ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Букановой Татьяны Васильевны

«ТЕНДЕНЦИИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук

по специальности 25.00.28 – океанология

В соответствии с результатами, полученными в ходе выполнения работ по программе HELCOM «Год Финского Залива – 2014», основными антропогенными факторами, оказывающими стрессовое воздействие на экосистему Балтийского моря, признаны эвтрофирование, дреджинг и выбросы в воздушную среду от морского транспорта. Эвтрофирование занимает в этом списке первое место, что обуславливает необходимость мониторинга показателей степени эвтрофированности морской среды с целью выявления существующих тенденций и прогнозирования будущего состояния экосистемы. При этом работы и наблюдения такого рода, выполненные в разных суб-регионах Балтики, могут существенно различаться результатами, так как концентрация хлорофилла «а» неодинакова в различных районах моря и зависит от условий среды.

Диссертационная работа Татьяны Васильевны Букановой «Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным» посвящена изучению именно этого, наиболее остро стоящего вопроса. В условиях продолжающегося эвтрофирования Балтики **актуальность данной работы несомненна**. Юго-Восточная Балтика - один их наиболее эвтрофированных районов Балтийского моря, что требует постоянного мониторинга и выявления тенденций изменения основных показателей эвтрофикации, прежде всего - концентрации хлорофилла «а».

Основная **цель исследования** - оценка уровня эвтрофикации и выявление тенденций её развития в открытой части Юго-Восточной Балтики по спутниковым данным о концентрации хлорофилла «а». Использование спутниковой информации оптического диапазона для расчета концентрации хлорофилла «а» является общепринятым и эффективным методом мониторинга эвтрофикации в морях. Концентрация хлорофилла «а» - единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой может быть изучена с помощью спутниковой информации в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.

Для достижения поставленной цели автором решались следующие **задачи**.

1. Верифицировать существующие спутниковые алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по данным судовых измерений.

2. Разработать региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а» для Юго-Восточной Балтики.

3. Провести анализ сезонной и межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла «а» по разработанному алгоритму.

4. Оценить уровень эвтрофирования и качество вод Юго-Восточной Балтики на основе спутниковых данных по концентрации хлорофилла «а».

5. Выявить тенденции развития эвтрофикации за период с 2003 по 2012 гг.

Решение поставленных задач описывается автором последовательно в трех главах диссертации.

В **Главе 1** – «ПРОБЛЕМА ЭВТРОФИКАЦИИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ: ОСОБЕННОСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ» - автор достаточно подробно рассматривает основные показатели эвтрофикации, уровень эвтрофирования Балтийского моря, а также методы дистанционного зондирования, применяемые в изучении эвтрофикации. Как следует из Главы 1, концентрация хлорофилла «а» в различных районах моря колеблется в зависимости от температуры воды и наличия биогенных элементов. При изложении материала автор успешно применяет междисциплинарный подход, демонстрируя хорошее знакомство с методами и технологиями гидробиологических и оптических исследований. Глава написана с учетом новейших данных, полученных для региона Балтийского моря, и блестяще проиллюстрирована.

Поскольку стандартные методики расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным разработаны для открытого океана и дают большие ошибки в прибрежных районах морей, автором обоснована необходимость разработки регионального алгоритма для района исследования.

Глава 2 - «РАЗРАБОТКА РЕГИОНАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ» - посвящена «регионализации» стандартной методики. Основные проблемы, которые приходится решать автору – это, во-первых, «маскирование» хлорофилла «а» в высокопродуктивных и мутных прибрежных водах взвешенным неорганическим и растворенным органическим веществом, а во-вторых - дефицит судовых наблюдений в исследуемой акватории. Использованный автором подход позволяет успешно преодолеть данные затруднения.

Именно в этой главе подробно излагаются методы исследований, обработки и анализа материала. Материал, положенный в основу исследования, представляется вполне добротным и адекватным по объему. Статистический анализ данных выполнен автором с использованием корректных методик. В результате проведенной верификации стандартных алгоритмов обработки спутниковых данных для расчета концентрации хлорофилла «а» и выполненной коррекции существующих алгоритмов автору удалось создать региональные алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла «а» для юго-восточной части Балтийского моря; то есть «регионализация» стандартной методики проведена успешно.

Выполненная коррекция существующих алгоритмов применительно к юго-восточной части Балтийского моря позволила создать для расчета концентрации хлорофилла «а» следующие эмпирические алгоритмы:

- для оценки концентрации хлорофилла «а» по данным спектрорадиометра MERIS создан региональный алгоритм на основе коррекции стандартного алгоритма MERIS Algal2 (нейронные сети), стандартное отклонение 1,7 мг/м^3;
- для оценки концентрации хлорофилла «а» по данным MODIS рекомендовано использовать алгоритм DESAMBEM (ИО ПАН), разработанный для южной части Балтийского моря, с модификацией по приводимому в диссертации уравнению (новый алгоритм для данных MODIS показывает наименьшее стандартное отклонение 1,2 мг/м^3);

Несмотря на невысокие коэффициенты корреляции, относительные ошибки расчета по разработанным региональным алгоритмам оказались ниже, чем у существующих:

- новый региональный алгоритм для данных MERIS имеет погрешность измерения концентрации хлорофилла «а» 42 %, стандартный алгоритм Algal Pigment Index II – 56 %;
- для данных MODIS новый региональный алгоритм имеет погрешность 34 %, алгоритм DESAMBEM – 52 %;

Основные результаты Главы 2 могут быть сформулированы следующим образом.

1. Существующие стандартные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным демонстрируют очень слабую корреляцию с данными натурных измерений, или даже ее полное отсутствие, и показывают систематическое завышение значений данных параметров в юго-восточной части Балтийского моря.

2. Разработанные (модифицированные) региональные алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла «а» на основе коррекции стандартного алгоритма Algal Pigment Index II для данных MERIS и польского алгоритма DESAMBEM для данных MODIS обеспечивают наибольшую точность расчета концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря.

3. На основе проведенных натурных измерений спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения посредством плавающего спектрорадиометра разработан региональный алгоритм атмосферной коррекции данных спутниковых спектрорадиометров MODIS и MERIS. Выполненная региональная коррекция спутниковых коэффициентов

яркости моря показала лучшие результаты в коротковолновой области спектра по сравнению со стандартными спутниковыми алгоритмами.

4. В целях исследования пространственного распределения и временной изменчивости концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря рекомендуется использовать предложенные региональные алгоритмы обработки спутниковых данных MODIS и MERIS.

Глава 2 так же хорошо проиллюстрирована, как и Глава 1, причем для ряда экспериментов приведена фотодокументация.

В **Главе 3** – «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭВТРОФИКАЦИИ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ» - на основе разработанного алгоритма расчета концентрации хлорофилла «а» диссертант дает оценку временной изменчивости и пространственного распределения концентрации хлорофилла «а», анализирует тенденции изменения данного параметра, проводит районирование акватории Юго-Восточной Балтики по уровню трофности и качеству вод, а также выявляет тенденции их изменения.

Анализ спутниковых данных MODIS-Aqua/Terra, рассчитанных региональным алгоритмом, позволил автору 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 (3,7 ± 0,9 мг/м^3), июле (4,8 ± 0,8 мг/м^3) и сентябре (3,2 ± 0,3 мг/м^3);

- концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое зимой составляет 1,4 ± 0,3 мг/м^3, весной 3,2 ± 0,6 мг/м^3, летом 3,8 ± 0,4 мг/м^3, осенью 1,9 ± 0,4 мг/м^3 (средние значения концентрации хлорофилла «а» в весенний и летний периоды в два раза выше наблюдаемых осенью и зимой).

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 максимум 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.

Автором выявлена значительная межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла «а». Максимальные среднегодовые значения отмечены в 2008 (4,67 ± 0,80 мг/м^3) и 2010 гг. (4,69 ± 1,51 мг/м^3). В 2008 г. зафиксирован сгон высокоэвтрофных вод с восточной части Готландского бассейна, определивший общее повышение концентрации хлорофилла «а» за год, а максимум концентрации хлорофилла «а» 2010 г. обусловлен максимальными

среднегодовыми значениями температуры поверхности моря.

В пространственном распределении концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря автором выявлен циркумконтинентальной 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 и 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.

Автору удалось показать, что преобладающее 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 и Балтийский пролив.

Положительную тенденцию роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря, составляющую 0,9 ± 0,4 мг/м^3 за декаду (2003-2012 гг.), автор связывает с равномерным увеличением концентрации хлорофилла «а» во все сезоны года в условиях роста температуры поверхности моря.

Чрезвычайно интересны результаты сопоставления уровня эвтрофирования и качества морских вод. За 2003-2012 гг. средняя многолетняя площадь эвтрофных вод в акватории юго-восточной части Балтийского моря составила 29 %, мезотрофных – 71 %. Ежегодное увеличение площади эвтрофных вод составило 1,5 %. Для российского сектора юго-восточной части Балтийского моря характерно увеличение площади эвтрофных вод на 2 % за год, при этом их средняя многолетняя площадь составляет 32 %, а площадь вод мезотрофного уровня – 68 %. 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 составило 1,5 % (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 %, эвтрофных вод – 32 % (на 3 % больше, чем в целом по Юго-Восточной Балтике). В данной акватории происходит ежегодное увеличение площади эвтрофных вод на 2 % за счет сокращения площади мезотрофных вод. Изменения площади вод I класса качества не выявлено.

Каждый из результатов, приводимых и обсуждаемых в Главе 3, эффектно проиллюстрирован наглядными и легко читаемыми картосхемами.

В целом содержание диссертации убеждает в том, что предложенный автором метод расчета концентрации хлорофилла «а» позволил существенно дополнить информацию об

уровне эвтрофирования Юго-Восточной Балтики, преодолев существовавшие методические и информационные трудности. «Регионализация» стандартных алгоритмов и их «привязка» к условиям Юго-Восточной Балтики предоставляют возможность оперативно и своевременно определять концентрацию хлорофилла «а» - как в широких пространственных масштабах, так и в определенных локальных участках.

Таким образом, работа имеет важное **практическое значение** для целей экологического мониторинга и оценки биологической продуктивности района. Результаты исследования могут быть использованы российскими рыбохозяйственными организациями с целью проведения мониторинга продуктивности морских экосистем, определения биомассы фитопланктона, уровня трофности, состояния и качества вод Юго-Восточной Балтики, в частности - ее российского сектора, а также оценки тенденций изменения этих показателей. Кроме того, работа имеет важное международное приложение, поскольку район исследований граничит с водами стран Европейского союза.

Работа характеризуется высокой степенью **научной новизны.**

1. В юго-восточной части Балтийского моря впервые проведены подспутниковые эксперименты, которые позволили сопоставить спутниковые и натурные значения концентрации хлорофилла «а», рассчитать ошибки стандартных алгоритмов и атмосферной коррекции спутниковых данных.

1. Безусловно новым является разработанный диссертантом региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла «а», обеспечивающий наиболее точную оценку данного параметра в Юго-Восточной Балтике.

2. Данные по концентрации хлорофилла «а» в районе исследования уточнены и существенно дополнены.

3. Установлена положительная тенденция роста концентрации хлорофилла «а» в поверхностном горизонте юго-восточной части Балтийского моря, составляющая 0,9 ± 0,4 мг/м^3 за 2003-2012 гг.

4. Выявлен рост уровня эвтрофирования и ухудшение качества вод в районе исследования (за 2003-2012 гг.).

Все выводы диссертации являются новыми, полностью обоснованными ее содержанием и хорошо проиллюстрированы. В диссертации решены все поставленные задачи; сформулированная автором цель представляется достигнутой.

Вынесенные на защиту положения характеризуются новизной и достоверностью.

Приведенные в диссертации и автореферате линейные тренды изменения площадей вод различного уровня трофности и различного качества являются важным научным вкладом в результаты программы HELCOM «Год Финского Залива – 2014».

В структурном отношении диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа 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. Подобная структура представляется близкой к оптимальной.

Структура и содержание автореферата адекватно отражает таковые рукописи диссертации.

Результаты исследования опубликованы автором в небольшом количестве работ (всего 2 статьи в рецензируемом издании), однако были представлены на многих рейтинговых международных и всероссийских конференциях.

Список использованной литературы содержит более половины иностранных источников, что подчеркивает актуальность и современный научно-методический уровень исследования.

Вопросы и замечания по диссертации.

1. В Главе 1 приведен обзор исследований проблемы эвтрофирования Балтийского моря. Дано подробное описание пространственного распределения, сезонной и межгодовой изменчивости основных показателей эвтрофикации – биомассы фитопланктона и концентрации хлорофилла «а». Автор, однако, уделяет недостаточно внимания другим важным индикаторам – таким, как концентрация биогенных элементов (азота и фосфора), скорость первичной продукции органического вещества, содержание кислорода и прозрачность. В разделах 1.2.1 и 1.2.2 приведены разновременные и разноплановые, нередко противоречащие друг другу оценки известных исследователей, касающиеся трендов концентрации хлорофилла «а» и биомассы цианобактерий в Балтийском море. В этой связи вывод автора о том, что большая часть акватории Балтийского моря подвержена эвтрофикации, а наиболее высокий уровень эвтрофирования характерен для всего побережья Гданьского бассейна в юго-восточной части моря, представляется не более чем «экспертным заключением».

2. По всему тексту диссертации и автореферата автор употребляет термины «эвтрофикация» и «эвтрофирование» как синонимы. Делают ли между этими терминами различия современные международные методические указания?

3. Не понятно, почему автор не тестирует (не верифицирует) алгоритмы, существующие для данных спутникового сенсора SeaWIFS - ведь именно они являются наиболее востребованными и широко используемыми для расчёта концентрации хлорофилла «а».

4. В автореферате (стр. 4) автор утверждает, что рост уровня эвтрофирования и ухудшение качества вод в районе исследования может привести к изменению структуры экосистемы, однако нигде не поясняет, что понимает под таковой. Никакие структурные характеристики исследуемых экосистем в работе не рассматриваются.

5. Автор утверждает, что межгодовой максимум концентрации хлорофилла «а» 2008 г. определялся ранним прогревом поверхности воды весной и сгоном высокоэвтрофных вод с Восточного Готландского бассейна. Следовало бы привести статистику таких ситуаций за период исследований. Был ли это единичный случай сгона высокоэвтрофных вод, приходящийся именно на апрель-май 2008 г.?

6. Второй межгодовой максимум концентрации хлорофилла «а» наблюдался в 2010 г. По мнению автора, он обусловлен наибольшими среднедекадными значениями температуры поверхности моря. Однако, согласно Таблице 15 рукописи диссертации средняя за декаду температура поверхности моря в 2010 г. составила 12,5 ± 0,7 °С, что равно показателю 2006 г. (12,3 ± 0,6 °С). В свою очередь, в 2006 г. отмечена минимальная среднегодовая концентрация хлорофилла «а» (рис. 40 диссертации), что ставит под сомнение вышеуказанный вывод.

7. Эффекты сгона высокоэвтрофных вод (2008) и максимальных среднегодовых значений температуры поверхности моря (2010) хорошо отображены на рисунках 53 и 55 диссертации, 10 и 11 автореферата; однако в автореферате причины максимумов 2008 и 2010 гг. никак не обсуждаются.

8. В работе установлено, что ежегодно концентрации хлорофилла «а» в Юго-Восточной Балтике увеличивается на 0,09 ± 0,04 мг/м^3. Хотелось бы получить пояснения, какое принципиальное значение имеет эта цифра для оценки эвтрофикации. Насколько это критично, или такой прирост можно признать ничтожным?

9. Показанные на рис. 19 рукописи диссертации станции подспутникового эксперимента №№ 4, 5 и 6 расположены далеко за пределами района исследования, для которого разрабатывались региональные алгоритмы.

10. Не ясно, каким образом применялись автором данные по температуре поверхности моря и солености, приведенные в таблице 6.

11. В литературном обзоре не упоминаются работы петербургской школы изучения эвтрофирования (см. Frumin G.T.: Total Phosphorus Distribution over the Baltic Sea Sub-regions // Russina Journal of General Chemistry, 2013, vol. 83, N 13, pp. 2647 – 2650).

Сделанные замечания и поставленные вопросы не являются принципиальными и не снижают общего благоприятного впечатления от диссертационной работы. Их можно

рассматривать в качестве рекомендаций диссертанту для продолжения дальнейшей научной деятельности.

Заключение официального оппонента. Диссертационная работа Т.В. Букановой «Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным» - законченная научно-квалификационная работа, содержащая новые сведения о тенденциях эвтрофирования Юго-Восточной Балтики на основе разработанного автором алгоритма расчёта концентрации хлорофилла «а». Выводы, полученные автором на основе тщательной и разносторонней обработки и анализа материалов натурных и спутниковых наблюдений современными методами математической статистики и технологий ГИС, имеют важное значение в теоретическом и практическом отношении.

Содержание диссертации (включая иллюстративный материал) целесообразно использовать в учебных курсах по проблемам прикладной океанологии и антропогенного воздействия на морские экосистемы.

Работа полностью соответствует критериям внутреннего единства, новизны результатов, взаимосвязанности и обоснованности выводов, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, а её автор – Татьяна Васильевна Буканова - заслуживает присуждения степени кандидата географических наук по специальности 25.00.28 – океанология.

Официальный оппонент
кандидат биологических наук,
доктор географических наук,
профессор, заведующий кафедрой Экологии
ФГБОУ ВПО «Российский государственный
гидрометеорологический университет»
Почтовый адрес: 195027, г. Санкт-Петербург,
проспект Металлистов, дом 3
Телефон: +7(812)372-50-87, e-mail: Shilin@rshu.ru

Михаил Борисович Шилин

17 ноября 2014 года

Подпись М.Б. Шилина удостоверяю.
Ученый секретарь Г.М. Веретенникова