

Спутниковые наблюдения цвета океана в СССР и России

О. В. Копелевич,
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
г. Москва

Спутник Sentinel-3А успешно выведен на орбиту



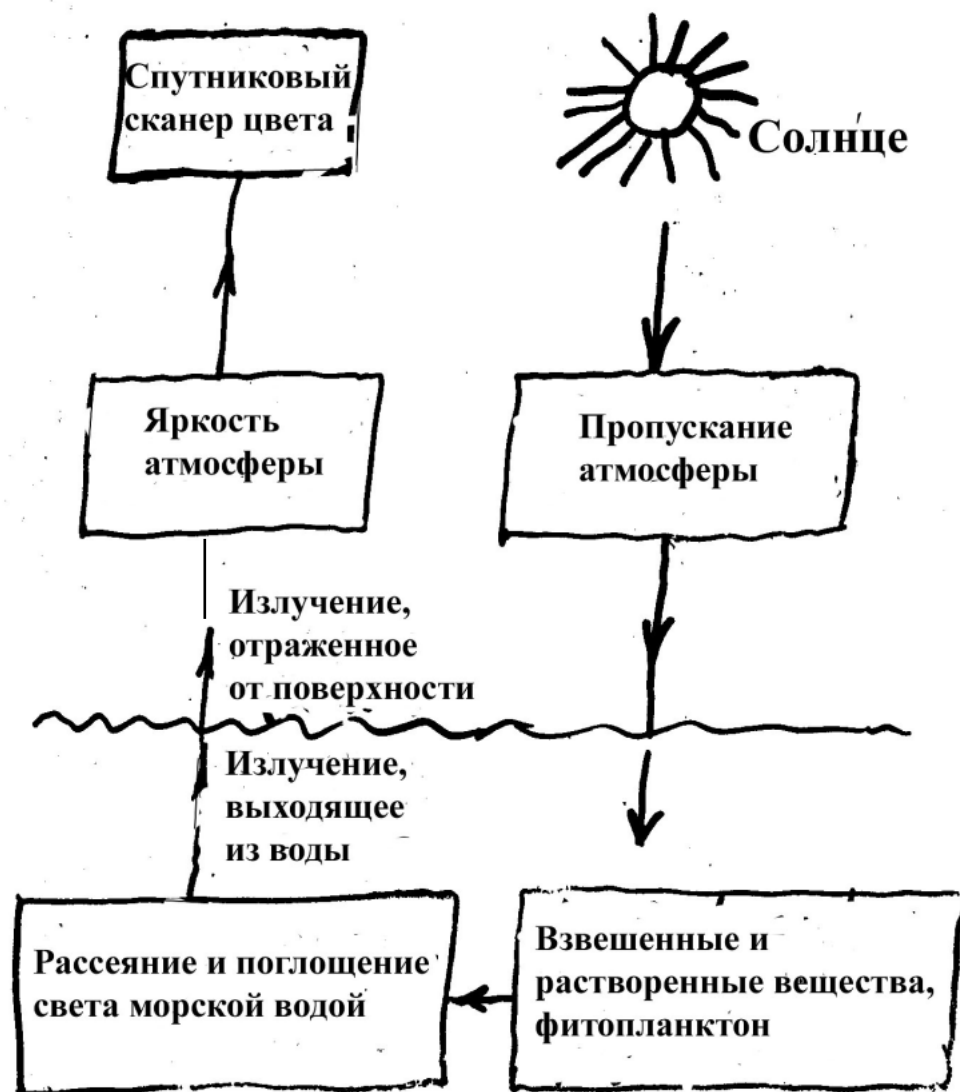
OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) – сканер цвета океана и суши нового поколения, который должен продолжить многолетнюю серию наблюдений известного сканера MERIS, работавшего на борту европейского спутника ENVISAT.

21 спектральный канал (MERIS -15),
пространственное разрешение –
300 м,

минимизируется влияние
солнечного блика.

Европейский космический аппарат Sentinel-3 А успешно выведен на орбиту (высота 800 км) российской ракетой -носителем «Рокот». Пуск состоялся с космодрома Плесецк 16 февраля в 20:58 по московскому времени.

Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



«Истинный» цвет океана обусловлен спектральным составом, излучения, выходящего из водной толщи.

Спектральная яркость выходящего излучения определяется оптическими свойствами морской воды, которые зависят от количественного и качественного состава содержащегося в морской воде вещества.

«Видимый» спутниковым датчиком цвет обусловлен в значительной степени влиянием атмосферы и отражением от поверхности.

Составляющие яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$L_t(\lambda_i)$ – спектральная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемая спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$$

где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;

$L_g(\lambda_i)$ и $L_{wc}(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной;

$T(\lambda_i)$ и $t(\lambda_i)$ – направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

$L_w(\lambda_i)$ – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

Проблемы разработки методологии спутниковых наблюдений цвета океана

1. Объяснение цвета океана и создание количественной теории формирования спектральной яркости излучения, восходящего от поверхности моря.
2. Разработка комплекса аппаратуры для измерения в морских экспедициях параметров, определяющих цвет моря.
3. Разработка методов обработки данных спутниковых измерений, в первую очередь, их атмосферной коррекции.
4. Разработка и создание спутниковой аппаратуры, решение проблем ее работы на космических орбитах, в частности, контроля бортовой калибровки.
5. Создание инфраструктуры для сбора, обработки и предоставления пользователям данных спутниковых измерений, организация подспутниковых экспериментов для контроля калибровки и валидации спутниковых алгоритмов.
5. Разработка методов и алгоритмов для практического использования данных спутниковых наблюдений.

20-е – 60-е годы прошлого столетия



Василий Владимирович
Шулейкин (1895-1979).
Цвет моря.



Григорий Александрович
Гамбурцев (1903-1955)
Цвет моря.



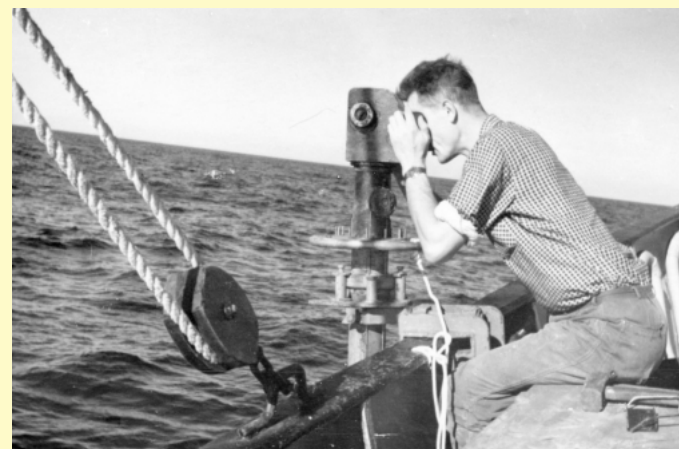
Михаил Владимирович
Козлянинов (1920-1989)
Проведение натурных
измерений.

Первый в мире комплекс экспедиционной гидрооптической аппаратуры

В 1957 г. под руководством М.В. Козлянинова в Институте океанологии создан первый в мире комплекс гидрооптической аппаратуры для работы в морских экспедициях, который включал погружаемые фотоэлектрический прозрачномер и измеритель подводный освещенности, лабораторный спектрогидронефелометр-прозрачномер и **гидрофотометр для измерения спектральных коэффициентов яркости моря, укрепляемый на борту судна.**

Разработаны методики гидрооптических измерений и подготовлено руководство по их проведению в море (Козлянинов, 1961), которые обеспечили сопоставимость результатов измерений, выполненных в разных экспедициях.

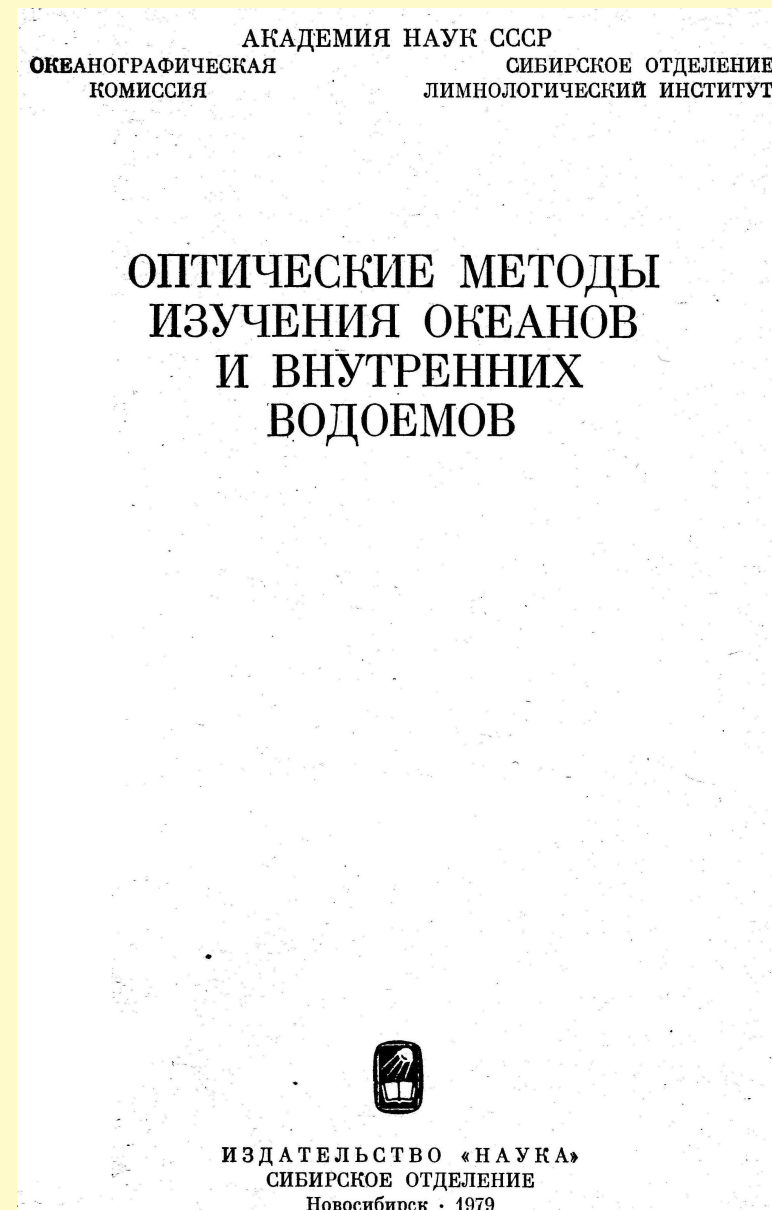
Первые измерения с новым комплексом были выполнены на Черном море в экспедициях на малых судах.



Измерения спектральных коэффициентов яркости моря.

70-е – 80-е годы

Сборник подготовлен по материалам III пленума Секции оптики океана Океанографической комиссии АН СССР в августе 1976 г. в Лимнологическом институте СО АН СССР на Байкале. Представлены новые для того времени результаты по различным направлениям, включающие фундаментальные вопросы (К.С. Шифрин), формирование спектров яркости излучения, выходящего из воды, и их изменение с высотой наблюдения (Буренков и др.), результаты измерений индекса цвета вод с борта судна в Атлантическом, Индийском, Южном и Тихом океанах, Средиземном и Черном морях (Неуймин и др.), количественная связь между индексом цвета и биолюминесценцией поверхностного слоя вод тропических районов (Владимиров, Урденко), результаты исследования зависимости спектров выходящего из моря излучения, измеренных с борта вертолета, от оптических характеристик взвеси и растворенного вещества в Пярнусском и Рижском заливах Балтийского моря (Пелевин и др.).



Разработка многоканального спектрометра МКС для КА «ИНТЕРКОСМОС-20» - 1976-1978 гг.

Разработчик аппаратуры: Институт электроники АН ГДР;

Головной исполнитель от СССР: ИКИ АН СССР.

Научно-методическое руководство и разработка алгоритмов:
ИФА (М.С. Малкевич) и Институт океанологии (О.В. Копелевич).

Другие участники эксперимента: ВНИРО, ТОИ, МГИ и др.

Что удалось сделать:

- математическое моделирование спектральной яркости на верхней границе атмосферы (Буренков и др. , 1977);
- разработка алгоритмов обработки данных (IK-20, The First Intercosmos Satellite Experiments for Oceanographic Purposes. Bishoff, Gatscke, Zimmermann, Kopelevich, Malkevich. Oceanography from Space. , 1980).
- натурные испытания разработанных алгоритмов в Одесском заливе в июле 1978 г. с использованием технологического образца МКС на НИС «Прибой» и «Орбели» с участием немецких специалистов.

Исследования 80-х годов

- Разработка научных программ исследований океана с борта орбитальных станций «Салют» для советских космонавтов, проведение сеансов связи, обработка и анализ полученных результатов (К.Н.Федоров, В.Е.Скляр, А.С.Казьмин).

За проведение этих работ К.Н.Федоров и В.Е.Скляр были награждены медалями.

Подготовлен Атлас цветных снимков океана с описанием и интерпретацией наблюдаемых явлений.

- Анализ и интерпретация результатов космической съемки с советских ИСЗ (серии Космос, Метеор, Метеор-Природа):

Казьмин А.С., Скляр В.Е. Опыт использования видеоинформации с ИСЗ «Метеор» для исследования явлений в океане. Исследования Земли из космоса, 1981, №5.

- Теоретические исследования по разработке формул для расчета параметров восходящих потоков излучения в морской среде (Голубицкий, Левин, Пропускание и отражение слоя среды с сильно анизотропным рассеянием, Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1980;
Зеге Э.П., Коэффициент яркости света, отраженного полубесконечной средой, Известия АН СССР, ФАО, 1983.

Программа «Интеркосмос» (1983-1985 гг.)

В 1983-85 гг. в рамках международной программы «Черное море – Интеркосмос» были проведены комплексные судовые, самолетные и спутниковые исследования различных параметров морской воды и атмосферы. Исследования включали рассмотрение теоретических проблем, описание аппаратуры и методики подспутниковых измерений, бортовой проверки работоспособности и калибровки спутникового спектрометра МКС, результаты судовых и авиационных измерений спектральной яркости на различных уровнях, биооптических характеристик воды и оптических параметров аэрозоля.

Результаты представлены в трех сборниках (1983, 1987, ч.1, 2).

Академия наук СССР, Академия наук ГДР
Академия наук УССР



ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ МОРЯ С УЧЕТОМ АТМОСФЕРЫ

Программа „ИНТЕРКОСМОС“

Под редакцией В. А. Урденко, Г. Циммерманн

Том 2, часть I

Москва - Берлин - Севастополь

Выпуск Института космических исследований АН ГДР

1987 г.

9-й рейс НИС «Профессор Штокман»,

февраль-май 1983г.

Бассейн Амазонки. Нач. экспедиции В.В. Гордеев

Первые комплексные оптические исследования вод Амазонки и ее притоков ("Наука в СССР", N.3, 1984). Получены количественные характеристики цвета разных вод. Удалось оценить коэффициент горизонтального перемешивания при слиянии крупнейших притоков Амазонки - Риу-Негру и Солимоинса.



«Профессор Штокман»
на Амазонке



Любопытные местные
жители

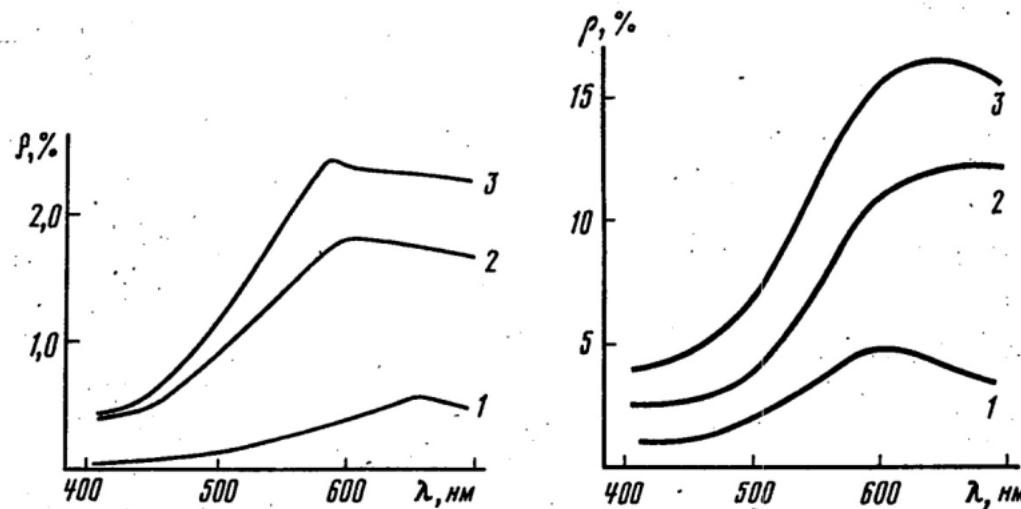


Интервью бразильскому
телевидению около
погружаемого измерителя
малоуглового рассеяния



Совместные
ихтиологические
исследования советских и
бразильских ученых

Воды Амазонки



Р и с. 30. Спектральные зависимости коэффициента яркости в «черных» и «чистых» водах

1 — Риу-Негру; 2 — Тапажос; 3 — Шингу

Р и с. 31. Спектральные зависимости коэффициента яркости в «белых» водах

1 — Амазонка; 2 — Мадейра; 3 — Солимоис

Характеристики излучения, выходящего из водной толщи, и значения альбедо в разных диапазонах спектра

Река	Цветовой тон, нм	Чистота цвета, %	Индекс цвета	Альбедо			
				400— —500 нм	500— —600 нм	600— —700 нм	400— —700 нм
Амазонка	578	38	2,4	8,7	13,0	16,0	12,0
Мадейра	582	46	2,1	12,0	23,0	36,0	22,0
Солимоис	581	43	2,0	15,0	29,0	41,0	27,0
Риу-Негру	583	65	3,5	6,1	6,5	7,0	6,5
Тапажос	578	50	3,0	7,1	8,8	9,6	8,5
Шингу	577	53	3,0	7,4	10,0	11,0	9,4

90-е годы

После успешной работы сканера цвета прибрежной зоны CZCS (1978-1986 гг.) НАСА запланировала создание нового сканера цвета второго поколения (SeaWiFS), учитывающего опыт CZCS. Первоначально запуск этого сканера планировался на октябрь 1993 г.

В 1993г. представители ИО РАН и МГИ НАНУ вошли в число членов созданной НАСА международной научной группы проекта SeaWiFS. В России работа по этому проекту была поддержана грантом Фонда международных проектов Миннауки РФ по теме «Разработка и проверка алгоритмов, использование данных SeaWiFS для глобальной оценки первичной продукции океана и потока углерода из атмосферы в океан»; большую поддержку, в том числе финансовую, оказывала НАСА США.

Научные исследования в рамках госконтракта РКА-НАСА («НАУКА-НАСА») -1995-1997 гг. (головной исполнитель: ФИРЭ РАН)

Проект "Использование данных о цвете вод для биологического мониторинга морей и океанов (руководитель - О.В.Копелевич, ИО РАН)

Цель проекта: усовершенствование методов обработки и практического использования спутниковых данных о цвете вод для биологического мониторинга морей и океанов.

Основная рабочая гипотеза проекта состояла в том, что совместный анализ данных, получаемых со спутникового сканера цвета SeaWiFS и модуля "Природа" (в первую очередь, спектрометрической системы MOS), с привлечением данных подспутниковых измерений позволит верифицировать и усовершенствовать методы обработки и использования спутниковых данных о цвете вод.

Научный коллектив включал сотрудников нескольких лабораторий ИОРАН (Оптики океана; Функционирования экосистем пелагиали; Исследования океана аэрокосмическими методами; Оптике атмосферы над океаном Спб филиала ИО РАН); Московского инженерно-физического института; Морского гидрофизического института НАНУ. Всего в работе участвовали более 30 сотрудников.

Основные результаты работы над проектом:

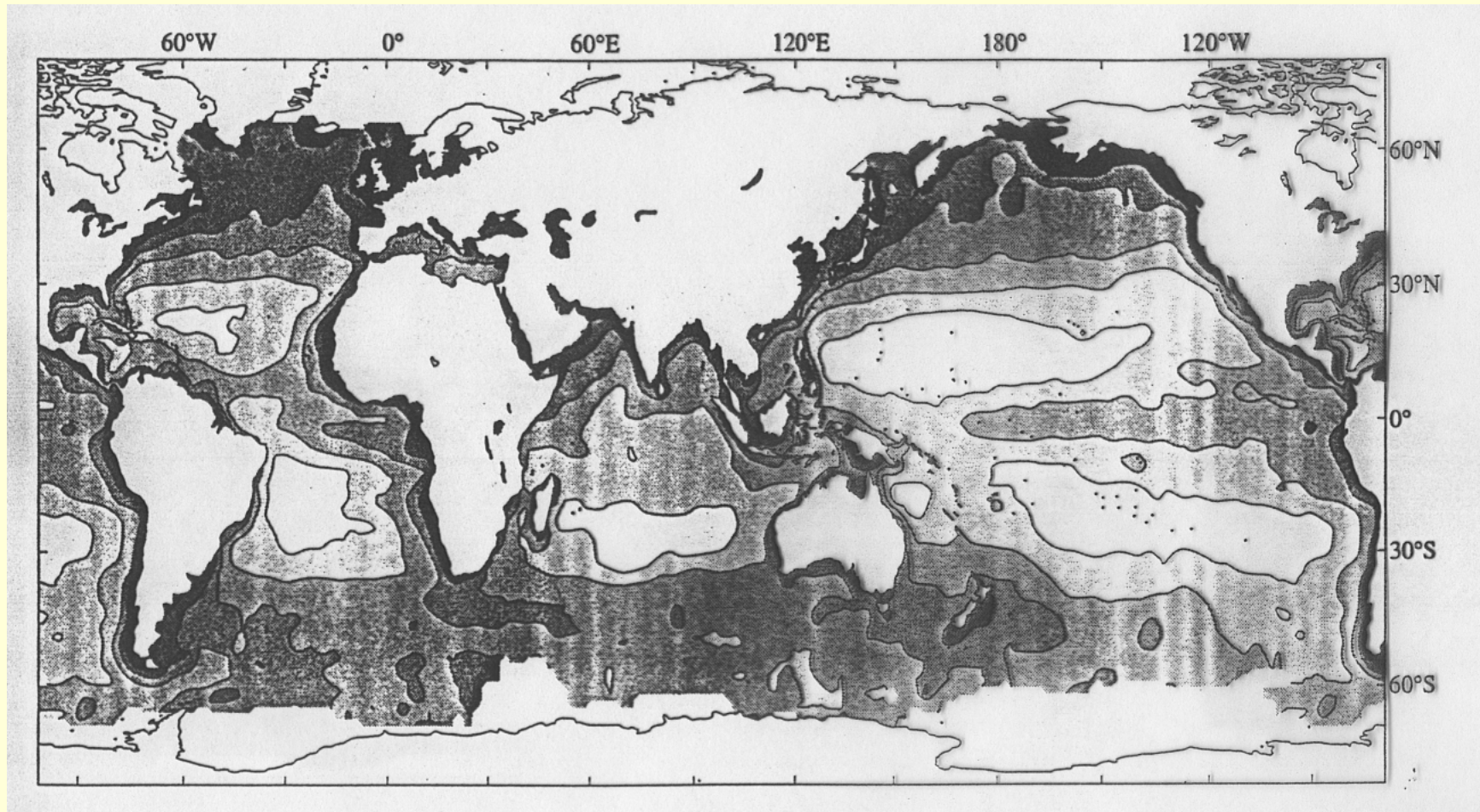
- В ИО РАН был создан Центр обработки данных с выходом в Интернет и локальной сетью внутри Центра, создана инфраструктура для обработки спутниковых данных о цвете вод, включая программное обеспечение для приема, обработки и хранения данных;
- Создание такого центра стало возможным благодаря помощи НАСА, предоставившей в долговременное пользование компьютерную рабочую станцию SUN SPARC System 20, программное обеспечение IDL, пакет программ SeaDAS для обработки данных SeaWiFS и канал связи для выхода в Интернет (корпоративная сеть ИО РАН посредством оптоволоконного кабеля была соединена с узлом региональной сети РКНСИ).
- Разработаны и успешно испытаны новые перспективные алгоритмы обработки и использования спутниковых данных о цвете вод.
- Подготовлен и успешно испытан в натурных условиях комплекс аппаратуры для проведения подспутниковых экспериментов. Проведена интеркалибрация аппаратуры и подспутниковые измерения, в соответствии с основными требованиями Ocean Optics Protocols.
- Проведены натурные исследования (в 1996 г. на Черном море на платформе МГИ в Кацивели и в Атлантическом океана вблизи восточного побережья США с использованием самолета - лаборатории НАСА; в 1997г. экспедиция на нис "Акванавт" в Черном и восточной части Средиземного моря).

Новый подход к оценке биопродуктивности океана, основанный на совместном использовании спутниковых и экспедиционных данных

Работа выполнена под руководством М.Е. Виноградова сотрудниками лабораторий Функционирования экосистем пелагиали и Оптики океана в 1995-1997 гг. Использовались сезонные карты концентрации пигментов фитопланктона по данным CZCS за 1978-1986гг., предоставленные НАСА, и данные натурных измерений первичной продукции и концентрации хлорофилла в экспедициях ИО РАН (около 300 станций). Получены новые оценки годовой и сезонной продукции различных океанов. Оказалось, в частности, что первичная продукция Мирового океана остается почти постоянной не только по календарным, но и по климатическим (фенологическим) сезонам. Это объясняется тем, что зимой сокращается площадь наиболее бедных тропических районов и увеличивается площадь среднепродуктивных промежуточных.

(Публикации: Виноградов и др. 1995, 1996а,б; 1997; Шушкина и др. 1997а,б).

Фотосинтетическая продукция Мирового океана по спутниковым и экспедиционным данным



Среднегодовое распределение первичной продукции в Мировом океане ($\text{мгС}/\text{м}^2$ день). Холодноводные умеренные районы дают 29% общей первичной продукции, тогда как более бедные, но значительно большие по площади тропические районы – 71%.

Спутниковый сканер цвета SeaWiFS на спутнике SeaStar (OrvView) (август 1997 – декабрь 2011)

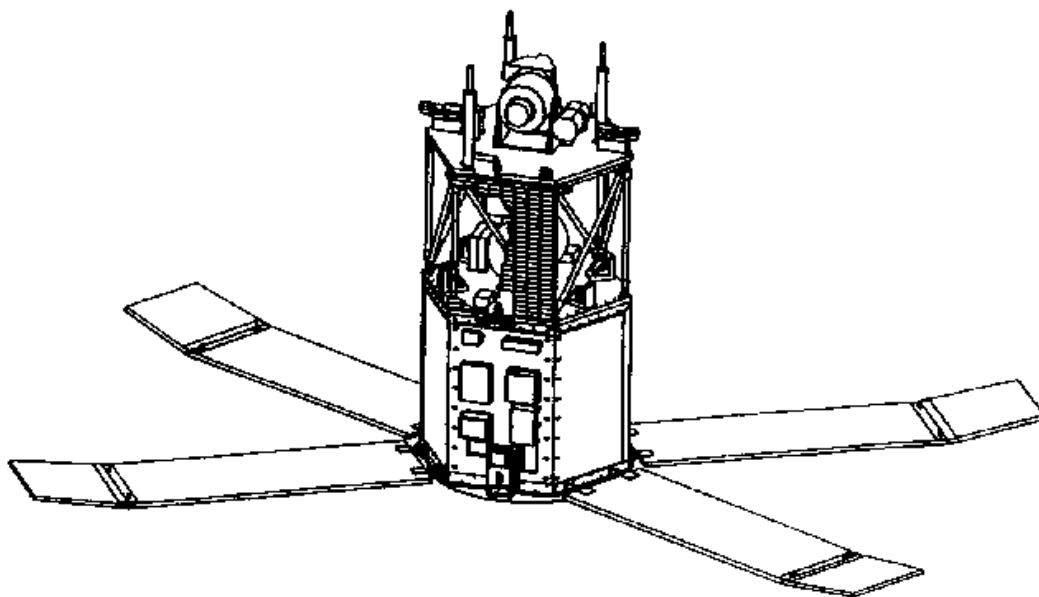


Figure 2. SeaStar satellite with its solar panels deployed.



В октябре 1997 г. был проведен 9-й рейс НИС «Акванавт» в Черном и Эгейском морях с участием польских специалистов - один из первых рейсов с подспутниковыми исследованиями под сканером цвета SeaWiFS (предварительно на платформе МГИ в Кацивели летом 1996 г. были проведены комплексные испытания разработанной аппаратуры и методики исследований).

**О концепции развития спутниковой океанологии
в России в 1996-2015 гг.**

Исследования Земли из космоса, 1997, №2.

Арманд Н.А. и др.

(от ИОРАН С.С. Лаппо, О.В. Копелевич, В.Н. Пелевин)

РОСС – Российская океанографическая система спутников

В начале 2000-х

Участие в новом проекте НАСА *SIMBIOS* (2000-2003 г.г) с проектом «Верификация и усовершенствование алгоритмов атмосферной коррекции и биооптических для Черного и Баренцева морей».

Проведены совместные с американскими специалистами из Институтов Скриппса, Брукхавенской Национальной Лаборатории, Мэрилендского Университета исследования в трансатлантических рейсах НИС «Академик Иоффе» в октябре-ноябре 2001 г. и марте - апреле 2002 г.



«Академик Сергей Вавилов» и
«Академик Иоффе» в Калининградском
порту

Антарктический 10-й рейс «Академика Иоффе», октябрь 2001 – апрель 2002 гг. Подспутниковые исследования.

Цель работы – измерения биооптических характеристик для валидации данных спутникового сканера SeaWiFS.



Перед отходом. Участники рейса справа налево: А.В. Григорьев, А.Б. Демидов, А.Н. Храпко; провожающие – О. Копелевич, Р. Фруин (НАСА).



А.Н. Храпко измеряет аэрозольную оптическую толщину прибором Sinbad.

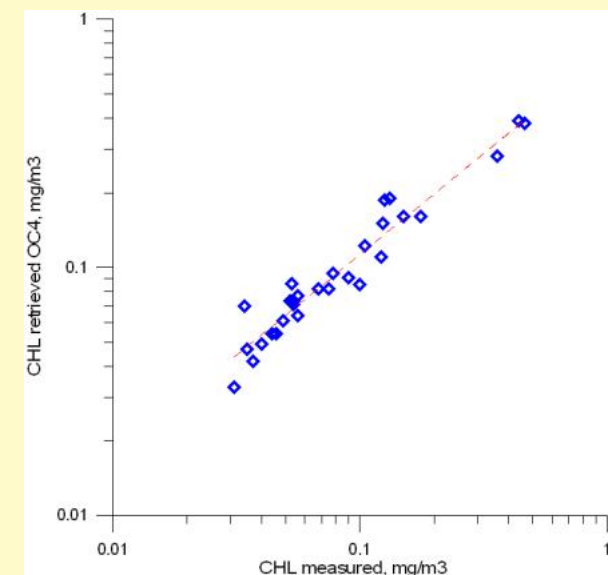
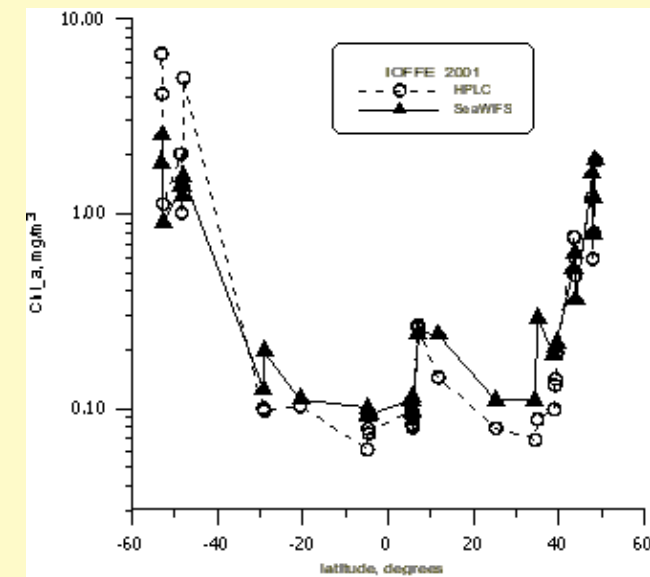
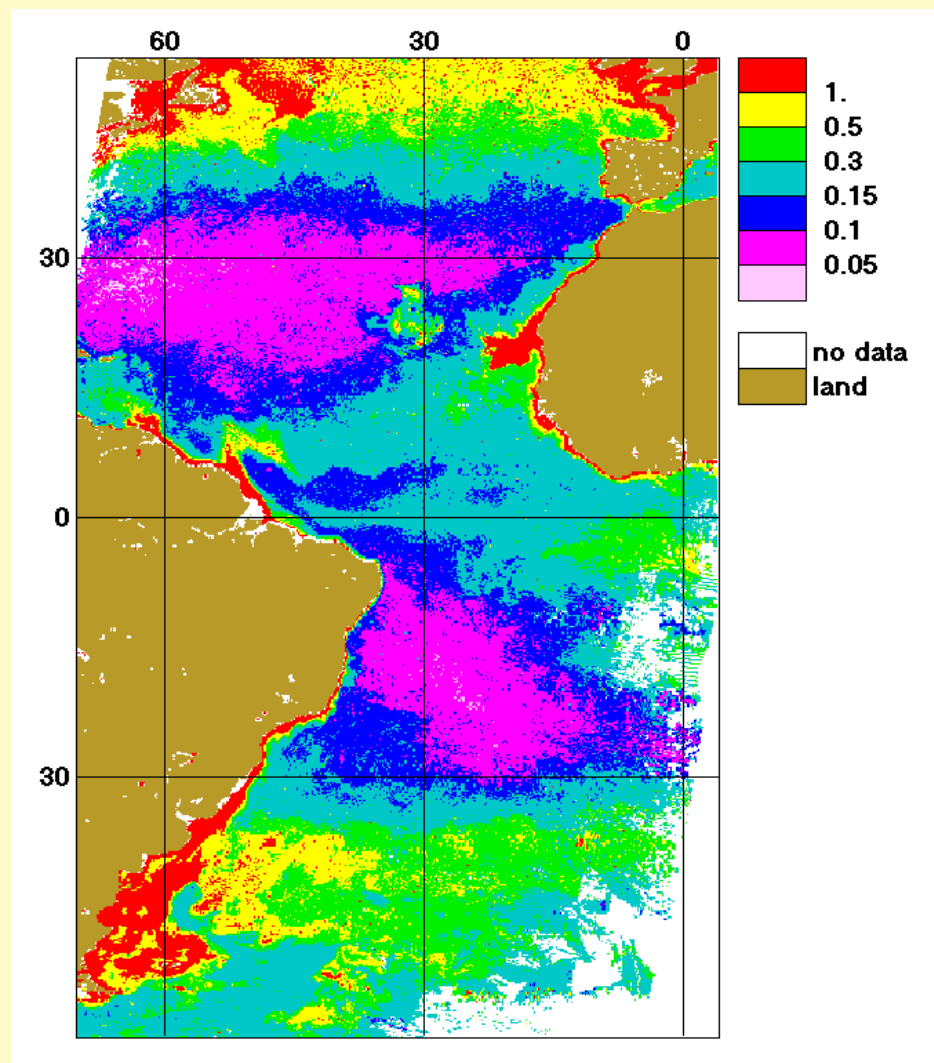


А еще 9/10 под водой!



Слева направо: А.Б. Демидов, А.В. Григорьев – рейс длительностью 7 месяцев!

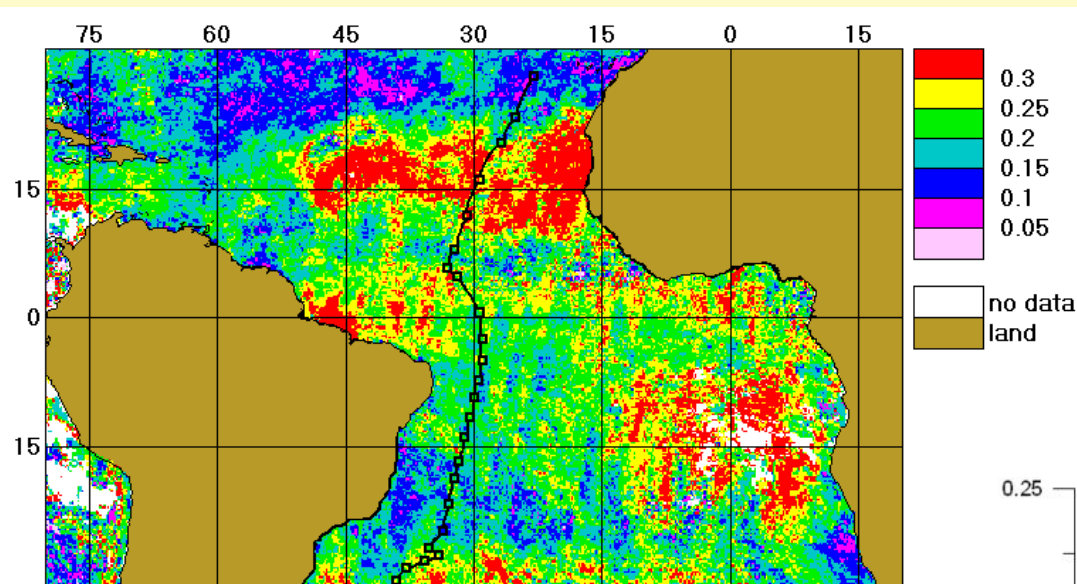
Верификация спутникового алгоритма определения концентрации хлорофилла



Трансатлантические рейсы НИС «Академик Иоффе» и «Академик Сергей Вавилов»

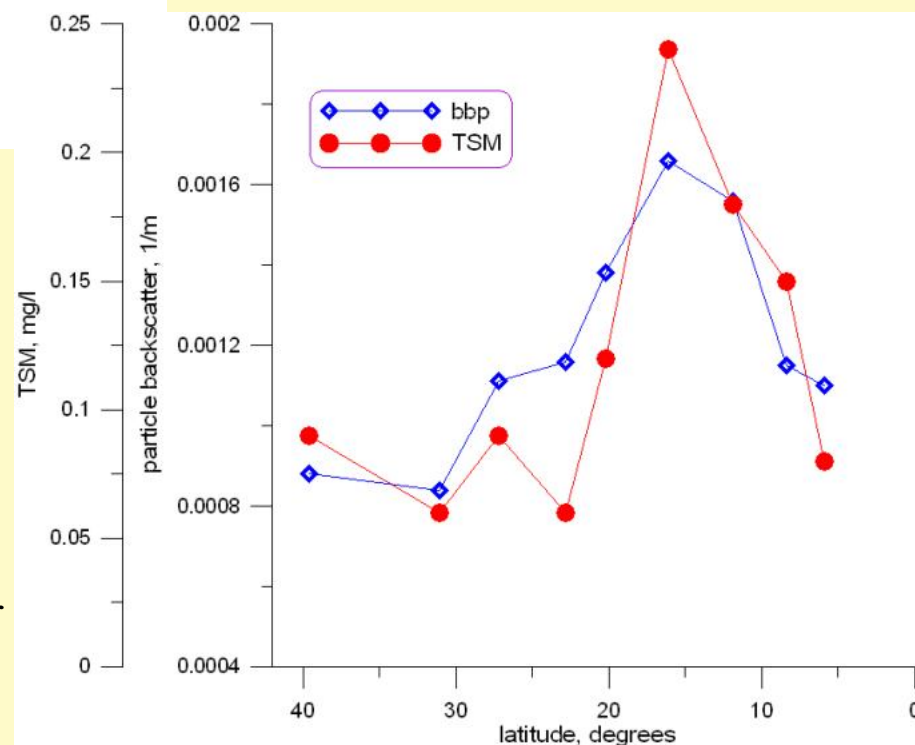
10 th cruise of R/V <i>Akademik Ioffe</i>	October 2001 – March 2002
11 th cruise of R/V <i>Akademik Ioffe</i>	October – November 2002
17 th cruise of R/V <i>Akademik Sergey Vavilov</i>	October – November 2003
19 th cruise of R/V <i>Akademik Sergey Vavilov</i>	October – December 2004.

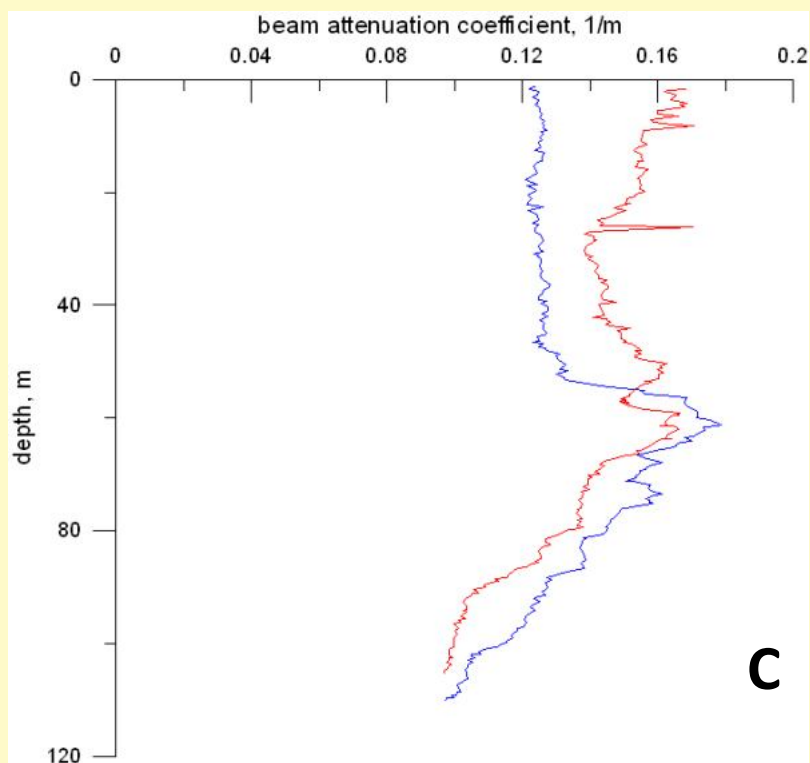
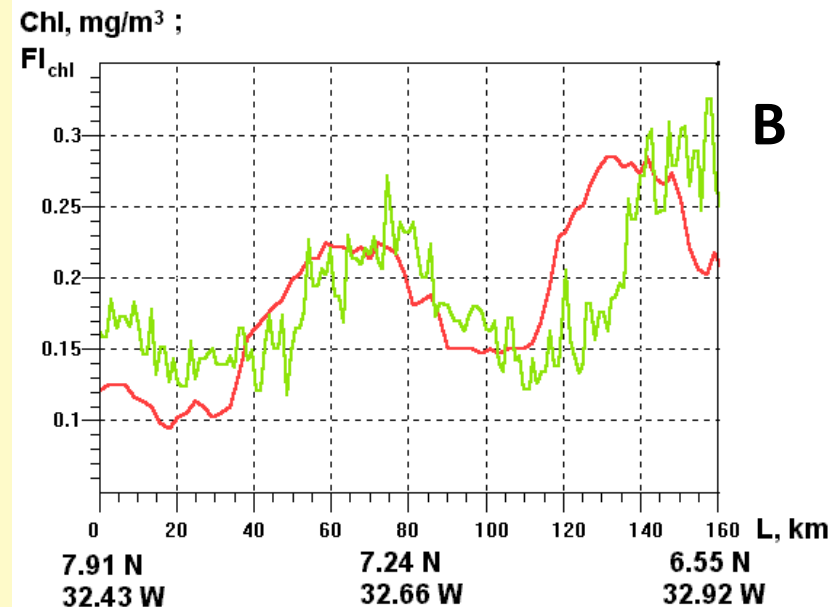
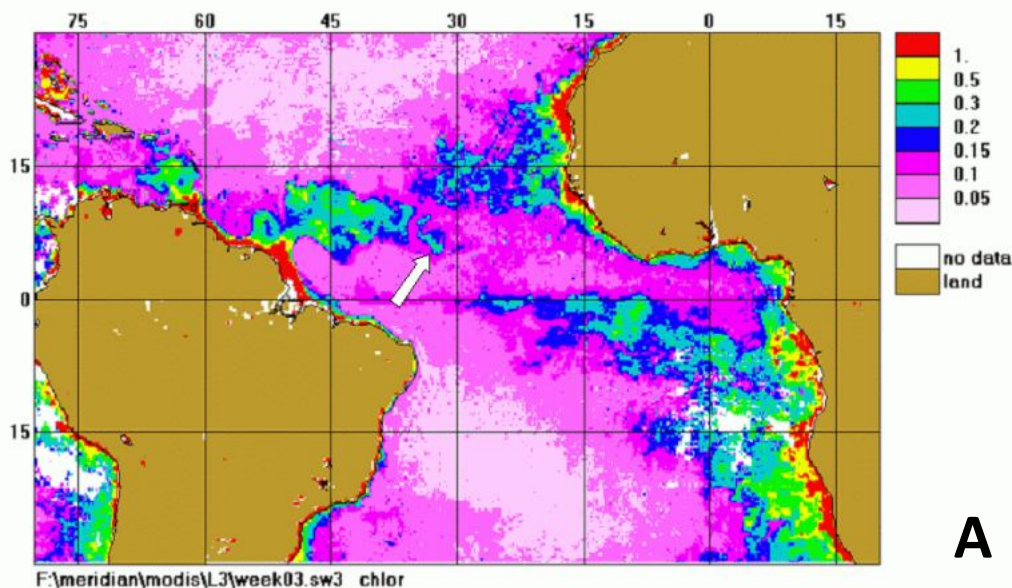
Эоловый перенос пылевых частиц из пустыни Сахара



The weekly distribution of the aerosol optical thickness $\tau(865)$ derived from MODIS data of 15-21 Oct. 2003. The black line is the ship track.

Changes of the particle backscattering coefficient (blue) and the suspended matter concentration (red) at the intersection of the Sahara dust area





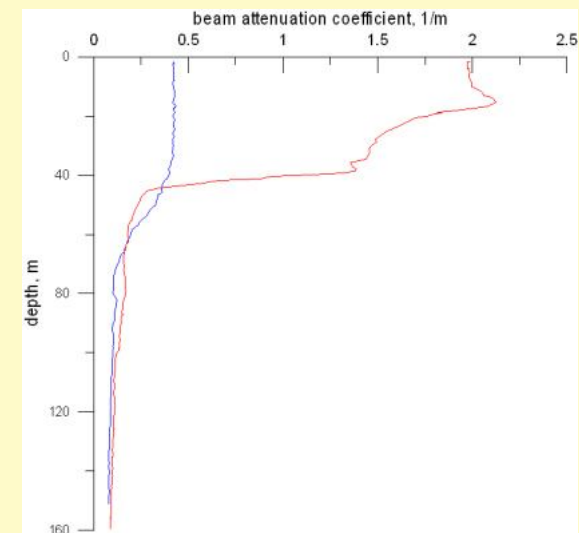
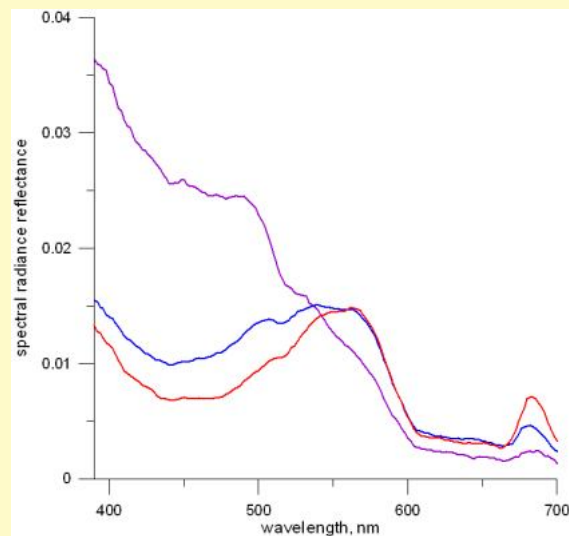
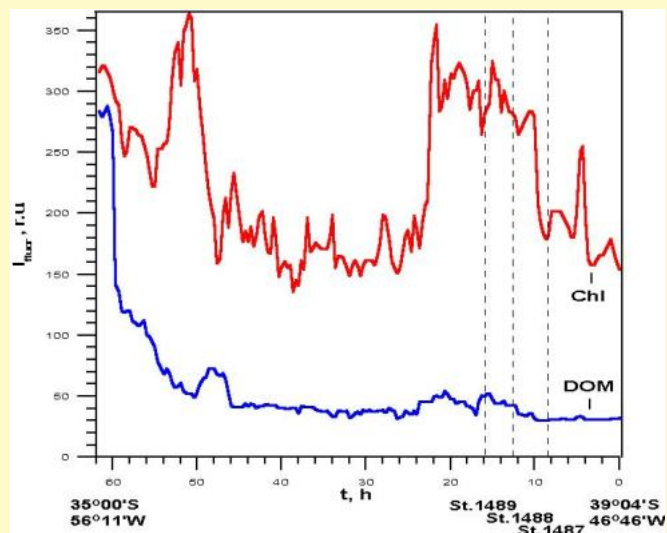
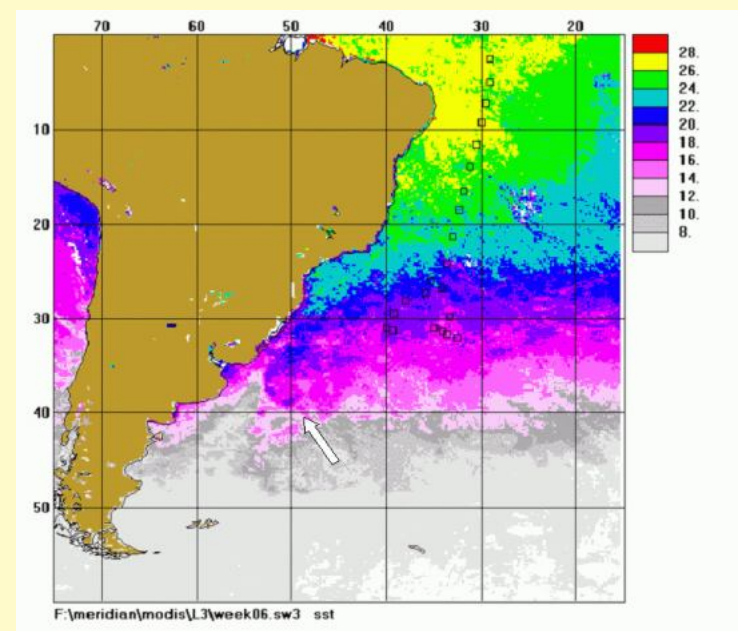
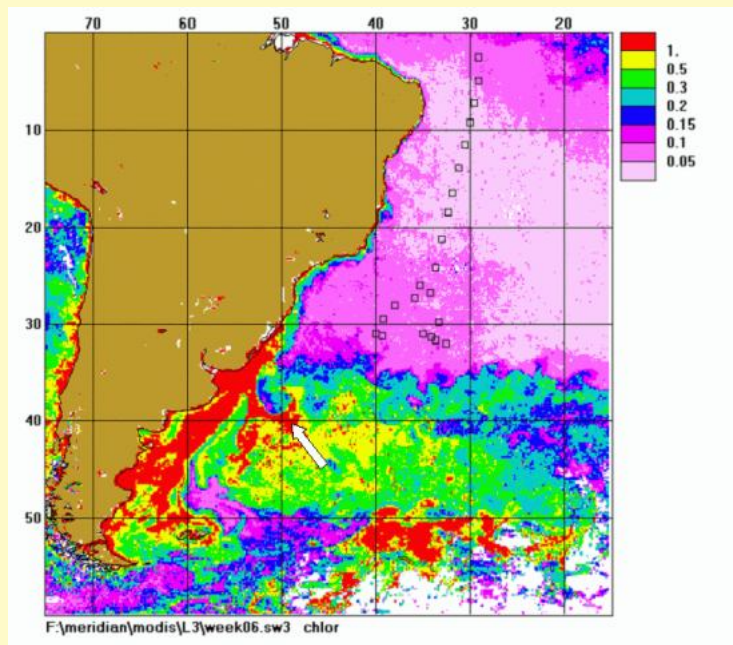
Амазонская «линза» в центре Атлантики

A. The weekly chlorophyll distribution in the central part of the Atlantic ocean derived from MODIS data of 15-21 October 2003. Position of the lens of transformed Amazon water is shown by an arrow.

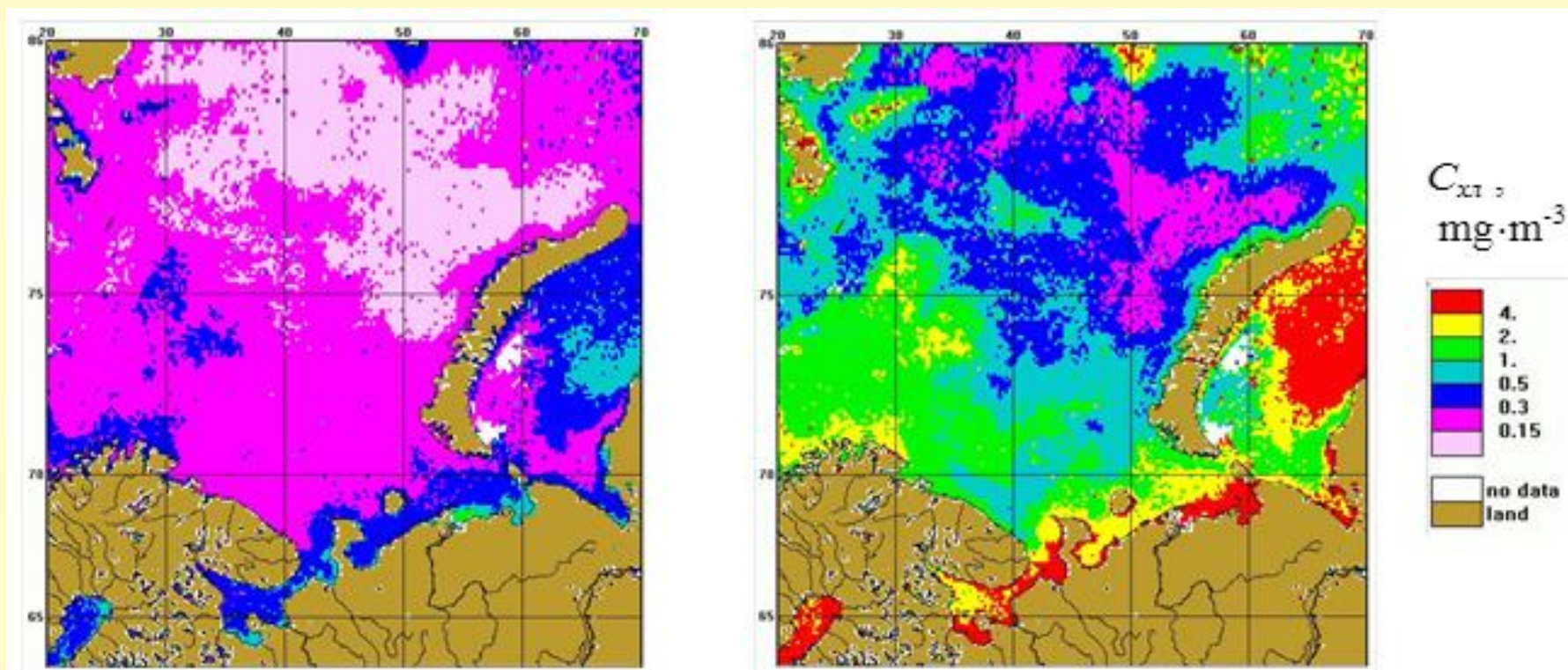
B. Comparison between changes of satellite chlorophyll concentration from MODIS-Terra data on 17 October 2003 (green) and of ship chlorophyll fluorescence measured by the flow-through laser fluorometer at the intersection of the Amazon lens.

C. Vertical profiles of the beam attenuation coefficient measured by a submersible transmissometer in the interior of the Amazon lens (red) and outside of it (blue).

Фронтальная зона вблизи побережья Южной Америки по спутниковым и судовым данным. Ноябрь 2003 г.

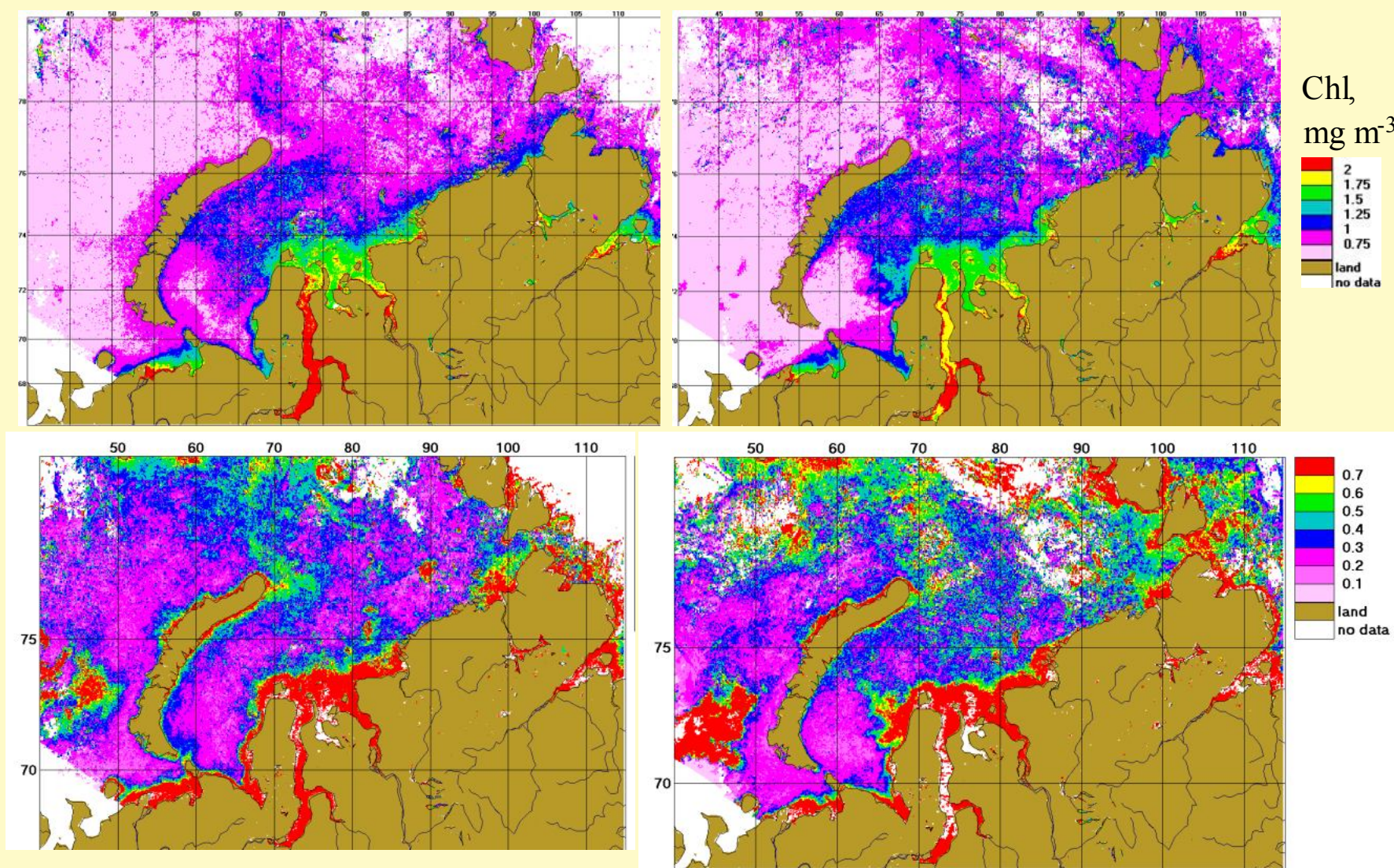


Региональные алгоритмы для морей России



Среднемесечные распределения концентрации хлорофилла в Баренцевом море, рассчитанные по стандартному алгоритму SeaWiFS (справа) и по алгоритму ИОРАН, верифицированному по данным натурных измерений (слева). Август 2001 г.

Региональные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла и взвеси по спутниковым данным для Карского моря



Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла «а» (верхние карты) и взвеси (нижние) в Карском море в сентябре 2007 (слева) и 2011 (справа), рассчитанные по данным сканера MODIS-Aqua посредством нового регионального алгоритма.

Взвешенное вещество в юго-восточной части Балтийского моря

Среднемесячные пространственные распределения с марта по сентябрь, осредненные за период 2003-2014 г.

Изображения в видимом цвете со сканера Landsat-8: А, 23 июля, Б, 18 сентября 2014

