

На правах рукописи



Липинская Надежда Александровна

**ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЯРКОСТИ
ВОСХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОРЯ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
СТРУКТУРАХ**

Специальность 1.6.17 - Океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток - 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель: **Салюк Павел Анатольевич**
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Павлов Андрей Николаевич**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Станичный Сергей Владимирович
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Морской гидрофизический институт Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Защита состоится 24 ноября 2023 г. в 13 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета 24.1.214.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук» по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук» и на сайте института: https://www.poi.dvo.ru/sites/default/files/Documents/Dissertation/2023/Lipinskaya/Диссертация_Липинская.pdf

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.214.02,
кандидат географических наук

Храпченков Фёдор Фомич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Дистанционное зондирование морской среды имеет большое значение для экологического мониторинга, оперативной океанологии, исследования изменений климата и для осуществления хозяйственной морской деятельности. В настоящее время спутниковые данные всё больше используются для исследования различных характеристик гидродинамических структур и процессов, оказывающих влияние на поверхностный слой моря. Кроме этого, спутниковые измерения активно используются при ассимиляции данных наблюдений в современных численных гидродинамических моделях циркуляции океана в том числе в моделях океанографического реанализа.

В последние десятилетия активно используются мультиспектральные спутниковые данные и внедряются гиперспектральные измерения с беспилотных летательных аппаратов в видимом спектральном диапазоне вне зоны солнечного блика. В таких данных гидродинамические структуры выделяются за счет пространственно-временной неоднородности содержания фитопланктона, окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) и взвешенных веществ. Дистанционно измеряемые спектральные характеристики коэффициентов яркости восходящего излучения моря (спектральный цвет моря), подверженные влиянию гидродинамических процессов, определяются вариациями содержания оптически-активных компонентов морской воды и/или формой их вертикального профиля в слое проникновения солнечного света в море.

Гидродинамические процессы могут приводить и к переносу клеток фитопланктона ближе к поверхности, где больше доступного света для фотосинтеза, а также подъему питательных веществ из более глубоких слоев к поверхности, приводящих к развитию клеток фитопланктона. Перечисленные факторы влияют на спектральный состав цвета моря и могут исследоваться с помощью дистанционного зондирования.

Современное развитие методов численного моделирования распространения света в системе «атмосфера-морская поверхность-морская толща» позволяет изучать процесс формирования спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения моря и определения их зависимости от изменчивости вертикальных профилей оптически-активных компонентов в приповерхностном слое моря. Использование этих методов численного моделирования спектрального цвета моря в диссертационной работе обуславливает ее актуальность.

Определение изменений характеристик дистанционно измеряемого спектрального цвета моря расширяет возможности изучения гидродинамических явлений и связанных биологических процессов, что важно и актуально в различных областях океанологии.

Цель диссертации — выявить изменчивость спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения моря, обусловленную вариациями горизонтального и/или вертикального распределения оптически-активных компонентов морской воды под влиянием гидродинамических процессов.

Для достижения цели были выполнены следующие **задачи**:

1. Создана база данных, содержащая результаты экспедиционных измерений различных гидрологических и гидрооптических характеристик, включая вертикальное распределение концентрации хлорофилла-а (хл-а), ОРОВ, коэффициентов яркости восходящего излучения моря, мутности, фотосинтетически-активной радиации, температуры, солености и плотности морской воды (*Нагорный и др.2017*).

2. Создана база данных спутниковых измерений цвета моря среднего пространственного разрешения MODIS-Aqua/-Terra, VIIRS-SuomiNPP/-NOAA-20, GOCI-COMS-1, OLCI-Sentinel-3A/-3B содержащая проявления гидродинамических структур (Салюк, Липинская, 2022).

3. Выполнен анализ изменчивости гидрооптических характеристик приповерхностного слоя моря при воздействии гидродинамических явлений, которые влияют на вертикальную стратификацию оптически-активных компонентов морской воды.

4. Идентифицированы гидродинамические процессы, которые влияют на вертикальную стратификацию оптически-активных компонентов морской воды в *in situ* и в дистанционных измерениях (Липинская, Салюк, 2020, 2021а, 2021б; Салюк и др., 2021; Salyuk et al., 2022; Липинская и др., 2021; Латушкин и др., 2023).

5. Настроен и адаптирован набор численных моделей для расчета спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря.

6. Рассчитаны коэффициенты яркости восходящего излучения моря в районах апвеллинга, мезомасштабных вихрей, и распространения внутренних волн.

7. Оценена максимальная глубина, на которой рассматриваемые гидродинамические структуры проявляются в дистанционных спектральных данных наблюдений цвета моря.

Защищаемые положения

1. Разработан метод определения глубины, на которой изменение положения слоя максимума концентрации хл-а на один метр значимо влияет на формирование спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения моря в области апвеллинга.

2. Изменение вертикальной стратификации оптически-активных компонентов под действием внутренних волн приводит к значительным вариациям коэффициентов яркости восходящего излучения моря в спектральном диапазоне 400-600нм, что позволяет дистанционно регистрировать эти волны.

3. Перераспределение концентрации оптически-активных компонентов морской воды и изменение их вертикальной стратификации в субмезомасштабных вихрях приводит к набору контрастных характеристик в спектрах коэффициентов яркости восходящего излучения моря, что позволяет выбрать параметры для наиболее эффективного дистанционного обнаружения субмезомасштабных вихрей методами пассивного оптического зондирования.

4. Разработан алгоритм оценки «максимальной глубины проявления конкретной гидродинамической структуры» в коэффициентах яркости восходящего излучения моря в зонах прибрежного апвеллинга, распространения внутренних волн и в субмезомасштабных вихрях на шельфе, где значимо изменяются пространственно-временные распределения оптически-активных компонентов морской воды.

Научная новизна работы:

Для изучения вертикальной изменчивости содержания оптически-активных компонентов и соответствующих изменений контрастных характеристик спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря под действием апвеллинга и внутренних волн впервые использованы методы прямого численного моделирования распространения света в системе «атмосфера – морская поверхность – морская толща».

Предложено определять контрастные характеристики проявления субмезомасштабного вихря в данных пассивного оптического зондирования на всех длинах волн видимого диапазона по отношению к статистическому шуму дистанционно полученных измерений и выбирать из них оптимальную, благодаря чему значительно увеличивается пространственно-временное покрытие изучаемого явления за счет увеличения количества регистрируемых проявлений.

Впервые введено понятие «максимальная глубина проявления гидродинамической структуры» в дистанционных спектральных данных по цвету моря (Z_{rsH}), дано определение, сформулирован метод её оценки и области использования.

Научная и практическая значимость работы

1. Результаты могут быть использованы для определения гидрооптических характеристик, обеспечивающих наилучший контраст для детектирования некоторых типов гидродинамических структур по дистанционным измерениям спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря.

2. Метод определения «максимальной глубины проявления гидродинамической структуры» позволяет улучшить интерпретацию дистанционных спектральных данных о цвете моря, связанную с вертикальной изменчивостью содержания оптически-активных компонентов морской воды и определять толщину поверхностного слоя моря, в котором гидродинамические структуры могут быть детектированы дистанционно в видимом диапазоне спектра, с учетом метода и качества измерений.

3. Созданный методический аппарат может быть применен для получения таблиц сравнения спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря и наборов вертикальных распределений оптически-активных компонентов морской воды при распространении апвеллингов, внутренних волн, вихрей, что позволит в оперативном режиме получать варианты возможных вертикальных профилей распределений оптически-активных компонентов морской воды из дистанционных измерений и оставлять из них только те, которые не противоречат результатам гидродинамического моделирования.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность результатов работы подтверждается согласованностью данных *in situ* измерений, дистанционных измерений и численного моделирования. Используются современные и общепризнанные приборы измерений, базы спутниковых данных, методы и программное обеспечение.

Полученные результаты были представлены в 6 рецензируемых журналах, а также представлены на 4 Всероссийских конференциях, 6 международных конференциях и на многочисленных научных семинарах ТОИ ДВО РАН, где были обсуждены с ведущими специалистами в области оптики океана и океанологии.

Личный вклад автора

Автором проведен сбор архивных спутниковых и экспедиционных данных, выполнена их организация в базу данных и обработка; принято участие в нескольких морских экспедициях, результаты измерений которых вошли в работу; произведен анализ изменчивости гидрооптических характеристик при воздействии внутренних волн, апвеллингов, вихрей; настроены и адаптированы модели для прямого численного моделирования распространения света в системе «атмосфера – морская поверхность – морская толща»; рассчитаны спектры коэффициентов яркости моря в рассматриваемых гидродинамических структурах; определен алгоритм оценки «максимальной глубины

проявления гидродинамической структуры» в коэффициентах яркости восходящего излучения моря; проанализированы, сформулированы и оформлены результаты исследований в научных публикациях; результаты представлены на 10 конференциях; постановка задач и разработка методик выполнены совместно с научным руководителем.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обозначена актуальность темы диссертации, определена цель исследования и перечислены поставленные задачи. Представлены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены личный вклад автора, список публикаций по теме диссертации и апробация результатов исследования.

В **первой главе** представлен аналитический обзор современного представления о формировании гидродинамических структур в данных дистанционного зондирования. Рассмотрены гидродинамические структуры (апвеллинги, внутренние волны, субмезомасштабные вихри), оказывающие влияние на вертикальную стратификацию вод и пространственно-временное распределение содержания оптически-активных компонентов морской воды. Представлена информация о типах гидродинамических процессов, их механизмах формирования и физических характеристиках.

В **разделе 1.1** и **разделе 1.2** содержится информация о теории формирования и современных методах измерений, расчетов оптических свойств морской воды, определяющих спектральный цвет моря.

Раздел 1.3 включает в себя сведения о гидродинамических процессах, оказывающих влияние на пространственно-временное распределение оптических характеристик приповерхностного слоя моря и морской поверхности.

Апвеллинг (подраздел **1.3.1**), как физический (абиотический) фактор, приводящий к увеличению численности фитопланктона за счет подъема глубинных вод, обогащенных питательными веществами к поверхности моря, а также как фактор, изменяющий глубину локального максимума содержания оптически-активных компонентов морской воды в пределах слоя проникновения солнечного света для дистанционного зондирования. Данный эффект в дистанционных спектральных данных по цвету моря отображается в повышении оценок концентрации хл-а. При этом, поскольку дистанционно определенная концентрация хл-а является интегральной по глубине характеристикой, ее увеличение будет иметь многофакторную зависимость (биологический и гидродинамический фактор).

Внутренние волны (подраздел **1.3.2**), как явление оказывающее существенное влияние на вертикальную стратификацию и перемешивание вод, что может приводить к вариациям распределения по глубине оптически-активных компонентов морской воды, изменяя при этом спектр яркости восходящего излучения моря, который может быть зарегистрирован дистанционно.

Субмезомасштабные вихри (подраздел **1.3.3**), которые являются гидродинамическими структурами, влияющими на вертикальное и горизонтальное распределение оптически-активных компонентов морской воды. Такие структуры возможно идентифицировать в дистанционных данных видимого спектрального диапазона, которые будут включать в себя информацию о вкладе оптически-активных компонентов с разных горизонтов.

Глава вторая посвящена основным методам исследования формирования спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря в гидродинамических структурах по *in situ* и дистанционным данным. Описываются используемые в работе данные, методы и модели.

В **разделе 2.1** представлено описание используемых в работе данных: судовые измерения глубинных профилей биооптических и гидрологических параметров, полученные при помощи зонда SBE-911 (SeaBird) и ПУМ-200 (ЛОО ИО РАН) во 2-ом этапе 79 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» 2020 г и зонда SBE-19plus (SeaBird), полученные в ходе прибрежных экспедиций на НИС «Малахит» и НИС «Импульс» 2008-2016 гг (*Нагорный и др., 2017*), а также гидрооптические и гидрологические измерения, проведенные на ходу судна в проточной системе с глубины 3 метра, с использованием термосалинографов SBE-21 и SeaBird SBE-45 (SeaBird), и лазерного гиперспектрального флуориметра (ИАПУ РАН); дистанционные измерения спектров яркости восходящего излучения моря с борта судна с помощью ручного гиперспектрального радиометра ASD FieldSpec Hand Held (подраздел **2.1.1**); спутниковые данные продуктов второго уровня обработки с радиометров MODIS, OLCI, и GOCI в полях коэффициентов яркости восходящего излучения моря на отдельных длинах волн в видимом спектральном диапазоне, концентрации хл-а рассчитанные по стандартному биооптическому алгоритму (*chl_a*) (*Салюк, Липинская, 2022*) и температуры поверхности океана (*sst*) (подраздел **2.1.2**); океанографические реанализы моделей HYCOM и NEMO в полях температуры, солености и скоростей течений (подраздел **2.1.3**).

В **разделе 2.2** представлена процедура адаптации моделей и настройки для прямого численного расчета распространения света в системе «надводная атмосфера-морская поверхность-морская толща». Результатом расчетов являлись модельные коэффициенты яркости восходящего излучения моря (*Rrs_{model}*).

В работе выполнялось прямое гидрооптическое моделирование спектров коэффициентов яркости моря с заданными распределениями концентраций хл-а и ОРОВ по глубине, с помощью программного обеспечения Hydrolight-Ecolight 6.0 (HL). Представлены алгоритмы, обоснование выбора и настроек оптимального набора моделей, используемых в HL (подраздел **2.2.1**).

Для настройки и проверки качества работы прямого численного моделирования с помощью HL было проведено сравнение смоделированных спектров яркости восходящего излучения моря — *Rrs_{model}(λ)* с дистанционно измеренными с борта судна — *Rrs_{ship}(λ)*, и спектрами яркости восходящего излучения моря измеренными со спутников MODIS-Terra/Aqua *Rrs_{satM}(λ)*. Средняя абсолютная ошибка в процентах между *Rrs_{model}(λ)* и *Rrs_{satM}(λ)* составила 14%, между *Rrs_{model}(λ)* и *Rrs_{ship}(λ)* 13%, что считается хорошим результатом для такого рода сопоставлений, следовательно, можно считать, что настройки HL и используемые входные данные обладают достаточной достоверностью. В ходе моделирования *Rrs_{model}(λ)* в HL также рассчитывались значения глубины проникновения солнечного света в море для дистанционного зондирования *Z₉₀(λ)*, выше которой формируется 90% восходящего рассеянного солнечного излучения (исключая зеркальное отражение от морской поверхности) (подраздел **2.2.2**).

Для учета такого фактора, как влияние «сликов» на морской поверхности на оценку вариаций хл-а (рассчитанную из дистанционных данных), выполнено моделирование спектров яркости восходящего излучения моря для следующих условий

ветрового воздействия (при одних и тех же гидрооптических характеристиках верхнего слоя моря):

- для гладкой поверхности при скорости ветра равной нулю (эталонный спектр);
- для гладкой поверхности, ошибочно интерпретируемой как шероховатая, при скорости ветра 5, 10 м/с (потенциально ошибочный спектр).

Результаты моделирования показали, что соответствующее изменение концентрации хл-а, оцененной по стандартному биооптическому алгоритму ОСЗ, для ветрового воздействия 5 м/с составило 1%, для 10 м/с — 3% (подраздел **2.2.3**).

В **разделе 2.3** представлен метод определения показателя максимального контраста к шуму (CNR – contrast-to-noise ratio) в данных дистанционного оптического зондирования гидродинамических структур.

Значения сигнала (sig) и фона (bkg) определялись внутри гидродинамической структуры и в окружающих областях следующим образом:

случай I, если $sig > bkg$, то sig — максимум сглаженных данных \overline{max} , а bkg — минимум сглаженных данных \overline{min} , прошедших процедуру медианной фильтрации;

случай II, если $sig < bkg$, то наоборот $sig = \overline{min}$, а $bkg = \overline{max}$;

случай III, когда в области проявления гидродинамических структур наблюдается локальный максимум и минимум одновременно, то $sig = \overline{max}$, $bkg = \overline{min}$.

Из разницы полученных значений sig , bkg рассчитывался контраст. Расчет показателя статистического шума (N) определялся значением среднего квадратичного отклонения bkg (σ_{bkg}) для случаев I, II и среднее квадратичное отклонение sig для случая III.

Таким образом, показатель $CNR = \frac{sig - bkg}{N}$, где $N = \min(\sigma_{sig}, \sigma_{bkg})$.

Дополнительно для анализа рассчитывались значения статистической относительной ошибки (δ) дистанционных измерений по формуле:

$$\delta = 100\% \times \frac{N}{\min(bkg, sig)}$$

При пороговом условии $CNR \geq 1$ гидродинамические структуры должны отображаться в дистанционных данных. При этом, если существует большое количество рядом расположенных точек измерений, то пороговое условие может быть $CNR > 0.5$. Такую структуру также возможно идентифицировать современными методами распознавания структур в данных измерений.

В **разделе 2.4** представлено описание определения характерных для внутренних волн пространственно-временных параметров со спутниковых данных видимого диапазона.

В **главе третьей** приводятся результаты анализа пространственно-временного распределения гидрооптических характеристик в гидродинамических структурах.

В **разделе 3.1** представлен анализ спутниковых и судовых *in-situ* измерений температуры и солености морской воды, концентрации хл-а и ОРОВ в зоне действия апвеллинга на склоне Патагонского шельфа, для которого был проведен расчет глубины проявления гидродинамического процесса. На рис. 1 показаны спутниковые изображения данных второго уровня радиометра MODIS-Aqua над зоной апвеллинга в полях концентрации хл-а $chlor_a$ и sst . Резкая граница в спутниковых значениях $chlor_a$ рис. 1 (а) наблюдается в зоне взаимодействия Фолклендского течения с Патагонским шельфом (примерно по 60°з.д.). При этом, в sst проявление апвеллинга малозаметно,

поскольку в данном случае температурный градиент между водами течения и шельфа большой ($\approx 2,5^\circ\text{C}$) на фоне которого не видно проявления подъема глубинных вод.

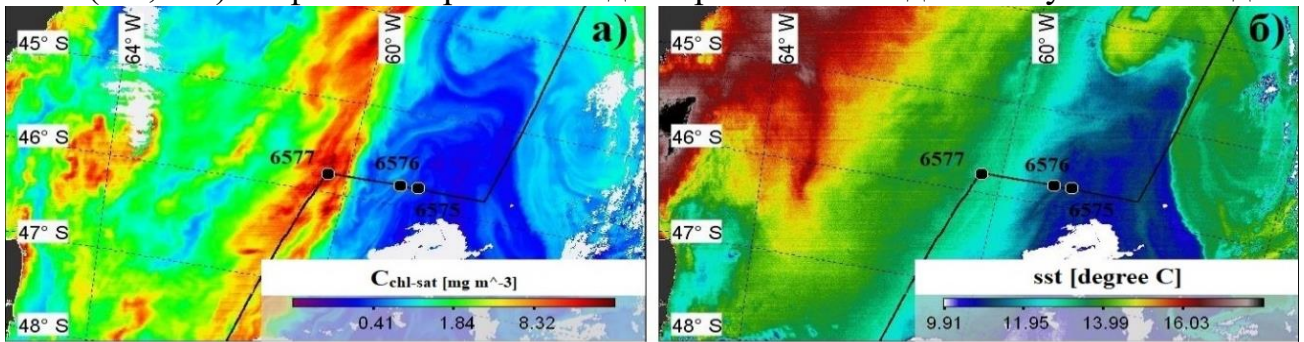


Рис. 1. Спутниковые изображения данных второго уровня радиометра MODIS-Aqua за 12 января 2020 г. в районе действия апвеллинга: а) *chl_a*; б) *sst*

Для валидации спутниковых данных и более детального анализа дополнительно рассмотрены проточные измерения, выполненные от 59° до 61° з.д. через Фолклендское течение с выходом на Патагонский шельф по $45,8^\circ$ ю.ш. На рис. 2 представлены данные судовых измерений, сопоставленные с интерполированными спутниковыми данными и данными реанализа модели NEMO, по которому посчитана дивергенция (*div*) вектора скорости течения в поверхностном слое моря. На рис. 2 выделено три водные массы: синяя зона – воды течения, красная зона – район максимальных значений концентрации хл-а, зеленая зона – район локального максимума значений концентрации хл-а. На западной границе фронта течения наблюдается максимальный уровень разницы потоковых величин $div > 0$, что соответствует переходу с глубоководной зоны на склон шельфа «апвеллинг 1», который сопоставлен с локальным максимумом судовых изменений концентрации хл-а. Другой пик разницы потоковых величин хорошо совпадает с пиком максимальной концентрации хл-а, и это явление связано с «апвеллингом 2» (красная область рис.2). Также на разрезе присутствует область, где значение разницы потоковых величин $div < 0$, что соответствует даунвеллингу, в котором происходит уменьшение значений локального максимума концентрации хл-а со временем.

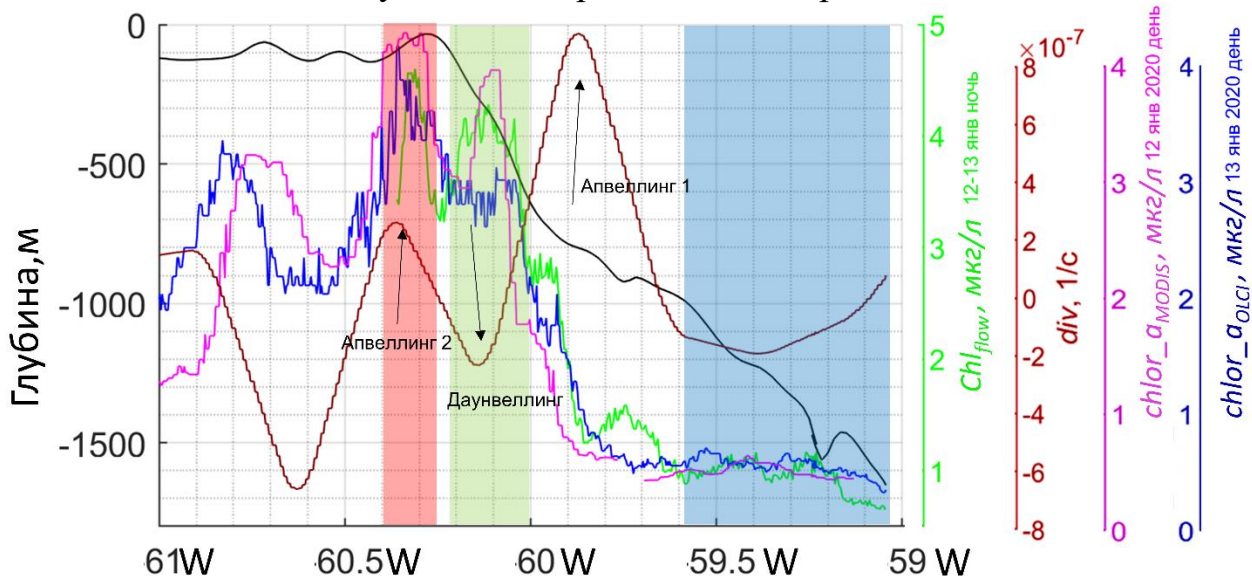


Рис. 2. Данные судовых проточных измерений концентрации хл-а (Chl_{flow}), дивергенции вектора скорости течения (*div*), спутниковые концентрации хл-а с радиометров MODIS ($chl_{a_{MODIS}}$) и OLCI ($chl_{a_{OLCI}}$) вдоль судового маршрута.

Для исследования влияния глубины положения максимума концентрации хл-а на вариации спутниковых оценок $chlor_a$ были проанализированы вертикальные профили практически синхронных измерений гидрологических и гидрооптических характеристик на станции № 6577 в области «апвеллинга 2» (рис. 2).

На станции сначала были проведены вертикальные измерения с профилографов ПУМ-200, а через ~15 минут измерения SBE-911, за которые судно сместилось на расстояние ~100 метров. Работы на данной станции проводились ночью, влияние эффекта фототушения на вертикальные профили флуоресценции хл-а отсутствовало. Термоклин для обоих зондирований зафиксирован на глубине около 25 м. При этом на станции отмечалась квази-трехслойная структура: верхний квазиоднородный слой — термоклин — холодный промежуточный слой. В верхнем квазиоднородном слое по значениям концентрации хл-а отмечается локальный максимум: на 8-10 метрах для первого и 17-18 метрах для второго зондирования. Разница между двумя вертикальными распределениями составила 8-9 метров, что свидетельствует о взаимосвязи гидродинамического явления и вертикального распределения концентрации хл-а (Салюк и др., 2021).

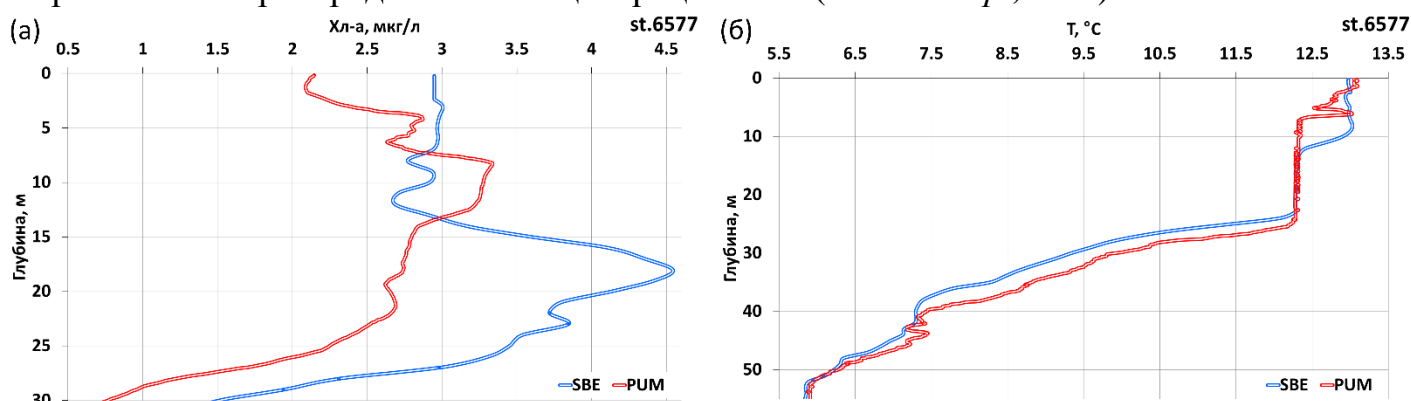


Рис. 3. Вертикальные профили концентрации хл-а ($Chl_{in situ}$) (а) и температуры ($T_{in situ}$) (б) на станции 6577, полученные с помощью зондов SBE-911, ПУМ-200.

Раздел 3.2 описывает анализ судовых *in situ* измерений на станциях, выполненных при прохождении внутренних волн на шельфе около м. Шульца, Японское море и анализ спутниковых данных с проявлениями внутренних волн в дистанционных оценках концентрации хл-а в различных районах Японского моря.

Из массива экспедиционных данных ежечасных измерений для судовых станций, где присутствовали внутренние волны, были построены временные разрезы вертикального распределения значений гидрологических и гидрооптических параметров морской воды и отобраны станции, где наиболее выражены колебания анализируемых параметров (Литинская, Салюк 2020). На рис.4 показан пример временного разреза на станциях, выполненный на входе в бухту Витязь с морской стороны мыса Шульца в 2008 и 2009 году. Причиной генерации внутренней волны (2008 г) послужили приливно-отливные силы за счет эффекта, когда при взаимодействии баротропных приливов с рельефом дна приливные волны превращаются во внутренние. Зарегистрировано, что в исследуемом районе наблюдался прилив с перепадом уровня 0,32 м, который мог существенно повлиять на генерацию мощной внутренней волны, амплитудой 13 метров.

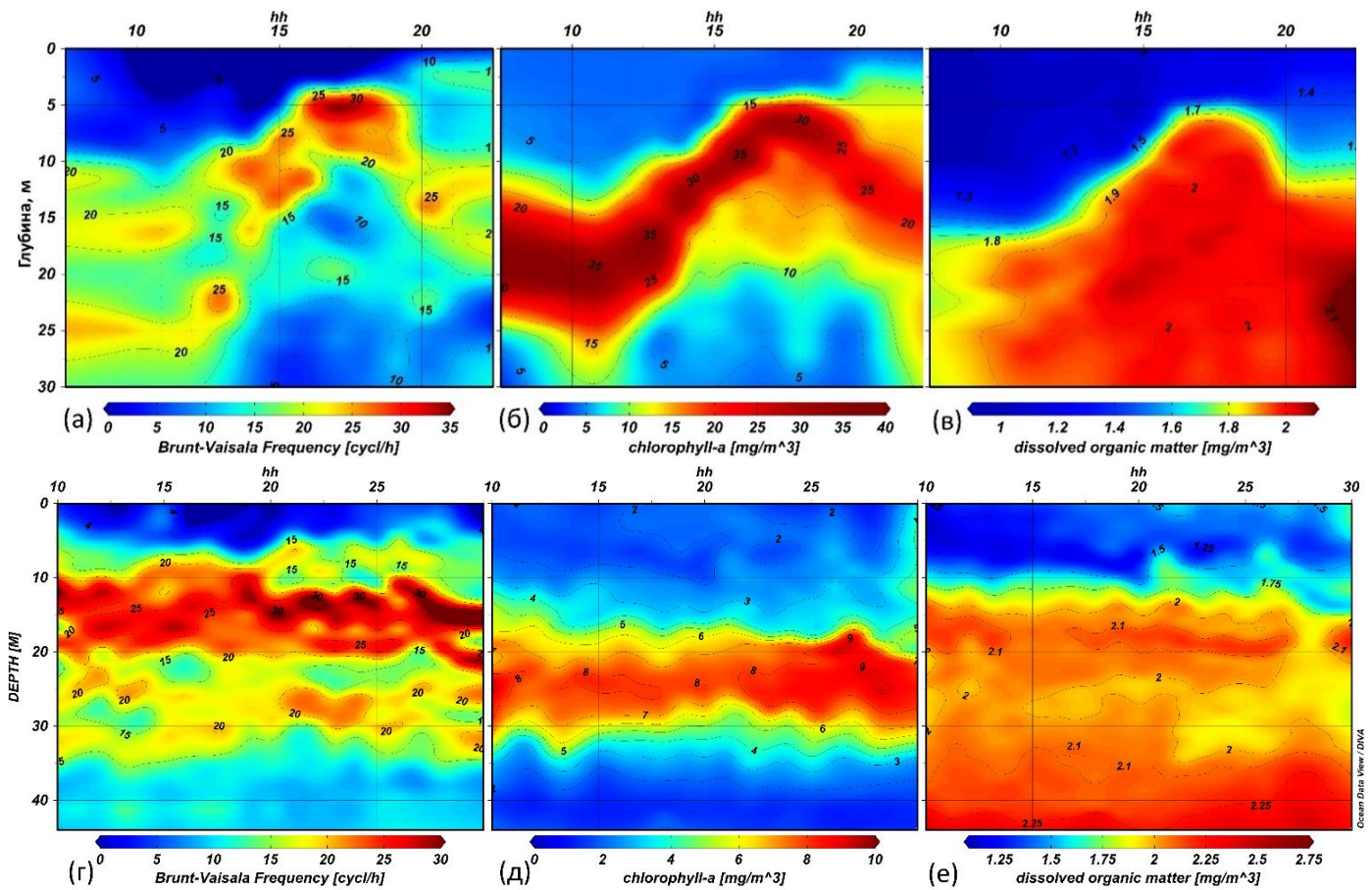


Рис.4. Временной разрез частоты Брента-Вяйсаля (а,г) и вертикального распределения концентрации хл-а (б,д), ОРОВ (в,е), выполненный 2008.10.03 и 2009.09.04 соответственно, в шельфовой зоне северо-западной части Японского моря с морской стороны мыса Шульца.

Для анализа проявления внутренних волн на спутниковых изображениях цвета моря была организована база данных, содержащая архив спутниковых измерений с проявлениями внутренних волн в Японском море (Салюк, Липинская, 2022).

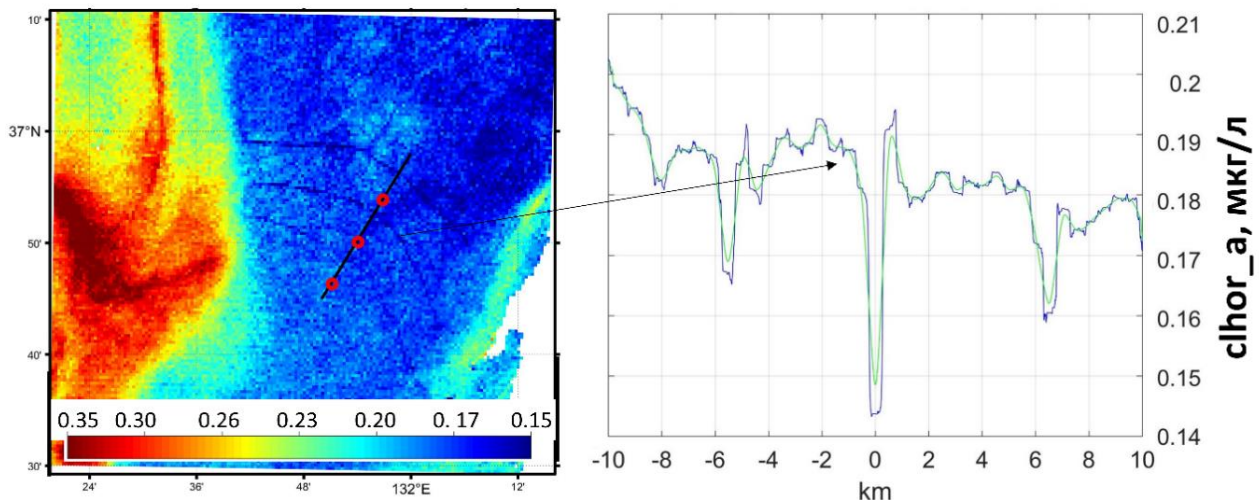


Рис.5. Проявление внутренних волн в южной части Японского моря 13-14.08.2009 в полях концентрации *chlora* с радиометра GOCI геостационарного спутника COMS-1.

Спутниковые данные прошли атмосферную коррекцию и рассчитаны вне зоны солнечного блика. Определены характерные для внутренних волн пространственно-временные характеристики, с учетом ветрового волнения, а также вариации дистанционных оценок концентрации хл-а относительно каждого гребня (пример представлен на рис.5), где изменение концентрации хл-а, оцененное по стандартному биооптическому алгоритму ОС-3, составило менее -20% (Липинская, Салюк 2021).

В **разделе 3.3** представлен результат исследования пространственно-временной изменчивости гидрооптических характеристик в гидродинамических структурах субмезомасштабных вихрей в южной части залива Петра Великого в районе распространения вод реки Туманная в северо-восточном направлении. На рис. 6 представлена серия спутниковых изображений в полях *chlor_a* и *sst* радиометров MODIS-Aqua/Terra, на котором видна цепочка циклонических субмезомасштабных вихрей. Вихри перемещались от дельты реки Туманной по направлению к мысу Шульца со скоростью 0,1–0,2 м/с в период с 30 августа по 6 сентября 2009 г и увеличиваясь в диаметре с 3 до 8–10 км.

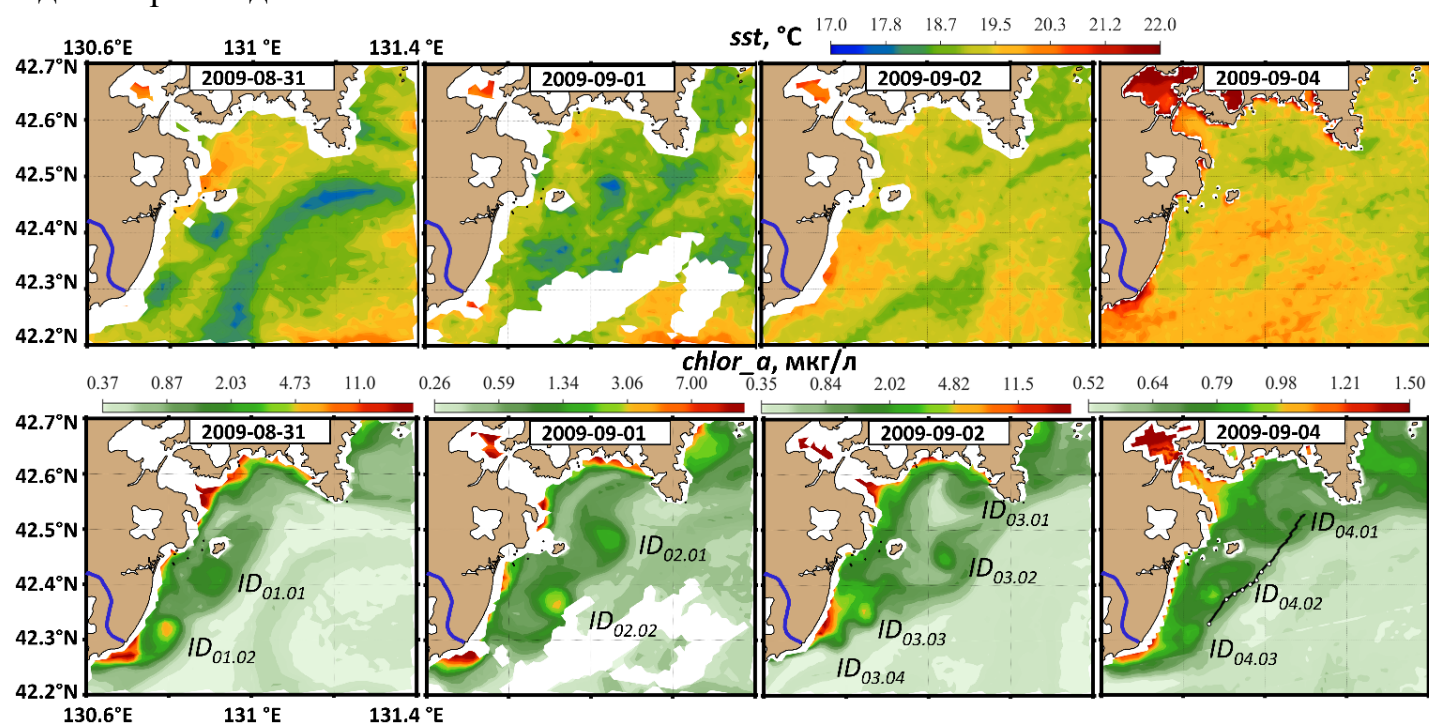


Рис 6. Проявления субмезомасштабных вихрей на серии спутниковых изображений в южной части залива Петра Великого с 31.08.2009 по 04.09.2009 в полях *sst* и *chlor_a*.

Через один вихрь были проведены гидрологические и гидрооптические судовые измерения на станциях 1-8 04.09.2009 (*ID04.02*) (рис.7). На разрезах выделяются распресненные области, в которых наблюдается высокое содержание ОРОВ (рис.8(б,в)), что характерно для распространения речных вод в море. Спутниковые данные в поле концентрации хл-а подтверждают, что данные области находятся в районе действия морских вихрей (при этом стоит учитывать, что на повышенные значения *chlor_a* в вихрях влияет поступление дополнительных ОРОВ из реки).

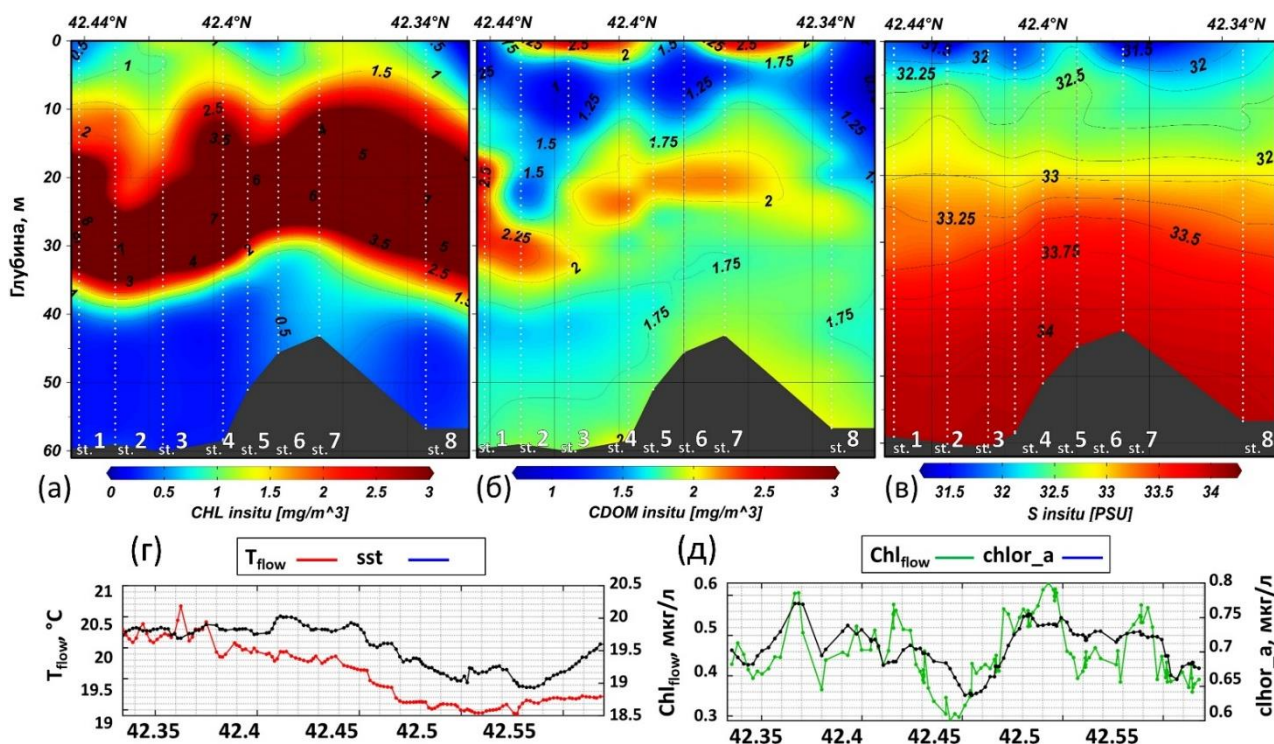


Рис. 7. Вертикальные профили: (а) концентрация хл-а ($Chl_{in situ}$); (б) концентрация ОРОВ ($CDOM_{in situ}$); (в) соленость. Пространственное распределение температуры моря (T_{flow}) (г) и концентрации хл-а (Chl_{flow}) (д) вдоль судового разреза 04.09.2009.

По данным T_{flow} значимых вариаций и соответствующей вихревой структуры не наблюдалось. Также не проявлялось вихревых структур в спутниковых данных sst за 02.09.2009 и 04.09.2009. Это может быть связано с близким прогревом рассматриваемых вод (Липинская, Салюк 2021).

Глава четыре посвящена исследованию формирования спектральных коэффициентов яркости восходящего излучения моря при влиянии вихрей, апвеллингов и внутренних волн.

В **разделе 4.1** представлен метод оценки глубины слоя, в пределах которого изменение глубины положения максимума концентрации хл-а под действием апвеллинга будет значимо влиять на спектры яркости восходящего излучения моря. Проведено численное моделирование спектров $Rrs_{model}(\lambda)$ на основе *in situ* измерений. Представлены результаты сравнительного анализа $Rrs_{model}(\lambda)$ и $Rrs_{satM}(\lambda)$ рис.8(а), подтверждающие правомерность использования выбранного набора моделей. Имитация поднятия слоя максимума концентрации хл-а без изменений формы профиля показана на рис. 8(б). Результаты влияния такой имитации на спектры яркости восходящего излучения моря представлены на рис. 8(в). Начиная с 12-метровой глубины положения максимума хл-а значения $Rrs_{model}(\lambda)$ стали увеличиваться в диапазоне 500-570 нм, что связано с влиянием показателя рассеяния света взвешенными частицами назад. На рис.8(г) приведены расчеты показателя CNR спектров $Rrs_{model}(\lambda)$ под действием апвеллинга. Полученный результат свидетельствует о том, что при максимуме концентрации хл-а на глубине 8 метров, включительно, видимая со спутника структура апвеллинга будет значимо проявляться в измерениях $Rrs_{model}(\lambda)$ с $\max(CNR) > 1$. Учитывая горизонтальный размер проявления рассматриваемого апвеллинга, который может составлять несколько десятков км, то можно использовать более мягкий критерий

$\max(CNR) > 0,5$, тогда определяемая глубина будет равна 11 м. Это «максимальная глубина проявления гидродинамического явления» (Z_{rsH}) в дистанционных спектральных данных по цвету моря (Салюк и др., 2021).

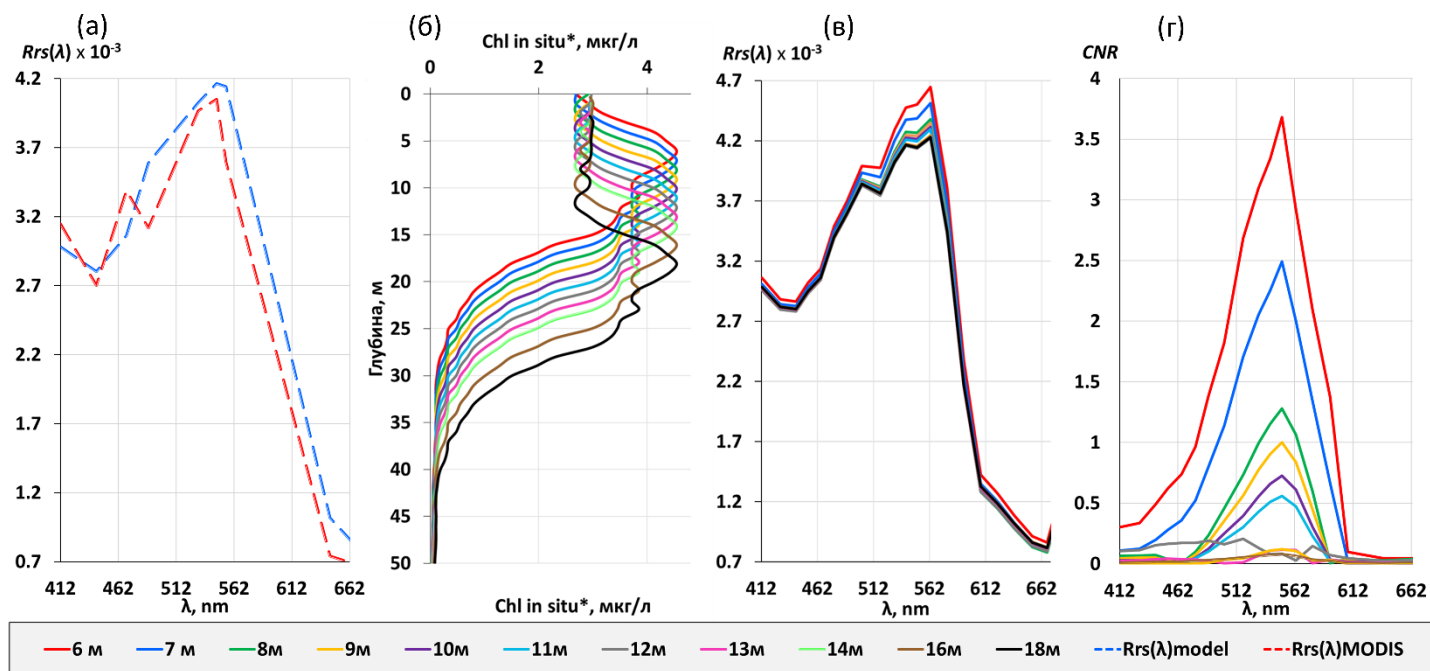


Рис. 8. (а) графики $Rrs_{model}(\lambda)$ и $Rrs_{satM}(\lambda)$; (б) имитация поднятия вертикального распределения концентрации хл-а и ОРОВ без изменений формы к поверхности; (в) результаты прямого численного моделирования спектра $Rrs_{model}(\lambda)$ в зависимости от изменения глубины залегания максимума концентрации хл-а; (г) видимые контрасты спектров яркости восходящего излучения моря.

В **разделе 4.2** представлены примеры результатов моделирования спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря с помощью NL, и рассчитанных из них индексов цвета ($CI(\lambda) = Rrs_{satM}(\lambda)/Rrs(555)$) на различных фазах движения внутренних волн, зарегистрированных в заливе Петра Великого осенью в 2008 г (рис. 9 (а,б)), и 2009 г (рис. 9 (в,г)). Внутренние волны, проходящие в водной толще, значимо отобразились в спектрах $Rrs_{model}(\lambda)$. Ожидается, что увеличение амплитуды волны привело к более существенным вариациям спектров яркости восходящего излучения моря. На рис. 9 также представлены соответствующие значения CNR для рассматриваемых внутренних волн. Хорошими показателями для идентификации проявлений внутренних волн из оптических радиометров будут диапазоны длин волн 410-465нм (I) и 520-600нм (II). В первом диапазоне контрасты обусловлены поглощением света клетками фитопланктона и ОРОВ, во втором рассеянием света взвешенными частицами. Для внутренних волн максимум контраста наблюдается в диапазоне 550-565нм, что связано с наибольшей глубиной проникновения света в морскую толщу.

Для спутникового зондирования лучше использовать I спектральный диапазон для детектирования внутренних волн. В случае, если использовать надводные носители оптических радиометров — суда или летательные аппараты, где нет необходимости проводить атмосферную коррекцию, то спектральный диапазон можно расширить и использовать оба диапазона, где в синей части спектра помимо фитопланктона будет оказывать дополнительное влияние ОРОВ, которое также изменяет глубину своего положения при прохождении внутренних волн.

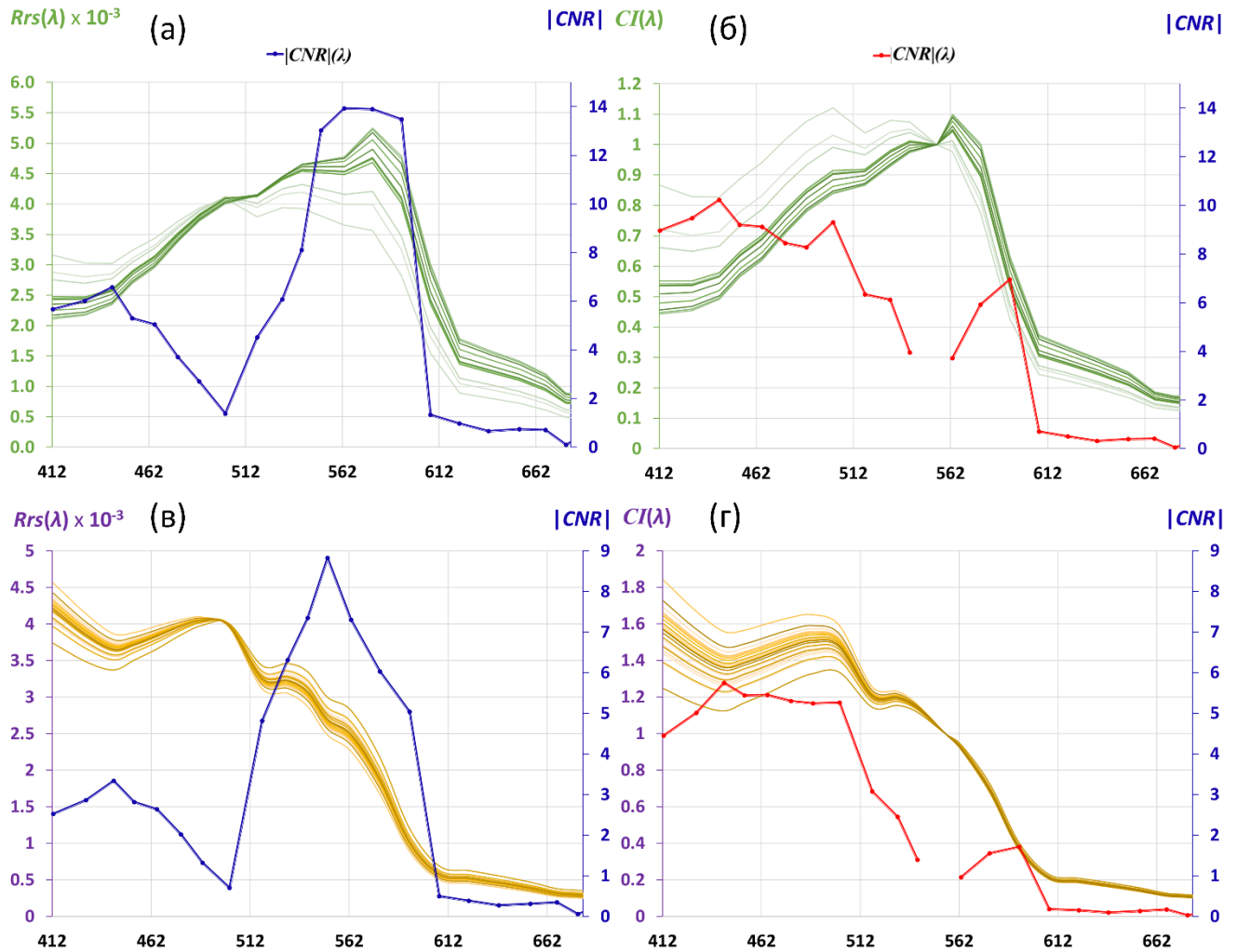


Рис. 9. $Rrs_{model}(\lambda)$ и индексы цвета $CI_{model}(\lambda)$ при прохождении внутренних волн для 2008.10.03 (а,б) и 2009.09.04 (в,г). Синим цветом на графике представлены $|CNR_Rrs_{model}(\lambda)|$, красным цветом $|CNR_CI_{model}(\lambda)|$. Для внутренних волн, анализируемых в разделе 3.2, рис.4.

По аналогии с определением глубин Z_{rsH} для апвеллинга, для внутренних волн максимальной глубиной, на которой волна проявляется в дистанционных спектральных данных по цвету моря — является максимальная глубина, где хотя бы для одной из анализируемых оптических характеристик $CNR > 1$ для разницы максимального и минимального значения на всех фазах движения внутренних волн.

Раздел 4.3. Приведены результаты определения дистанционно оцениваемых параметров в оптическом спектральном диапазоне, по которым возможно получить наибольшие контрасты для детектирования рассматриваемых субмезомасштабных вихрей.

Для начала был определен наилучший спектральный диапазон для определения контрастов в $Rrs_{satM}(\lambda)$ и в индексах цвета $CI(\lambda)$. На рис.10(а) представлено сколько раз $Rrs_{satM}(\lambda)$ имел наибольший CNR , на рис.10 (б) аналогично для $CI(\lambda)$. Тот факт, что максимальные значения получены для $Rrs(547)$ обусловлен следующими факторами: во-первых, эта длина волны наиболее близка к максимуму «окна прозрачности» морской толщи, который сдвинут в длинноволновую область за счет влияния ОРОВ и фитопланктона в синей области спектра, во-вторых, в этой спектральной области

относительные ошибки атмосферной коррекции спутниковых данных при определении спектров яркости восходящего излучения моря минимальны.

Максимальные показатели CNR для $CI(\lambda)$ были на длине волны 678нм. Высокая контрастность на длине волны 678нм обусловлена влиянием солнечно-индуцированной флуоресценции хл-а. Так же большое количество максимальных CNR для $CI(\lambda)$ наблюдалось на длине волны 443нм. Это связано с совместным влиянием поглощения света фитопланктоном и ОРОВ.

Из графиков распределения средних и медианных значений $CNR(\lambda)$ по всем рассматриваемым субмезомасштабным вихрям (рис. 10 (в,г)) видно, что лучшими спектральными диапазонами для детектирования являются зеленый (520-560нм) и красный (660-690нм). Для составления синтезированных RGB изображений из спектров яркости восходящего излучения моря целесообразно использовать каналы R-667нм, G-547нм, B-412нм или B-443 (*Латушкин и др., 2023*). Для рассматриваемого случая такое изображение будет обладать высокими контрастами и являться универсальной характеристикой в случае перераспределения содержания оптически-активных компонентов.

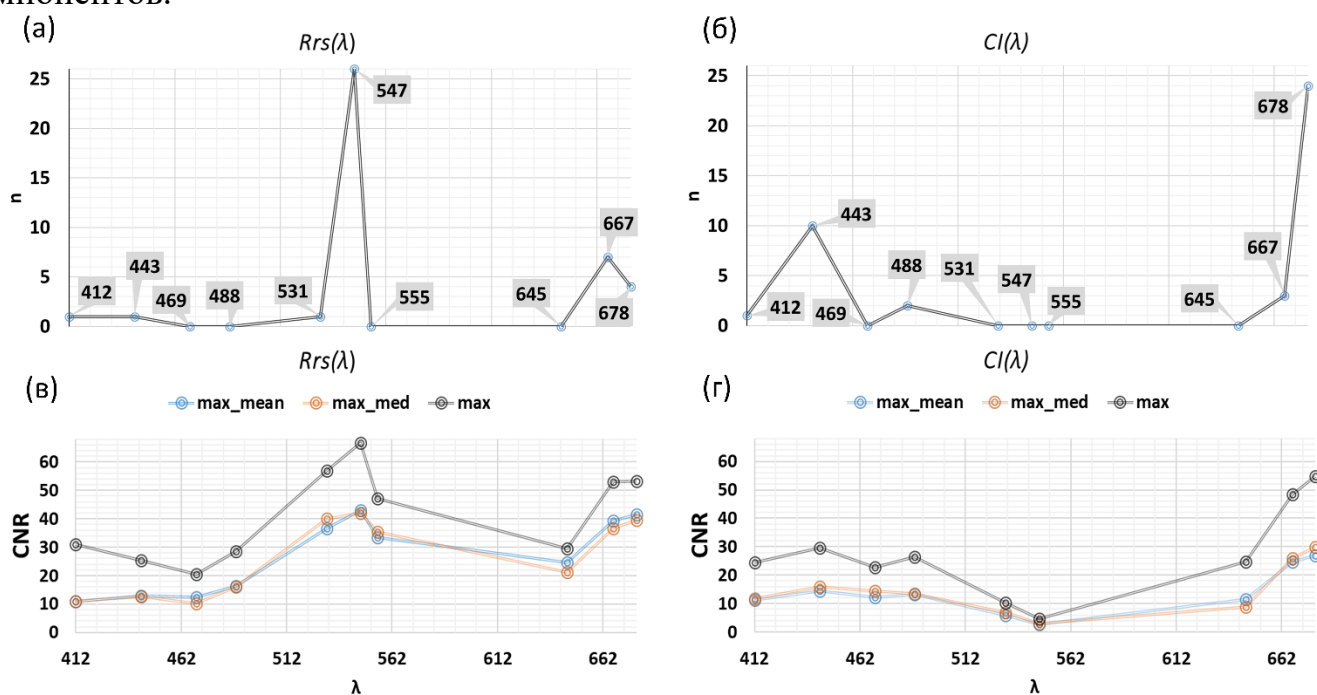


Рис.10. График повторяемости максимального контраста субмезомасштабных вихрей, (а) для $Rrs_{satM}(\lambda)$, (б) для $CI(\lambda)$, а также среднее арифметическое и медианное значение CNR , (в) для $Rrs(\lambda)$, (г) для $CI(\lambda)$ на длинах волн радиометра MODIS.

Результаты сравнительного анализа величин CNR для sst , $chlor_a$, $Rrs(547)$ и $CI(678)$ позволяют сделать вывод о том, что наиболее контрастной характеристикой для субмезомасштабных вихрей в исследуемом районе будет являться именно дистанционная оценка концентрации хл-а $chlor_a$ (*Литинская, Салюк 2021*), рис.11.

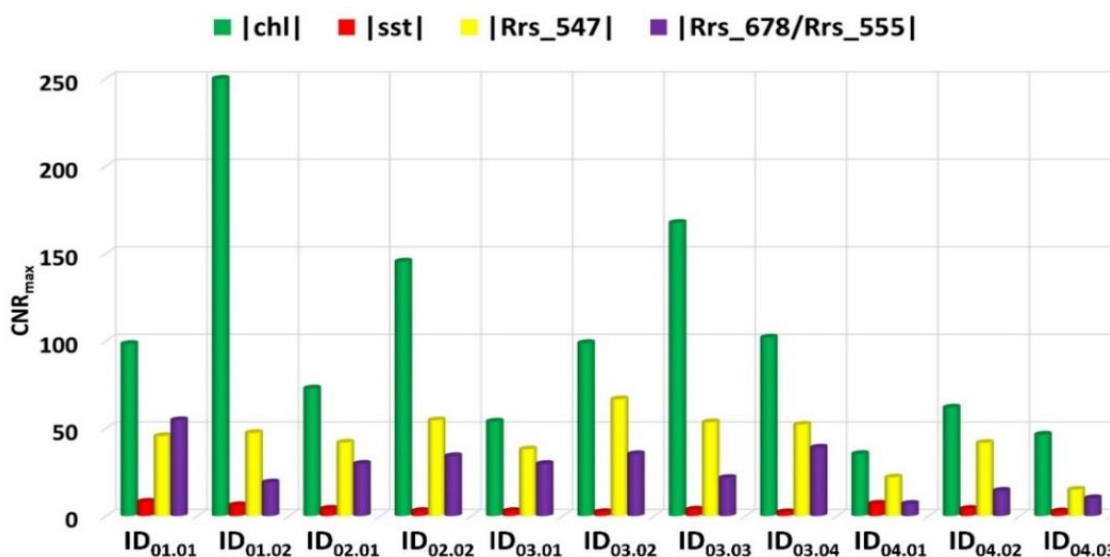


Рис 11 – График проявлений субмезомасштабных вихрей в *sst*, *chlor_a*, *Rrs*(547) и *CI*(678) для вихрей, представленных на рис. 6.

В **разделе 4.4** приведен результат анализа вариаций $Rrs_{model}(\lambda)$ в области действия субмезомасштабного вихря (ID_{04.02}, рис. 7), и дана оценка глубины, при которой наличие соответствующей гидродинамической структуры перестает проявляться в дистанционных спектральных данных по цвету моря. Для исследований использованы $Rrs_{ship}(\lambda)$ и валидированные $Rrs_{model}(\lambda)$, полученные из *in situ* измерений.

На рис. 12 показана изменчивость $CI(\lambda)$ на длинах волн 412, 443, 490, 510 относительно номеров станций (а), и $Rrs_{model}(\lambda)$ на длинах волн 412, 443, 490, 510, 547 (б). Номера станций соответствуют рис.7.

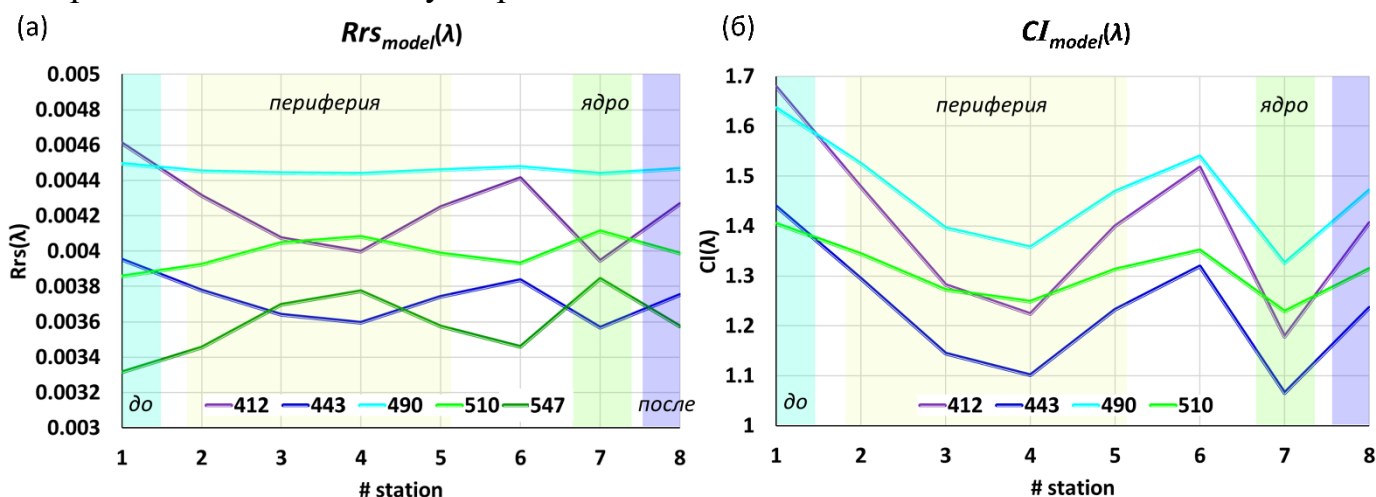


Рис. 12. Изменчивость значений $Rrs_{model}(\lambda)$ (а) и индексов цвета $CI(\lambda)$ (б) на станциях разреза, выполненных через субмезомасштабный вихрь ID_{04.02}.

Структура вихря проявляется в $Rrs(\lambda)$ на длинах волн 510, 547нм за счет повышенного рассеяния света в водах вихря (положительный контраст), а на длинах волн 412 и 443нм за счет большего поглощения света (отрицательный контраст). Максимальные значения $CI(\lambda)$ наблюдаются на станциях 1, 6 и 8, где относительно чистая вода. Индексы цвета на станции 2-5,7 имеют низкие значения за счет влияния поглощения света ОРОВ и клетками фитопланктона, переносимыми вихрем.

Таким образом, исходя из полученной структуры, воды были разделены на находящиеся в области действия вихря (сигнал) и вне его (фон). Максимальные контрасты получены между станциями 1-4, 4-6, 6-7, 7-8.

Проведены расчёты Z_{rsH} , которая для субмезомасштабного вихря является максимальной глубиной, на которой сохраняется его гидродинамическая структура по критерию $\max(CNR) \geq 1$. Определение Z_{rsH} было выполнено следующим образом: для каждой станции рассчитаны $Rrs_{model}(\lambda)$, с изменением значений профиля концентрации хл-а и ОРОВ в приповерхностном слое. Для станций, находящихся в зоне действия вихря, значения на разных глубинах последовательно заменялись на интерполированные фоновые значения от поверхности ко дну через каждый метр. На рис. 13 представлен пример имитации выравнивания характеристик сигнала относительно фона для концентрации хл-а.

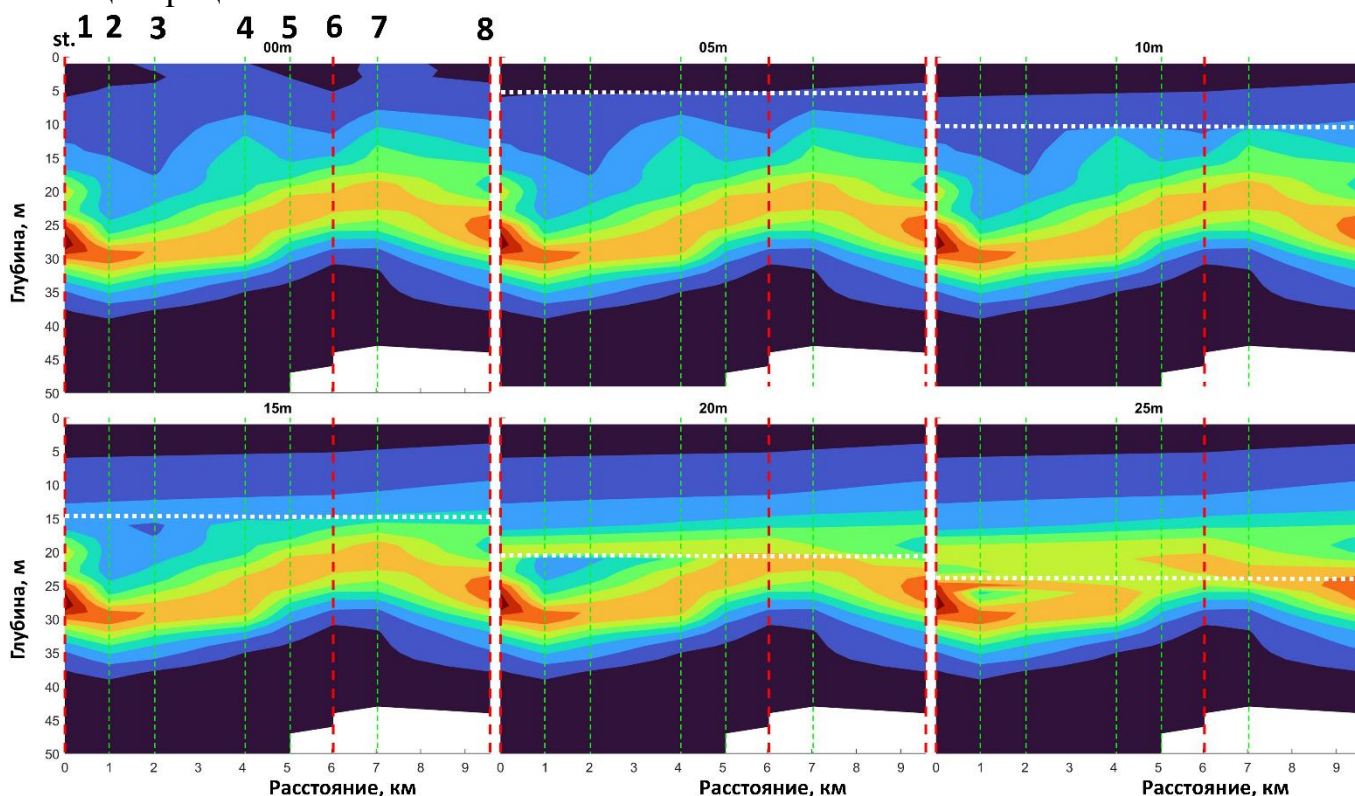


Рис. 13. Пример имитации выравнивания структуры вихря (интерполяция фоновых значений от поверхности ко дну через каждый метр) за счет изменения профиля концентрации $Chl_{in situ}$, приводящее к уменьшению контраста

Z_{rsH} определялась на параметрах концентрации хл-а (Chl_{model}), рассчитанных из $Rrs_{model}(\lambda)$ по алгоритму ОСЗ и для $Rrs_{model}(547)$. Z_{rsH} – это последнее значение глубины, где наилучший из всех анализируемых значений $CNR > 1$.

Результаты имитации выравнивания структуры субмезомасштабных вихрей представлены на рис. 14, где в случае анализа контраста между станциями 4 и 6 (периферия вихря) видно, что после 6 метров $CNR < 1$ для $Rrs(547)$, и после 8 метров для Chl_{model} . Между станциями 6 и 7 (ядро вихря) $CNR < 1$ после 9 метров и после 12 метров для $Rrs(547)$ и Chl_{model} , соответственно. Глубже контрасты уменьшаются до такой степени, что определить структуру вихря из спектральных данных по цвету моря будет уже невозможно.

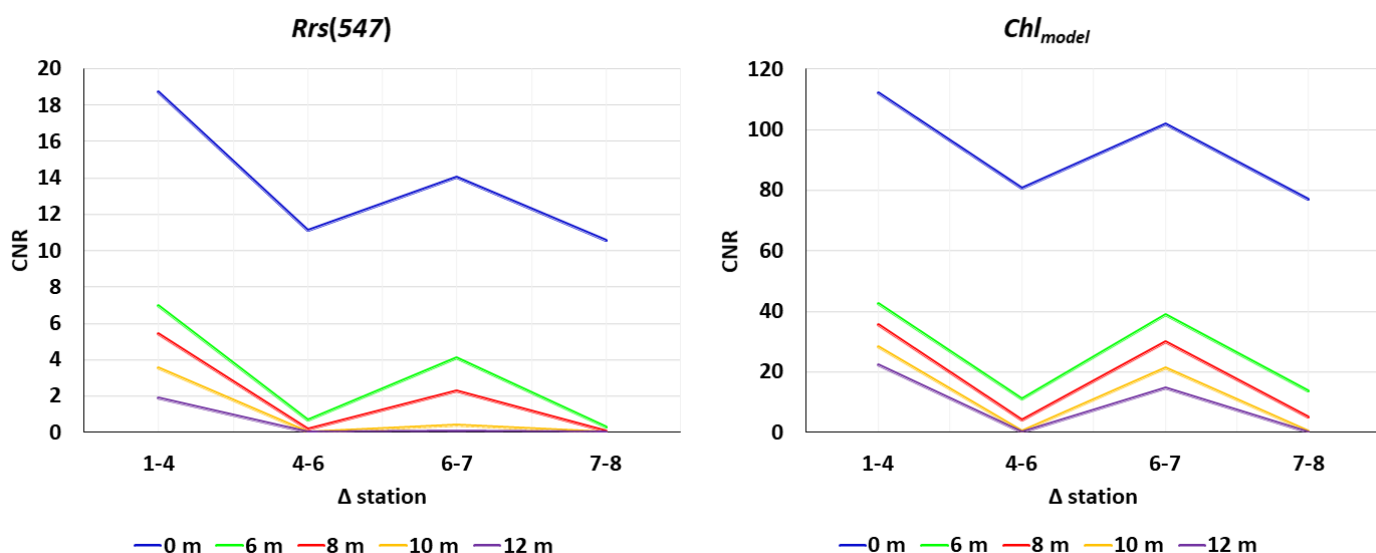


Рис.14. График проявления гидродинамических структур субмезомасштабного вихря в $|CNR_Rrs_{model}(547)|$ и $|CNR_Chl_{model}|$

В **разделе 4.5** представлены обобщенные результаты проведенных исследований, определен алгоритм оценки «максимальной глубины проявления гидродинамической структуры» (Z_{rsH}) в дистанционных спектральных данных по цвету моря.

Z_{rsH} — максимальная глубина, на которой гидродинамический процесс оказывает прямое значимое воздействие на хотя бы одну из дистанционно определяемых оптических характеристик, по которой остается возможность идентифицировать гидродинамическую структуру.

Для определения глубины Z_{rsH} необходимо выполнить следующие действия:

1. Получить измерения спектров яркости восходящего излучения моря и *in situ* данные вертикального распределения концентрации хл-а, ОРОВ и взвешенных веществ (как минимум хл-а) в области действия исследуемого гидродинамического процесса.
2. Идентифицировать гидродинамическую структуру в дистанционных данных.
3. Определить значения сигнала и фона в области идентифицированной структуры, и шума в дистанционных данных (подробнее в разделе 2.3).
4. Настроить и валидировать модели численного моделирования спектров яркости восходящего излучения моря с учетом вертикальных профилей оптически-активных компонентов.
5. Промоделировать спектры яркости восходящего излучения моря по двум подходам (в зависимости от гидродинамической структуры):

5.1 «Вертикальный» (для апвеллинга и внутренних волн) — имитация изменения глубины вертикального измеренного профиля концентрации оптически-активных компонентов с заданным шагом по глубине (подробнее данный подход описывается в разделе 4.1).

5.2 «Горизонтальный» (для субмезомасштабного вихря) — определение из *in situ* измерений значений сигнала, фона и имитация приравнивания сигнала к фоновому значению последовательно от верхних к глубоководным слоям с заданным шагом по глубине (подробнее данный подход описывается в разделе 4.4).

6. Из результатов п.5 рассчитать характеристики спектров яркости восходящего излучения моря и оценить содержание оптически-активных компонентов.

7. Для каждой характеристики п.6 рассчитать показатель отношения контраст/шум (CNR), и выполнять п.5 и п.6 с заданным шагом по глубине до тех пор, пока максимальное значение из полученных CNR не станет меньше единицы (для гидродинамических структур минимальный линейный размер которых может быть равен 1-2 точкам измерений), либо $\max(CNR)$ не станет меньше 0.5 (для структур минимальный линейный размер которых превышает 2 точки измерений).

8. Последнее значение глубины п.7, где выполняется превышение максимального значения CNR над граничным значением — является искомая Z_{rsH} .

Необходимо иметь в виду, что для определения типа гидродинамической структуры, недостаточно того, что CNR превышает пороговое значение. Важно наличие некоторого количества пикселей (точек измерений), в области действия предполагаемого процесса, по которым соответствующие структуры будут идентифицированы. Важно, что Z_{rsH} является «максимальной» глубиной, т.е. она может восприниматься, как оценка значения сверху. Даже если в реальности на полученном значении глубины Z_{rsH} количества точек измерений с достаточным CNR будет не хватать для идентификации типа гидродинамической структуры, то на $Z_{rsH}-1\text{м}$ их станет значительно больше, поскольку процесс проявления структур в спектральных данных по цвету моря не линеен по глубине.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

1. Разработанный метод позволил установить максимальную глубину, на которой положение слоя максимума концентрации хл-а значимо влияет на спектральные коэффициенты яркости восходящего излучения моря в области действия апвеллинга на примере реально измеренных в ходе экспедиции данных в районе взаимодействия Фолклендского течения с водами Патагонского шельфа, в котором наблюдается чередование зон поднятия и опускания вод. Таким образом, расчёт глубины Z_{rsH} позволяет сделать вывод о том, что в районе исследований вариации спутниковых оценок концентрации хл-а вызваны не только биологическими факторами, но и прямым гидродинамическим эффектом процесса.

2. Результаты численного моделирования спектров яркости восходящего излучения моря на всех фазах движения внутренних волн, зарегистрированных в районе м. Шульц в ходе серии прибрежных экспедиций, показали, что изменение вертикальной стратификации оптически-активных компонентов под действием внутренних волн, в спектральном диапазоне 400-600нм значительно проявляются в вариациях коэффициентов яркости моря, за счет чего возможно дистанционно регистрировать указанные волны. Так же определено, что внутренние волны с большей амплитудой приводят к более существенным вариациям спектров яркости восходящего излучения моря, что в перспективе может быть использовано в качестве дополнительной информации для оценки их амплитуды из спутниковых данных.

3. Полученные методы и экспериментальные данные позволили рассчитать максимальную глубину проявления, видимой из космоса гидродинамической структуры субмезомасштабного вихря ($ID_{04.02}$) для периферии вихря и для ядра вихря в наилучших контрастных характеристиках видимого диапазона, который может быть существенным за счет разного содержания оптически-активных компонентов внутри и вне вихря. Расчеты и анализ изменчивости концентраций и глубин залегания оптически-активных компонентов морской воды и оценка влияния вихря на вертикальную стратификацию поверхностного слоя моря может обеспечить дополнительную информацию для идентификации вихрей на спутниковых изображениях цвета моря.

4. Для гидродинамических явлений (субмезомасштабных вихрей и внутренних волн) распространяющихся в шельфовой зоне, южной части залива Петра Великого, зарегистрированных в ходе серии прибрежных экспедиций, определены спектральные диапазоны для идентификации в спектрах яркости восходящего излучения моря:

I – в синей области спектра (410-465нм), больше за счет поглощения света (отрицательный контраст), II – в зеленой области спектра (510-600нм), больше за счет рассеяния света (положительный контраст). Для субмезомасштабных вихрей высокие контрасты также наблюдаются в красной области спектра в диапазоне 660-690нм, за счет солнечно-индуцированной флюоресценции хл-а в водах вихря. Проведенный анализ может быть использован для любых подобных гидродинамических структур.

5. Обобщен и сформулирован алгоритм определения «максимальной глубины проявления гидродинамической структуры» в дистанционных спектральных данных по цвету моря, с помощью которого можно улучшить интерпретацию дистанционных данных о цвете моря, связанную с вертикальной изменчивостью содержания оптически-активных компонентов и определять толщину поверхностного слоя моря, в котором гидродинамические явления могут быть детектированы дистанционно в видимом диапазоне спектра. Введенная величина похожа на максимальную по спектру глубину проникновения солнечного света в море для дистанционного зондирования, однако отличается от нее, что связано с учетом статистических ошибок определения спектров яркости восходящего излучения моря и пространственным масштабом проявления гидродинамических структур в дистанционных измерениях.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах

1. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А. Исследование воздействия внутренних волн на оптические характеристики поверхности моря в шельфовой зоне залива Петра Великого // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 51-59. DOI: 10.7868/S2073667320020069.

2. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А., Исследование проявлений и характеристик внутренних волн по данным спутниковых изображений со сканера цвета моря GOCI-COMS-1 // *Подводные исследования и робототехника*. 2021а. №. 3 (37). С.16-22. DOI: 10.37102/1992-4429-2021-37-03-02.

3. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А., Анализ гидробиологических и гидрооптических характеристик в субмезомасштабных вихрях в заливе Петра Великого с помощью одновременных in-situ и дистанционных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2021б. Т. 14. № 3. С. 111-121. DOI 10.7868/S2073667321030102.

4. Салюк П.А., Глуховец Д.И., **Липинская Н.А.**, Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Пономарев В.И., Аглова Е.А., Артемьев В.А., Латушкин А.А., Майор А.Ю., Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т.18, №6. С. 200-213. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-200-213.

5. Латушкин А.А., Пономарев В.И., Салюк П.А., Фрей Д.И., **Липинская Н.А.**, Шкорба С.П. Распределение оптических и гидрологических характеристик в проливе Антарктика по данным измерений в январе 2022 года в 87-м рейсе НИС «Академик

Мстислав Келдыш» // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 1(229). С. 52-66. DOI 10.29039/0233-7584-2023-1-52-66.

6. Pavel A. Salyuk, Sergey A. Mosharov, Dmitry I. Frey, Valentina V. Kasyan, Vladimir I. Ponomarev, Olga Yu. Kalinina, Eugene G. Morozov, Alexander A. Latushkin, Philipp V. Sapozhnikov, Sofia A. Ostroumova, **Nadezhda A. Lipinskaya**, Maxim V. Budyansky, Pavel V. Chukmasov, Viktor A. Krechik, Michael Yu. Uleysky, Pavel A. Fayman, Alexander Yu. Mayor, Irina V. Mosharova, Anton D. Chernetsky, Svetlana P. Shkorba and Nikita A. Shved, Physical and Biological Features of the Waters in the Outer Patagonian Shelf and the Malvinas Current // Water. 2022. Vol. 14, No. 23. P. 3879. DOI 10.3390/w14233879.

Монографии

1. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А., Буланов А.В., Шамбарова Ю.В., Гидрооптические исследования // Геологогеофизические и океанографические исследования западной части ЮжноКитайского моря и прилегающего континента (по результатам 88 рейса НИС "Академик М.А. Лаврентьев" и береговых экспедиций 2010-2020) / Глав. ред. Р.Б. Шакиров; отв. ред. М.Г. Валитов, Н.С. Ли, Нгуен Хоан, Фун Ван Фать -М.: ГЕОС. 2021. С. 291-304.

Свидетельства о регистрации баз данных

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620258 Российская Федерация. Результаты исследований флуоресценции растворенных органических веществ различного типа в водах Залива Петра Великого: № 2016621641: И. Г. Нагорный, П. А. Салюк, **Н. А. Ефанова**.

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620146 Российская Федерация. Характеристики внутренних волн в полях концентрации хлорофилла-а в Японском море, зарегистрированных с помощью спутникового сканера цвета моря GOCI-COMS-1: № 2021623353: П. А. Салюк, **Н. А. Липинская**.

Статьи в сборниках научных трудов

1. **Lipinskaya N.A.** The study of the indicate and characteristics of internal waves according to satellite images of the color of the sea // Proc. SPIE 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. 2020. 115604T; DOI: 10.1117/12.2575611.

2. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А. Возможности детектирования внутренних волн со спутниковых изображений цвета моря // Морские исследования и образование (MARESEDU-2018): труды VII Международной научно-практической конференции. 19-22 ноября 2018 г., Москва. Тверь: ООО «Поли ПРЕСС», 2019. Том III (IV). С. 41-50.

3. **Липинская Н.А.**, Салюк П.А. Контрастные характеристики для дистанционного детектирования в оптическом диапазоне субмезомасштабных вихрей, переносящих воды реки Туманная // Океанологические исследования: материалы X конференции молодых ученых, 24 – 28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2023. С.42-43. ISBN 978-5-6041943-5-5.

4. Салюк П.А., **Липинская Н.А.** Контрастные характеристики субмезомасштабных вихрей в спутниковых данных по цвету моря в районе выхода реки Туманная в Залив Петра Великого // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIX Международного симпозиума, 26-30 июня 2023 г., Электронный ресурс. Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2023. ISBN 978-5-94458-196-9.

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Липинской Надежды Александровны

Подписано к печати 18.08.2023 г.
Объем 0,9 п.л.

Формат бумаги 60x84/16
Тираж 100 экз.

Напечатано в ФГБУН
«Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Иличева ДВО РАН»

690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43