

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт
океанологии им. П.П. Ширшова» Российской
академии наук, член-корреспондент РАН



Соков А.В.

«3» марта 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
«Институт океанологии им. П.П. Ширшова» РАН

на диссертационную работу

Папковой Анны Станиславовны

«Учет 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

Актуальность темы работы. Оперативный контроль состояния морской среды возможен только при активном использовании спутниковых данных. За последние 20 лет, одной из ключевых проблем, стоящих перед спутниковыми методами оценки биооптического состояния прибрежных морей, оптические свойства которых зависят не только от концентрации хлорофилла-а (случай вод второго оптического типа), была разработка новых алгоритмов, которые учитывают изменчивость состояния атмосферы. Несмотря на регулярные модификации алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета, качество биооптических продуктов все еще требует улучшения. Ошибки атмосферной коррекции, например, отрицательные значения коэффициентов яркости моря, часто регистрируются при наличии частиц в атмосфере, поглощающих световое излучение. В настоящее время, для проверки достоверности обработанных спутниковых данных принято привлекать информацию об оптических свойствах аэрозольной оптической толщины, измеренных солнечными фотометрами с уровня поверхности моря. Однако в

случае присутствия в атмосфере поглощающего аэрозоля, сигнал, измеряемый на верхней границе системы море-атмосфера, существенно зависит не только от спектральных свойств поглощения взвешенными частицами, но и от вертикального профиля поглощающих частиц, в то время как, оптическая толщина атмосферы является интегральным параметром. Таким образом, количество дополнительной информации, необходимой для построения работающей процедуры атмосферной коррекции существенно увеличивается.

В диссертации Папковой А.С. на примере спутниковых данных сканеров цвета для Черного моря, предлагается новый подход к решению задачи учета влияния атмосферы. Суть нового метода состоит в использовании спектральных закономерностей восходящего из воды излучения, а также в оценке спектральной зависимости погрешностей атмосферной коррекции. Качественно новый уровень спутниковых данных позволит заметно улучшить работу прогностических и экологических моделей морской среды, а также оперативно определять реальное изменение ее биооптических характеристик в условиях присутствия поглощающего аэрозоля над акваторией Черного моря.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка условных обозначений и списка литературы из 111 наименований. Объем диссертации – 117 страниц, включая 24 рисунка и 12 таблиц.

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 дис-

сертационная 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 первом разделе приведена схема расчета коэффициента яркости моря по стандартным алгоритмам для спутниковых и натурных данных AERONET-OC, перечислены основные компоненты, влияющие на цвет моря, кратко описаны модели аэрозоля, используемые при построении таблиц атмосферной коррекции, рассмотрен алгоритм Гордона-Ванга, дан обзор предлагаемых ранее альтернативных методов атмосферной коррекции, рассмотрены существующие методы учета поглощающего аэрозоля. В конце раздела делается вывод о том, что ни один из описанных методов не нашел широкого применения для массовой обработки данных спутниковых сканеров цвета при наличии в атмосфере пылевого аэрозоля.

Во втором разделе описаны инструменты и методы для определения оптических свойств пылевого аэрозоля и коэффициента яркости моря. Характеристики атмосферного аэрозоля измерялись солнечными фотометрами Cimel-318, установленными на автоматизированных станциях сети AERONET. В работе использовались данные двух станций: 1) Gloria – у побережья Румынии, с 2019 года переименованная в Section7, и 2) Galata_Platform – в 13 морских милях от г. Варна. Критериями наличия пыли являлись превышение величины аэрозольной оптической толщины в ближней ИК области над фоновым ее значением приблизительно в два раза, а также низкие значения показателя Ангстрема. Для подтверждения пустынного происхождения аэрозоля анализировались 7-дневные обратные траектории, полученные с помощью кинематического алгоритма NASA.

Станции сети AERONET предоставляют также информацию о цвете морской поверхности (AERONET-OC), что играет важную роль в задачах валидации спутниковых данных. В диссертации для оценки влияния атмосферы на ошибки определения со спутника спектрального коэффициента яркости моря выбирались данные о

коэффициенте яркости Черного моря, как со спутников MODIS-Aqua, так и с платформ AERONET-OC.

Третий раздел посвящен натурным измерениям спектрального коэффициента яркости моря. Поскольку погрешности измерения восходящего из воды излучения сильно зависят от условий освещения, в подразделе 3.1 был рассмотрен способ проверки качества *in situ* данных, основанный на статистике распределения невязки. Величина невязки вычислялась как среднеквадратичное отклонение измеренного спектра коэффициента яркости от модельного. Использовалась классическая трехпараметрическая оптическая модель морской воды с параметрами, определяющими концентрации хлорофилла-а (Хл) и органического вещества, а также величину обратного рассеяния света на примесях. Параметры определялись численным поиском минимума невязки. Недостоверными натурными данными считались такие, для которых величина невязки не удовлетворяла «правилу двух сигм». Из последующего сравнения со спутниковыми данными было исключено 21% спектров коэффициента яркости моря.

В подразделе 3.2 исследовались особенности изменчивости коэффициента яркости моря, полученные в западной части Черного моря с морских платформ Glorgia и Galata. Кластерный анализ позволил обнаружить 5 кластеров, отличающихся положением и величиной максимума коэффициента яркости. В подразделе дано предположительное описание биооптических характеристик вод, соответствующих каждому кластеру. Был проведен анализ индексов цвета, вычисленных по спектральным каналам радиометра. На основании расчетов был сделан вывод о слабой изменчивости отношения $R_{rs}(412)/R_{rs}(443) = 0,81 \pm 0,07$. Средняя величина индекса цвета $CI(412/443)$ по кластерам варьировалась на заметно меньшую величину (от 0,791 до 0,833).

В четвертом разделе описан алгоритм дополнительной коррекции спутниковых значений величин спектрального коэффициента яркости моря. Раздел начинается с вывода аналитической зависимости, описывающей уменьшение коэффициента отражения атмосферы, обусловленной наличием поглощающего аэрозоля. Показано, что в первом приближении спектральная

зависимость ошибки коэффициента отражения определяется как произведение спектральных функций молекулярного рассеяния и поглощения аэрозоля. Абсолютная величина эффектов поглощения будет зависеть от геометрии наблюдения и вертикального профиля поглощающего аэрозоля.

В подразделе 4.2 представлены результаты статистического анализа погрешностей атмосферной коррекции на основе сопоставления спутниковых и натурных данных при благоприятных условиях наблюдения и при наличии пыли в атмосфере. Показаны средние величины погрешности определения со спутника коэффициента яркости моря и величины первого собственного вектора. Спектральная зависимость первого собственного вектора оказалась близкой к степенной функции $\lambda^{-3,57}$.

В алгоритме дополнительной атмосферной коррекции использовалась степенная зависимость λ^{-4} и величина «синего» индекса цвета 0,8. По двум спектральным каналам $R_{rs}(412)$ и $R_{rs}(443)$ определялась аддитивная поправка, и вычислялся весь спектр коэффициента яркости моря. В подразделах 4.3 и 4.4 иллюстрируется работоспособность алгоритма как в стандартных условиях наблюдения цвета моря со спутника, так и при наличии пыли. Сравнение натурных данных AERONET–OC со спутниковыми, показало, что даже в отсутствие пыли коэффициент детерминации в каналах 412 и 443 нм возрастает от 0,65 до 0,89 и от 0,87 до 0,94 соответственно. Коэффициент детерминации индекса цвета, вычисленный по значениям в каналах 488 и 547 нм, там, где коррекция незначительна, возрос от 0,81 до 0,91. Приводятся, также, несколько снимков Черного моря при интенсивном выносе пыли, демонстрирующих успешную работу алгоритма.

Обоснованность и достоверность результатов.

В работе приведена теоретическая оценка погрешности атмосферной коррекции, при условии, что аэрозоль поглощает часть солнечного излучения. Результаты теоретических оценок соответствовали расчетам погрешности атмосферной коррекции в случае пылевых выносов. Все массивы данных

измерений, анализируемые в диссертации, обрабатывались с использованием статистического анализа и соответствующих метрик.

Достоверность научных результатов диссертации подтверждается:

- дополнительной проверкой достоверности натуральных данных, предоставляемых AERONET-OC;
- равенством индексов цвета для выделенных районов моря до и во время пылевого выноса после проведения дополнительной коррекции и совпадением расчетных концентраций хлорофилла-а с его типичными значениями;
- отсутствием цветовых контрастов для карт распределения коэффициента яркости Черного моря, построенных на основании спутниковых снимков после использования коррекции, при наличии пылевого аэрозоля в атмосфере;
- публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах.

Научная новизна исследования и полученных результатов.

1. Впервые предложена аналитическая формула, описывающая эффект влияния пылевого аэрозоля на измеряемую яркость на верхней границе атмосферы. Показано, что при поглощающем аэрозоле погрешность атмосферной коррекции близка к λ^{-4} .
2. На основании многолетнего сравнительного анализа натуральных и спутниковых измерений коэффициента яркости моря в акватории Черного моря получены статистические закономерности ошибки атмосферной коррекции при различных состояниях атмосферы. Для повышения качества натуральных измерений AERONET-OC, предложено использовать стандартную оптическую модель моря. Установлено, что в случаях наличия пыли, первый собственный вектор ошибки атмосферной коррекции пропорционален $\lambda^{-3,57}$.
3. Впервые разработан региональный алгоритм дополнительной коррекции спутниковых значений коэффициента яркости Черного моря при

наличии пылевого аэрозоля. Метод основан на обнаруженной закономерности постоянства индекса цвета на длинах волн 412 нм и 443 нм для вод Черного моря. Проведен кластерный анализ многолетнего массива данных об изменчивости коэффициента яркости моря по данным с платформ AERONET-OC. Было показано, что для всех кластеров условие постоянства $CI(412/443)$ сохраняются.

Сильные стороны работы

1. Коррекция данных спутниковых сканеров цвета в условиях пылевого переноса. Показан пример расчета индекса цвета, используемого в стандартном алгоритме для определения концентрации Хл, вид распределения которого говорит об устранении влияния ошибок атмосферной коррекции, связанных с сахарской пылью. При этом коррекция оставляет без изменения данные, полученные вне области влияния поглощающего аэрозоля.

2. Использование различных подходов: статистических (метод главных компонент, кластеризация K-means), аналитических, биооптической модели МГИ, работа с массивами данных сети AERONET и атмосферная коррекция спутниковых данных.

Научная и практическая значимость

Диссертационная работа демонстрирует возможности и перспективы применения алгоритмов атмосферной коррекции, основанных на методе интерполяции, который предусматривает использование не только ИК каналов спутника, но и коротковолновой области видимого диапазона спектра. Хотя работоспособность алгоритма проиллюстрирована на примере спутниковых данных для Черного моря, аналогичный метод может быть разработан для других прибрежных водоемов. Применение предлагаемого алгоритма позволяет избежать явных артефактов интерпретации спутниковых данных. Уменьшается потеря информации в случае неблагоприятных условий, вызванных наличием пыли в атмосфере, так как такие данные часто исключают

ются из общего анализа. Кроме того, появляется возможность оперативной оценки биооптических характеристик поверхностного слоя моря в случае реализации таких событий как пылевые выносы.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Разработанный в диссертации алгоритм может быть рекомендован пользователям спутниковой информации в качестве дополнительной процедуры атмосферной коррекции, поскольку он устраняет основные ошибки, связанные с присутствием в атмосфере пыли и, как было показано в работе, не ухудшает результатов атмосферной коррекции в случае отсутствия аридного аэрозоля в атмосфере.

Вопросы и замечания по диссертации

- (1) Положения, выносимые на защиту, могли бы быть сформулированы с соответствующей конкретикой. В представленном виде трудно понять, в чем собственно достоинство и новизна предложенной аналитической формулы (положение 1), спектральной зависимости (положение 2) и алгоритма коррекции данных (положение 3). Ясно, что представленная в работе методика коррекции данных позволит получать более реалистичные значения концентрации Хл, чем дает стандартный продукт. Правда, этот вывод не сформулирован в явном виде, и результат расчета концентрации Хл в работе не приведен (хотя это, безусловно, усилило бы диссертацию). Автор пишет: «Также пересчет индекса цвета, который впоследствии используется при расчете хлорофилла-а, показал, что цветения в центральной части Черного моря нет (что подтверждается многолетними экспедиционными наблюдениями за сентябрь в Черном море)» (стр. 93). Сравнения с данными контактных измерений проведено не было.

- (2) Не все статьи, приведенные в списке работ во введении, вошли в диссертацию.

Например, Калинская Д.В., Вареник А.В., Папкина А.С. «Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля над Черноморским регионом» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018; 15(3):217. (в тексте представлены англоязычные выходные данные). В тексте диссертации нет упоминания фосфора или кремния. Связь этой статьи с диссертацией заключается только в использовании семидневных обратных траекторий для подтверждения переноса аэрозоля со стороны Сахары. В статье анализируются данные за 2010 год, в диссертации – за 2017 и 2018 гг.

Папкина А.С., Папков С.О., Шукало Д.М. «CALIPSO стратификация атмосферного аэрозоля с экологической оценкой над Черноморским регионом» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020; 17(1): 234-42. (в тексте представлены англоязычные выходные данные). Данные CALIPSO в диссертации не используются. Встречается только одно упоминание во введении. В статье тоже приведены обратные траектории за 2016 г., некоторые из них начинаются над Сахарой.

Калинская Д.В., Папкина А.С., Кабанов Д.М. «Исследование изменчивости оптических и микрофизических характеристик аэрозолей над Черным морем под воздействием пожаров Причерноморья за 2018-2019 годы» // Морской гидрофизический журнал. 2020; 36(215):559-70. (в тексте представлены англоязычные выходные данные). В тексте диссертации только одно упоминание пожаров: «В середине октября 2017 года ураган Офелия пересек западное побережье Европы, вызвав перенос одновременно 2 типов аэрозоля: пыли из Сахары и дыма пожаров

Пиренейского полуострова над несколькими европейскими регионами [Parkova et al., 2022]». Материалов статьи, опубликованной в МГЖ в 2020 г., в диссертации нет.

Parkova A., Parkov S., Shukalo D. «Prediction of the Atmospheric Dustiness over the Black Sea Region Using the WRF-Chem Model» // Fluids. 2021 May 27; 6(6): 201. Результаты, связанные с WRF, не попали в работу.

Таким образом, во введении автор отмечает, что результаты работы опубликованы в 8 статьях, удовлетворяющих требованиям ВАК, однако, непосредственная связь четырех публикаций (1-3 и 5) с содержанием диссертации неочевидна. Кроме того, абсолютно непонятно зачем автор приводил свой список опубликованных работ на английском языке, поскольку 4 работы опубликованы на русском языке в журнале «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» и это подтверждается приведенными DOI. В случае 1 статьи в «Physical Oceanography» (2020 г.) – это переводная версия статьи на русском языке, опубликованная в «Морском гидрофизическом журнале». Это можно рассматривать, как неудачную попытку искусственно повысить значимость своих работ.

(3) Следует обратить внимание на необоснованность отдельных формулировок. Например,

3.1. «Как говорилось ранее в подразделе 1.1, при решении обратных задач восстановления оптических свойств морской воды по коэффициенту яркости его обычно связывают с отношением $\rho(\lambda) = k \cdot b_b(\lambda) / a(\lambda)$ » (стр. 29). При этом в разделе 1.1 (стр. 21) приводится соотношение, содержащее в знаменателе сумму a и b_b . В работе не приводится обоснование выполненного упрощения соотношения.

3.2. Стр. 48, Рис. 2.2. На спутниковых изображениях от 19.10.2017 и 16.10.2018 действительно видны пылевые шлейфы, но они абсолютно не доказывают, что они пришли из западной Сахары и тем более по указанным сложным траекториям, что видно по спутниковым изображениям всей восточной Европы.

3.3. Неточность и противоречие: «Стоит отметить, что рассматриваемые сканеры вращаются по определённым траекториям и только изредка попадают в рассматриваемую зону (Черноморский регион), ежедневно в Ocean Color по результатам съемки MODIS-Aqua предоставляется от одного до трех спутниковых снимков» (стр. 50). Три снимка в день, это не так редко.

3.4. «Для проверки качества натуральных измерений AERONET–OC будет использоваться трёхпараметрическая модель...» (стр. 55). Всего в используемой в работе биооптической модели пять параметров (формула 3.3), значения трех из них зафиксированы автором: $k=0,15$; $\alpha = 0,0015$; $\gamma = 1$ (стр. 54-55). Если при используемом подходе остается только два параметра, то становится непонятно, почему автор называет такую модель «трёхпараметрической».

3.5. Указанное автором на странице 55 значение параметра спектрального наклона поглощения неживой органики $\alpha = 0,0015 \text{ м}^{-1}$ на порядок меньше общепринятого (см., например, Оптика океана, Т.1, изд. Наука, 1983, стр. 158; Werdell P.J., et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. Applied optics. 2013). Если это не опечатка, то результат расчета содержит систематическую погрешность.

3.6. Формула 3.3 не содержит показателя Ангстрема, информация о фиксации его значений представляется здесь неуместной (стр. 55).

3.7. Фраза «Стоит отметить, что в данной модели хлорофилл-а является подгоночным параметром, так как в Черном море «цвет» определяется растворенной органикой» (стр. 56) противоречит содержанию последующего раздела «3.2 Особенности изменчивости коэффициента яркости моря в западной части Черного моря. Изменения индекса цвета» (стр. 57), в котором

обсуждается влияние цветения фитопланктона на коэффициент яркости моря.

3.8. «Данные таблицы за 19.10.2017 показывают занижение показателей $R_{rs}(\lambda)$ в коротковолновой области, с резким увеличением значений в видимой и ИК области спектра, что является признаком аномалии и неверной атмосферной коррекции (таблица 4.2)» (стр. 78) – в таблице нет данных, соответствующих ИК области спектра.

(4) Общее впечатление портит небрежность оформления и использования терминологии:

4.1. В Разделе 1 и 4 не все формулы пронумерованы.

4.2. CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) – это лидар, а не радар (стр. 7).

4.3. Python – это язык программирования, а не «математический пакет» (стр. 8).

4.4. μ в уравнении (1.1) обозначает косинус зенитного угла, а не сам угол (стр. 16).

4.5. В уравнении (1.4) не расшифрованы переменные μ_0 и φ_0 (стр. 17).

4.6. T – коэффициент пропускания Френеля (стр. 22).

4.7. В работе [Morel et al., 1995] нет представленной формулы (стр. 22).

4.8. В первой формуле на странице 25 нет переменной L_{sky} .

4.9. AERONET – Aerosol Robotic Network (стр. 43)

4.10. Представляется некорректным называть базу данных SeaBASS «системой проверки» (стр. 51).

4.11. В работе [IOCCG (2000)] нет упоминания базы данных SeaBASS (стр. 51).

4.12. Параметр Ангстрема (множество раз).

4.13. Одна и та же величина – вероятность выживания фотона (или альbedo однократного рассеяния в переводе с английского) – обозначается в работе тремя способами: w , SSA, L .

4.14. Не указана величина, приводимая в таблице 4.5. Чем объясняется ее изменчивость почти на 7 порядков?

4.15. Ссылка на рис. 7 вместо рис. 4.11 (стр. 91).

4.16. В цветовой шкале к рис. 4.11б указано, что на нем представлена концентрация Хл, в то же время, в подписи к рисунку указано, что на рисунке показан индекс цвета.

4.17. На многие карты не нанесена координатная сетка, что затрудняет восприятие представленных результатов.

4.18. Список условных обозначений имеет две расшифровки аббревиатуры SMA (стр. 102).

4.19. Разнородное оформление литературных ссылок.

4.20. Ссылка 23 неполная.

4.21. Ссылки 82 и 83 идентичны.

4.22. Ссылки на литературу в тексте выполнены не по стандарту, они не должны включать инициалы – см., например, на стр. 5 – «[Moulin, C et al., 2001; Паршиков С.В. и др. 1992; Суетин В.С. и др., 2004; Корчемкина Е.Н. и др. 2009; Shibanov E.V. et al., 2008].

4.23. Текст диссертации содержит множество опечаток, он плохо вычитан.

Отметим, что вышеуказанные неточности не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Папковой А.С., имеющую важное научное и прикладное значение.

Заключение

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченный этап исследований по актуальной теме. Получены новые результаты в области оптики естественных сред, существенно улучшающие качество спутниковых данных сканеров цвета моря в условиях поглощающего аэрозоля над акваторией Черного моря.

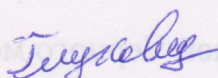
В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя.

Работа хорошо апробирована. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации. Всего по теме диссертации опубликованы 17 научных работ, из них 8 статей – в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus. Автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842.

Диссертация полностью соответствует специальности 1.6.17 – «Океанология» и удовлетворяет всем требованиям действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Папкова Анна Станиславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических 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, протокол № 6 от 3 марта 2023 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 экспериментальной физики океана
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
доктор физико-математических наук (специальность 25.00.28 – Океаноло-
гия), профессор
117997, Москва, Нахимовский пр-т, д. 36
Телефон: +7-916-654-1721
E-mail: kostianoy@ocean.ru

Костяной Андрей Геннадьевич

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/>

Подпись сотрудников Глуховца Дмитрия Ильича и Костяного Андрея Генна-
дьевича заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
кандидат географических наук

Фалина Анастасия Сергеевна

« 3 » марта 2023 г.

