

На правах рукописи



Юшманова Анна Владимировна

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН
ПОКАЗАТЕЛЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА МОРСКОЙ ВОДОЙ
КОНТАКТНЫМИ И ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук

Глуховец Дмитрий Ильич

Официальные

Будак Владимир Павлович,

оппоненты:

доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Мольков Александр Андреевич,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится «__» декабря 2022 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <https://disser.ocean.ru/> Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Соловьев Дмитрий
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Поглощение и рассеяние – основные процессы, определяющие распространение светового излучения в морской воде [Шифрин, 1983; Оптика океана Т.1, 1983]. Энергия поглощенного света может быть направлена на целый ряд процессов, из которых выделим два важнейших: нагрев морской воды и фотосинтез. Первый процесс важен при анализе климатической изменчивости, что особенно актуально в Арктике в связи с проявлениями глобального потепления [Duarte et al., 2012; Gulev et al., 2021]. Важно отметить, что механизм отрицательной обратной связи между площадью ледового покрова и поступлением солнечной радиации в толщу морской воды в Арктике [Perovich et al., 2011; Stroeve et al., 2014] делает исследования параметров, определяющих поглощение света морской водой, еще более актуальными. Данные о поглощении света необходимы и для морской биологии, в частности для оценки доступной фотосинтетически активной радиации (ФАР) на разных глубинах [Kirk, 1994; Копелевич и др., 2006; Чурилова и др., 2009; Копелевич и др., 2017], расчета первичной продукции океана [Fox et al., 2022] и оценки таксономического состава фитопланктона [Ciotti et al., 2002; Чурилова и др., 2008; Погосян и др., 2015], в частности, для обнаружения массовых токсичных цветений [Ahn and Shanmugam 2006; Копелевич и др., 2016].

Наиболее точным источником данных о показателе поглощения света морской водой являются результаты прямых определений, выполненные в судовых экспедициях. В последние годы проводятся активные регулярные исследования параметров поглощения в арктическом регионе в морских экспедициях на судах Института Океанологии РАН (ИО РАН) [Копелевич и др., 2016; Флинт и др., 2016; Кравчишина и др., 2019, 2022; Flint et al., 2022]. Известны работы иностранных научных групп [Reynolds et al., 2019; Liu 2018; Macke et al., 2018]. Однако в целом, проблема комплексной оценки показателя поглощения для арктических районов еще не решена. Кроме того, для исследования климатической изменчивости

необходимы регулярные измерения различных параметров, в том числе, показателя поглощения света морской водой [Копелевич и Костяной, 2018].

Получение данных судовых измерений в Арктике связано с рядом трудностей, в первую очередь, с суровыми погодными условиями в течение значительной части года и относительной труднодоступностью региона. Поэтому данные прямых определений фрагментарны. Однако именно они позволяют разрабатывать и модифицировать спутниковые региональные алгоритмы, позволяющие проводить оценку параметров поглощения морской воды в широком пространственно-временном масштабе [Копелевич и др., 2018]. Региональные алгоритмы учитывают особенности, определяющие оптические характеристики морской воды, и позволяют получать более точные результаты по сравнению со стандартными алгоритмами, а также проводить регулярный мониторинг состояния экосистем [Алексанин и др., 2010; Лаврова и др., 2011; Костяной, 2017].

Цель настоящей работы – комплексная оценка спектральных величин показателя поглощения света морской водой по данным прямых измерений, выполненных в морских экспедициях в Арктике и в северо-восточной части Черного моря преимущественно в летние сезоны, и спутниковых наблюдений; обобщение полученных результатов для различных регионов, исследование сезонной и межгодовой изменчивости параметров поглощения, выделение роли обуславливающих эту изменчивость факторов. Комплексная оценка включает результат исследований закономерностей пространственного распределения параметров поглощения (поглощение окрашенным растворенным органическим веществом и взвешенными частицами) и получение информации о диапазоне их изменчивости.

Для осуществления данной цели были сформулированы следующие задачи:

- подтвердить обоснованность ламбертовского приближения и проверить влияние использования различных индикатрис рассеяния на результаты расчета путем численного моделирования формирования структуры светового поля в интегрирующей сфере методом Монте-Карло.

- выявить особенности использования сферы с зеркальным покрытием для определений показателя поглощения морской воды методом численных расчетов.
- разработать методику расчета профилей спектрального поглощения взвешенными частицами с учетом стратификации биооптических характеристик;
- оценить влияние ветрового перемешивания на распространение биооптических характеристик на примере поверхностного слоя Черного моря;
- оценить погрешность определения показателя поглощения окрашенным растворенным органическим веществом (ОРОВ) по спутниковым данным сканера цвета OLCI в Баренцевом и Карском морях;
- определить точность использования разработанного для Карского моря регионального спутникового алгоритма расчета показателя поглощения ОРОВ в Баренцевом море.

Научная значимость работы обусловлена получением новых данных о пространственном распределении параметров поглощения в арктическом регионе в условиях глобального потепления. Усовершенствованная в работе методика прямого определения показателя поглощения с помощью интегрирующей сферы применима в различных водах Мирового океана в различные сезоны.

Практическая значимость связана с возможностью совершенствования мониторинга морских экосистем по данным дистанционного спутникового зондирования, в первую очередь для арктического региона. Кроме того, прямые определения показателя поглощения морской воды позволяют определять таксономический состав фитопланктона, в частности, детектировать массовые токсичные цветения.

Методы исследования. Значения спектрального показателя поглощения света морской воды измерялись с использованием интегрирующей сферы в конфигурации ICAM [Погосян и др., 2009]. Спутниковые значения биооптических параметров рассчитаны как по стандартным алгоритмам NASA, так и по разработанным в Лаборатории оптики океана (ЛОО) ИО РАН региональным

алгоритмам [Копелевич и др., 2018]. Для построения соответствующих пространственных распределений использовалась система пакетной обработки океанологических спутниковых данных SMCS [Шеберстов и др., 2015] и Matlab.

Научную новизну исследования составляют основные положения, выносимые на защиту:

1. Численное моделирование методом Монте-Карло показало, что для определения показателя поглощения морской воды с использованием заполняемой интегрирующей сферы с зеркальным покрытием необходимо знать точное значение показателя рассеяния. Погрешность при определении показателя поглощения без учета параметров рассеяния может привести к ошибке в сотни процентов.
2. Разработана методика использования вертикального профиля показателя ослабления света морской водой в эвфотическом слое для расчета вертикальных профилей спектрального показателя поглощения взвешенными частицами для вод первого типа. Ее применение позволяет получать более точную оценку характеристик подводных световых полей и профилей концентрации хлорофилла «*a*» (*Chl*).
3. На основе совместного анализа спутниковых данных сканера цвета OLCI (Sentinel-3) о показателе поглощения ОРОВ на длине волны 443 нм $a_g(443)$ и данных судовых измерений этой величины, выполненных с помощью интегрирующей сферы, показано, что реальная погрешность использования стандартного алгоритма OLCI для расчета $a_g(443)$ в арктических морях России существенно выше ($>100\%$), чем указываемая в спутниковых данных погрешность стандартного продукта ($\sim 10\%$).
4. Разработанный для Карского моря региональный алгоритм определения показателя поглощения ОРОВ применим и в Баренцевом море. При этом для медианных значений рассчитанных по данным спутниковых сканеров цвета MODIS показателей поглощения ОРОВ относительная ошибка составляет около 30% (при ошибке стандартных продуктов – около 60%). Это позволяет отчетливо выделить пространственно-временные изменения показателя

поглощения ОРОВ, связанные с влиянием стока вод Белого моря, и цветением фитопланктона в Баренцевом море.

Достоверность научных результатов обеспечивается: использованием калиброванного спектрофотометра с интегрирующей сферой [Погосян и др., 2009] и отработанной методики для получения данных прямых определений параметров поглощения морской воды непосредственно в судовых экспедициях [Глуховец и др., 2017], а также использованием региональных алгоритмов ЛОО ИО РАН, основанных на данных *in situ* [Копелевич и др., 2018].

Апробация диссертационной работы. Основные результаты настоящей диссертации были представлены на заседании Ученого совета Физического направления ИО РАН и докладывались на конференциях и школе-семинаре: Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2022 г.; «Геология морей и океанов», ИО РАН, Москва, 2022 г.; «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 2017–2021 гг.; «Комплексные исследования мирового океана», ИО РАН, Москва, 2017 г., 2021 г.; «Современные проблемы оптики естественных вод», Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г., 2021 г.; «Современные проблемы термогидромеханики океана», Москва, 2017 г.; «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 2017 г.

Личный вклад автора. Большая часть данных судовых измерений показателя поглощения морской воды, на основе которой написана работа, получены непосредственно автором в арктических морях России на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в 2018 – 2021 гг. и в Черном море на МНИС «Ашамба» в 2017 и 2018 гг. Проведены обработка и анализ судовых и спутниковых данных, подготовка полученных результатов к публикации и их представление на российских и международных конференциях.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 4 опубликованных и 1 принятая в печать статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 глава в монографии, 18 тезисов докладов на международных и российских научных конференциях.

Объем и структура работы. Работа изложена на 109 страницах текста, содержит 57 рисунков, 14 таблиц и 17 формул. Список литературы насчитывает 201 наименование.

Благодарности. Автор благодарит заведующего Лаборатории оптики океана ИО РАН, кандидата физико-математических наук Глуховца Дмитрия Ильича за безграничную щедрость в предоставлении ценных рекомендаций по усовершенствованию материала. Постоянное воодушевление и моральная поддержка, исходящие от научного руководителя, для автора имели огромное значение. Автор также благодарит дружный коллектив ИО РАН лабораторий оптики океана, физико-геологических исследований, структуры и динамики планктонных сообществ и химии океана: С.В. Шеберстова за ценные консультации и материалы; С.В. Вазюля и Ю.А. Гольдина за прочтение материала с чутким вниманием и содействие автору советами; И.В. Салинг за помощь в обработке спутниковых данных; В.А. Артемьева, П.В. Хлебопашева, Д.Н. Дерягина – за помощь в работе; д.б.н. А.Б. Демидова, к.б.н. С.А. Мошарова, к.б.н. А.В. Лифанчук и к.г.-м.н. М.Д. Кравчишину – за данные прямых определений концентрации хлорофилла «а»; П.Г. Каралли и В.О. Муравья – за помощь в измерении показателя поглощения морской воды. Отдельную благодарность автор выражает профессору д.б.н. С.И. Погосяну (биологический факультет МГУ) за предоставленную возможность использования измерителя поглощения ICAM. И особо искренне диссертант хотел бы поблагодарить родителей Юшмановых В.В. и В.Н. и близких друзей Д.И. Фрея и М.А. Павлову, которые помогали преодолевать сомнения, колебания и поддерживали морально.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, излагаются ее цель и постановленные задачи, ее научная новизна, научная и практическая значимость, а также представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор текущего состояния проблемы исследования поглощения света морской водой, описывается поглощение

компонентами морской воды, методы измерений и теория формирования структуры светового поля в интегрирующей сфере.

Вторая глава посвящена материалам и методам исследования показателя поглощения морской воды. **Раздел 2.1** включает в себя описание методов получения натуральных данных о показателе поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы ICAM [Погосян и др., 2009].

Раздел 2.2 посвящён численному моделированию формирования структуры светового поля в интегрирующей сфере методом Монте-Карло. В **разделе 2.2.1** представлена блок-схема написанной для моделирования программы. Программа содержит три отдельных модуля: *seawater*, *quartz* и *fluorilon*, в каждом из которых осуществляется моделирование событий, происходящих с фотоном в соответствующей среде. Под событиями здесь подразумеваются столкновение фотона с границей среды, рассеяние в воде или флуорилоне, поглощение в любой из сред, выход наружу за пределы флуорилоновой оболочки и попадание в регистратор. Положение текущего события в пространстве задается вектором r_1 , направление движения после события определяется единичным вектором x . Переход к следующему событию моделируется так: вычисляется длина свободного пробега $l = -\ln(rnd)/c$, где rnd – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $[0, 1]$, а c – показатель ослабления света в данной среде. Коэффициент отражения неполяризованного света получается усреднением коэффициентов отражения для двух поляризаций по формулам Френеля. Входными параметрами программы расчета являются количество фотонов (оптимальное 10^6 - 10^7); показатели поглощения и рассеяния морской воды; показатели преломления воды, кварца и флуорилон; радиусы сфер и размеры выходного отверстия. Кроме того, для морской воды и флуорилон задавалась индикатриса рассеяния Петцольда [Petzold, 1972], Копелевича [Оптика океана Т.1, 1983], Хеньи-Гринштейна [Henyeu and Greenstein, 1941]. Результатом работы программы является выходящий в световой поток I как функция показателя поглощения, а также количество фотонов, поглощенных в каждой из сред, средний пройденный путь фотона, альbedo и средняя облученность на стенке E_{norm} .

В разделе 2.2.2 проведено исследование гипотезы применимости ламбертовского приближения для ускорения расчетов. Результаты численного моделирования показали (рис. 1), что использование ламбертовского приближения позволяет на порядок сократить время расчетов с приемлемой для данных расчетов потерей точности (8%). В разделе 2.2.3 продемонстрировано, что в случае интегрирующей сферы, выполненной из флуорилона, использование различных индикатрис рассеяния (на примере индикатрис Петцольда, Копелевича и Хеньи-Гринштейна) не влияет на результат расчета. В разделе 2.2.4 выполнены численные расчеты, позволившие оценить влияние наличия воздушной прослойки между кварцем и флуорилоном. Интенсивность сигнала при ее наличии несколько выше, чем при отсутствии. Однако на практике влияние этого эффекта нивелируется тем, что все измерения, включая опорное (пустой сферы или чистой воды), выполняются в одних и тех же условиях.

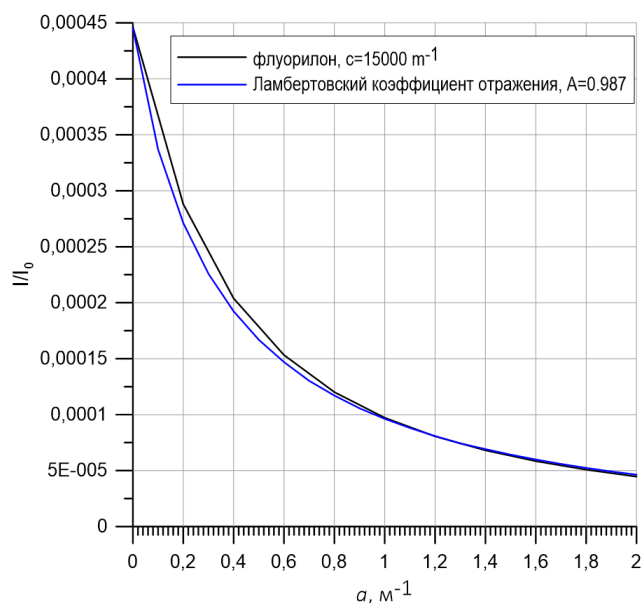


Рисунок 1 – Иллюстрация применимости ламбертовского приближения

В разделе 2.2.5 подробно рассмотрен случай сферы с зеркальными стенками и ее применимость для измерения поглощения света морской водой. Серебро поглощает свет интенсивнее флуорилон. Коэффициент отражения рассчитывается по формуле Френеля, с учетом, что коэффициент преломления металла является комплексным числом, $\tilde{n}_s = n_s - i \cdot \chi$. Для серебра $n_s = 0,18$; $\chi = 3,64$ [Сивухин,

2002]. Зеркальная сфера отличается от сферы с диффузно рассеивающими стенками тем, что при многократных отражениях изотропизация углового распределения фотонов происходит существенно медленнее, либо в случае невысоких значений показателя рассеяния пробы не происходит вообще. Кроме того, коэффициент отражения (альbedo) серебра существенно меньше, чем альbedo флуорилона. Таким образом, интенсивность регистрируемого сигнала в значительной степени определяется не только показателем поглощения, но и показателем рассеяния. На рис. 2 представлены графики зависимостей сигнала от показателя рассеяния при показателе поглощения $a=0,2 \text{ м}^{-1}$ и двух индикатрис Хеньи-Гринштейна с параметрами $g=0,6$ и $g=0,9$. Выбор индикатрисы, а, следовательно, и влияние рассеяния, перестают определять параметры светового поля внутри сферы при значениях показателя рассеяния, превышающих $25-30 \text{ м}^{-1}$. Такие значения на порядок превышают соответствующий показатель, характерный для самых мутных природных вод Мирового океана [Левин и Копелевич, 2007].

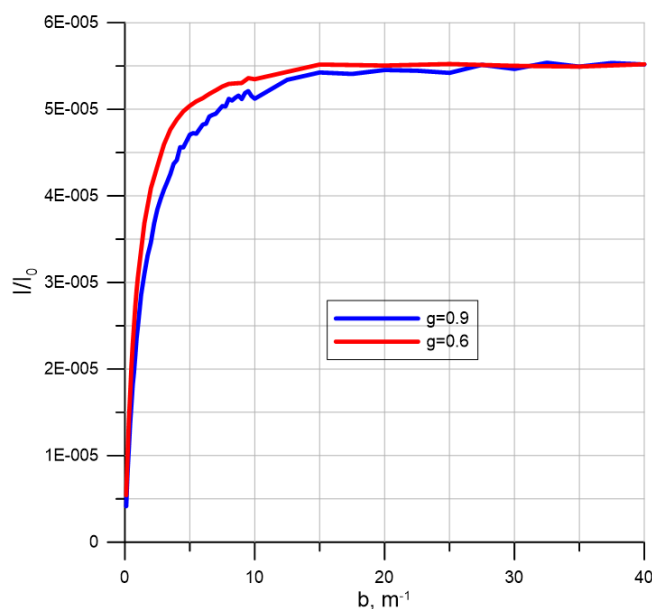


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности выходного сигнала от показателя рассеяния для различных индикатрис для случая зеркальной сферы

Для определения показателя поглощения с использованием зеркальных сфер необходимо знать точное значение показателя рассеяния, измерение которого само по себе представляет достаточно сложную задачу. Погрешность при определении

показателя поглощения без учета параметров рассеяния может привести к ошибке в сотни процентов. В качестве рекомендации использования подобной схемы измерений можно предложить метод добавления в пробу морской воды светорассеивающей добавки (суспензии) с известным показателем рассеяния и низким поглощением. Примеры использования суспензии Маалокс в гидрооптических измерениях можно найти в работах [Ли и др., 2015; Шибанов и Ли, 2021]. В разделе 2.3 представлена информация о сопутствующих гидрооптических измерениях с кратким описанием приборного комплекса Лаборатории оптики океана ИО РАН. В разделе 2.4 описана методика учета стратификации оптических характеристик для расчета вертикальных профилей спектрального показателя поглощения взвешенными частицами. Методика разрабатывалась для вод первого типа [Morel and Prieur, 1977], в которых значения первичных гидрооптических характеристик можно параметризовать через концентрацию Chl , пренебрегая вкладом остальных растворенных и взвешенных в морской воде компонентов. Судовые данные получены в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», проходившего 24 июля – 26 августа 2021 г. в водах Северного Ледовитого океана, удаленных от источников материкового стока. Для расчета вертикальных профилей $a_p(\lambda, z)$ по данным измерений на нескольких горизонтах и профилю $c(530, z)$ необходимо найти связь между этими величинами. В качестве опорной длины волны для построения корреляционного соотношения, связывающего $a_p(\lambda)$ и $c(530)$ была выбрана $\lambda_0 = 443$ нм (рис. 3). Такой выбор связан с возможностью сопоставления значений показателя поглощения взвеси $a_p(443)$, рассчитанных на основе $c(530)$, с данными стандартных продуктов спутниковых сканеров цвета. Полученное уравнение регрессии

$$a_p^{\text{calc}}(443, z) = 0,13 * c(530) - 0,01 \quad (1)$$

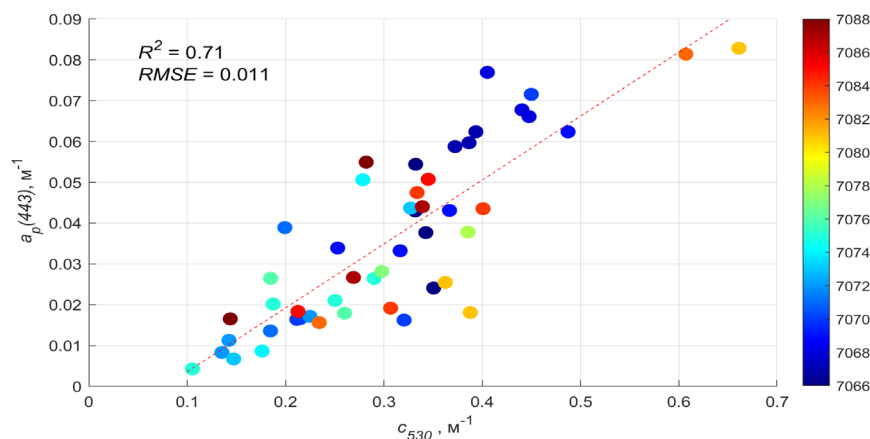


Рисунок 3 – Диаграмма рассеяния между $a_p(443)$ и $c(530)$. Красный пунктир – линия регрессии, цветом обозначены номера станций

используется для расчёта вертикальных профилей показателя поглощения взвешенными частицами на длине волны 443 нм. Затем выполняется интерполяция (между горизонтами z_i с измеренными на пробах морской воды значениями $a_p(\lambda, z_i)$) и экстраполяция (от верхнего горизонта к поверхности и от нижнего горизонта вниз) для получения $a_p^{int}(\lambda, z)$. Итоговые значения показателя поглощения взвесью рассчитываются по формуле

$$a_p(\lambda, z) = \frac{a_p^{calc}(\lambda, 443)}{a_p^{int}(\lambda, 443)} a_p^{int}(\lambda, z). \quad (2)$$

Одно из применений данной методики – получение профилей концентрации хлорофилла «а». Для их расчета использовались две биооптические модели: Chl_{Boss} [Boss et al, 2007] и $Chl_{Bricaud}$ [Bricaud et al., 1998]. Значения Chl_{Boss} рассчитывались по амплитуде пика поглощения Chl в длинноволновой области с использованием формулы:

$$Chl_{Boss} = \frac{a_p(676) - 20/46 * a_p(650) - 26/46 * a_p(696)}{0,014}, \quad (3)$$

где в скобках указаны длины волн, а 0,014 мкг/л·м – удельное поглощение Chl для вод первого типа. Значения коэффициентов в числителе отличаются от предложенных авторами для соответствия спектральному диапазону данных $a_p(\lambda)$, измеряемых с помощью интегрирующей сферы. Значения $Chl_{Bricaud}$ получены путем минимизации среднеквадратичного отклонения между измеренными на

интегрирующей сфере спектрами поглощения взвешенными частицами и рассчитанными для различных концентраций Chl с помощью модели [Bricaud et al., 1998] спектрами поглощения пигментов фитопланктона.

Для оценки применимости моделей расчета Chl построены диаграммы рассеяния для данных прямых определений концентрации Chl и рассчитанных по двум методикам – рис. 4. Различие в количестве пар данных связано с тем, что пробы на концентрацию Chl отбирались чаще, чем на поглощение морской воды. Интенсивность флуоресценции может изменяться в зависимости от условий освещения, видового состава фитопланктона и состояния клеток [Карабашев, 1987; Falkowski and Raven, 2013]. Перечисленные факторы влияют на связь концентрации и интенсивности флуоресценции Chl [Глуховец, 2019]. Вертикальные профили интенсивности флуоресценции Chl могут быть использованы для получения профилей его концентрации.

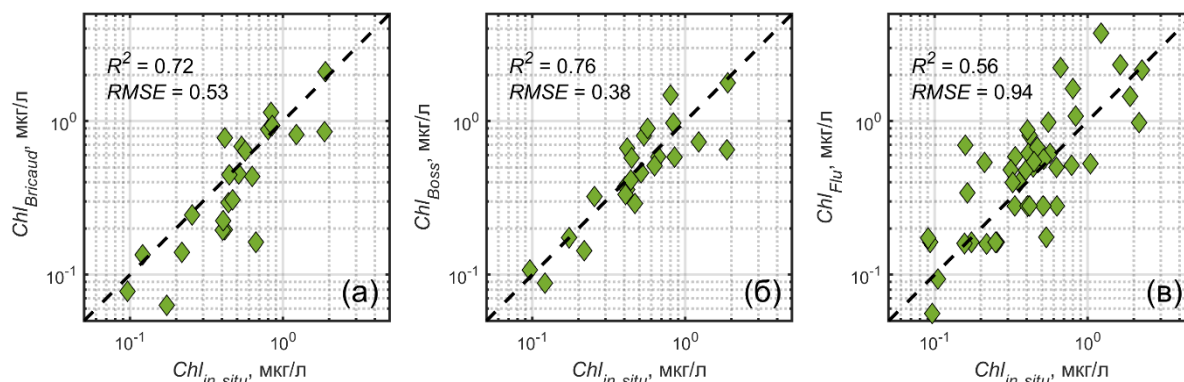


Рисунок 4 – Сопоставление величин $Chl_{in\ situ}$ с концентрациями хлорофилла, рассчитанными через спектры $a_p(\lambda, z_i)$ по методикам Bricaud (а), Boss (б) и по интенсивности флуоресценции (в). Пунктирными линиями представлены линии идеального соответствия

В разделе 2.5 представлены материалы и методы использования данных дистанционного зондирования и реанализа: используемые сканеры цвета (Aqua\Terra, VIIRS Suomi-NPP\NOAA-20 и OLCI Sentinel 3A/B), алгоритмы расчета биооптических характеристик (алгоритм нейронных сетей OLCI, RSA, QAA, GIOP), данные реанализа ERA-Interim о скорости ветра и осадках и данные Emersit об уровне рек Черного моря. В разделе 2.6 представлены выводы по Главе 2.

В третьей главе на основе результатов судовых измерений (шести экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш» 2016-2019 гг.) проведена валидация данных спутниковых сканеров цвета OLCI и MODIS в Баренцевом и Карском морях, выполнена оценка величин показателя поглощения окрашенным растворенным органическим веществом (ОРОВ). В разделе 3.1. представлено сравнение данных показателя поглощения ОРОВ, измеренных на интегрирующей сфере ($a_g \text{ icam}$), с данными второго уровня ADG_443_NN ($a_g \text{ olci std}$) стандартного продукта сканера цвета OLCI; рис.5а – полный набор данных (151), 5б – исключены устья рек, станции с большими зенитными углами солнца (более 75°) и другие факторы, препятствующие получению качественных данных, 5с и 5д - стандартные ошибки продукта ADG_443_NN_err в сравнении со значениями ADG_443_NN для файла OLCI L2 S3A_OL_2_WFR_20170814T091713. Сравнивая рис. 5б и 5д, можно

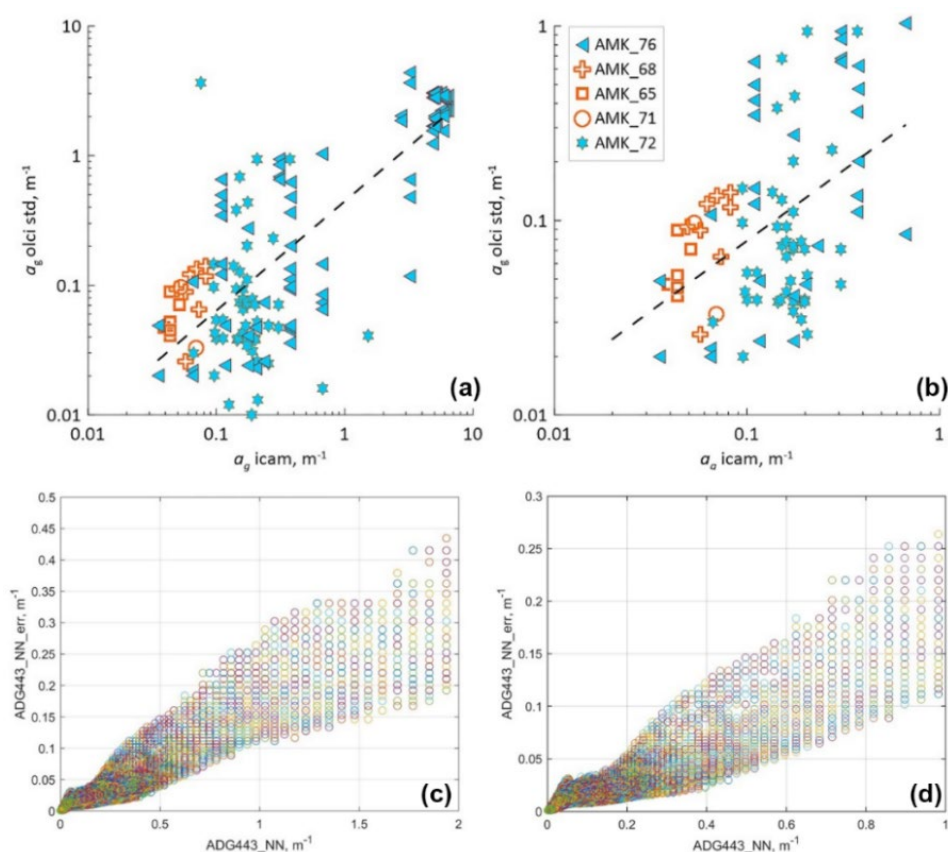


Рисунок 5 – Сверху: диаграммы рассеяния для значений $a_g(443)$, измеренных *in situ* и полученных со спутника: (а) — полный набор данных; (б) – данные по устьям рек исключены.

Внизу: стандартные ошибки продукта ADG_443_NN_err в сравнении со значениями ADG_443_NN для файла OLCI L2 S3A_OL_2_WFR_20170814T091713; (с) полный набор данных; (д) то же в увеличенном масштабе. Баренцево море, 14 августа 2017 г.

увидеть, что реальные погрешности значительно ($>100\%$) превышают расчетные погрешности ADG443_NN_err ($\sim 10\%$).

В разделе 3.2 представлена валидация спутниковых алгоритмов для оценки значений показателя поглощения ОРОВ $a_g(443)$ по данным MODIS в Баренцевом море. Для анализа применялись следующие алгоритмы:

- Региональный алгоритм (RSA), разработанный в Лаборатории оптики океана ИО РАН [Вазюля и др., 2014]. Его особенность заключается в том, что в нем не используется коротковолновая часть спектра (каналы 412, 443 и 469 нм), где велика вероятность ошибок атмосферной коррекции. В качестве входного параметра использовались результаты расчета концентрации хлорофилла «a», полученные по региональному алгоритму для Баренцева моря [Каралли и Вазюля, 2021]. Кроме того, произведена модификация алгоритма расчета показателя поглощения взвешенными частицами или пигментами фитопланктона [Bricaud, et al., 1998] в зависимости от присутствия кокколитофоридного цветения.
- Алгоритм GIOP (*Generalized Inherent Optical Properties*) [Werdell et al., 2013] разработан и используется NASA, как стандартный метод получения значений показателя поглощения ОРОВ совместно с нефитопланктонной составляющей взвеси $a_{dg_iop}(443)$ по данным спутниковых сканеров цвета MODIS. Относительно низкие концентрации взвеси в Баренцевом море [Политова и др., 2019], за исключением района цветения кокколитофорид, позволяют пренебречь ее поглощением, и сравнивать спутниковые данные $a_{dg_iop}(443)$ непосредственно с результатами прямых определений $a_g(443)$.
- Квазианалитический алгоритм QAA (*Quasi-Analytical Algorithm*) [Lee et al., 2013], особенность которого – определение оптических параметров в зависимости типа вод: прибрежных ($R_{rs_670} > 0,0015$) или открытого океана. Согласно данному алгоритму $a_{dg_qaa}(443) = a_{g_qaa}(443)$.

Сопоставление спутниковых и натуральных данных (шесть экспедиций в летний период 2016-2021 гг. на НИС «Академик Мстислав Келдыш») показателя поглощения ОРОВ, в зависимости от используемого алгоритма – RSA, QAA, GIOP,

показало, что наименьшее отклонение наблюдается у алгоритма RSA ($RMSE = 0,022$, $RE = 33\%$). Алгоритмы GIOP и QAA чаще всего занижают значения данного параметра (QAA $RMSE = 0,029$, $RE = 45\%$; GIOP $RMSE = 0,037$, $RE = 61\%$), количество пар данных 125. Спутниковые карты распределения показателя поглощения ОРОВ дают возможность анализировать пространственно-временное распределение $a_g(443)$. Однако широко используемые алгоритмы QAA и GIOP занижают величины $a_g(443)$, что делает затруднительным проведение такого исследования. Использование регионального алгоритма Лаборатории оптики океана ИО РАН RSA позволяет зарегистрировать пространственно-временные изменения показателя поглощения ОРОВ, связанные с влиянием стока вод Белого моря, богатых ОРОВ, и цветением фитопланктона в Баренцевом море (рис. 6). В разделе 3.3 представлены выводы по Главе 3.

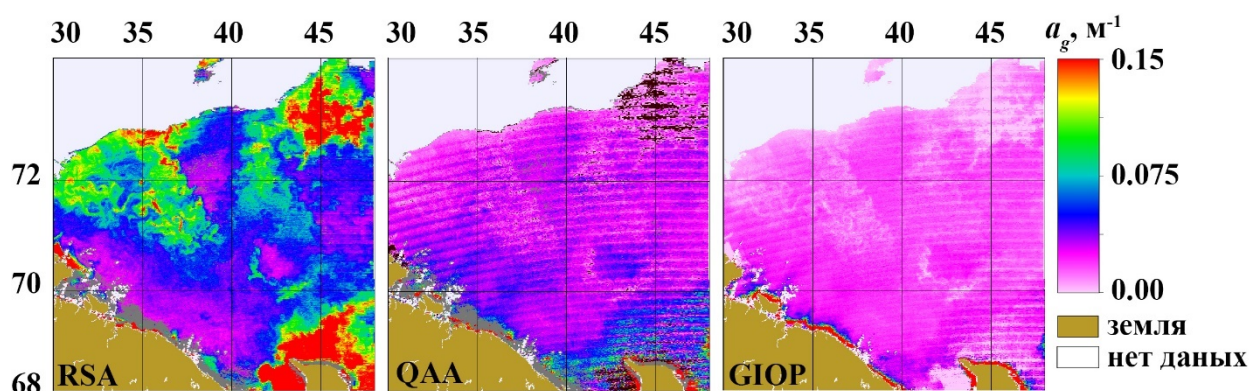


Рисунок 6 – Карты пространственного распределения показателя поглощения ОРОВ для алгоритмов RSA, QAA и GIOP во время 1 этапа экспедиции АМК 83, 12 июня 2021 г.

В четвертой главе рассматривается анализ изменчивости показателя поглощения ОРОВ по спутниковым и судовым данным в морях России. В разделе 4.1. – в северо-восточной части Черного моря, в районе Геленджика, на основе экспедиций в июне 2017 и 2018 гг. на МНИС «Ашамба». В 2017 г. по данным натуральных измерений и спутниковых определений наблюдались высокие значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} , при низких значениях a_g . В 2018 г., наоборот, наблюдались заметно более высокие значения показателей поглощения ОРОВ, особенно у побережья, но более низкие значения b_{bp} . Причина повышенных значений b_{bp} – кокколитофоридное цветение высокой интенсивности,

которое также ярко выражено в данных спектральных коэффициентов яркости моря $R_{rs}(\lambda)$, измеренных сканером цвета MODIS-Aqua в соответствующие годы. Повышенные значения показателя поглощения ОРОВ в поверхностном слое морской воды сопровождались высокими значениями солености. Это говорит о том, что речной сток не является единственным источником ОРОВ в поверхностном слое. Наблюдаемые в данном случае изменения обусловлены влиянием ветрового перемешивания стратифицированной толщи воды (рис. 7).

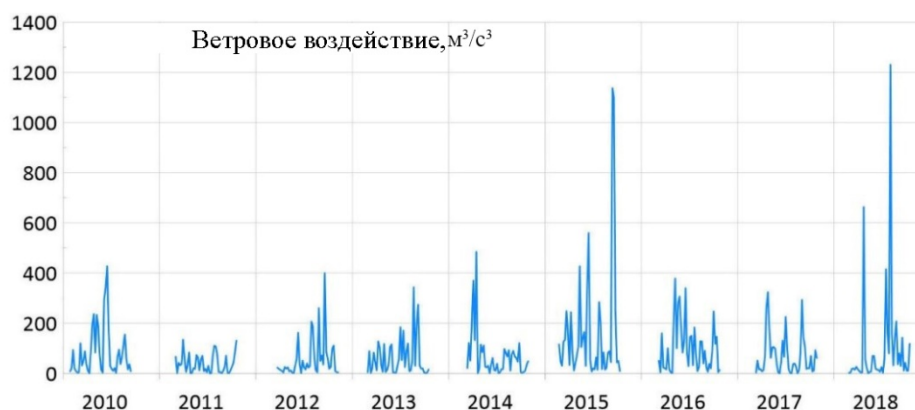


Рисунок 7. – Среднее ветровое воздействие на рассматриваемый период с 1 мая по 11 июня 2010 – 2018 гг.

Сравнение вертикальных профилей солености в 2017 и 2018 гг. выявило не только увеличение солености в верхнем 5-метровом слое (рис. 8б), но и изменение их формы – нарушение выраженной вертикальной стратификации, которая была в 2017 г. и опускание нижней границы галоуклина. Если увеличение солености в верхнем 5-метровом слое можно объяснить уменьшением количества осадков в 2018 г. (наименьшее количество с 1 апреля по 11 июня в период 2010-2018 гг.), то изменение нижележащего слоя позволяет предположить, что оно было обусловлено вертикальным перемешиванием, связанное с ветровым воздействием. Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что такая ситуация наблюдалась не только в 2018 г., но и в 2015 г., когда среднее ветровое воздействие было наиболее сильным за весь период 2010 – 2018 гг. (примерно в 1,7 раза сильнее, чем в 2018 г.), а соленость в слое 0 – 5 м была несколько выше, чем в 2018 г. (рис. 8б). В 2015 г. прямых измерений поглощения ОРОВ не проводилось, но оценка по

спутниковым данным показывает, что в июне значения a_g были даже выше, чем в 2018 г. – см. рис.8а.

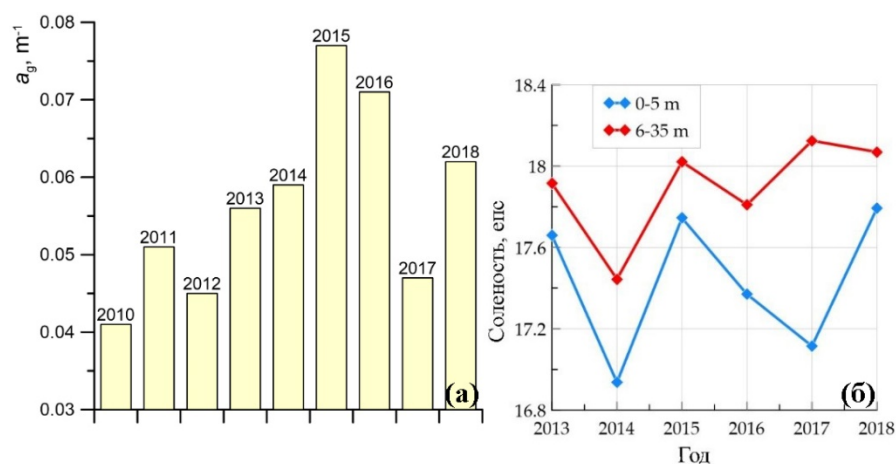


Рисунок 8 – (слева) изменчивость среднемесячных июньских значений a_g (443) по спутниковым данным; (справа) – изменение солености в слоях 0-5 м и 6-35 м за период 2013-2018 гг. (по данным *in situ* исследований в июне)

В разделе 4.2 описывается анализ изменчивости показателя поглощения ОРОВ на переходе по маршруту следования судна в пяти морях: Балтийском, Северном, Норвежском, Баренцевом и Белом. Одновременные измерения интенсивности флуоресценции и показателя поглощения ОРОВ зафиксировали четкое разделение оптических свойств исследованных морей, что позволяет разделять границы водных масс по данным гидрооптических измерений (рис. 9). В разделе 4.3 представлены выводы по Главе 4.

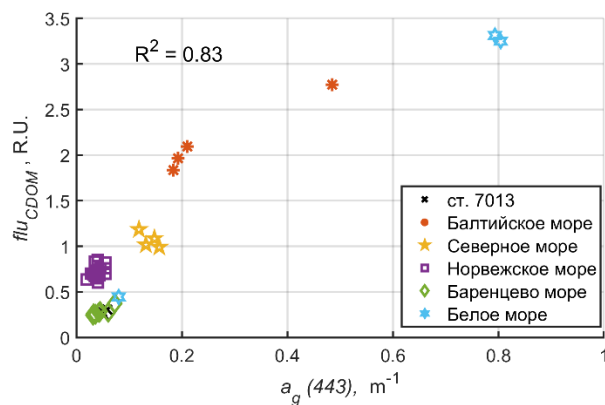


Рисунок 9 – Сопоставление интенсивности флуоресценции ОРОВ (flu_{CDOM}) и величин показателя поглощения a_g (443)

В **Заключении** представлены основные результаты работы:

- Численного моделирования показали, что использование ламбертовского приближения позволяет на порядок сократить время расчетов с приемлемой для данных расчетов потерей точности (8%). Продемонстрировано, что в случае интегрирующей сферы, выполненной из флуориллона, использование различных индикатрис рассеяния не влияет на результат расчета.
- Показано, что использование зеркальных сфер сопряжено с рядом методических трудностей. Для определения показателя поглощения с использованием таких сфер необходимо знать точное значение показателя рассеяния, измерение которого само по себе представляет достаточно сложную задачу. Погрешность при определении показателя поглощения без учета параметров рассеяния может привести к ошибке в сотни процентов.
- Создана методика расчета вертикальных профилей спектрального показателя поглощения взвешенными частицами с учетом стратификации по данным показателя ослабления морской воды.
- Оценено влияние ветрового перемешивания на распространение показателя поглощения ОРОВ в поверхностном слое Черного моря в районе Геленджика.
- Оценена точность определения показателя поглощения ОРОВ по спутниковым данным сканера цвета OLCI в Баренцевом и Карском морях.
- Определена применимость использования разработанного для Карского моря регионального спутникового алгоритма расчета показателя поглощения ОРОВ в Баренцевом море.
- Показано, что одновременные измерения интенсивности флуоресценции и показателя поглощения ОРОВ позволили зафиксировать четкое разделение оптических свойств исследованных морей, что позволяет разделять границы водных масс по данным гидрооптических измерений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. **Yushmanova A.V.**, Kopelevich O.V., Vazyulya S.V., Sahling I.V. Inter-annual variability of the seawater light absorption in surface layer of the northeastern Black Sea in connection with hydrometeorological factors // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. V. 7. No. 9. P. 326;
2. Glukhovets D.I., Kopelevich O.V., **Yushmanova A.V.**, Vazyulya S.V., Sheberstov S.V., Karalli P.G., Sahling I.V. Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 19. P. 3210.
3. Glukhovets D.I. Sheberstov S.V., Vazulya S.V., **Yushmanova A.V.**, Salyuk P.A., Sahling I.V., Aglova E.A. Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 19. P. 4995.
4. **Юшманова А.В.**, Дерягин Д.Н., Глуховец Д.И. Учет стратификации биооптических характеристик для расчета световых полей в водах первого типа // Океанологические исследования. 2022. Т. 50. №. 1. С. 38-48.

Глава в монографии:

5. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., **Юшманова А.В.** Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. // М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ». 2018. 140 с.

По теме диссертации опубликовано также 18 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Работа в издании из списка, рекомендованного ВАК, принятая к печати:

6. **Юшманова А.В.**, Вазюля С.В. Валидация спутниковых алгоритмов расчета показателя поглощения окрашенного растворенного органического вещества в Баренцевом море // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2022.

