

УТВЕРЖДАЮ



Шевченко В.П.

«18» декабря 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт океанологии им. П.П. Ширшова» РАН
на диссертационную работу**

Калинской Дарьи Владимировны

**«Влияние атмосферного аэрозоля на биооптические характеристики Черного моря
по данным наземных и спутниковых измерений»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата географических наук
по специальности 1.6.17 – Океанология**

Актуальность темы работы. Черное море, как водоем с тонким деятельным слоем, уязвимо к внешним воздействиям, включая климатические изменения и антропогенную нагрузку. Наблюдаемые в последние десятилетия потепление и увеличение солёности верхнего слоя ведет к сокращению толщины кислородного слоя и подъему зоны сероводородного заражения. В этих условиях исследование биооптических характеристик Черного моря с использованием спутниковых данных приобретает особую значимость. Диссертация посвящена оценке влияния атмосферного аэрозоля на биооптические характеристики (в первую очередь, концентрацию хлорофилла-а), что важно по нескольким причинам. Во-первых, атмосферный аэрозоль является элементом глобального биогеохимического цикла, поставляя в поверхностный слой океана лимитирующие первичную продукцию микроэлементы (азот, кремний, фосфор, железо). Во-вторых, для Черного моря этот процесс остается недостаточно изученным, несмотря на его потенциальное влияние на формирование «цветений» фитопланктона и биопродуктивность моря в целом. В-третьих, присутствие аэрозоля (особенно пылевого) является основным источником погрешностей при дистанционном определении значений биооптических характеристик, что требует разработки методов корректного учета его воздействия. Таким образом, результаты работы необходимы как для

углубления понимания механизмов функционирования экосистемы Черного моря, так и для решения практических задач ее мониторинга.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и обозначений, списка использованных источников. Объем работы составляет 140 страниц, она содержит 40 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список включает в себя 185 наименований, в том числе 80 на английском языке.

Основные результаты, полученные в диссертации.

Во Введении обосновывается актуальность темы исследования и дается информация о степени ее разработанности, описываются цели, задачи, объект, предмет и методы исследования. Указывается новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечисляются положения, выносимые на защиту, обосновывается степень достоверности результатов исследований. Приведен список конференций, на которых была апробирована диссертационная работа, а также список опубликованных работ по теме диссертации. Приводится информация о связи диссертационной работы с научными программами, планами и темами, выполняемыми в Морском гидрофизическом институте РАН. Подробно описывается личный вклад автора.

В Главе 1 рассматриваются основные оптические характеристики атмосферного аэрозоля – аэрозольная оптическая толщина (AOT), параметр Ангстрема и распределение частиц по размерам, а также методы их определения. Дается классификация и описание типичных для Черного моря типов аэрозоля: фоновый, пылевой и дымовый (сажи). Отдельное внимание уделяется инструментальной базе: описаны принципы работы и данные наземной сети AERONET, портативного фотометра SPM, спутника CALIPSO и ряда сканеров цвета, а также вспомогательных модельных комплексов и баз данных. В конце главы обосновывается необходимость комплексного использования всех перечисленных источников информации.

Глава 2 посвящена анализу оптических характеристик и источников аэрозолей над Черным морем. В ней представлен разработанный алгоритм определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля на основе анализа обратных траекторий моделей AERONET и HYSPLIT. Приведена статистика выносов, выявившая сезонные особенности и географию основных источников пылевого и дымового аэрозоля. На основе обширного массива измерений получены и систематизированы количественные оптические характеристики (AOT, параметр Ангстрема, распределение частиц по размерам) для трех типов аэрозоля: фоновый, пылевой и дымовый. Отдельно проанализирован

качественный и количественный состав биогенных микроэлементов (фосфаты, силикаты, азот) в пылевом и дымовом аэрозоле.

Глава 3 содержит результаты оценки влияния пылевого аэрозоля на биооптические характеристики верхнего слоя Черного моря. Исследование выполнено двумя методами: на основе анализа исключительно спутниковых данных (параграф 3.1) и с привлечением данных подспутниковых судовых измерений интенсивности флуоресценции растворенного органического вещества (параграф 3.2). В первой части главы рассмотрены случаи переноса аэрозоля, зарегистрированные в 2010, 2016 и 2018 гг., во второй – в 2020 г. Для первых трех случаев проанализирована динамика концентрации хлорофилла-а и температуры поверхности моря до и после эпизодов пылевого переноса. По данным 2020 г. представлены результаты анализа события осеннего переноса взвешенных частиц PM10 в акваторию и прибрежные районы Черного моря с востока. Проанализирована корреляция между повышенными значениями аэрозольной оптической толщины, содержанием фосфатов и силикатов в осадках и фактом пылевого переноса из Сахары (коэффициенты корреляции $R=0,79$ и $R=0,73$). Установлен временной сдвиг между выпадением аэрозоля и откликом экосистемы.

В Заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается комплексным применением взаимодополняющих подходов и методов. Теоретическая и методическая основа исследования опирается на методы, общепринятые в современной оптике атмосферы и океанологии. Высокое качество данных натурных измерений оптических характеристик аэрозоля достигалось за счет использования калиброванных фотометров сети AERONET и SPM. Использованный в работе массив статистически значим. О достоверности основных выводов также свидетельствует их успешная апробация и публикация в ряде профильных рецензируемых журналов, как российских, так и международных.

Научная новизна исследования и полученных результатов:

1. Для регионов акватории Черного моря приведены оптические характеристики пылевого и дымового аэрозоля (величины значений аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема, распределение частиц по размерам).
2. Алгоритм определения источников пылевого и дымового аэрозоля по результатам статистического анализа событий переноса пыли в регион Черного моря по данным моделирования AERONET и HYSPLIT.
3. Результаты корреляционного анализа между оптическими характеристиками пылевого и дымового аэрозоля и количественным и качественным составом микроэлементов в

атмосферных осадках, которые содержат высокие концентрации фосфатов, силикатов и азота.

4. Оценка изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя вод Черного моря под влиянием биогенных веществ (PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , NO_2 , NO_3 , NH_4), осажденных из пылевого аэрозоля по данным наземных и спутниковых измерений.

Научная и практическая значимость. Научная значимость исследования заключается в определении значений аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема и распределения частиц по размерам для различных типов аэрозоля (фоновое, пылевое, дымовое), в прибрежной зоне Черного моря. Полученные результаты могут применяться для более точной региональной параметризации основных оптических характеристик атмосферного аэрозоля, при моделировании биогеохимических процессов, происходящих в поверхностном слое Черного моря, и повышения точности атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Разработанный алгоритм идентификации источников пылевого и дымового аэрозоля, основанный на статистическом анализе событий переноса, может быть рекомендован к внедрению в практику экологического мониторинга. Данный инструмент может быть использован специалистами, работающими с данными дистанционного зондирования, для оперативного анализа и оценки последствий масштабных природных явлений в черноморском регионе, таких как пылевые бури и пожары.

Вопросы и замечания по диссертации:

1. Положения, выносимые на защиту, могли бы быть сформулированы с большей конкретикой: с указанием конкретных регионов Черного моря и приведением значений оптических характеристик аэрозоля (положение 1), указанием более точного источника данных (AERONET или HYSPLIT, положение 2), представлением численных результатов корреляционного анализа (положение 3).

2. Отсутствие выделенных разделов с литературным обзором и описанием использованных в исследовании методов затрудняет оценку научной новизны.

3. Вывод «Сравнительный анализ результатов обратных траекторий двух моделей и оптических характеристик показал, что результаты моделирования HYSPLIT менее достоверны для анализа переносов воздушных масс над черноморским регионом, чем результаты AERONET» (стр. 60) представляется сомнительным, поскольку базируется на анализе данных всего за два дня: 12 и 20 апреля 2016 г. (рис. 2.8). Если все же считать этот вывод

верным, то это ставит под сомнение правомерность последующего использования данных HYSPLIT для решения задач работы.

4. Следует обратить внимание на необоснованное использование стандартного алгоритма для оценки концентрации Хл при том, что в МГИ РАН на протяжении многих лет успешно разрабатываются региональные алгоритмы для Черного моря. По-видимому, именно с этим связано зарегистрированное 7 апреля 2018 г. завышение концентрации Хл по сравнению со среднемесячным значением за апрель 2018 г. ($1,2 \text{ мг/м}^3$) более, чем в 10 раз: *«значения концентрации хлорофилла-а в области интенсивного цветения находились в диапазоне 10 - 40 мг/м³»* (стр. 99, рис. 3.10). При этом результаты современного стандартного алгоритма дают существенно меньшие значения: около $1,5\text{-}2,5 \text{ мг/м}^3$ (данные Suomi NPP / VIIRS, <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

5. Известно, что ошибка стандартного алгоритма оценки концентрации Хл составляет около 30%. При этом представленная на рис. 3.2 изменчивость этого параметра находится в пределах этой погрешности, что не позволяет судить о влиянии каких-либо факторов на определенную по спутниковым данным концентрацию Хл в рассмотренном в параграфе 3.1.1 случае.

6. При обсуждении влияния атмосферного аэрозоля на концентрацию Хл не рассматриваются другие факторы, способные привести к изменению концентрации этого пигмента. К ним относятся возможное увеличение фотосинтетически активной радиации (ФАР), которое могло привести к увеличению первичной продукции и, в свою очередь, концентрации Хл, регенерация биогенных элементов, адвекция водных масс, в частности, для района к юго-западу от Крыма (параграф 3.1.1), где заток обогащённых биогенными элементами вод с северо-западного шельфа мог повлиять на увеличение их концентрации в поверхностном слое и также стимулировать увеличение концентрации Хл. Кроме того, отсутствие анализа фоновой изменчивости концентрации Хл в периоды без выпадения аэрозоля не позволяет доказать, что наблюдаемые изменения связаны именно с ним, а не с естественным изменением состояния экосистемы. Все это снижает обоснованность некоторых выводов.

7. В работе отсутствует анализ важнейшей роли атмосферных осадков, что существенно снижает полноту и корректность выводов. Вместо этого в исследовании использован следующий подход: *«Критерием «выпадения осадков», т.е. нисходящего воздушного потока является одно условие: P_t мбар/час. Если оно выполняется, то «обнуляется» вся предыстория соответствующего атмосферного слоя, т.е. считается, что атмосферный слой уже не содержит аэрозоль, поднятый ранее восходящими потоками с поверхности Земли»* (стр. 44). Ключевым упущением является то, что именно «мокрое» выпадение (с

дождями) служит доминирующим и наиболее эффективным механизмом стимуляции первичной продукции фитопланктона, в то время как влияние «сухого» выпадения второстепенно. Это обусловлено принципиальным различием этих процессов: осадки не только обеспечивают быструю прямую доставку аэрозольного материала в фотический слой, но и, предварительно растворяя и, таким образом, переводя биогенные элементы в ионную форму, способствуют быстрому усвоению их фитопланктоном. При этом сами частицы аэрозоля, выступая ядрами конденсации, непосредственно влияют на формирование и интенсивность осадков. Напротив, при сухом осаждении нерастворимые частицы могут тонуть, не успевая раствориться, что резко снижает их вклад в минерализацию вод. Говоря о недостатках работы, стоит упомянуть об отсутствии обсуждения роли железа, как микроэлемента, стимулирующего рост фитопланктона. Известно, что аэрозольное железо является одним из основных источников его поступления в открытые районы морей и океанов.

8. Без изучения полного химического состава аэрозолей сложно говорить об их однозначно стимулирующем эффекте на рост фитопланктона, так как тяжелые металлы могут оказывать токсическое воздействие.

9. Представленная интерпретация данных флуоресценции РОВ как индикатора влияния атмосферного аэрозоля представляется неубедительной, поскольку судовые измерения проводились в районе, подверженному влиянию насыщенных РОВ вод Азовского моря (судовые данные получены примерно в 100 км к югу от Керченского пролива). Более вероятно, что наблюдаемые изменения связаны с адвекцией водных масс, а не с атмосферным переносом.

Вышеуказанные замечания представляются существенными, но не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Д.В. Калининской.

Заключение. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченный этап исследований по актуальной теме. Получены новые результаты в области оптики океана и атмосферы, показывающие влияние атмосферного аэрозоля над акваторией Черного моря. В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя.

Работа хорошо апробирована. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК при Минобрнауки России (16 работ, из них 9 статей – в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus). Автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание.

Работа полностью соответствует специальности 1.6.17 – «Океанология» и удовлетворяет всем предъявляемым к кандидатским диссертациям требованиям действующего

«Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, а ее автор, Калининская Дарья Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата географических наук.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на заседании Ученого совета Физического направления Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Присутствовало на заседании 31 чел. Результаты голосования «за» – 31 чел., против – 0 чел., воздержалось – 0 чел.; Протокол № 32 от 26 декабря 2025 г.

Руководитель Лаборатории оптики океана
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук (специальность
25.00.28 – Океанология)
117997, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36
Телефон: +7-499-124-75-83
E-mail: glukhovets@ocean.ru

Глуховец Дмитрий Ильич

Главный научный сотрудник Лаборатории экологии планктона
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
доктор биологических наук (специальность 25.00.28 – Океанология)
117997, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36
Телефон: +7-499-129-21-09
E-mail: demsp@rambler.ru

Демидов Андрей Борисович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН)
117997, г. Москва, Нахимовский проспект, 36,
Телефон: 8-499-124-59-96, office@ocean.ru
Веб-сайт: <http://ocean.ru/>



«18» декабря 2025 г.