

ОТЗЫВ  
официального оппонента  
на диссертационную работу  
Папковой Анны Станиславовны  
«Учёт влияния пылевого аэрозоля на восстановление спектрального коэффициента  
яркости Черного моря по спутниковым данным»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.6.17 – Океанология

Представленная к защите работа представляет несомненный научный и практический интерес, поскольку разработанные методы позволяют корректно определять спектральные коэффициенты яркости моря, измеренные со спутников при наличии поглощающего аэрозоля в атмосфере. Это расширяет возможности пассивного оптического спутникового зондирования в морских районах, над которыми регулярно переносится пылевой или любой другой поглощающий свет атмосферный аэрозоль.

Во-первых, увеличивается точность определения коэффициентов яркости моря в видимом спектральном диапазоне, а следовательно, и тех характеристик, которые из них рассчитываются, такие, например, как: концентрация хлорофилла-а, содержание окрашенных растворенных органических веществ и взвешенных веществ в морской воде. Во-вторых, более корректно разделяется вклад атмосферы и водной толщи в формируемое общее излучение, которое регистрируется спутниковыми радиометрами, что позволяет увеличить точность определения аэрозольной оптической толщины и показателя Ангстрема. Таким образом увеличивается пространственное и временное покрытие «качественными» спутниковыми данными, когда не приходится их отбраковывать по критериям качества восстановления гидрооптических или атмосферных характеристик.

Все вместе это как увеличивает корректность интерпретации спутниковых изображений при решении практически любых атмосферных и океанологических задач, так и существенно расширяет возможности по проведению тех исследований, где требуется одновременный анализ оптически-активных компонентов атмосферы и гидросферы, например при исследовании влияния атмосферного аэрозоля на функционирование фитопланктонных сообществ. Это подчеркивает научную важность представленной к защите работы.

Полученные результаты являются новыми и до сих пор нет аналогов подобных процедур, которые были бы включены в алгоритмы стандартной обработки спутниковых данных по цвету моря любыми мировыми космическими агентствами. Представленные в работе алгоритмы и методы разработаны для акватории Черного моря, но подобные подходы к их разработке могут быть перенесены в другие похожие районы, где наблюдается частое появление поглощающего аэрозоля над морем и где есть станции

регулярного надводного измерения спектров коэффициентов яркости моря. Это, например, Средиземное море, Восточно-Китайское море или Японское море.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Полученные аналитические и экспериментальные зависимости ошибок определения спектральных коэффициентов яркости моря от наличия поглощающего атмосферного аэрозоля согласуются друг с другом. Качество экспериментальных данных наземной сети AERONET-OC и спутникового радиометра MODIS контролируется большим количеством согласованных международных протоколов и международными организациями. Для теоретических и статистических расчетов используется признанный мировым научным сообществом математический аппарат. Результаты представлены в ведущих рецензируемых российских и зарубежных изданиях, а также на всероссийских и международных конференциях перед ведущими специалистами в области оптики океана и атмосферы.

Соискателем лично проделан большой объем работы по обработке и анализу экспериментальных данных, интерпретации теоретических расчетов, обобщению полученных результатов и подготовке научных статей. Проведены личные выступления с научными докладами на конференциях, подготовлено несколько статей в качестве первого автора.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов с отдельными выводами, заключения и списка процитированной литературы, содержащей 111 источников.

Во введении приведены все необходимые для защиты сведения, включающие: обоснование актуальности темы диссертации; постановку проблемы, цели и задачи исследования; определение предмета исследования; введение в методологию; представление научной новизны, теоретической и практической значимости результатов работы; обоснование достоверности и описание личного вклада автора.

В первом разделе представлен литературный обзор, включающий описание уравнения переноса излучения в атмосфере и океане, и его применение к решению задачи дистанционного зондирования яркости моря со спутника. Определены компоненты атмосферы и водной толщи, а также их характеристики, которые влияют на распространение света в системе «атмосфера – морская поверхность – водная толща». Рассмотрены вопросы по атмосферной коррекции спутниковых данных по цвету моря. В целом литературный обзор можно считать достаточным для того, чтобы перейти к решению поставленных в работе задач.

Во втором разделе описаны используемые в работе инструменты и стандартные методы для получения экспериментальных данных по оптическим характеристикам атмосферы и гидросферы. Представлены особенности работы сети наземных/надводных

станций AERONET-OC из которых получены характеристики атмосферного аэрозоля и спектральные коэффициенты яркости моря, а также приведены некоторые процедуры и методы по проверке качества и анализа полученных данных. Рассмотрены характеристики спутникового радиометра MODIS, измерения которого использовались для получения коэффициентов яркости моря на различных длинах волн. Представлена международная база данных SeaBASS, которая содержит подспутниковые измерения коэффициентов яркости моря, в том числе данные AERONET-OC, которые прошли дополнительную проверку. Представленный перечень источников данных можно считать достаточным для Черного моря в рамках поставленных в работе задач, поскольку в регионе есть несколько действующих станций AERONET-OC, есть измерения, включенные в базу SeaBASS, а спутниковый радиометр MODIS обеспечивает ежедневное покрытие акватории Черного моря данными измерений по цвету моря.

В третьем разделе представлена авторская методика по выбору качественных измерений коэффициентов яркости моря со станций AERONET-OC из базы данных SeaBASS, проведен анализ изменчивости и выполнена классификация спектров коэффициентов яркости моря в западной части Черного моря. Таким образом был создан качественный экспериментальный набор подспутниковых данных для последующего анализа. Также выявлены наименее изменчивые спектральные характеристики коэффициентов яркости моря, которые могут быть использованы в качестве эталона при проведении дальнейшей атмосферной коррекции спутниковых измерений цвета моря.

В четвертом разделе приведена основная суть защищаемых положений. Во-первых, представлен аналитический метод для учета стратификации аэрозоля в уравнении переноса излучения, с помощью которого получена формула, описывающая ошибку получения спектрального коэффициента яркости моря при наличии в атмосфере поглощающего аэрозоля. Во-вторых, проведен анализ влияния поглощающего аэрозоля над акваторией Черного моря на спутниковые измерения коэффициентов яркости моря. Показано, что спектральная зависимость возникающих ошибок согласуется с результатами аналитических расчетов. В-третьих, представлена методика по коррекции спутниковых значений спектрального коэффициента яркости моря при наличии поглощающего аэрозоля и проведен анализ ее работы при сравнении с данными подспутниковых наблюдений AERONET-OC и подспутниковых измерений МГИ РАН. Также показан результат проведенной коррекции спутниковых изображений концентрации хлорофилла-а при наличии пылевого аэрозоля, который позволил убрать кажущееся завышение спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а на всем пути распространения атмосферной пыли над Черным морем. В целом раздел дает достаточно информации, чтобы подтвердить все три защищаемых положения диссертационной работы.

В заключении приведено обобщение полученных результатов, сделаны основные выводы, показаны перспективы дальнейших исследований и практического использования полученных результатов.

Оценивая диссертационную работу Папковой А.С., можно заключить, что соискатель внесла существенный вклад в методологию расчета спектральных коэффициентов яркости моря из данных измерений спутниковыми радиометрами при наличии поглощающего аэрозоля. Результаты могут быть использованы как стандартная процедура дополнительной коррекции спутниковых данных по цвету моря акваторий, над которыми появляется атмосферный поглощающий аэрозоль. Достоинством работы является согласованность аналитических и эмпирических результатов, а также большой объем проанализированных данных подспутниковых измерений спектров коэффициентов яркости моря. Кроме этого, можно отметить простоту используемой дополнительной коррекции, для которой не требуется привлечение большого количества смежных данных и сложных численных расчетов.

К работе есть следующие замечания и вопросы:

1) Основой методики, представленной в третьем защищаемом положении, является то, что отношение коэффициентов яркости моря на 412 и 443 нм изменяется слабо и приблизительно равняется  $0,81 \pm 0,07$ . При этом практически все кластеры, полученные при классификации подспутниковых измерений спектров коэффициентов яркости моря, соответствуют этому критерию за исключением кластера 2 из таблицы 3.3, где рассматриваемое соотношение составляет  $0,73 \pm 0,07$ . В этот кластер входит 130 измерений и несмотря на то, что границы разброса выбранной характеристики для этих кластеров пересекаются, это не говорит об их статистически незначимом различии. Кроме этого, в выборке кластера 2 присутствует много спектров со значением рассматриваемого отношения менее 0,74 (разница между 0,81 и 0,07).

Необходимо было отдельно проанализировать описанные случаи, поскольку они выбиваются из используемого критерия в третьем защищаемом положении. Какие характеристики морской воды привели к такому значению критерия? Насколько существенна была бы ошибка проводимой дополнительной коррекции спутниковых измерений, если использовать фиксированное значение 0,81 вместо реального диапазона 0,66-0,73?

2) На странице 31 в конце пункта 1.3 процитирована работа Чуриловой Т.Я. и Берсеновой Г.П. (Морской гидрофизический журнал, 2004, №4, С. 39-50), где сказано, что спектральный наклон поглощения неживой органики сильно варьируется в области 420-440 нм. При этом для фильтрации измеренных спектров коэффициентов яркости моря на станциях AERONET-OC и для выбора спектров для дальнейшего анализа используется

критерий соответствия с трехпараметрической биооптической моделью (формула 3.3), в которой три параметра являются константами (зафиксированы), это: спектральный наклон обратного рассеяния света; спектральный наклон поглощения света неживой органикой; и концентрация хлорофилла-а, которая используется для расчета спектра удельного показателя поглощения света фитопланктоном.

В результате сравнения реально измеренных спектров коэффициентов яркости моря с аппроксимированными спектрами по используемой трехпараметрической биооптической модели было отфильтровано 21% измерений (179 спектров) по критерию большой величины невязки. В защищаемой работе на стр. 57 сказано, что данные погрешности связаны с не учётом поляризации при измерениях и отраженной составляющей. Это действительно может быть так, и используемый критерий является хорошим «жестким» критерием проверки качества измерений.

Однако, еще одной не рассмотренной причиной большой невязки может быть то, что зафиксированные спектральные параметры, которые были перечислены выше, не позволили корректно описать измеренный спектр трехпараметрической биооптической моделью по причине того, что в районе и во время измерений реальные значения зафиксированных параметров могли иметь другие значения. Особенно это относится к спектральному наклону поглощения света неживой органикой, который по данным других исследователей может существенно изменяться в диапазоне 420-440 нм в Черном море. Кроме этого, вариации удельного поглощения света клетками фитопланктона и изменения спектрального показателя наклона обратного рассеяния света также могли иметь место при изменчивости характеристик фитопланктонных сообществ или при поступлении минеральной взвеси.

Необходимо было рассмотреть, как вариации зафиксированных параметров могли повлиять на индекс цвета  $CI(412/443)$ . Кроме того, есть опасность, что такая «жесткая» фильтрация данных AERONET-OC и привела к тому, что для дальнейшего анализа остались только те спектры коэффициентов яркости моря, для которых отношения значений на 412 и 443 нм изменяются слабо.

3) В работе присутствует большое количество опечаток и помарок. Например, нет четкого разграничения использования курсивного шрифта, часть переменных отмечена курсивом, а часть нормальным шрифтом. Не все формулы имеют номера. Очень маленький шрифт на некоторых рисунках, например, на рис 3.1 и 3.2. На рисунке 3.3 нет легенды для кластера 2, а ошибочно приведено два разных обозначения для кластера 1. Нет четкого соответствия списку условных обозначений. Например, параметр  $\gamma$  используется в разных смыслах в разных формулах, при этом в формуле 1.15 это должен был быть  $\nu$ , а в формуле 3.3 дано не правильное описание данного параметра. Обозначение  $Rrs$  в тексте диссертации

используется как коэффициент яркости моря, что соответствует принятой российской терминологии в оптике океана, а в списке условных обозначений  $Rrs$  – это спектральная отражательная способность дистанционного зондирования, что является прямым переводом англоязычной литературы. Кроме этого, в диссертации присутствуют не очень удачные термины, появившиеся по всей видимости, при формальном переводе с английского языка, например «перенос горячей биомассы», где скорее всего имеются в виду «продукты горения ...».

Перечисленные замечания не снижают общую высокую оценку работы, поскольку полученный научный результат многократно перекрывает возможные недостатки работы, а часть возникших вопросов могут быть решены соискателем в своих дальнейших исследованиях. Полученные результаты уже в текущем виде могут быть использованы для широкого перечня задач и распространены на другие акватории Мирового океана.

Представленная к защите диссертация является актуальной и востребованной законченной научной работой, с согласованной структурой разделов, содержащая новые результаты и свидетельствующая о большом личном вкладе соискателя. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Все защищаемые положения представлены в достаточном количестве научных работ, являются непротиворечивыми и соответствуют современным теоретическим и экспериментальным результатам океанологии, а также оптики океана и атмосферы. Таким образом, диссертация Папковой А.С. удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17 – Океанология.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией спутниковой океанологии и лазерного зондирования  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Дальневосточного отделения

Российской академии наук,

кандидат физико-математических наук, доцент

эл. почта psalyuk@poi.dvo.ru, тел. +79020548684

09.03.2023

Павел Анатольевич Салюк

