

ОТЗЫВ

официального оппонента Репиной Ирины Анатольевны о диссертационной работе Калининской Дарьи Владимировны «Влияние атмосферного аэрозоля на биооптические характеристики Черного моря по данным наземных и спутниковых измерений», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.17- океанология.

Диссертационная работа Калининской Дарьи Владимировны представляет собой комплексное исследование, направленное на изучение роли атмосферных аэрозолей в формировании биооптических характеристик Чёрного моря. Исследование сосредоточено на трёх основных типах аэрозолей: фоновом (типичном для морской акватории), пылевом (переносимом из пустынных регионов Сахары и Ближнего Востока) и дымовом (образующемся в результате лесных и степных пожаров). Автор ставит задачу охарактеризовать оптические свойства этих аэрозолей над регионом Чёрного моря и количественно оценить их влияние на ключевые параметры морской экосистемы. Исследование базируется на комплексном анализе данных из различных источников: это многолетние ряды наземных фотометрических измерений с сетей AERONET и с помощью портативного прибора SPM, спутниковые наблюдения приборами MODIS, VIIRS, Sentinel-3 и CALIPSO, а также результаты моделирования траекторий воздушных масс с использованием моделей HYSPLIT и SILAM. Таким образом, работа лежит на стыке атмосферной оптики, спутниковой океанологии и морской биогеохимии.

Актуальность темы диссертации

Атмосферный аэрозоль является критически важным климатообразующим фактором, непосредственно влияющим на радиационный баланс и, как следствие, на тепловой режим планеты. Также аэрозоли служат ключевым механизмом глобального переноса веществ, доставляя в удалённые регионы океана биогенные элементы (фосфор, кремний, азот), которые влияют на продуктивность морских экосистем. Для Чёрного моря – внутреннего водоёма с уникальной экосистемой и ярко выраженной аноксией глубинных вод – атмосферный приток биогенов может играть особую роль в стимуляции цветения фитопланктона и динамике «мёртвых зон».

Несмотря на длительную историю изучения Чёрного моря, влияние именно аэрозольной компоненты на его биооптические свойства остается слабо исследованным. Работа восполняет этот пробел, предлагая системный анализ на основе современных данных дистанционного зондирования и прямых измерений. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость: они необходимы для совершенствования алгоритмов атмосферной коррекции спутниковых данных, что критически важно для точного мониторинга концентрации хлорофилла-а, температуры поверхности моря и других параметров. Кроме того, понимание механизмов и масштабов влияния пылевых бурь и пожаров на продуктивность моря важно для экологического прогнозирования и разработки стратегий управления прибрежными зонами в условиях изменения климата.

Научная новизна

Научная новизна работы убедительно продемонстрирована в тексте и заключается в следующем:

Впервые для акватории Чёрного моря на основе прямых фотометрических измерений с высокой точностью определены и количественно описаны оптические характеристики (аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрема, распределение частиц по размерам) для трёх чётко идентифицированных типов аэрозоля: фонового морского, пылевого и дымового.

Существенным вкладом является разработка и апробация оригинального алгоритма для идентификации географических источников приземного аэрозоля. Алгоритм основан на интеллектуальной интерпретации данных обратных траекторий воздушных масс, предоставляемых сетью AERONET и моделью HYSPLIT, и включает критерии отбора, учитывающие динамику атмосферных процессов (восходящие/нисходящие потоки). С его помощью впервые проведена количественная оценка частоты и сезонности переносов пылевого аэрозоля из Сахары и с Ближнего Востока в черноморский регион за многолетний период.

Впервые на комплексной основе показано и количественно оценено влияние эпизодов пылевого переноса на результаты спутникового определения оптических характеристик поверхностного слоя моря, таких как спектральная яркость. Ещё одним важным новым результатом является оценка временного сдвига между моментом осаждения биогенных веществ (фосфатов, силикатов, соединений азота) из аэрозоля и наблюдаемым откликом экосистемы открытой части моря в виде роста концентрации хлорофилла-а.

Достоверность результатов подтверждается публикациями в авторитетных профессиональных изданиях, выступлениями автора на научных конференциях.

Также достоверность результатов и выводов работы обеспечена комплексным методологическим подходом и применением общепринятых в мировой практике инструментов и процедур. Измерения основных оптических характеристик аэрозоля проводились с помощью сертифицированного оборудования: фотометров CIMEL-318 международной сети AERONET и калиброванного портативного фотометра SPM. Данные сети AERONET проходят строгую процедуру контроля качества (уровни 1.5 и 2.0), что гарантирует их надёжность.

Использование данных из независимых источников (наземные измерения, разные спутниковые платформы, различные модели переноса) позволяет проводить кросс-валидацию результатов и минимизировать систематические ошибки, присущие каждому из методов в отдельности. Статистическая обработка значительных массивов данных (многолетние ряды измерений) обеспечивает репрезентативность полученных средних значений и выявленных закономерностей.

Личный вклад автора адекватно представлен в тексте диссертации и реферата, где отражено участие соавторов и даны корректные ссылки на предыдущие исследования. Все вынесенные на защиту положения и научные результаты, представленные в диссертационной

работе, получены лично автором. Автору принадлежит ведущая роль в постановке задач, подготовке научных публикаций и докладов на конференциях, симпозиумах, семинарах и т.д.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, описывается методология, научную новизна и практическая значимость работы, кратко излагается содержание диссертации.

В **первой главе** представлен подробный аналитический обзор методов и инструментов, используемых для исследования атмосферного аэрозоля. В ней систематизированы теоретические основы определения ключевых оптических характеристик: аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и функции распределения частиц по размерам. Дана классификация основных типов аэрозолей, характерных для региона Чёрного моря. Детально описаны приборные средства: принципы работы и возможности глобальной сети AERONET, портативного фотометра SPM. Рассмотрены дополнительные источники данных: спутниковые приборы (CALIPSO, MODIS, VIIRS, Sentinel-3), платформы обработки (EOSDIS, FIRMS) и моделирующие комплексы (SILAM, HYSPLIT). Глава служит фундаментальной теоретико-методической базой для всего последующего исследования.

Во **второй главе** представлен и верифицирован разработанный автором алгоритм идентификации источников приземного аэрозоля. На основе этого алгоритма проведён детальный статистический анализ пространственно-временного распределения источников аэрозоля, влияющих на черноморский регион, с учётом сезонности, высотных слоёв и типа подстилающей поверхности. В главе приведены и проанализированы полученные впервые количественные оптические характеристики фонового, пылевого и дымового аэрозолей. Особое внимание уделено установлению связей между оптическими параметрами пылевого и дымового аэрозолей и химическим составом атмосферных осадков; показано, что маркерами дальнего переноса пыли являются аномально высокие концентрации фосфатов и силикатов, а дымового аэрозоля – соединений азота.

Третья глава посвящена оценке влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики Чёрного моря. На конкретных примерах за 2010, 2016 и 2018 годы продемонстрировано, как эпизоды интенсивного пылевого переноса, верифицированные по данным наземных измерений и моделей, влияют на спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а в поверхностном слое моря. Автор доказывает, что наблюдаемый рост хлорофилла не связан с апвеллингом (поскольку температура поверхности моря не снижалась), а является следствием поступления биогенных веществ из атмосферы. Определён характерный временной сдвиг между осаждением аэрозоля и экосистемным откликом. Также рассмотрено влияние взвешенных частиц (PM₁₀) на оптические свойства моря.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации. Результаты диссертации изложены в 76 научных работах, из которых 16 – статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, оформлено 1 свидетельство РОСПАТЕНТА о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Основные замечания к работе:

Ряд замечаний носят скорее редакционный характер.

Первое положение, выносимое на защиту, сформулировано слишком обще. Каких регионов? В чём особенность каждого региона? Различаются ли приведенные характеристики аэрозоля?

Формулы 1.1, 2.1 – не приведены размерности используемых величин.

Есть ряд плохо читаемых рисунков: мелкие размытые подписи, нечеткие линии.

Замечания по существу:

1. Главным методическим ограничением является существенная географическая привязка наземных измерений к севастопольскому региону и нескольким станциям на западном побережье. Это не позволяет в полной мере экстраполировать полученные зависимости на всю акваторию Чёрного моря, особенно на его восточную и юго-восточную части, которые могут находиться под влиянием иных аэрозольных потоков.
2. Разработанный алгоритм идентификации источников остаётся зависимым от точности и разрешения исходных модельных данных. Автором проведена сравнительная проверка двух моделей, но было бы полезно дополнить её валидацией по независимым трассерам, например, по данным лидарных измерений или по траекториям конкретных атмосферных событий с известным источником. В анализе практически не затрагивается потенциальный вклад локальных антропогенных источников аэрозоля (например, от судоходства или прибрежной промышленности), который может маскировать или модифицировать сигнал от удалённых пустынных источников, особенно в прибрежной зоне.
3. Биогеохимическая интерпретация связи «аэрозоль – рост фитопланктона», хотя и убедительно показана на макроуровне, остаётся несколько упрощённой. Не рассматриваются внутренние механизмы экосистемы: какой именно таксон фитопланктона (диатомовые, кокколитофориды) откликается на поступление конкретных биогенов, какова роль градиентов освещённости и стратификации вод. Учёт этих факторов позволил бы построить более детальную причинно-следственную модель.
4. Работа опирается на спутниковые продукты стандартных алгоритмов, которые сами по себе могут содержать погрешности, особенно в условиях сильной аэрозольной нагрузки. Более глубокий анализ неопределённостей, присущих каждому этапу обработки данных — от измерений до финальных выводов — усилил бы доказательную базу.
5. Хотя временной ряд охватывает более десяти лет, для уверенного выделения климатических трендов и анализа их связи с изменчивостью аэрозольных переносов в условиях меняющегося климата желательно его дальнейшее накопление и расширение.

Представленные замечания не влияют на общее положительное впечатление от работы. Проведённое исследование является законченной, целостной научной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Соискатель продемонстрировал глубокое владение современным инструментарием атмосферной оптики и спутниковой океанологии, умение

работать с большими массивами разнородных данных и проводить комплексный анализ. Работа имеет практическую значимость и перспективы для развития.

Диссертационная работа Калинской Д.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем научном и техническом уровне. В работе приведены интересные и важные с практической точки зрения исследования взаимодействия аэрозолей и морской поверхности. В работе приведены научные результаты, позволяющие квалифицировать её как законченное и значимое научное исследование. Полученные автором результаты имеют новый уровень, являются достоверными, а выводы и заключения обоснованными.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертационного исследования.

Диссертационная работа Калинской Дарьи Владимировны «Влияние атмосферного аэрозоля на биоптические характеристики Черного моря по данным наземных и спутниковых измерений» является самостоятельной работой. Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.6.17 – «Океанология» (по географическим наукам), а также критериям, определённым Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 года.

Официальный оппонент:
Репина Ирина Анатольевна

Доктор физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы, профессор РАН, заместитель директора по научно-техническому развитию Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук,
119017, г. Москва, Пыжевский пер. 3
e-mail. repina@ifaran.ru
Тел. +7(916) 144-84-59

Выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата географических наук Калинской Д.В.

«19» января 2026 г.



Подпись И.А. Репиной заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)

Киселева Юлия Викторовна

