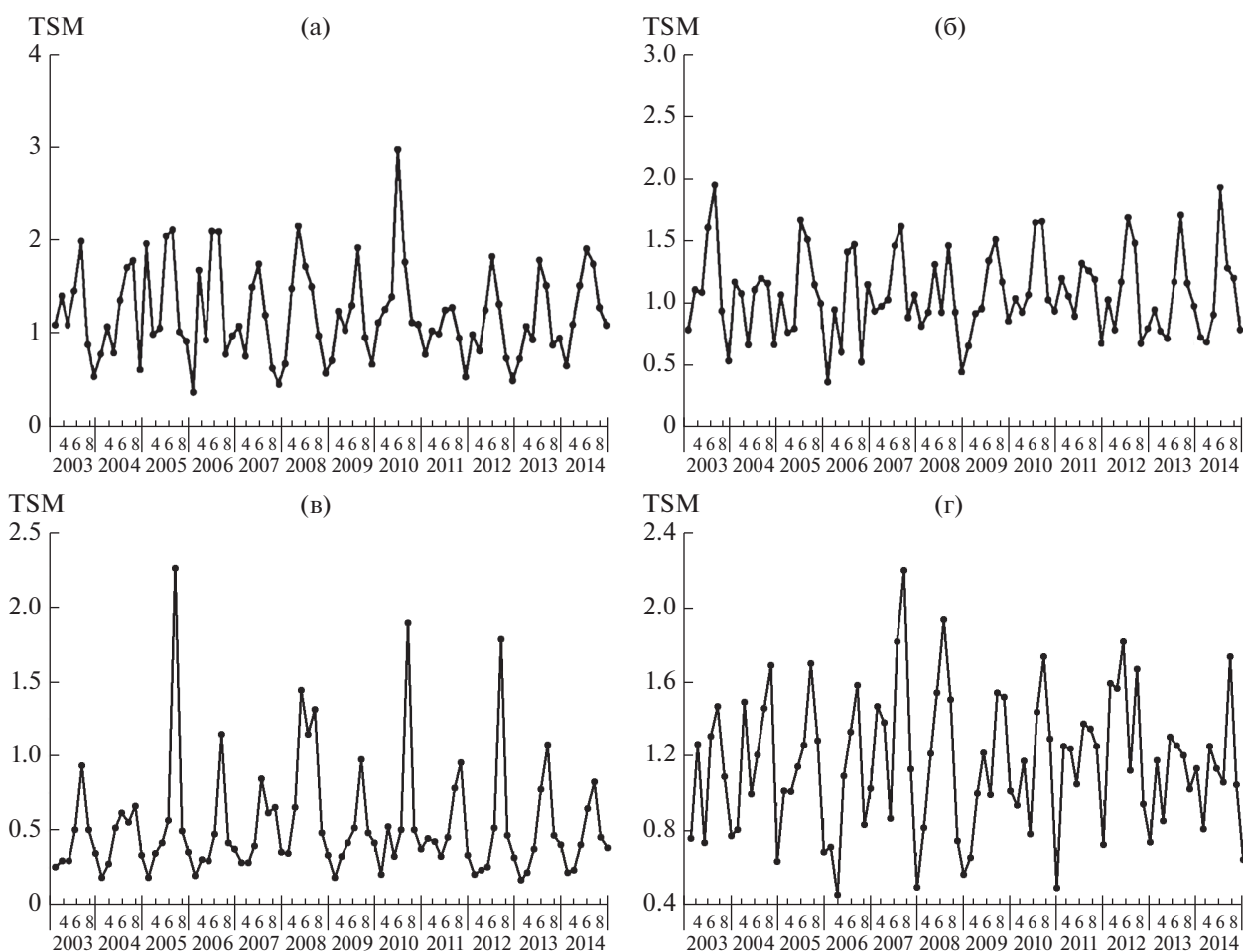


Рис. 5. Изменения среднемесячных значений TSM, мг/л в различных районах: (а) – напротив устья Вислы (примерно на 54.4° с.ш., 19° в.д.); (б) – вблизи мыса Таран Самбийского п-ова (примерно на 55° с.ш., 20° в.д.); (в) – открытая часть (примерно 55.6° с.ш., 18.3° в.д.); (г) – вблизи Клайпедского пролива (примерно на 55.7° с.ш., 20.9° в.д.).

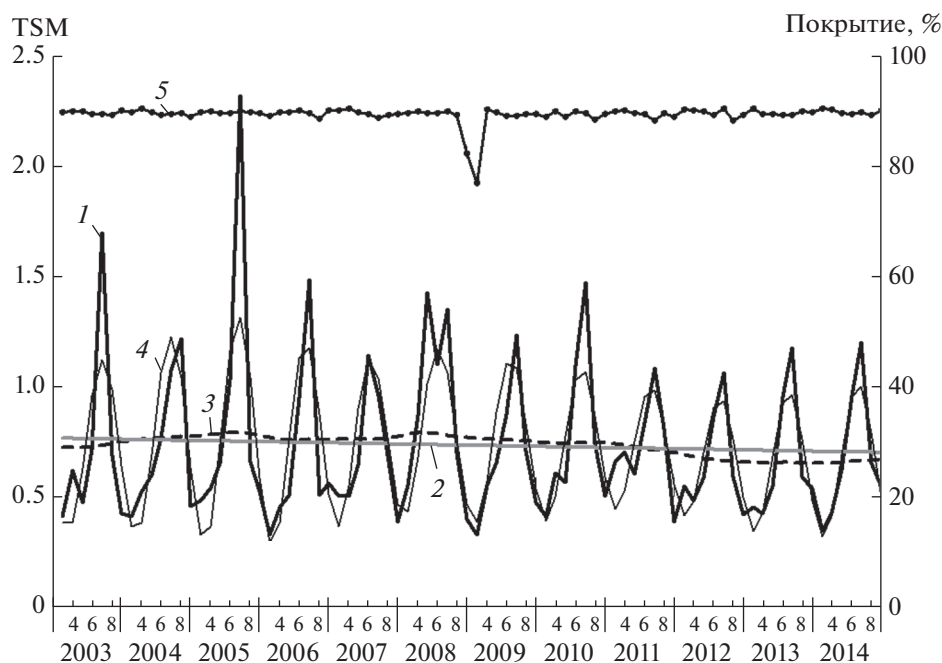


Рис. 6. Оценка межгодовых изменений концентрации взвеси TSM, мг/л в Юго-Восточной Балтике для периода март–сентябрь по данным спутникового сканера MODIS-Aqua с марта 2003 г. по сентябрь 2014 г.

1 — показывает изменение среднемесячных значений TSM; 2 — оценка линейного тренда; 3 — оценка тренда методом сингулярного спектрального анализа [4]; 4 — периодическая составляющая; 5 — процент месячного покрытия региона спутниковыми данными.

Прямая 2, представляющая собой линейный тренд, описывается уравнением

$$y = -0.0081t + 0.778,$$

где y — среднегодовая концентрация взвеси, мг/л, t — годы.

Оценка значимости полученного наклона прямой с помощью критерия Стьюдента показала, что по уровню значимости 0.05 его нельзя считать значимым, т.е. нет оснований говорить о наличии тренда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ среднемесячных пространственных распределений концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое вод Юго-Восточной Балтики, рассчитанных по данным спутникового сканера MODIS-Aqua для весенне-летнего сезона (март–сентябрь) за 12-летний период с 2003 по 2014 гг., позволил выявить следующие закономерности и особенности этих распределений:

Во все рассматриваемые месяцы существует достаточно резкая граница между концентрациями взвеси в прибрежной зоне и в открытом море; наибольшие концентрации по всему региону наблюдаются в июле, наименьшие — в марте и сентябре.

Наблюдались значительные различия между пространственными распределениями в разные годы; в частности, самые высокие концентрации наблюдались в июле 2005 г. — почти на всей акватории рассчитанная концентрация превышала 1.5 мг/л; для сравнения, в марте 2006 г. и сентябре 2007 г. она не превышала 0.5 мг/л.

Существенное значение в Юго-Восточной Балтике в весенне-летний период имеет биогенная составляющая взвешенного вещества; в частности, высокие значения концентрации взвеси в июле 2005 г. обусловлены в значительной степени цветением сине-зеленых водорослей.

Спутниковые данные наглядно показывают проявление главных источников поступления терригенной взвеси в Юго-Восточной Балтике: сток Вислы, поступление взвешенного вещества из Вислинского и Куршского (сток Немана) заливов через Балтийский и Клайпедский проливы, из карьеров Калининградского янтарного комбината на северо-западе Самбийского полуострова.

Для детального наблюдения проявления источников взвеси очень полезно привлекать изображения со спутниковых сканеров высокого пространственного разрешения, в частности, свободно доступные данные сканера Landsat-8 с пространственным разрешением 30 м.

Рассмотрение сезонной и межгодовой изменчивости содержания взвеси в разных районах показало наличие значительных сезонных изменений: в прибрежной зоне четко проявляются весенний и летний максимумы, причем летний максимум, как правило, по величине превосходит весенний; в открытой части моря весенний максимум проявляется слабо. Наиболее резко выраженные летние максимумы в открытой части моря связаны с интенсивными цветениями сине-зеленых водорослей.

Проведенная оценка наличия тренда в межгодовых изменениях средней концентрации взвеси в поверхностном слое исследуемого региона показала, что статистически он незначим, и нет оснований говорить о наличии тренда.

Авторы благодарят Н.В. Евтушенко за подготовку данных Landsat-8.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 14-50-00095), предоставленного Институту океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Сбор и обработка данных сканера MODIS-Aqua выполнены Т.В. Букановой в рамках гранта РНФ (проект № 14-37-00047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буканова Т.В.* Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук: 25.00.28. Калининград: Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, 2014. 23 с.
2. *Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В. и др.* Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64–73.
3. *Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др.* Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // Океанология. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
4. *Голяндина Н.Э.* Метод “Гусеница” – SSA: анализ временных рядов. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 2004. 76 с.
5. *Дубравин В.Ф., Дорохова Е.В., Сивков В.В. и др.* Гидрохимические показатели и взвешенное вещество // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / Под ред. Сивкова В.В. и др. Калининград: Терра Балтика, 2012. С. 276–291.
6. *Сивков В.В.* Водная взвесь // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Т. II: Море / Под ред. Сивкова В.В. и др. Калининград: Терра Балтика, 2012. С. 120–128.
7. *Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Лукьянова Е.А.* Анализ межгодовых трендов температуры поверхности океана и концентрации хлорофилла в Атлантическом океане по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 274–282.
8. *Kratzer S., Ebert K., Sorensen K.* Monitoring the Bio-optical State of the Baltic Sea Ecosystem with Remote Sensing and Autonomous In Situ Techniques // The Baltic Sea Basin, Central and Eastern European Development Studies (CEEDES), DOI 10.1007/4978-3-642-17220-5_20 / Eds. Harff J. et al. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 407–435.

Suspended Matter in the Surface Layer of the South-Eastern Baltic from Satellite Data

O. V. Kopelevich, S. V. Vazyulya, S. V. Sheberstov, T. V. Bukanova

Spatial and temporal variability of the suspended matter concentration in the surface layer of the South-Eastern Baltic is analyzed by using data from satellite scanner MODIS-Aqua. The suspended matter concentration was calculated by the regional algorithm developed on the basis of field data in the given region. The mean monthly distributions of the suspended matter concentration from March–September 2003–2014 were calculated. The role of the contributing factors is analyzed by using the data of the satellite scanner Landsat-8 with a spatial resolution of 30 m. Along with the whole area of studies, the seasonal and inter-annual variability of the concentration of suspended matter in different regions is considered. No meaningful trend for the average concentration of suspended matter over the considered period is shown.