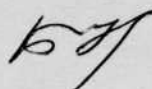


На правах рукописи



Буканова Татьяна Васильевна

**ТЕНДЕНЦИИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Калининград – 2014

Работа выполнена в Атлантическом отделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: **Сивков Вадим Валерьевич**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геоэкологии

Официальные оппоненты: **Шилин Михаил Борисович**, доктор географических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет», заведующий кафедрой экологии (г. Санкт-Петербург)

Лаврова Ольга Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований РАН, заведующая лабораторией аэрокосмической радиолокации (г. Москва)

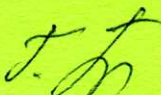
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «19» декабря 2014 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.084.02 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14, ауд. 202; e-mail: ecogeography@rambler.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Балтийского федерального университета им. И. Канта (ул. Университетская, 2) и на сайте <http://www.kantiana.ru/postgraduate/dis-list/142466/>

Автореферат разослан «17» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Г.М. Баринава

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из важнейших экологических проблем Балтийского моря является эвтрофикация - процесс повышения биологической продуктивности и ухудшения качества вод, вызванный избыточным поступлением биогенных элементов, прежде всего азота и фосфора, под воздействием антропогенных и естественных факторов (Россолоимо, 1975; Larsson et al., 1985; Elmgren, 1989; Rosenberg, 1990; Nehring, 1992; Rönnerberg, Bonsdorff, 2004; Schiewer, 2008; HELCOM, 2014).

К числу наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря относится юго-восточная часть. Исследования последних лет показывают, что концентрация хлорофилла «а» и биомасса цианобактерий достигают здесь максимальных значений (Lindgren, Nakanson, 2007; Nakanson, Bryhn, 2008; HELCOM, 2014). За 2003-2007 гг. вклад потенциально токсичных сине-зеленых водорослей (цианобактерий) в общую биомассу фитопланктона в летний период составляет до 70 % по численности и до 90 % по биомассе, а их максимальные значения характерны для прибрежных зон (Александров и др., 2012).

Сложившаяся ситуация в различных районах Балтийского моря привела к необходимости мониторинга важнейших показателей экологического состояния морской среды. Общепризнанный метод оценки биомассы и развития фитопланктона, а также продуктивности водоемов – определение концентрации хлорофилла «а», основного пигмента фитопланктона, играющего важнейшую роль в процессе фотосинтеза. Информация о его пространственно-временной изменчивости служит важнейшим индикатором степени эвтрофирования и качества вод (Carlson, 1977; Орадовский и др., 1992; Бульон, 1993; Baban, 1996; Directive 2000; Thiemann, Kaufmann, 2002; Wasmund, Ulig, 2003; HELCOM, 2006).

Концентрация хлорофилла «а» - оптически активный компонент морской среды и единственная характеристика, изменчивость которой может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов с помощью спутниковой информации (Doerffer, Fiseher, 1994).

Стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» были разработаны для открытых океанических вод I типа (Morel, Prieur, 1977; Gordon, Morel, 1983). Они непригодны и нуждаются в существенной коррекции для вод II типа – высокопродуктивных, мутных прибрежных, внутренних вод и вод эстуариев, где оптические свойства определяются наличием не только хлорофилла «а», но и взвешенного неорганического и растворенного органического вещества, оказывающих влияние на спектральную яркость излучения во всем видимом диапазоне спектра. Воды Балтийского моря относят именно ко II типу оптически сложных вод (Darecki, Stramski, 2004; Kutser, 2009; Morel, Prieur, 1977; IOCCG Report, 2000). Применяемые стандартные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла «а» по данным спутниковых спектрорадиометров для акватории Балтийского моря показывают существенное завышение значе-

ний по сравнению с натурными данными (Darecki et al., 2008). В юго-восточной части Балтийского моря особенное влияние на оптические свойства акватории оказывает значительный сток с суши, в том числе сток крупных равнинных рек – Вислы и Немана, приносящих ежегодно огромное количество взвешенного вещества (Kowalczyk, 1999).

Таким образом, целесообразна коррекция стандартных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным на основе данных натурных наблюдений и разработка региональных алгоритмов.

Цель работы - оценка уровня эвтрофирования и тенденций его изменения в юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным оптического диапазона.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Верифицировать существующие спутниковые алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по данным судовых измерений.
2. Разработать региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а».
3. Провести анализ сезонной и межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла «а» по разработанному алгоритму.
4. Оценить уровень эвтрофирования и качество вод на основе спутниковых данных по концентрации хлорофилла «а».
5. Выявить тенденции развития эвтрофикации за 2003-2012 гг.

Научная новизна:

- предложен модифицированный региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным MODIS, позволяющий дать более точную оценку данного параметра в юго-восточной части Балтийского моря;

- данные по концентрации хлорофилла «а» в районе исследования уточнены и существенно дополнены благодаря региональному алгоритму;

- установлена положительная тенденция роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте Юго-Восточной Балтики за 2003-2012 гг.;

- выявлен рост уровня эвтрофирования и ухудшение качества вод в районе исследования (за 2003-2012 гг.), что может привести к изменению структуры экосистемы.

Защищаемые положения:

1. Предложенный автором региональный алгоритм обработки спутниковых данных MODIS позволяет рассчитать концентрацию хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря с большей точностью по сравнению с существующими алгоритмами (стандартное отклонение - $1,2 \text{ мг/м}^3$, относительная ошибка – 34 %).

2. Положительная тенденция роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря составляет $0,9 \pm 0,4 \text{ мг/м}^3$ за декаду (2003-2012 гг.).

3. За 2003-2012 гг. средняя многолетняя площадь эвтрофных вод в Юго-Восточной Балтике составляет 29 %, мезотрофных – 71 %. Увеличение площади эвтрофных вод составляет 1,5 % в год.

Практическая значимость. Разработанный автором метод расчета одного из основных показателей качества морской среды – концентрации хлорофилла «а» имеет важное практическое значение для экологического мониторинга, оценки биологической продуктивности и промыслового потенциала Балтийского моря. Появилась возможность оперативно и своевременно определять концентрацию хлорофилла «а» моря, как в широких пространственных масштабах, так и в определенных локальных участках. Результаты исследования могут быть использованы рыбохозяйственными организациями с целью проведения мониторинга продуктивности, биомассы фитопланктона, уровня эвтрофирования и качества вод Юго-Восточной Балтики, в частности, ее российского сектора, а также оценки тенденций изменения этих показателей.

Личный вклад. Автором осуществлен сбор и обработка спутниковых данных оптического диапазона спектрорадиометров MODIS-Terra, MODIS-Aqua, MERIS-Envisat, SeaWiFS-Seastar, созданы массивы спутниковых данных по концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря для Балтийского моря. Автор принимала непосредственное участие в четырех подспутниковых экспериментах в Юго-Восточной Балтике, получении и последующей обработке натурных данных плавающего спектрорадиометра, а также в создании региональных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» на основе подхода, разработанного в лаборатории оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва). Автором произведен пересчет массива спутниковых данных за 2003-2012 гг. по новому региональному алгоритму расчета концентрации хлорофилла «а», проанализированы пространственное распределение и временная изменчивость концентрации хлорофилла «а», выявлена тенденция изменения данного параметра, оценен уровень эвтрофирования и качество вод юго-восточной части Балтийского моря.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на многих конференциях: «Комплексное управление, индикаторы развития, пространственное планирование и мониторинг прибрежных регионов юго-восточной Балтики» (Калининград, 2008), 7-й, 8-й, 9-й Балтийский научный конгресс (Эстония, 2009; Россия, 2011; Литва, 2013), 8-я, 9-я Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2010, 2011), 6-я международная конференция «Современные проблемы оптики естественных вод» (Санкт-Петербург, 2011), 15-я конференция по промысловой океанологии (Калининград, 2011), международная конференция IEEE/OES Baltic Symposium (Литва, 2012; Эстония, 2014), конференция Европейского космического агентства (Италия, 2012).

Работа проходила экспертную оценку и поддерживалась грантами РФФИ (№ 10-05-90718-моб_ст, № 11-05-90760-моб_ст, № 12-05-90814-мол_рф_нр), а также POGO-SCOR Visiting fellowship (2012 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 2 статьи в периодическом издании, рекомендованном ВАК.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, содержит 142 страницы машинописного текста, 57 рисунков и 23 таблицы. Список литературы включает 210 наименований, в том числе 63 отечественных и 147 – на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю кг-мн В.В. Сивкову за постановку задачи и помощь в выполнении исследования, дф-мн О.В. Копелевичу и сотрудникам лаборатории оптики океана ИОРАН С.В. Вазюле, В.И. Буренкову, С.В. Шеберстову, А.В. Григорьеву, А.Н. Храпко и В.А. Артемьеву за содействие в разработке региональных алгоритмов расчета биооптических параметров, кбн С.В. Александрову за предоставленные данные по концентрации хлорофилла «а», ценные рекомендации и консультации, а также Е.В. Булычевой и Ж.И. Стонт. Особенно благодарна ООО «Морское венчурное бюро» и В.И. Буканову, а также ООО «ЛУКОЙЛ-Калининградморнефть» за материалы и организацию экспедиций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Проблема эвтрофикации Балтийского моря: особенности юго-восточной части

В открытой части Балтийского моря отмечена тенденция весьма слабого снижения концентрации хлорофилла «а» за 1974–2006 гг. (Hakanson, Bryhn, 2008). В целом средняя концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое открытой части Балтики составляет 2 мг/м^3 , что по ряду основных классификаций (Wasmund et al., 2001; Coasts and Seas, 2002; Vuoristo, 1998) соответствует низкой степени эвтрофирования или пограничному состоянию между олиготрофным и мезотрофным уровнем. Однако, концентрация хлорофилла «а» неодинакова в различных районах моря в зависимости от условий среды, в особенности от температуры и наличия биогенных элементов (Kononen, 1992; Wasmund et al., 2001; Wasmund et al., 2011).

В течение 1990–2005 гг. наиболее низкие концентрации хлорофилла «а» (менее 2 мг/м^3) встречались только в северных районах моря – Ботнический залив и отдельные участки Ботнического моря, воды этого района соответствуют олиготрофным условиям. Здесь отмечаются минимальные значения биомассы сине-зеленых водорослей, в том числе токсичных видов, в летний период (Jaanus et al., 2007; Wasmund et al., 2013), а также минимальные значения концентрации хлорофилла «а» (Lindgren, Hakanson, 2007; HELCOM, 2014).

Наиболее высокий уровень эвтрофирования характерен для восточной части Финского залива, южной и центральной части Рижского залива, юга Арконского бассейна, а также юго-восточной части моря. Здесь концентрации хлорофилла «а» и значения биомассы сине-зеленых водорослей максимальны

(Jaanus et al., 2007; Lindgren, Hakanson, 2007; Wasmund et al., 2013). В период с 2003 по 2007 гг. в российском секторе Юго-Восточной Балтики отмечался как очень низкий (I класс, концентрация хлорофилла «а» $< 1,5 \text{ мг/м}^3$), так и очень высокий уровень эвтрофирования вод (V класс, концентрация хлорофилла «а» $> 5,0 \text{ мг/м}^3$) по классификации Coasts and Seas, 2002. Качество вод (по классификации Vuoristo, 1998) в данный период соответствовало первым трем классам: в открытой части акватории наблюдалось наилучшее качество воды (концентрация хлорофилла «а» была ниже 4 мг/м^3 - I и II классы), в береговой зоне оно снижалась до III класса (концентрация хлорофилла «а» $> 4,0 \text{ мг/м}^3$) (Александров и Кудрявцева, 2012).

Таким образом, Юго-Восточная Балтика - один из наиболее эвтрофированных районов моря и требует особого внимания с точки зрения проверки тенденций изменения основных показателей эвтрофикации, прежде всего биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а».

В условиях дефицита и нерегулярности судовых наблюдений концентрации хлорофилла «а» в Юго-Восточной Балтике, наиболее эффективным методом оценки становится дистанционное зондирование в оптическом диапазоне спутниковыми спектрорадиометрами. Однако в водах Балтийского моря стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным дают завышенные значения. Относительные ошибки составляют: систематические – 177 % для SeaWiFS и 236 % для MODIS; случайные – 159 % для SeaWiFS и 209 % для MODIS (Wozniak et al., 2008; Darecki et al., 2008). Главная причина больших ошибок стандартных алгоритмов для Балтийского моря - высокая концентрация взвешенного и окрашенного органического вещества (Darecki, Stramski, 2004). Первостепенная задача заключается в коррекции стандартных методик расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным на основе данных натурных наблюдений.

Глава 2. Разработка региональных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным

Район исследований расположен в пределах Гданьского бассейна в юго-восточной части Балтийского моря (Рисунок 1). Для разработки региональных алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» использовались следующие данные:

- натурные измерения концентрации хлорофилла «а», проведенные в рамках комплексного экологического мониторинга по программе ООО «ЛУКОЙЛ – Калининградморнефть» в российском секторе Юго-Восточной Балтики в 2003-2009 гг. (Нефть и окружающая среда, 2012). Концентрация хлорофилла «а» определялась спектрофотометрическим методом специалистами АтлантНИРО (Методическое руководство, 2006; ГОСТ, 1990);

- спутниковые данные оптического диапазона трех спектрорадиометров: MERIS на спутнике ENVISAT (пространственное разрешение 1,2 км) и MODIS на спутниках Terra и Aqua (пространственное разрешение 1 км) за период с 2003 года по 2012 г., а также SeaWiFS на спутнике SeaStar (пространственное разрешение 1,1 км) за 2010 г. Спутниковые данные обрабатывались с помощью программных комплексов SeaDAS Virtual Appliance (версия 6.4) и BEAM[©] (версия 4.10.3);

- натурные измерения спектральных коэффициентов яркости излучения, вышедшего из-под поверхности моря, выполненные в четырех подспутниковых экспериментах (Рисунок 1) плавающим спектрорадиометром - прибором, разработанным в лаборатории оптики океана ИО РАН. Спектральный диапазон 390-700 нм; спектральное разрешение – 2,5 нм; точность измерений – 5 % (Артемьев и др., 2000).

Концентрация хлорофилла «а» рассчитывалась по спутниковым данным четырьмя алгоритмами: для данных MODIS использо-

вался стандартный алгоритм OC3M (O'Reilly et al., 2000), а также алгоритм DESAMBEM, разработанный в Институте океанологии Польской академии наук для южной части Балтийского моря (Wozniak et al., 2008; Darecki et al., 2008); для данных MERIS использовался стандартный регрессионный алгоритм Algal Pigment Index I (Morel, Antoine, 1999) и стандартный алгоритм с использованием метода нейронных сетей Algal Pigment Index II (Doerffer, Schiller, 1997). Верификация и последующая коррекция существующих алгоритмов расчета концентрации хлорофилла «а» проводилась на основе сопоставления значений данного параметра, полученных по данным натурных измерений 2003-2009 гг., и по результатам обработки спутниковых данных MERIS-Envisat и MODIS-Terra/Aqua вышеуказанными алгоритмами. Массивы спутниковых данных по концентрации хлорофилла «а» для каждой станции были экспортированы с помощью программного комплекса SeaDAS Virtual Appliance 6.4. Для сопоставления натуральных и спутниковых данных по концентрации хлорофилла «а» отбирались пары измерений, для которых разница во времени между станцией и пролетом спутника не превышала 3 часов.

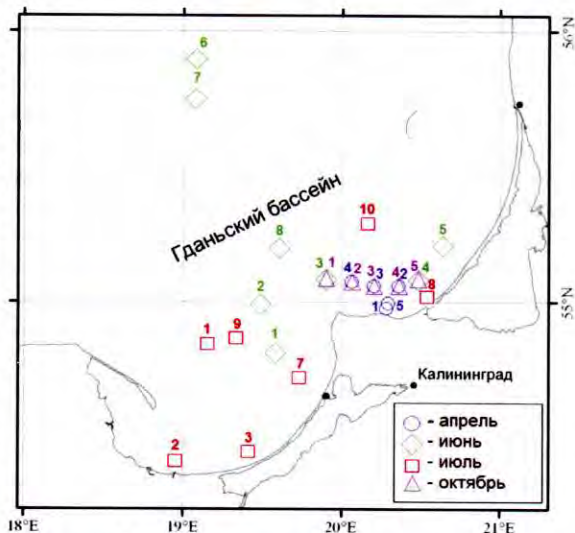


Рисунок 1 – Схема расположения станций 2010 г.

Верификация стандартных алгоритмов обработки спутниковых данных для расчета концентрации хлорофилла «а». Сопоставление данных по концентрации хлорофилла «а», полученных по данным натурных измерений 2003–2009 гг. и по результатам обработки спутниковых данных MERIS стандартным регрессионным алгоритмом *Algal Pigment Index I*, показало его непригодность для вод Юго-Восточной Балтики (квадрат коэффициента корреляции $r^2 = 0,05$, число пар измерений $n = 69$, статистический уровень значимости $\alpha > 0,05$). Лучший результат для данных MERIS показал стандартный алгоритм *Algal Pigment Index II*. Наблюдается заметная корреляция между данными спутниковых и натурных измерений: $r^2 = 0,59$, $n = 87$, стандартное отклонение $\sigma = 2,9 \text{ мг/м}^3$, относительная ошибка $V = 56 \%$, $\alpha < 0,05$. Спутниковые данные дают завышенные значения по сравнению с данным *in situ*. Для устранения систематической ошибки использована корреляционная зависимость между спутниковыми и натурными данными:

$$X_l = 0,60 * X_l_Algal\ Pigment\ Index\ II + 0,93, \quad (1)$$

где X_l – искомая концентрация хлорофилла «а», $X_l_Algal\ Pigment\ Index\ II$ – концентрация хлорофилла «а», рассчитанная по данным MERIS алгоритмом *Algal Pigment Index II*. После коррекции стандартное отклонение и относительная ошибка сокращены $\sigma = 1,7 \text{ мг/м}^3$, $V = 42 \%$ (Рисунок 2а).

Сопоставление натуральных данных по концентрации хлорофилла «а» и значений, полученных в результате обработки спутниковых данных MODIS стандартным алгоритмом OC3M, показало практически полное отсутствие корреляции ($r^2 = 0,08$, $n = 91$, $\sigma = 5,26 \text{ мг/м}^3$, $\alpha < 0,05$) и непригодность данного алгоритма для Юго-Восточной Балтики.

В результате обработки данных MODIS алгоритмом DESAMBEM наблюдается заметная корреляция между данными спутниковых и натурных измерений: $r^2 = 0,33$, $n = 109$, $\sigma = 1,9 \text{ мг/м}^3$, $V = 52 \%$, $\alpha < 0,05$. Спутниковые данные дают в целом завышенные значения, что устраняется путем коррекции с использованием уравнения регрессии:

$$X_l = 0,64 * X_l_DESAMBEM + 0,42, \quad (2)$$

где X_l – искомая концентрация хлорофилла «а», $X_l_DESAMBEM$ – концентрация хлорофилла «а», рассчитанная по данным MODIS алгоритмом DESAMBEM. Стандартное отклонение и относительная ошибка после коррекции сокращены: $\sigma = 1,2 \text{ мг/м}^3$, $V = 34 \%$ (Рисунок 2б).

Выполненная коррекция существующих алгоритмов позволила создать региональные алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла «а» для юго-восточной части Балтийского моря (уравнения 1, 2). Полученные региональные алгоритмы обеспечивают наибольшую точность расчета концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря (Буканова и др., 2011).

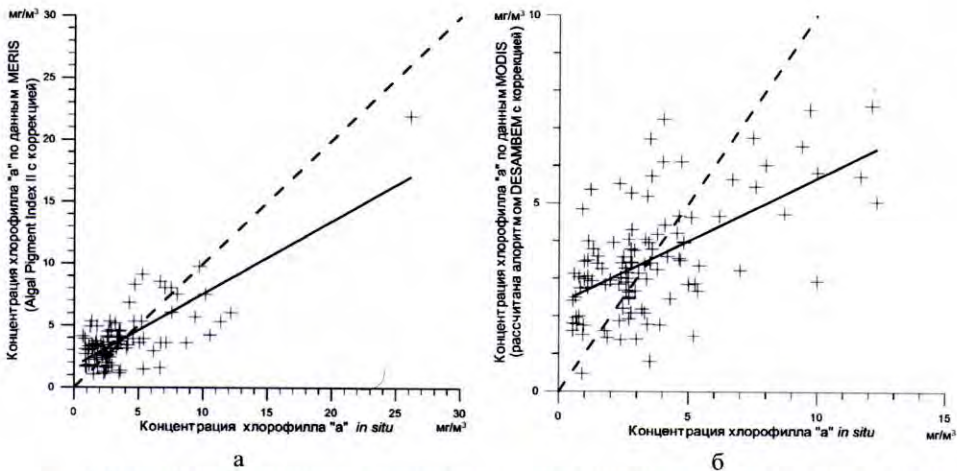


Рисунок 2 – Сопоставление данных по концентрации хлорофилла, полученных по данным натуральных и спутниковых измерений: а - по данным MERIS, рассчитанным алгоритмом Algal Pigment Index II с коррекций по уравнению (1); б – по данным MODIS, рассчитанным алгоритмом DESAMBEM, корректированным по уравнению (2). Сплошные линии – линейная корреляция между полученными данными, пунктир – линия идеального соотношения 1:1 (Буканова и др., 2011)

Несмотря на невысокие коэффициенты корреляции, ошибки расчета по разработанному региональным алгоритмам ниже, чем у существующих: региональный алгоритм для данных MERIS (уравнение 1) имеет погрешность измерения концентрации хлорофилла «а» 42 %, а стандартный алгоритм Algal Pigment Index II – 56 %; погрешность регионального алгоритма для данных MODIS (уравнение 2) – 34 %, а алгоритма DESAMBEM – 52 %.

Региональный алгоритм атмосферной коррекции. На основе натуральных измерений спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения плавающим спектрорадиометром разработан региональный алгоритм атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета MODIS-Aqua и MERIS, который основан на использовании системы базисных функций, позволяющей восстанавливать значения спектрального коэффициента яркости моря во всем видимом диапазоне по спутниковым данным (Копелевич и др., 2009). Система базисных функций построена на основе разложения по собственным векторам ковариационной матрицы спектральных значений коэффициента яркости водной толщи. Разложение, используемое для расчета спектрального коэффициента яркости моря $\rho(\lambda_i)$, имеет вид (Буканова и др., 2012):

$$\rho(\lambda_i) = \langle \rho(\lambda_i) \rangle + C_1 \Psi_1(\lambda_i) + C_2 \Psi_2(\lambda_i), \quad (3)$$

где $\langle \rho(\lambda_i) \rangle$ - средние значения коэффициента яркости моря на длине волны λ_i , $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$ - собственные вектора, C_1 и C_2 - коэффициенты разложения.

Система базисных функции ($\langle \rho(\lambda_i) \rangle$, $\Psi_1(\lambda_i)$ и $\Psi_2(\lambda_i)$) рассчитывалась по 26 измеренным *in situ* спектрам коэффициента яркости моря во всем видимом диапазоне 400-700 нм. Неизвестные коэффициенты C_1 и C_2 рассчитывались методом наименьших квадратов по величинам коэффициента яркости моря, полученным стандартными алгоритмами атмосферной коррекции для спектральных каналов с длиной волны больше 500 нм, где ошибки стандартных алгоритмов обычно минимальны (Буканова и др., 2011).

Выполненная региональная коррекция спутниковых коэффициентов яркости моря показала лучшие результаты в коротковолновой области спектра по сравнению со стандартными спутниковыми алгоритмами (Рисунок 3). К сожалению, для осуществления более точной региональной атмосферной коррекции пока слишком мало подспутниковых измерений коэффициента яркости моря.

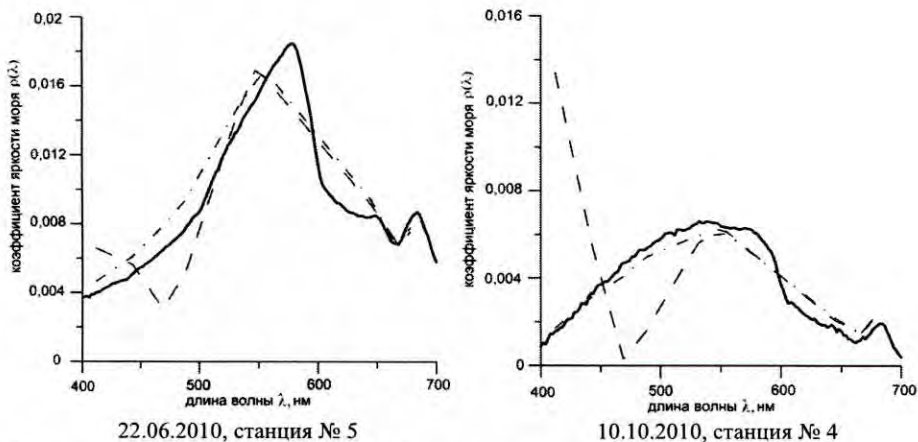


Рисунок 3 – Результаты атмосферной коррекции данных MODIS-Aqua (Буканова и др., 2012). Сплошная линия – измерения *in situ*, пунктирная – стандартный алгоритм MODIS, штрихпунктирная – региональный алгоритм

Поскольку спутник Envisat с установленным на его борту прибором MERIS прекратил свою миссию в апреле 2012 г., в дальнейшем исследовании закономерностей распределения и тенденций изменения концентрации хлорофилла «а» использованы данные спектрорадиометра MODIS.

Глава 3. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» и тенденции развития эвтрофикации в юго-восточной части Балтийского моря

Для анализа сезонной, межгодовой изменчивости и пространственного распределения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря принято и обработано 1027 спутниковых

снимков спектрорадиометра MODIS за период с 2003 по 2012 года. Пространственное разрешение снимков – 1 км. Для расчета концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое моря использовался модифицированный автором региональный алгоритм (уравнение 2). Массивы данных по концентрации хлорофилла «а» получены с использованием программного обеспечения для обработки спутниковых данных BEAM[©] для 66 экспериментальных станций в Юго-Восточной Балтике (Рисунок 4).

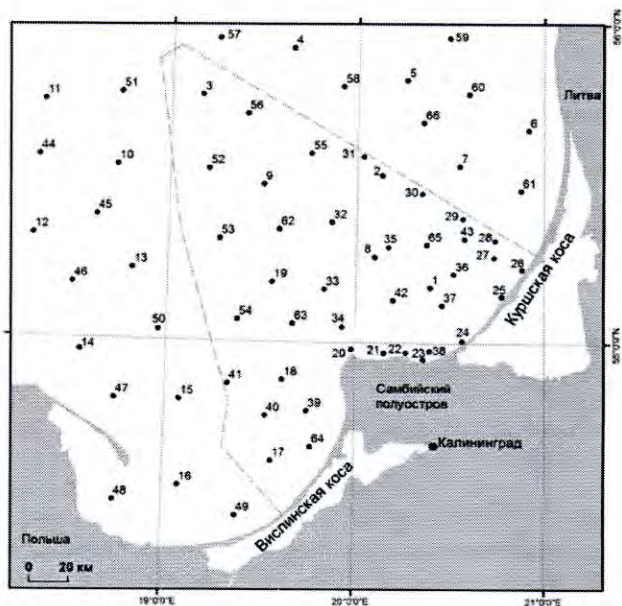


Рисунок 4 – Расположение экспериментальных спутниковых станций.
Пунктирная линия – граница российского экономического сектора

Район исследования ограничен с юга побережьем Польши, Вислинской косы и Самбийского полуострова, с востока – берегами Куршской косы и Литвы, с севера ограничен 56 градусом с.ш., с запада – 18 градусом в.д., и практически полностью совпадает с положением 26-ого подрайона согласно промышленному районированию Балтийского моря Международным советом по исследованию моря (ИКЕС), за исключением северной границы – 26-ой подрайон с севера ограничен 56,5 градусов с.ш.

Значение концентрации хлорофилла «а» для каждой станции определялось в окне 1x1 пиксель. Выборка данных за 2003-2012 гг. составила 46856 значений. Карты распределения концентрации хлорофилла «а» получены путем интерполяции точечных данных с использованием метода кригинга.

Сезонная изменчивость. Изменчивость концентрации хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря носит ярко выраженный сезонный характер (рассматриваются биологические сезоны, предложенные Wasmund, Uhling, 2003). В среднем за 2003-2012 гг. концентрация хлорофилла «а» зимой (январь-февраль) составляет $1,4 \pm 0,3$ мг/м³, весной (март-май) – $3,2 \pm 0,6$ мг/м³, летом (июнь-сентябрь) равна $3,8 \pm 0,4$ мг/м³, осенью (октябрь-декабрь) – $1,9 \pm 0,4$ мг/м³. Средние значения концентрации хлорофилла «а» в весенний и летний периоды в 2 раза выше наблюдаемых осенью и зимой.

Сезонное распределение концентрации хлорофилла «а» имеет три отчетливых максимума (Рисунок 5): весенний в апреле (концентрация хлорофилла «а» равна $3,7 \pm 0,9$ мг/м³), летний в июле (концентрация хлорофилла «а» достигает $4,8 \pm 0,8$ мг/м³) и третий годовой пик в сентябре (концентрация хлорофилла «а» составляет $3,2 \pm 0,3$ мг/м³). Такой трехвершинный тип сезонной сукцессии фитопланктона характерен для мезотрофных водоемов умеренной зоны.

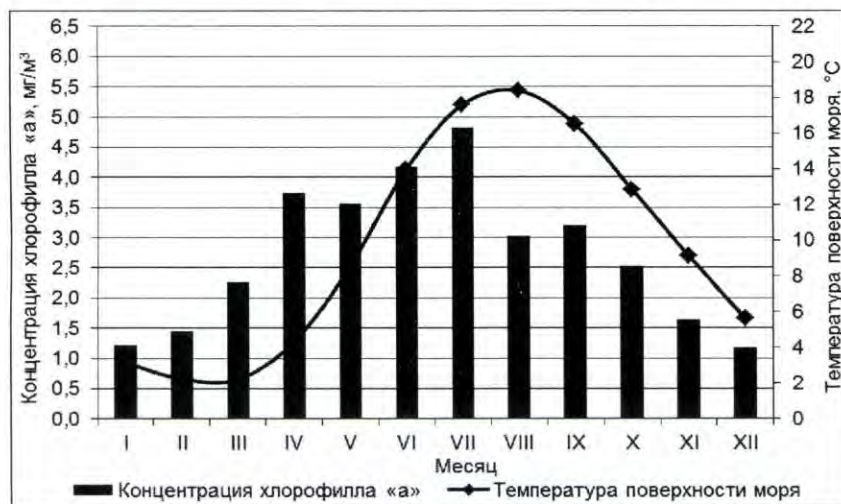


Рисунок 5 – Распределение среднемесячных значений концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря за 2003-2012 гг.

Годовой ход концентрации хлорофилла «а», полученный по спутниковым данным MODIS, полностью согласуется с классической картиной сезонной динамики биомассы фитопланктона в Балтийском море и отражает стадии годовой сукцессии видового состава водорослей: первый, весенний максимум в развитии фитопланктона, наблюдается в апреле и связан с «цветением» диатомовых водорослей; второй, летний максимум в июле, обусловлен массовым развитием сине-зеленых водорослей; третий годовой максимум в сентябре формируется обильной вегетацией диатомовых водорослей.

Межгодовая изменчивость. В распределении среднегодовых значений концентрации хлорофилла «а» выделяются два года с максимальными значениями - 2008 и 2010 гг. (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Среднегодовые значения концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря в 2003-2012 гг.

Межгодовой максимум концентрации хлорофилла «а» 2008 года определялся ранним прогревом поверхности воды весной и сгоном высокоэвтрофных вод с Восточного Готландского бассейна, а максимум 2010 года обусловлен наибольшими среднедекадными значениями температуры поверхности моря.

Пространственное распределение. В пространственном распределении концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря выявлен циркумконтинентальный тип зональности. Средние многолетние значения концентрации хлорофилла «а» за период 2003-2012 гг. имеют максимум (6 мг/м^3) в 2 км от побережья до глубин 20 м, уменьшаются по мере удаления от берега, достигая минимума на расстоянии более 100 км от берега на глубинах более 75 м, где концентрации хлорофилла «а» в 1,5-2 раза ниже прибрежных значений и в среднем составляют $2,3 \text{ мг/м}^3$ (Рисунок 7).

Повышенные концентрации хлорофилла «а» ($> 4 \text{ мг/м}^3$) как в отдельные сезоны, так и в среднем за 10 лет, наблюдаются в прибрежной зоне вдоль северного побережья Самбийского полуострова, Куршской косы, особенно в северной части косы, где источниками вод с высокими концентрациями хлорофилла «а» являются реки Неман и Дейма, впадающие в гиперэвтрофный Куршский залив, затем через Клайпедский канал попадающие в открытую часть моря. Максимальные концентрации хлорофилла «а» также отмечаются в Гданьском заливе, куда впадает самая крупная река Юго-Восточной Балтики – Висла, и поступают воды из высокопродуктивного Калининградского (Вислинского) залива через Балтийский пролив (Рисунок 7).

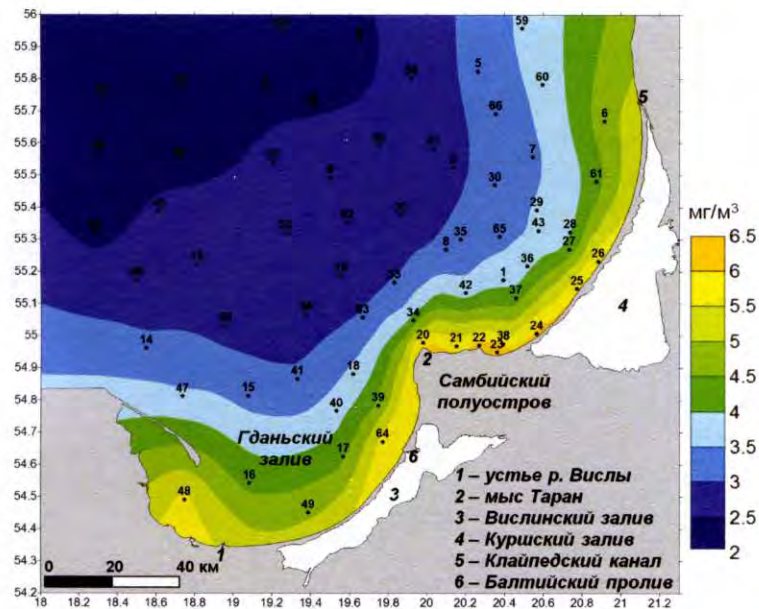


Рисунок 7 – Пространственное распределение средних многолетних значений концентрации хлорофилла «а» за 2003-2012 гг.

Тенденции развития эвтрофикации. За десятилетний период наблюдений (2003-2012 гг.) по спутниковым данным MODIS отмечена положительная тенденция роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря. В среднем по станциям ежегодно концентрация хлорофилла «а» увеличивается на $0,09 \pm 0,04$ мг/м³. Прирост за десятилетний период наблюдений составил $0,9 \pm 0,4$ мг/м³ (Рисунок 8).

В сезонном аспекте (рассматриваются биологические сезоны по Wasmund, Uhling, 2003) отмечено относительно равномерное увеличение концентрации хлорофилла «а» во все периоды. Осенью значение тренда максимально и составляет $1,0 \pm 0,6$ мг/м³/10 лет, весной $0,8 \pm 0,5$ мг/м³/10 лет, зимой $0,6 \pm 0,5$ мг/м³/10 лет. Наименьшее значение линейного тренда характерно для летнего периода ($0,4 \pm 0,6$ мг/м³/10 лет).

Равномерное увеличение концентрации хлорофилла «а» во все сезоны года дает основание прогнозировать дальнейшее развитие процесса эвтрофикации в Юго-Восточной Балтике.

В пространственном отношении помимо прибрежной зоны с наиболее высокими средними многолетними значениями концентрации хлорофилла «а» выявлена тенденция роста данного параметра в открытых удаленных от берега водах Юго-Восточной Балтики, для которых характерны минимальные концентрации хлорофилла «а» (станции 3, 11, 45, 51, 57).

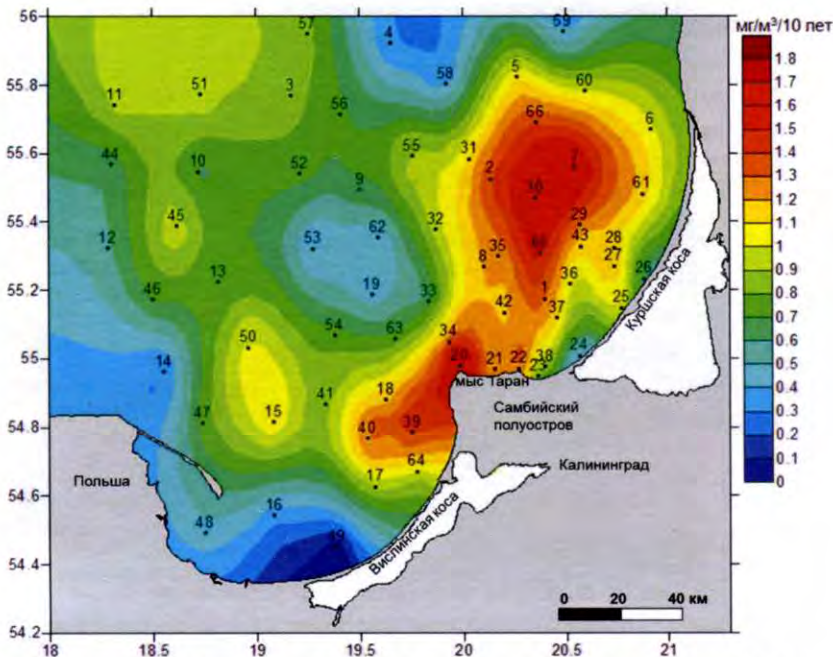


Рисунок 8 – Пространственное распределение значений линейных трендов концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным MODIS за 2003-2012 гг.

Результаты сопоставления средних многолетних значений концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря показывают высокую степень корреляции: квадрат коэффициента корреляции $R^2 = 0,8$, что подтверждает тесную связь изменения концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря в регионе. В сезонном аспекте прослеживается соответствие тенденций роста концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря, при которых максимальный рост приходится на весну и осень, а минимальный наблюдается летом.

Уровень эвтрофирования и качество вод. Оценка уровня эвтрофирования Юго-Восточной Балтики выполнена на основе классификации вод, принятой учеными стран Балтийского моря (Wasmund et al., 2001). Качество вод района исследования определено согласно классификации Vuoristo, 1998. Данные классификации являются обобщенными, утверждены и используются странами HELCOM для мониторинга экологического состояния Балтийского моря, основаны на данных по среднегодовой концентрации хлорофилла «а». Районирование акватории Юго-Восточной Балтики проведено на основе среднегодовых значений концентрации хлорофилла «а», рассчитанных региональным алгоритмом (уравнение 2) по спутниковым данным MODIS-Aqua и Terra.

Воды Юго-Восточной Балтики делятся на мезотрофные (концентрация хлорофилла «а» составляет $0,8-4 \text{ мг/м}^3$) в открытой части и эвтрофные (концентрация хлорофилла «а» $4-10 \text{ мг/м}^3$) в прибрежной зоне (Рисунок 9). Среднее многолетнее положение границы между мезотрофными и эвтрофными водами находится на удалении $\sim 30 \text{ км}$ от берега до изобаты 80 метров в юго-западной части акватории (Гданьский залив, вдоль побережья Вислинской косы) и в $15-25 \text{ м}$ от берега (до изобат $25-50 \text{ м}$) в восточной части вдоль северного побережья Самбийского полуострова и побережья Куршской косы.

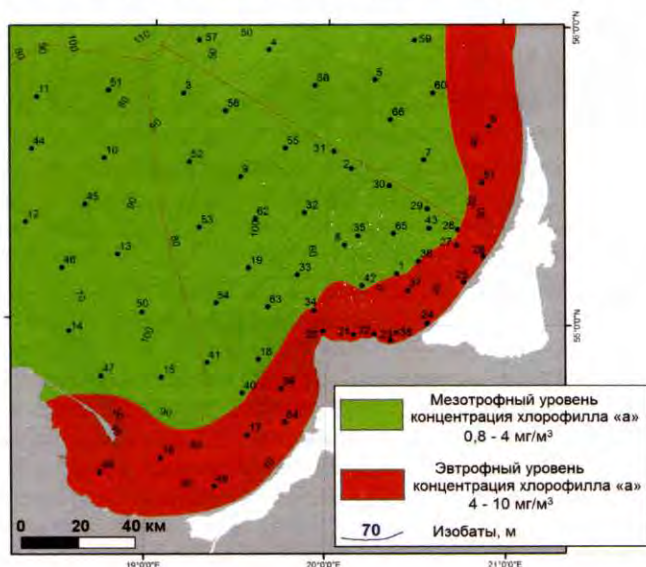


Рисунок 9 – Средний многолетний уровень эвтрофирования Юго-Восточной Балтики за 2003-2012 гг.

В целях выявления тенденций процесса эвтрофикации и закономерностей ее межгодовой изменчивости в Юго-Восточной Балтике рассчитаны площади распространения вод различного уровня эвтрофирования за каждый год. За период наблюдений (2003-2012 гг.) средняя многолетняя площадь эвтрофных вод в акватории составила 29 %, а мезотрофных – 71 %. Ежегодное увеличение площади эвтрофных вод составляет 1,5 % за счет сокращения площади мезотрофных вод. Однако, коэффициенты корреляции линейных трендов ничтожно малы (Рисунок 10).

В Юго-Восточной Балтике обнаружены воды трех классов качества: I класс (отличное качество, концентрация хлорофилла «а» менее 2 мг/м^3); II класс (хорошее качество, концентрация хлорофилла «а» составляет $2-4 \text{ мг/м}^3$); III класс (удовлетворительное качество, концентрация хлорофилла «а» $4-12 \text{ мг/м}^3$).

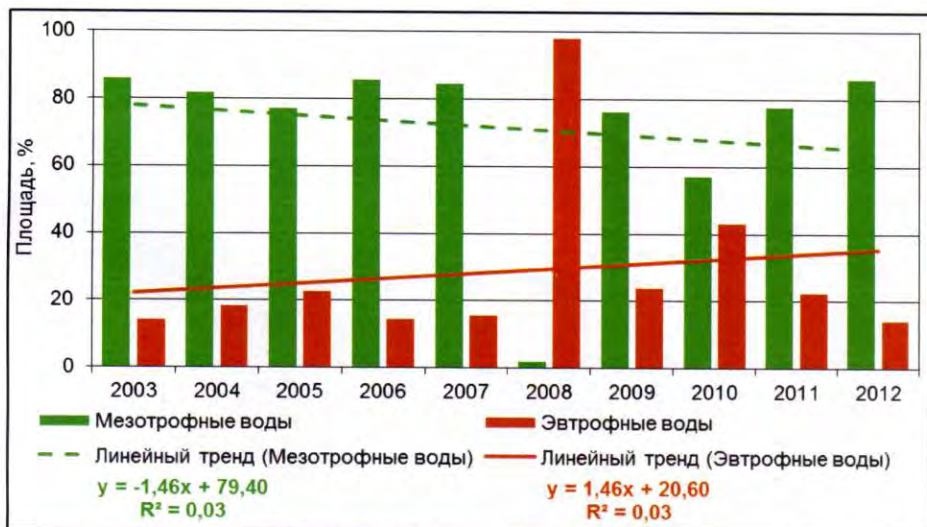


Рисунок 10 – Линейные тренды изменения площадей вод различного уровня трофности

За весь период наблюдений средняя многолетняя площадь вод I класса составляет 11 % акватории Юго-Восточной Балтики, II класса – 60 %, III класса – 29 %. Ежегодное изменение площади вод II класса не зафиксировано, в то время как площадь вод III класса увеличивается на 1,5 % за счет сокращения вод I класса качества (Рисунок 11).

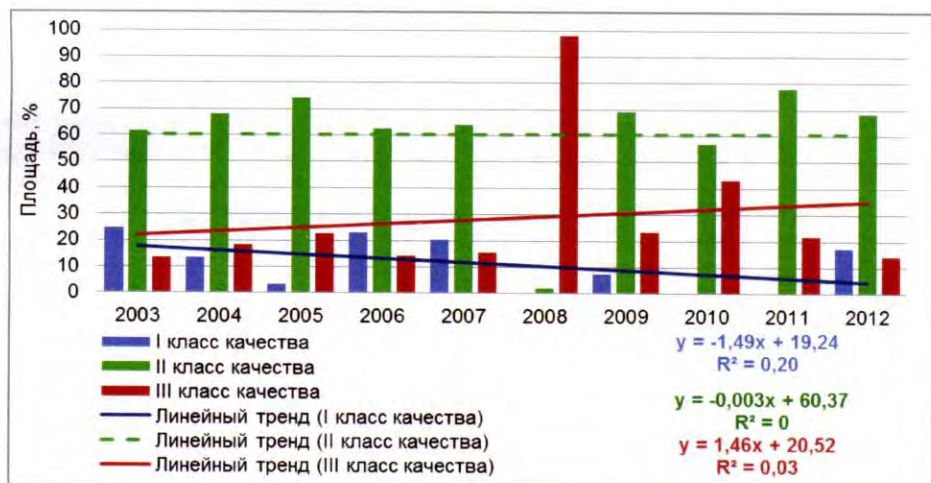


Рисунок 11 – Линейные тренды изменения площадей вод различного качества

Для российского сектора характерны общие тенденции процесса эвтрофирования в регионе Юго-Восточной Балтики, описанные выше. За 2003-2012 гг. средняя многолетняя площадь чистых вод I класса качества составила 6 %, мезотрофных (II класса качества) – 62 %, эвтрофных вод (III класса качества) – 32 %. В данной акватории происходит ежегодное увеличение площади эвтрофных вод на 2 %. Наличие вод I класса качества нерегулярно наблюдается в 5-ти из 10 лет наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Сопоставление спутниковых и натуральных значений концентрации хлорофилла «а» показало, что стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным демонстрируют очень слабую корреляцию или ее полное отсутствие с данными натуральных измерений, а также систематическое завышение значений данного параметра в юго-восточной части Балтийского моря.

2. Модифицированный автором региональный алгоритм обработки спутниковых данных MODIS обеспечивает наибольшую точность расчета концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря по сравнению со стандартными алгоритмами. Стандартное отклонение составляет $1,2 \text{ мг/м}^3$, относительная ошибка 34 %. Несмотря на невысокий коэффициент корреляции, относительная ошибка расчета по предложенному региональному алгоритму ниже, чем у существующих.

3. Анализ спутниковых данных MODIS-Aqua/Terra, рассчитанных региональным алгоритмом позволил выявить следующие закономерности в характере сезонной изменчивости концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря:

- распределение концентрации хлорофилла «а» носит ярко выраженный сезонный характер и имеет три отчетливых максимума: в апреле (концентрация хлорофилла «а» равна $3,7 \pm 0,9 \text{ мг/м}^3$), июле (концентрация хлорофилла «а» достигает $4,8 \pm 0,8 \text{ мг/м}^3$) и сентябре (концентрация хлорофилла «а» составляет $3,2 \pm 0,3 \text{ мг/м}^3$).

- в среднем за период исследований 2003-2012 гг. концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое зимой составляет $1,4 \pm 0,3 \text{ мг/м}^3$, весной $3,2 \pm 0,6 \text{ мг/м}^3$, летом $3,8 \pm 0,4 \text{ мг/м}^3$, осенью $1,9 \pm 0,4 \text{ мг/м}^3$. Средние значения концентрации хлорофилла «а» в весенний и летний периоды в 2 раза выше наблюдаемых осенью и зимой.

4. Годовой ход концентрации хлорофилла «а», полученный по спутниковым данным MODIS, полностью согласуется с классической картиной сезонной динамики биомассы фитопланктона в Балтийском море, а также отражает стадии годовой сукцессии видового состава водорослей: первый, весенний макси-

мум в развитии фитопланктона, наблюдается в конце марта – апреле и связан с «цветением» диатомовых водорослей; второй, летний максимум в июле – августе обусловлен массовым развитием цианобактерий; третий, осенний максимум в сентябре, вызван обильной вегетацией диатомовых водорослей.

5. Выявлена значительная межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла «а». Максимальные среднегодовые значения отмечены в 2008 ($4,67 \pm 0,80 \text{ мг/м}^3$) и 2010 гг. ($4,69 \pm 1,51 \text{ мг/м}^3$). В 2008 году зафиксирован сгон высокоэвтрофных вод с восточной части Готландского бассейна, определивший общее повышение концентрации хлорофилла «а» за год, а максимум концентрации хлорофилла «а» 2010 года обусловлен максимальными среднегодовыми значениями температуры поверхности моря.

6. В пространственном распределении концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря выявлен циркумконтинентальный тип зональности. Средние многолетние значения концентрации хлорофилла «а» за период 2003-2012 гг. имеют максимум (6 мг/м^3) в 2 км от побережья до глубин 20 м, уменьшаются по мере удаления от берега, достигая минимума на расстоянии более 100 км от берега на глубинах более 75 м, где концентрации хлорофилла «а» в 1,5-2 раза ниже прибрежных значений.

7. Влияние на распределение концентрации хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря оказывают три основных источника выноса высокопродуктивных вод: устье реки Вислы в Гданьском заливе, Клайпедский канал, несущий воды гиперэвтрофного Куршского залива и Балтийский пролив, через который поступают воды Калининградского (Вислинского) залива.

8. Положительная тенденция роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря составляет $0,9 \pm 0,4 \text{ мг/м}^3$ за декаду (2003-2012 гг.), что связано с равномерным увеличением концентрации хлорофилла «а» во все сезоны года в условиях роста температуры поверхности моря.

9. За 2003-2012 гг. средняя многолетняя площадь эвтрофных вод в акватории юго-восточной части Балтийского моря составляет 29 %, мезотрофных – 71 %. Ежегодное увеличение площади эвтрофных вод составляет 1,5 %. Для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря характерно увеличение площади эвтрофных вод на 2 % за год, их средняя многолетняя площадь составляет 32 %, площадь вод мезотрофного уровня – 68 %.

10. Средняя многолетняя площадь вод I класса качества в акватории юго-восточной части Балтийского моря составила 11 %, II класса (воды мезотрофного уровня) – 60 %, III класса (эвтрофный уровень) – 29 %. Ежегодное увеличение площади вод III класса качества в акватории юго-восточной части Балтийского моря составляет 1,5 %, что происходит за счет сокращения площади вод I класса качества.

Для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря средняя многолетняя площадь вод I класса качества составила 6 % (на 5 % меньше, чем в целом по акватории Юго-Восточной Балтики), мезотрофных – 62 %, эвтроф-

ных вод – 32 % (на 3 % больше, чем в Юго-Восточной Балтике). В данной акватории происходит ежегодное увеличение площади эвтрофных вод на 2 % за счет сокращения площади мезотрофных. Изменение площади вод I класса качества не выявлено.

Модифицированный автором региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным MODIS может применяться при комплексном мониторинге экологического состояния юго-восточной части Балтийского моря. Перспективы представленного исследования заключаются во внедрении разработанного метода определения концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте моря в комплексное изучение всех показателей эвтрофирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Буканова Т. В.**, Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Александров С.В. Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета для вод Юго-Восточной Балтики // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 70-79.

2. **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 исследования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 64-73.

Публикации в других изданиях:

3. Bulycheva E., Stont Z., **Bukanova T.** Variations of sea surface temperature and ice conditions in the South-Eastern Baltic over the last decade // Baltic International Symposium (BALTIC), 2014 IEEE/OES, 27-29 May, Tallinn. IEEE. 2014. P. 1-10.

4. **Bukanova T.**, Stont Z., Goushchin O. Sea surface temperature trends in the South-eastern Baltic from satellite data. Proceedings of BSSC 9th Baltic Sea Science Congress: New Horizons for Baltic Sea Science.: Coastal Research and Planning Institute of Klaipeda University. 2013. P. 145.

5. **Bukanova T.V.**, Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V., Aleksandrov S.V. Development of regional bio-optical algorithms of satellite data for the South-Eastern Baltic // Proceedings of 2012 IEEE/OES Baltic International Symposium. 2012. P. 1-5.

6. Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Rybakova I.V., **Bukanova T.V.** Comparison between the data products derived from satellite ocean color

sensors MERIS and MODIS-AQUA // Abstract book of Sentinel-3 OLCI/SLSTR and MERIS/(A)ATSR workshop. 2012. P. 86.

7. Александров С.В., **Буканова Т.В.**, Кудрявцева Е.А. Использование дистанционных и судовых измерений для оценки биологической продуктивности Балтийского моря // Материалы XV конференции по промысловой океанологии, посвященной 150-летию со дня рождения академика Н.М. Книповича. 2011. С. 33-37.

8. **Bukanova T.V.**, Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Grigoriev A.V., Khrapko A.N., Sheberstov S.V., Aleksandrov S.V. Development of regional bio-optical algorithms for processing satellite ocean color data for the South-Eastern Baltic // Proceedings of VI International Conference «Current problems in optics of natural waters» (ONW'2011). Saint-Petersburg. Nauka of RAS, 2011. P. 136-140.

9. **Bukanova T.**, Vazyulya S., Kopelevich O., Burenkov V., Grigoriev A., Sheberstov S., Khrapko A., Aleksandrov S. Regional bio-optical algorithms for retrieval of CHL and TSM concentrations from satellite ocean color data in the South-Eastern Baltic // Proceedings of 8th Baltic Sea Science Congress. 2011. P. 341.

10. **Буканова Т.В.**, Вазюля С.В., Копелевич О.В., Буренков В.И., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета. // Материалы конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований РАН, Москва. 2010. С. 219.

11. **Bukanova T.V.**, Stont J.I. Use of satellite data in the ecological monitoring of the South-Eastern Baltic // Proceedings of the 2nd Baltic Green Belt Forum. Towards sustainable development of the Baltic Sea coast. 2010. P. 235-239.

12. Александров С.В., Кудрявцева Е.А., **Буканова Т.В.** Использование спутниковых и судовых измерений хлорофилла и первичной продукции для оценки экологического состояния и биологической продуктивности Балтийского моря // Ученые записки русского географического общества. 2008. Т. 7. Ч. 1. АВ1–АВ10 (CD–ROM версия).