

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

СУСЛИН Вячеслав Владимирович

УЧЕТ АТМОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ОТКРЫТОГО
ОКЕАНА ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ
ИЗ КОСМОСА

04.00.22 - геофизика

А в т о р е ф е р а т
диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Севастополь 1992 г.



00815061 (L)

Работа выполнена в Морском
АН Украины

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Суетин В. С.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Копелевич О. В.
кандидат физико-математических наук
Ли М. Е.

Ведущая организация: Институт прикладной математики
Российской Академии наук

Защита состоится "27" "11" 1992 г. в "11" часов на
заседании Специализированного совета Д 016.01.01 при Морском
гидрофизическом институте АН Украины (335000, г. Севастополь,
ул. Капитанская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского гидрофизического института АН Украины (335000, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2).

Автореферат разослан "11" "09" 1992 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
канд. физ.-мат. наук

А. М. Суворов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Наблюдение океана в видимом диапазоне спектра является одним из наиболее информативных способов дистанционного зондирования, который в принципе позволяет контролировать глобальное распределение оптических полей океана, региональные особенности контрастов, связанные с фронтальными зонами, апвеллингами, течениями и другими гидрофизическими процессами. Спектральный состав и интенсивность восходящего из моря излучения, определяющие цвет моря, являются источником информации о содержании в воде примесей различной природы, характерной глубине проникновения солнечного света и других элементах, важных для целого ряда смежных научных дисциплин. При использовании измерений со спутников в видимом диапазоне одна из основных проблем связана с необходимостью учета мешающего действия атмосферы: рассеяние света в атмосфере и на границе вода-воздух. После устранения атмосферных помех, необходимо получить значения величин коэффициента яркости воды на различных длинах волн.

В настоящее время известны несколько подходов к устранению атмосферной помехи. К числу наиболее апробированных из них относятся методики Гордона с соавторами [Gordon, 1976; Gordon, 1978; Gordon et al., 1981-1983; Viollier et al., 1980; Sturm, 1981, 1983] и Бадаева-Малкевича [Бадаев, Малкевич, 1978; Бадаев и др., 1983, 1985]. Несмотря на то, что существуют несколько подходов к выполнению атмосферной коррекции, наиболее принципиальные их элементы являются общими для большинства применяемых методик, основывающихся на использовании одновременных измерений в различных интервалах видимого и ближнего ИК диапазонов. К числу таких элементов относятся: восстановление вклада аэрозоля в одних спектральных интервалах по результатам его определения в других интервалах, учет угловых зависимостей измеряемых и определяемых величин и параметризация спектральной зависимости коэффициента яркости воды. В настоящее время в научной литературе имеют место противоречивые в той или иной степени сведения относительно всех трех элементов, которые в первую очередь объясняются скудностью контактных эмпирических данных о них, тем более когда речь идет о

районах удаленных от берегов или регионах в Южном полушарии в открытом океане [Gordon et al., 1983; Бадаев и др., 1983].

Вряд ли можно надеяться на сколько-нибудь полное изучение свойств перечисленных выше элементов, используя только синхронные измерения со спутника и корабля, в силу ограниченности скорости последнего, что сразу исключает из рассмотрения богатое разнообразие состояний системы океан-атмосфера, содержащееся в спутниковых данных. Поэтому, если стремиться сохранить это преимущество спутника, то для изучения свойств перечисленных выше элементов требуется развитие новых методов, в которых реализована процедура статистической обработки спутниковых измерений без привлечения какой бы то ни было сопутствующей информации.

Цель работы заключалась в том, чтобы изучить возможности дистанционного восстановления коэффициента яркости воды для условий открытого океана на основе обработки и анализа массива измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21".

Для проведения такого рода исследований были разработаны и реализованы специальные процедуры, которые без привлечения каких бы то ни было сопутствующих измерений, позволили изучить свойства изменчивости аэрозольной и угловозависимой компонент коэффициента яркости системы океан-атмосфера в разных спектральных каналах. Основной принцип этих процедур заключается в том, что путем формирования анализируемых массивов специальным образом и вычисления отклонений от локальных средних значений обеспечивается постоянство одних факторов и возможность анализа свойств других. Такая процедура проделывалась со всеми факторами поочередно. Математический аппарат исследования формируемых выборок - стандартный корреляционный анализ.

Научная новизна. Для исследования спектральной зависимости изменчивости аэрозольной и угловозависимой компонент коэффициента яркости на верхней границе атмосферы разработана методика обработки дистанционных данных, дающая возможность оценивать потенциальную точность восстановления коэффициента яркости воды без привлечения контрольных данных.

С помощью этой методики на большом статистическом материале

измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" показано, что изменчивость аэрозольной компоненты имеет приблизительно однофакторный характер и близкую к нейтральной спектральную зависимость в интервале длин волн 449 - 675 нм; устойчивость этих свойств проверена для диапазона зенитных углов Солнца от 15 до 70 градусов и для различных регионов и сезонов.

Сопоставлены два способа учета угловой зависимости Рэлеевой составляющей рассеяния света в атмосфере - через точное решение с учетом эффектов многократного рассеяния [Gordon et al., 1988] и с помощью аппроксимации упрощенной функцией зенитного угла Солнца [Viollier et al, 1980]; точность алгоритма атмосферной коррекции при этом почти не отличается.

По результатам обработки дистанционных измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" получены оценки точности восстановления спектральной яркости воды в открытом океане для различных участков спектра с учетом изменений зенитного угла Солнца в различных интервалах; характерный уровень среднеквадратичных ошибок составляет для длины волны 449 нм около 0,006, что обеспечивает уверенное различение нескольких градаций коэффициента яркости воды в открытом океане.

Для регионов открытого океана проведен анализ изменчивости спектрального коэффициента яркости воды, восстановленного по дистанционным данным при фиксированном зенитном угле Солнца с учетом полученного спектрального хода аэрозольной компоненты коэффициента яркости; в результате анализа большого массива данных измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" получено подтверждение гипотезы о том, что изменчивость спектрального коэффициента яркости воды является однофакторной и в основном сосредоточена в области длин волн 400-500 нм; получены оценки максимального перепада коэффициента яркости воды в открытом океане для длин волн 415, 449, 483, 535 и 570 нм; выявлены районы, в которых коэффициент яркости моря для длин волн 415 и 449 нм достигает 0,06, что соответствует наиболее прозрачным океанским водам.

Для зенитных углов Солнца 40-60° построена глобальная карта распределения коэффициента яркости океана в спектральном канале 449 нм, восстановленная по спутниковым данным.

На примере акватории Атлантического океана продемонстрирова-

на сезонная изменчивость коэффициента яркости воды в спектральном канале 449 нм, восстановленная по измерениям с ИСЗ "Интеркосмос 21".

Практическая ценность. В работе содержится демонстрация возможностей дистанционных методов зондирования океана в видимом диапазоне спектра.

Основные результаты работы имеют практическое значение для развития и применения методов дистанционного зондирования в целях глобального мониторинга обширных акваторий, регистрации крупномасштабных гидрологических явлений в океане, оценок экологического состояния и классификации водных масс по биопродуктивности.

В качестве организаций по использованию результатов диссертации можно предложить Институт космических исследований РАН, Институт океанологии РАН, Морской гидрофизический институт АН Украины, Физический факультет МГУ, Государственный океанографический институт, Институт биологии южных морей АН Украины и другие организации, занимающиеся изучением океана.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на IX - XI Пленумах рабочей группы по оптике океана Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана (октябрь 1984 г., Батуми и октябрь 1988 г., Ростов-на-Дону, сентябрь 1990 г., Красноярск), на 4, 6, 7 и 9 совещаниях-семинарах по спутниковой гидрофизике в г. Севастополе, III съезде советских океанологов (октябрь 1988 г., Ленинград) и семинарах ИО РАН, ИКИ РАН, ИПГ им. Е. К. Федорова ГОСКОМГИДРОМЕТА, МГИ АН Украины.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 17 печатных работах, перечисленных в списке литературы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 157 страниц, включающих 26 рисунков, 16 таблиц и 99 наименований списка литературы.

Содержание работы

В первой главе диссертации обсуждены основные факторы, влияющие на формирование сигнала, регистрируемого спутником; выделены наиболее принципиальные элементы, общие для всех применяемых методик устранения атмосферной помехи. Приведена и обсуждается процедура исследования свойств этих элементов. Дано краткое описание эксперимента с ИСЗ "Интеркосмос-21" [Bischoff et al, 1983; Бадаев и др., 1985] и параметров аппаратуры МКС (многоканального спектрометра) на этом спутнике; рассмотрены некоторые статистические свойства эмпирического материала, который получен с помощью этой аппаратуры и использован в следующих главах для содержательного анализа.

В 1.1 на примере уравнения атмосферной коррекции [Gordon, Clark, 1981; Gordon et al., 1983; Viollier et al, 1980; Sturm, 1981] описаны основные факторы, влияющие на формирование сигнала, регистрируемого со спутника: аэрозольное и Рэлеевское рассеяние света в атмосфере, Френелевское отражение от границы вода-воздух и излучение выходящее из-под поверхности воды; обсуждены ограничения его применения (для наблюдения в надир интервал пригодных для интерпретации зенитных углов Солнца θ_0 ограничен эффектами блика с одной стороны и усилением влияния многократного рассеяния с другой стороны и допущения, используемые при его выводе (наиболее важное касается аддитивности представления вкладов Рэлеевской и аэрозольной компонент рассеяния света). Оно имеет следующий вид

$$R_{\lambda} = (R_{a\lambda} + R_{r\lambda} + \rho_{w\lambda} T_{\lambda}) T_{o\lambda} + R_{g\lambda}, \quad (1)$$

где $R_{a\lambda}$, $R_{r\lambda}$ и $\rho_{w\lambda}$ - коэффициенты яркости аэрозольной и Рэлеевской компонент атмосферы (с учетом однократного Френелевского отражения от поверхности воды) и коэффициент яркости воды; $R_{g\lambda}$ - составляющая коэффициента яркости, обусловленная бликовым отражением солнечных лучей от поверхности воды; T_{λ} и $T_{o\lambda}$ - функции пропускания по двойному пути луча рассеивающих компонент атмосферы (молекулярное и аэрозольное рассеяние) и слоя озона соответс-

твенно: λ - длина волны света.

Проведенный в этом разделе сравнительный анализ наиболее апробированных методик атмосферной коррекции [Gordon, 1976, 1978; Gordon et al., 1981-1988; Бадаев, Малкевич, 1978; Бадаев и др., 1983, 1985] показал, что принципиальные их элементы являются общими для всех методик, основывающихся на использовании одновременных измерений в различных областях видимого и ближнего ИК-диапазона. К числу таких элементов относятся: восстановление вклада аэрозоля в одних спектральных интервалах по результатам его определения в других интервалах, учет угловых зависимостей измеряемых и определяемых величин и параметризация спектральной зависимости коэффициента яркости воды. Отмечено, что комплексное исследование перечисленных свойств в схеме спутник плюс корабль сопряжено с нетривиальными проблемами, т.к. необходимо иметь контроль и обеспечить достаточное разнообразие всех условий эксперимента. Как правило, в подобных экспериментах удается получить лишь демонстрационные оценки возможностей определения параметров океана из космоса [Esaias et al., 1986; Gordon et al., 1980, 1983; Smith, Baker, 1982; Бадаев и др., 1985, 1986, 1991]. Далее изложен предлагаемый подход к исследованию свойств, упомянутых выше трех основных элементов. Суть этого подхода сформулирована выше.

Контроль полученных результатов предлагается делать, опираясь на известные независимые эмпирические результаты: например, поведение спектрального коэффициента яркости воды в открытом океане [Morel, Prieur, 1977], проводя сравнение с картами географического распределения оптических и биологических характеристик верхнего слоя вод Мирового океана [Войтов, 1981; Ерлов, 1980; Кобленц-Мишке и др., 1968; Колянинов, 1960; Колянинов, Овчинников, 1961; Неуймин и др., 1982; Халемский, Войтов, 1972; Шифрин, 1983].

В 1.2 в предположении однофакторности связи вкладов аэрозольных компонент на различных длинах волн

$$R_a(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_1, \lambda_2) R_a(\lambda_2) \quad (2)$$

и равенства нулю коэффициента яркости воды $\rho_w(\lambda_2) = 0$ для $\lambda_2 > 600$ нм получено и обсуждается выражение для восстановления коэф-

коэффициента яркости воды $\rho_{w\lambda}$:

$$\rho_{w\lambda}(\lambda_1) T_{\lambda_1} T_{\lambda_2} = R(\lambda_1) + a(\lambda_1, \lambda_2) R(\lambda_2) + b(\lambda_1, \lambda_2) f(\theta_0), \quad (3)$$

где a и b - константы, зависящие от выбора пары длин волн λ_1 и λ_2 ($\lambda_2 > 600$ нм), $f(\theta_0)$ - угловзависимая компонента (см. главу 3), $R(\lambda_1)$ и $R(\lambda_2)$ - коэффициенты яркости, измеряемые со спутника на λ_1 и λ_2 . В дальнейшем (главы 2 и 3) при анализе дистанционных данных будут получены оценки адекватности выражения (3) и числовые значения коэффициентов a и b .

В 1.3 дана общая характеристика эксперимента со спутника "Интеркосмос-21", включая краткое описание аппаратуры МКС и процедур первичной обработки. Многоканальный спектрометр (МКС), установленный на ИСЗ "Интеркосмос-21" [Bischoff et al, 1981; Bischoff et al, 1983; Бадаев и др., 1985], производил измерения в надир восходящей яркости в 13 спектральных каналах видимого и ближнего ИК диапазонов (415, 449, 483, 534, 570, 621, 675, 758, 761, 763, 767, 794, 824 нм) с высокой точностью. Охват данными измерений составил 16 месяцев с февраля 1981 г. по май 1982 г., по пространству - от 74° ю. ш. до 74° с. ш. Первичная обработка всего массива измерений была выполнена в МГИ АН Украины с помощью модернизированного комплекса программ, созданного в Институте космических исследований РАН. Архив данных, прошедших первичную обработку, хранится в МГИ АН Украины. Выходная структура записи информации имеет следующий вид: московское время, координаты (широта, долгота), зенитный угол Солнца, измерений спектральной яркости в тринадцати спектральных каналах в абсолютных единицах [Суетин и др., 1987].

В 1.4 описаны критерии выбора измерений в безоблачных условиях и некоторые обобщенные свойства окончательной выборки. Основным критерием состоял в том, что к безоблачным относились только такие спектры, которые совпадали в двух последовательных во времени отчетах. При совпадении всех спектров в пределах одноградусного (по широте) отрезка трассы спутника в итоговый массив включался только один такой спектр. Сравнение спектров на

совпадение имеет смысл в связи с борьбой с частичной облачностью и возможными сбоями в телеметрической системе. Безусловно, этот критерий может отбраковывать и безоблачные точки, но при его применении более надежно выбираются измерения в безоблачных условиях. Кроме того, накладывалось ограничение на коэффициент яркости на длине волны 675 нм (R_7) не более 0,08 (это условие обеспечивает браковку не только облаков, но и ситуаций, искаженных солнечным бликом, льдом и т. п.) и диапазон зенитных углов Солнца (θ_0) от 15° до 70° . Все измерения выбирались для районов океана удаленных от ближайшей суши не менее 200 км. Последнее обстоятельство автоматически исключило из рассмотрения измерения, выполненные над внутренними морями и прибрежными районами океанов, тем самым образуя выборку, которая характеризует оптические свойства воды и атмосферы в безоблачных условиях над районами открытого океана. Точное число таких спектров составило 42085. Они распределены по пространству в пределах широтной зоны от 70° ю. ш. до 70° с. ш. Наибольшее число измерений попадает в диапазон широт от 40° ю. ш. до 40° с. ш. Из всех океанов наиболее обеспечен измерениями Атлантический.

В 1.5 описаны процедуры и результаты их применения для проверки стабильности во времени измерительного тракта спектрометра МКС. За основу оценки стабильности работы аппаратуры МКС в течение всего периода его функционирования на орбите были взяты результаты анализа бортовых калибровок, которые производились с помощью эталонных ламп, с периодичностью ~ 2 мин, и оценка изменчивости во времени (через год в один и тот же месяц) минимальных сигналов в спектральных каналах для одних и тех же узких интервалов зенитного угла Солнца. Результаты проведенных исследований показали, что в течение всего периода функционирования ИСЗ на орбите (16 месяцев) аппаратура МКС отработала стабильно для $\lambda > 500$ нм, включая пропускание внешнего иллюминатора спутника, при небольшом падении чувствительности в каналах с $\lambda < 500$ нм. Это позволило рассматривать весь массив как единое целое без дополнительной радиометрической коррекции.

Во второй главе изучаются свойства изменчивости аэрозольной компоненты рассеяния света в атмосфере и коэффициента яркости воды в открытом океане.

В 2.1 изложены формальные и физические принципы формирования выборки, из которых исключены изменчивости, связанные с угловозависимой компонентой и коэффициентом яркости воды, или во всяком случае для большинства ситуаций они гораздо меньше, чем изменчивость, обусловленная влиянием аэрозоля. Суть этой процедуры была описана ранее, конкретная ее реализация заключалась в следующем. Весь массив измерений был разбит на подмассивы, соответствующие измерениям на одном витке ИСЗ внутри достаточно малых по широте и долготе ячеек размером 200×200 км². Для каждого такого подмассива вычислялись отклонения измеренных коэффициентов яркости от средних значений. В дальнейшем анализе во внимание принимались только такие отклонения, которые были достаточно велики в длиноволновой области спектра и различны внутри отдельно взятого подмассива. Такой подход позволил, не задавая конкретных значений угловозависимой компоненты и коэффициента яркости воды, исключать их как среднее и формировать выборки (объединяя таким образом найденные отклонения по всем подмассивам в один массив), по которым можно изучать изменчивость аэрозольной компоненты для различных пар спектральных каналов. Длительностной размер ячейки по пространству был выбран как компромисс между возможным вкладом ошибки, связанным с изменчивостью $\rho_{\text{вд}}$ внутри ячеек и количеством измерений, попадающих в ячейку, и в конечном счете определяющих статистическую обеспеченность анализируемой выборки.

В 2.2 приведены результаты конкретных экспериментов по определению A_{ij} и исследованию свойств корреляционных матриц, построенных из отклонений, описанных в разделе 2.1 для всех комбинаций каналов МКС. Были рассмотрены эксперименты с различными $\bar{E}_7 = 0,04$ и $0,08$, диапазонами зенитных углов Солнца от 15° до 70° и географических районов и сезонов, т.е. широком спектре физико-географических условий, в которых выполнялись измерения. Была показана однофакторность корреляционных матриц для первых семи длин волн МКС (отношение первых двух собственных чисел было

больше 45). Продемонстрировано, что ошибка экстраполяции изменчивости аэрозольной компоненты в синюю область (415 и 449 нм) по ее значению в красной области спектра (675 нм) не превышала 0,002, что вполне приемлемо, т.к. эта величина более чем на порядок меньше характерной величины изменчивости коэффициента яркости воды в открытом океане [Gordon, Clark, 1981]. На то, что изучаемая нами изменчивость связана с аэрозольной компонентой указывает тот факт, что значения диагональных элементов ковариационных матриц этих экспериментов лишь немного превышают соответствующие значения кванта в полосе поглощения кислорода 760 нм (девятый спектральный канал МКС). Рассчитанные значения величин a_{ij} в интервале длин волн 449-675 нм оказались близкими к минус 1, что свидетельствует о нейтральной спектральной зависимости изменчивости аэрозольной компоненты. Это существенно отличается от известных свойств континентального аэрозоля, но может считаться вполне реальным для аэрозоля, характерного для открытого океана [Шифрин и др., 1985; Кондратьев и др., 1983; Зуев, Креков, 1986], отличительная особенность которого заключается в преобладающей роли частиц, имеющих размеры порядка длины волны видимого света.

В 2.3 изучались свойства изменчивости коэффициента яркости воды и аэрозольной компоненты коэффициента яркости системы океан-атмосфера. Для последнего отличие от 2.2 состояло в том, что теперь отклонения от среднего будут вычисляться не для локальных по пространству и времени выборок, а от среднего по всему массиву, т.е. всем сезонам и всему океану в целом. Проводился анализ собственных векторов и собственных значений ковариационных матриц для выборок из узких интервалов зенитных углов Солнца (40-45° и 45-50°). Фиксирование зенитного угла позволяло исключить из рассмотрения изменчивость угловозависимой компоненты. Учет аэрозоля выполнялся двумя способами: наложением явного ограничения на коэффициент яркости на длине волны 675 нм ($< 0,025$) или его исключением с помощью коэффициентов a_{ij} найденных в разделе 2.2. В последнем случае формировались ковариационные матрицы вида $H' = (t'_k - \bar{t}'_k)(t'_n - \bar{t}'_n)$, где $t'_i = R_i + a_{i6}R_6$ ($R(675 \text{ нм}) < 0,08$).

Кроме того, были проанализированы выборки как со всеми каналами (415-675 нм), так и исключая синий участок спектра (т.е. используя только $\lambda = 534-675$ нм). Выполненный анализ показал высокую эффективность учета аэрозольных эффектов с коэффициентами a_{ij} , и тем самым подтвердил установленную в 2.2, однофакторность и спектральную нейтральность изменчивости аэрозольной компоненты коэффициента яркости, но уже для всего открытого океана в целом. Показано, что изменчивость коэффициента яркости воды, восстановленного по спутниковым данным, максимальна в синей области спектра, ослабевает до нуля в красной и носит приблизительно однофакторный характер (отношение первых двух собственных чисел для каждой из матриц H' равно 20). Этот результат не является новым, однако он существенно дополняет по географии и сезонам выборки, которые анализировались в работе [Morel, Prieur, 1977].

По формуле $\Delta\rho_{w\lambda} = \frac{\max_i t_i - \min_i t_i}{T_{0i} T_i}$ получена оценка максимальной изменчивости коэффициента яркости воды в открытом океане: 415 нм - 0,063; 449 нм - 0,058; 483 нм - 0,034; 534 нм - 0,010; 570 нм - 0,006.

Следует отметить, что полученные величины $\Delta\rho_{w\lambda}$ для синей части спектра являются несколько неожиданными, если учесть, что должно выполняться условие $\rho_{w\lambda} > 0$. Отсутствие в литературе сведений о наблюдении таких $\rho_{w\lambda} \approx 0,05-0,06$, можно объяснить тем, что по нашим данным они выявлены в тех районах, где экспедиционные исследования проводятся крайне редко. В качестве примера можно указать области с координатами центров 100° з.д., 22° ю.ш. или 10° з.д. 25° ю.ш. в зимний период для Северного полушария.

В третьей главе изучались свойства угловозависимой компоненты, а также приведены некоторые результаты восстановления коэффициента яркости воды с помощью выражения (3).

В 3.1 подход, развитый в разделе 2.1 к исследованию свойств изменчивости аэрозольной компоненты рассеяния света, обобщается на случай переменного зенитного угла Солнца. Объектом исследования при этом служит изменчивость угловой зависимости компоненты рассеяния света, а изменчивость, связанная с аэрозольными эффек-

тами, устраняется на основе использования определенных в главе 2 коэффициентов a_{ij} . Изменчивость коэффициента яркости воды устраняется как и в 2.1, путем рассмотрения локальных отклонений в пределах небольших ($200 \times 200 \text{ км}^2$) участков акватории открытого океана. Важным условием реализации этого подхода в данном случае является наличие измерений, полученных при существенно меняющемся зенитном угле Солнца. Последнее условие достигалось за счет использования измерений с разных витков, но разделенных по времени не более, чем на один месяц. Выбор интервала времени в один месяц связан с тем, что необходимо получить измерения над одной и той же локальной площадкой при разных зенитных углах Солнца, с одной стороны, но с другой стороны, необходимо избежать ошибок, связанных с временной (сезонной) изменчивостью коэффициента яркости воды. Таким образом, анализируя соответствующие локальные отклонения вида $\Delta(R_i + a_{ij}R_j)$ и $\Delta f(\theta_0)$ в различных условиях, может быть поставлен вопрос: насколько удовлетворительно имеющиеся модели Рэлеевского рассеяния описывают изменчивость угловозависимой компоненты регистрируемой на ИСЗ яркости и какова будет оценка точности восстановления коэффициента яркости воды с использованием этих моделей?

В 3.2 представлены результаты атмосферной коррекции измерений, относящихся к наиболее благоприятному интервалу зенитных углов Солнца ($40-60^\circ$), в котором существенно ослаблено влияние блика и эффектов многократного рассеяния. Используя точное решение для Рэлеевской атмосферы [Gordon et al., 1988] при задании функции $f(\theta_0)$ в формуле (3) и измерения для пары каналов 449 и 675 нм и учитывая спектральный ход аэрозольной компоненты с помощью a_{27} (раздел 2.2), построена глобальная карта коэффициента яркости моря на длине волны 449 нм (ρ_{w2}). Минимальное полученное значение ρ_{w2} равно нулю. Максимальное полученное значение ρ_{w2} составляет 0,06, что неплохо согласуется с оценкой полного размаха изменчивости ρ_{w2} в открытом океане, полученной в разделе 2.3. В целом восстановленная географическая картина распределения величины ρ_{w2} хорошо соответствует сложившимся представлениям об оптических и биологических свойствах верхнего слоя вод открытого

океана [Войтов, 1981; Ерлов, 1980; Кобленц-Мишке и др., 1968; Козлянинов, 1960; Козлянинов, Овчинников, 1961; Неуймин и др., 1982; Халемский, Войтов, 1972; Шифрин, 1983]: высокие значения ρ_{w_2} наблюдаются в центральных частях тропических и субтропических районов, несколько более низкие значения ρ_{w_2} получены в приэкваториальных зонах, а наиболее низкие - в приполярных широтах. Перечисленные три причины дают основание предполагать, что использованный алгоритм обработки (3) не только правильно учитывает изменчивость основных факторов, но и обеспечивает получение адекватных абсолютных уровней ρ_{w_2} без какой-либо дополнительной привязки и калибровки.

При применении методик анализа данных, описанных в разделе 3.1, оценка точности $\tilde{\sigma}_{27}$ для использованного здесь массива дает значение $4,05 \cdot 10^{-3}$. Эта величина служит мерой точности алгоритма атмосферной коррекции, основанного на формуле (3); если разделить ее на величину пропускания $T_2 \approx 0,78$, с учетом интервала зенитных углов Солнца, то полученная величина составит $(\tilde{\sigma}_{27})_{\omega} \approx 5,2 \cdot 10^{-3}$. Это достаточно малое значение, если учитывать диапазон изменчивости ρ_{w_2} в открытом океане (см. раздел 2.3). Заметим, что при использовании формулы, в которой $f(\theta_0) = \cos\theta_0 + 1/\cos\theta_0$ или учитывается точное решение для чисто Рэлеевской атмосферы [Gordon et al., 1988], значения $\tilde{\sigma}_{27}$ отличаются друг от друга не более, чем на 15%. Таким образом, учет эффектов изменений угла θ_0 различными методами применительно к данному массиву измерений приводит практически к одинаковым результатам.

В 3.3 представлены результаты применения описанной в разделе 3.1 методики анализа измерений для различных вариантов компоновки массивов. Основная цель здесь состоит в том, чтобы продемонстрировать репрезентативность и устойчивость получаемых результатов. Поскольку, как это уже было отмечено выше, при расчетах с параметризацией углового хода через функцию $f(\theta_0) = \cos\theta_0 + 1/\cos\theta_0$ или через описанную в [Gordon et al., 1988] более точную модель Рэлеевской компоненты рассеяния света в атмосфере получаются практически одинаковые оценки $\tilde{\sigma}_{ij}$, в данном разделе реализован более простой подход с использованием $f(\theta_0)$. Проверка

устойчивости определения коэффициентов β_{ij} для разных вариантов компоновки массива показала, что решение становится неустойчивым, если выборка формируется в интервале малых зенитных углов Солнца. Это обусловлено тем, что изменчивость $f(\theta)$ в этих условиях сравнима с уровнем различных "шумов", и используемая методика нахождения решения становится неэффективной. При увеличении интервала θ_0 значения β_{ij} приближаются к физически правильному теоретическому решению, что дает основание говорить об удовлетворительном описании углозависимой компоненты Рэлеевским членом.

В 3.4 продемонстрирована сезонная изменчивость коэффициента яркости океана. Построены сезонные карты коэффициента яркости моря ρ_{w_2} для Атлантического океана. Для получения наиболее надежных результатов использовались измерения в диапазоне зенитных углов Солнца $40-60^\circ$.

Наиболее существенной особенностью полученных сезонных карт является сильная изменчивость ρ_{w_2} в центральной части Южной Атлантики. Этот район относится к числу слабо изученных традиционными экспедиционными методами, поэтому был использован специальный способ обработки полученных измерений, чтобы получить дополнительные надежные доказательства этого явления. Этот способ заключается в том, что для локального района в Южной Атлантике при существенно более узком диапазоне углов $\theta_0 = 47-50^\circ$ была прослежена сезонная изменчивость R_2 при фиксированных равных значениях R_0 в разные сезоны, которая в этом случае могла быть однозначно объяснена изменчивостью ρ_{w_2} . Оценка $\Delta\rho_{w_2}$ дала значение 0,029, которое значительно превышает возможную ошибку, связанную с вариацией спектрального хода аэрозоля и конечной шириной θ_0 . Это служит убедительным подтверждением выявленной сезонной изменчивости ρ_{w_2} .

В заключении сформулированы основные результаты диссертации, которые сводятся к следующему.

1. Разработана методика обработки данных для исследования спектральной зависимости изменчивости аэрозольной и углозависимой компонент коэффициента яркости на верхней границе атмосферы в открытом океане, позволяющая оценивать потенциальную точность

восстановления коэффициента яркости толщи воды без привлечения контрольных данных.

2. С помощью этой методики на большом статистическом материале измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" показано, что изменчивость аэрозольной компоненты является приблизительно однофакторной и имеет близкую к нейтральной спектральную зависимость в интервале длин волн 449 - 575 нм; устойчивость этих свойств проверена для диапазона зенитных углов Солнца от 15° до 70° и для различных регионов и сезонов.

3. Сопоставлены два способа учета угловой зависимости Рэле-евской составляющей рассеяния света в атмосфере - через точное решение с учетом эффектов многократного рассеяния и с помощью аппроксимации функцией $f(\theta_0) = \cos\theta_0 + 1/\cos\theta_0$; точность алгоритма атмосферной коррекции при этом почти не отличается.

4. По результатам обработки дистанционных измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" получены оценки точности восстановления спектральной яркости воды открытого океана для различных участков спектра с учетом изменений зенитного угла Солнца в различных интервалах; характерный уровень среднеквадратичных ошибок составляет для длины волны 449 нм около 0,006, что обеспечивает уверенное различение нескольких градаций коэффициента яркости воды в открытом океане.

5. Для регионов открытого океана проведен анализ изменчивости спектрального коэффициента яркости воды, восстановленного по дистанционным данным при фиксированном зенитном угле Солнца с учетом полученного спектрального хода аэрозольной компоненты коэффициента яркости; в результате анализа большого массива данных измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" получено подтверждение гипотезы о том, что изменчивость спектрального коэффициента яркости воды является однофакторной и в основном сосредоточена в области длин волн 400-500 нм; получены оценки максимальной изменчивости коэффициента яркости воды в открытом океане для длин волн 415, 449, 483, 535 и 570 нм; выявлены районы, в которых коэффициент яркости моря для длин волн 415 и 449 нм достигает 0,06.

6. Построена глобальная карта распределения коэффициента яркости океана в спектральном канале 449 нм, восстановленная по

спутниковым данным.

7. На примере акватории Атлантического океана продемонстрирована сезонная изменчивость коэффициента яркости воды в спектральном канале 449 нм, восстановленная по измерениям с ИСЗ "Интеркосмос-21".

Основные научные результаты, включенные в диссертацию опубликованы в следующих работах (в скобках указаны соавторы):

1. Линейный алгоритм обработки результатов дистанционных измерений цвета океана // В кн.: Методы обработки космической океанологической информации. Севастополь: МГИ АН УССР, 1983, с. 39-46. (Суетин В. С., Шутиков С. П., Игнатов А. М.)
2. Предварительные результаты проверки алгоритма атмосферной коррекции при дистанционных измерениях цвета океана с ИСЗ "Интеркосмос-21" // Тез. докл., IX Пленум рабочей группы по оптике океана комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана, 1984, Л.: с. 250-251. (Суетин В. С., Игнатов А. М.)
3. Определение цвета вод открытого океана с помощью линейного алгоритма по дистанционным измерениям с ИСЗ // Морской гидр. физ. журнал., 1985, № 5, с. 40-47. (Суетин В. С.)
4. Первичная обработка данных и анализ качества функционирования прибора МКО (блок ВС) на ИСЗ "Интеркосмос-21" // В сб. ст.: Материалы совещания специалистов социалистических стран по обсуждению результатов экспериментов "Черное море-Интеркосмос - 83,84" (Ялта, 4-10 фев. 1985 г.), 1986, Деп. ВИНТИ 26.12.86., № 8915-В86, с. 31-37. (Суетин В. С., Сячинов В. И., Маслов В. Д., Кровотынцев В. А.)
5. Глобальный анализ оптических типов вод открытого океана с ИСЗ "Интеркосмос-21" // В сб.: Дистанционное зондирование с учетом атмосферы. Под ред. Урденко В. А. и Циммерманна Г. Том 2. Часть 2, Москва-Берлин-Севастополь, вып. изд. ИКИ АН ГДР, 1987, с. 152-166. (Суетин В. С.)
6. Определение глобального поля цвета вод океанов по дистанционным измерениям со спутника "Интеркосмос-21" // Препринт, 39 Конгресс МАФ, 1987, Англия, Брайтон, 5 с. (Коротаев Г. К., Суетин В. С.)

7. Автоматизированная обработка данных наблюдений цветовых характеристик морской воды // В сб. гт.: Автоматизированные системы сбора и переработки гидрофизической информации. Деп. ВИНТИ N 6894-В87, 25.09.87, с. 85-96. (Суетин В. С., Изюмин И. Н.)
8. Восстановление крупномасштабного поля цвета вод открытого океана по дистанционным измерениям со спутника "Интеркосмос-21" // Тез. докл. III съезд советских океанологов: серия "Физика и химия океана", Л.: Гидрометеиздат, 1987, с. 234. (Суетин В. С., Шутиков С. П.)
9. Определение глобального поля цвета вод океанов по дистанционным измерениям с ИСЗ // Тез. докл., X Пленум рабочей группы по оптике океана комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. 1988, Л.: с. 72-73. (Суетин В. С.)
10. Определение оптических типов вод океана на основе линейного алгоритма обработки результатов дистанционного зондирования // В кн.: Географическая интерпретация аэрокосмической информации. М.: 1988, с. 113-118. (Суетин В. С., Шутиков С. П., Игнатов А. М., Радайкина Л. Н.)
11. Модельный анализ точности восстановления параметра оптических типов вод открытого океана по дистанционным спектрметрическим измерениям // В сб.: Исследование океана дистанционными методами: Труды 6 Всесоюзного совещания-семинара по спутниковой гидрофизике. Севастополь, 3-8 апреля 1989. МГИ АН УССР. Деп. ВИНТИ N 6176 - В89 9.10.89, с. 121-156. (Суетин В. С.)
12. Зависимость от времени параметров измерительного тракта спектрометра МКС в эксперименте на ИСЗ "Интеркосмос-21" // В сб.: Исследование океана дистанционными методами: Труды 6 Всесоюзного совещания-семинара по спутниковой гидрофизике. Севастополь, 3-8 апреля 1989. МГИ АН УССР. Деп. ВИНТИ N 6176-В89 9.10.89, с. 41-53. (Суетин В. С.)
13. Повышение точности дистанционных измерений яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы с учетом данных о ее изменчивости над океаном // В сб.: Исследование океана дистанционными методами: Труды 6 Всесоюзного совещания-семинара по спутниковой гидрофизике. Севастополь, 3-8 апреля

1989. МГИ АН УССР. Деп. ВИНТИ N 6176-B89 9.10.89, с. 2-17.
(Суетин В. С.)

14. Аэрозольная компонента рассеяния при дистанционных измерениях яркости системы "океан-атмосфера" в видимом диапазоне // Тез. докл., XI Пленум рабочей группы по оптике океана комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. 1990, Красноярск, с. 110-111. (Суетин В. С.)
15. Сезонная изменчивость оптических типов вод открытого океана по данным измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" или "фиолетовое дыхание" океана // Тез. докл., XI Пленум рабочей группы по оптике океана комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана. 1990, Красноярск, с. 41. (Суетин В. С.)
16. Эмпирический анализ влияния аэрозоля на изменчивость спектральной яркости системы "океан-атмосфера" // Морской гидрофиз. журнал, 1991, N 3, с. 51-58. (Суетин В. С.)
17. Иллюстрация изменчивости спектрального коэффициента яркости открытого океана по данным измерений с ИСЗ "Интеркосмос-21" // Исслед. Земли из космоса, 1992, N 3. (Суетин В. С.)

Еячеслав Владимирович Суслин

УЧЕТ АТМОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
СПЕКТРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ ОТКРЫТОГО
ОКЕАНА ПО ДИСТАНЦИОННЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ИЗ КОСМОСА

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать	4.09.92 г.
Формат бумаги 60x90	Объем 1 уч. изд. л.
Заказ	Тираж 100 экз.

Отпечатано на ротапринтере фирмы "Экоси"
335005, Севастополь-5, ул. Ленина, 28.

467 364

AB 25.670

12

12