

Работа выполнена в Институте физики Академии наук Беларуси (Минск, Беларусь) и в Институте физики окружающей среды Бременского Университета (Бремен, Германия)

На правах рукописи

Александр Анатольевич Кохановский

ТЕОРИЯ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАКАХ И СНЕЖНОМ  
ПОКРОВЕ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА  
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Диссертация

в виде научного доклада

на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности 25.00.29 “физика атмосферы и гидросферы”

Санкт- Петербург – 2010 год

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Поздняков Дмитрий Викторович

доктор физико-математических наук, профессор

Покровский Олег Михайлович

доктор физико-математических наук, профессор

Фараонов Виктор Григорьевич

Ведущая организация: Российский Государственный Гидрометеорологический  
Университет (С-Петербург)

Защита состоится «    » мая 2010 года в 14 часов на заседании совета Д 327.005.01 по  
защитам докторских и кандидатских диссертаций при государственном учреждении  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: 194021, Санкт-  
Петербург, ул. Карбышева, дом 7.

С диссертацией в виде научного доклада можно ознакомиться в библиотеке  
Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

Диссертация в виде научного доклада разослана

«    » ..... 2010 г.

Ученый секретарь совета,

по защитах докторских и кандидатских диссертаций,

доктор географических наук

А.В. Мещерская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Облака, а также ледовый и снежный покровы относятся к классу сильноотражающих поверхностей. Отражательная способность чистого снега в видимом диапазоне может достигать 90%. Спектральный коэффициент яркости (СКЯ) облаков сильно варьирует в зависимости от их толщи, но обычно он превосходит 30%. Эти особенности исследуемых объектов наряду с их протяженностью (например, облачность покрывает в среднем около 70% земной поверхности в каждый данный момент времени) обуславливают важность и актуальность их исследования в ряде научных дисциплин. В первую очередь это относится к задачам метеорологии, климатологии и космического мониторинга земной поверхности и атмосферы.

Актуальность мониторинга снежного и ледового покрова обусловлена еще и тем, что, как показывают измерения, площадь земной поверхности покрытой снегом и льдом с каждым годом уменьшается. Это связано с процессами глобального изменения климата. В частности, было установлено, что 2003, 2005, 2006, 2007 и 2009 годы были наиболее теплыми за последние 100 лет. Некоторые климатические сценарии предсказывают возможность полного таяния льдов в районе северного полюса, что может привести к катастрофическим последствиям для будущих поколений. В первую очередь это связано с резким уменьшением отражательной способности Земли как объекта из-за потери значительной доли снежного и ледового покровов. Однако, не только площадь занимаемая снежным покровом определяет его отражательную способность. Большую роль играют размеры снежных зерен, содержание жидкой воды, а также различные примеси (например, сажа). Альbedo снега также значительно понижено в городах и на прилегающих территориях, что связано в первую очередь с промышленными загрязнениями и продуктами выбросов выхлопных газов. В 2007 году впервые за всю историю человечества население городов превысило сельское население. Эта тенденция будет продолжаться и в будущем, увеличивая техническую нагрузку на среду обитания человека в целом и на снежный покров, в частности. Это обстоятельство еще раз подчеркивает важность и актуальность мониторинга снежного покрова (степень покрытия, альbedo, наличие примесей, микроструктура снега). Важны долговременные как наземные, так и самолетные и, в особенности, спутниковые измерения основных параметров снежного покрова. Это же относится и к глобальному полю облачности. В настоящее время не зарегистрировано существенных глобальных

трендов основных параметров облачности в отличие, например, от существенных трендов параметров снежного покрова. Однако отсюда нельзя заключить, что глобальное поле облачности совершенно не подвержено влиянию климатических изменений. В частности, увеличение температуры земной поверхности приводит к увеличению интенсивности процессов испарения и облакообразования. Немаловажную роль играют процессы загрязнения атмосферы поглощающим аэрозолем и различными газами. Это приводит как к уменьшению альbedo облаков за счет уменьшения альbedo однократного рассеяния, так и к увеличению средних высот облаков, связанных с изменением температуры пограничного слоя и процессов атмосферной конвекции.

Изменения балла облачности, вероятности дождя, микроструктуры облаков и их альbedo, связанные с техногенной нагрузкой, слабо изучены. Это обусловлено сложностью идентификации соответствующих процессов с использованием как наземных, так и космических систем наблюдения.

Уменьшение степени покрытия поверхности снегом может быть легко оценено по снимкам высокого разрешения, например, в видимом диапазоне. Это связано с тем, что снег аккумулируется на земной поверхности и, таким образом, гораздо менее подвержен процессам переноса, что является полной противоположностью облачности, которая может характеризоваться не только как явление, но и как процесс. Изменения альbedo облаков за счет аэрозольного загрязнения зачастую ошибочно трактуются как просто связанные с уменьшением их толщи.

Из приведенного выше следует, что необходимы новые подходы и комплексные программы исследования полей облачности и снежного покрова и их модификаций под воздействием различных факторов, в том числе антропогенного характера.

#### Цель и задачи исследования

Эти обстоятельства и сформировали цель настоящей работы – разработать методическое и программно-алгоритмическое обеспечение мониторинга состояния облачного и снежного покровов с использованием спутниковых систем наблюдения. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- Разработаны теоретические модели и исследованы процессы переноса света в облаках и снеге.
- Поставлены и решены ряд новых обратных задач оптики облаков и снежного покрова.
- Разработаны соответствующие алгоритмы обращения.

- Созданы программные комплексы, способные обрабатывать поступающую спутниковую информацию в реальном масштабе времени.
- Разработанные алгоритмы и программы использованы для исследования глобальных полей облачности с использованием измерений спектрометра SCIAMACHY на борту спутника ENVISAT (2002-2009).

#### Методы исследования

Методы работы основаны на решении уравнения переноса излучения. Проводится сопоставление приближенных решений уравнения переноса излучения с точными решениями, а также сравнение результатов математического моделирования с результатами других авторов и натурными экспериментами.

#### Научная новизна

работы состоит в следующем:

- Получены приближенные аналитические формулы для оценки локальных оптических и радиационных характеристик облаков. Проведена оценка их точности.
- Исследованы оптические свойства облачности и их влияние на интенсивность и поляризацию отраженного солнечного излучения (в том числе, в 3-D геометрии).
- Разработана феноменологическая теория оптических свойств снега.
- Предложены новые алгоритмы для определения:
  - геометрической толщи облака;
  - термодинамического состояния облака;
  - сферического альбедо облаков и снега;
  - дискриминации облачности и дождя по измерениям в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра.
- Исследовано глобальное поле облачности по данным SCIAMACHY.

#### Теоретическая и практическая ценность

результатов диссертации заключается: 1) в разработке эффективных приближенных методов решения уравнения переноса совместно с уравнениями, отвечающими за другие физические процессы в полной системе; 2) в подробном исследовании

радиационных характеристик облаков и снега на основании предложенных моделей; 3) в предложении новых методов решения задач дистанционного зондирования.

#### Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана приближенная модель переноса солнечного излучения, обеспечивающая корректный расчет радиационных характеристик в снеге и облаках. Достоверность результатов моделирования подтверждена сопоставлением с расчетами в рамках точной модели SCIATRAN, а также результатами тестирования с использованием экспериментальных данных. Предложенная теория в сочетании с полученными геометрооптическими решениями для локальных оптических характеристик обеспечивает эффективное вычисление коэффициентов яркости с относительной погрешностью не превышающей 5% в областях изменения параметров, существенных для решения обратной задачи.
2. Разработанная схема решения обратной задачи, основанная на использовании приближенных решений теории переноса, теории Ми и геометрической оптики (для ледяных кристаллов), позволила повысить точность (надежность) восстановления параметров снега и облаков. Проведена валидация методики с использованием спутниковых данных MODIS, MERIS, AATSR для снежных поверхностей и протяженной облачности. При этом использовались данные наземных измерений размера снежных зерен в момент пролета спутника.
3. Действующая система глобального мониторинга облачного покрова по данным SCIAMACHY ([www.iup.physik.uni-bremen.de/~sacura](http://www.iup.physik.uni-bremen.de/~sacura)) обеспечивает мониторинг параметров облаков в непрерывном режиме. Система включает такие параметры как высота облаков, их геометрическая и оптическая толщина, размеры капель, водозапас, степень покрытия и фазовое состояние.
4. Анализ глобального поля облачности Земли по данным SCIAMACHY позволил получить широтные распределения искомым параметров облаков, а также исследовать временные тренды.

#### Основные публикации

Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в 4 монографиях, 6 сборниках (5 – под редакцией автора) и 136 статьях, из них 125 в рецензируемых изданиях, из них 53 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

### Достоверность результатов

диссертационной работы определяется их верификацией при разнообразном тестировании, включающем сравнение с точными решениями, сравнением с результатами экспериментов и расчетами по другим моделям, четким физическим смыслом полученных результатов и согласованностью с современными представлениями о предмете исследования.

### Апробация результатов диссертации

Результаты исследований, приведенных в диссертационной работе, были представлены и обсуждались на Всероссийских и Международных конференциях: Международном симпозиуме „Атмосферная радиация“ (СПб, 2002, 2009), Генеральных Ассамблеях Европейского геофизического общества (Ницца, 2002, 2003, Вена, 2004-2009), осеннем совещании Американского Геофизического Общества (Сан-Франциско, 2007), в климатическом центре Токийского Университета (Токио, 2006), NASA (Гринбелт, 2007), NOAA (Гринбелт, 2007).

### Реализация и внедрение результатов работы

Научные положения диссертации и разработанные на их основе методики, алгоритмы и программные комплексы использовались для совместных исследований в следующих организациях: Европейское Космическое Агенство, Космическое Агенство ФРГ.

### Личный вклад соискателя

В список положений, выносимых на защиту, включены результаты и выводы, в которых вклад соискателя был основным.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 146 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведено обоснование актуальности работы, сформулированы цель и задачи работы, изложено ее краткое содержание, сформулированы защищаемые

положения, обоснована достоверность результатов, описан личный вклад соискателя, приведены сведения о научной новизне и практической значимости работы, а также ее апробации.

**В первой главе** диссертации излагаются основы точной теории переноса света в сильнорассеивающих объектах, а также различные приближенные решения уравнения переноса излучения (УПИ) с указанием границ применимости и исследованием погрешностей. В частности, рассмотрены следующие вопросы:

- влияние края облака на процессы переноса излучения в чистой атмосфере;
- усиление отражательной способности облака при его освещении со стороны чистого неба (см. Рис.1);
- асимптотические решения УПИ (с учетом поляризации) для оптически толстых светорассеивающих слоев;
- перенос света в линиях газового поглощения;
- теория переноса света в горизонтально-неоднородном облачном слое;
- оптические свойства вертикально-неоднородных сред.

В этой же главе приводятся известные, а также полученные автором высокоточные приближения для оптических параметров элементарного объема рассеивающих сред. Эти уравнения делают возможным вывод простых аналитических соотношений, связывающих параметры микроструктуры облаков (например, распределение капель по размерам) с радиационными характеристиками облачности (например, их альbedo и спектральные коэффициенты яркости). Полученные результаты важны для выяснения зависимости коэффициентов отражения и пропускания облаков от их микроструктуры. Они также используются при решении обратной задачи (см. главы 3 и 4). Ошибка полученных уравнений в большинстве случаев не превышает 5% (см. Рис. 2, 3). При этом полученные приближенные решения для СКЯ (см. Рис. 2, 3) могут быть представлены в виде

$$R(\mu, \mu_0, \varphi, \tau) = R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi) \exp\left[-y(1 - ty)u_0(\mu_0)u_0(\mu)R_{0\infty}^{-1}(\mu, \mu_0, \varphi)\right] - (1) \\ (t - \Delta) \exp(-x - y)u_0(\mu_0)u_0(\mu),$$

где  $R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi)$  – коэффициент яркости полубесконечного непоглощающего облака,  $\mu_0$  – косинус угла падения,  $\mu$  – косинус угла наблюдения,  $\varphi$  – относительный азимут,

$\tau$  – оптическая толщина облака,  $\omega_0$  – альбедо однократного рассеяния,  $g$  – параметр асимметрии индикатрисы рассеяния  $p(\theta)$ ,  $\theta$  – угол рассеяния,

$$u_0(\mu) = \frac{3}{7}(1 + 2\mu), \quad (2)$$

$$t = \frac{\sinh(y)}{\sinh(x + \alpha y)}, \quad x = \gamma\tau, \quad y = 4q\gamma, \quad \gamma = \sqrt{3\beta(1-g)}, \quad \beta = 1 - \omega_0, \quad q = \frac{1}{3(1-g)}, \quad (3)$$

$$\Delta = (a + b\mu\mu_0 + c\mu^2\mu_0^2)\tau^{-3} \exp(x), \quad a = 4.86, \quad b = -13.08, \quad c = 12.76, \quad m = 0.05, \quad \alpha = 1.07.$$

Для функции  $R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi)$  было найдено аналитическое представление. Оно имеет особенно простой вид при наблюдении в надир

$$R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi) = \frac{A + B(\mu + \mu_0) + C\mu\mu_0 + F(\theta)}{\mu + \mu_0}, \quad (4)$$

где константы  $A = 3.944$ ,  $B = -2.5$ ,  $C = 10.664$  были получены с использованием численного решения уравнения переноса, а  $F(\theta) = p(\theta) - \bar{p}(\theta)$ ,  $\bar{p}(\theta)$  – азимутально усредненная индикатриса рассеяния.

Эти формулы были обобщены на случаи вертикально и горизонтально неоднородных облаков. В случае горизонтально неоднородных облаков предполагалось, что СКЯ может быть представлен в виде

$$\bar{R} = \int_0^{\infty} R(\tau) f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где  $f(\tau)$  – функция распределения оптических толщин в облаке. Было показано, что в случае толстых облаков в видимом диапазоне имеет место следующее соотношение

$$\bar{R}(\mu, \mu_0, \varphi) = R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi) - \bar{t}u_0(\mu_0)u_0(\mu), \quad (6)$$

где

$$\bar{t} = \frac{4}{3(1-g)(1-\rho_\tau^2)\bar{\tau}}, \quad (7)$$

$\rho_\tau$  – коэффициент вариации распределения  $f(\tau)$ ,  $\bar{\tau}$  – средняя толщина облака. В том же приближении следует, что

$$t(\bar{\tau}) = \frac{4}{3(1-g)\bar{\tau}}, \quad (8)$$

а это значит, что  $\bar{t} \geq t(\bar{\tau})$  и, соответственно,  $\bar{R} \leq R(\bar{\tau})$ . Мы видим, что горизонтально неоднородные облака отражают меньше света по сравнению с однородными облаками с  $\tau = \bar{\tau}$ . Разработанная автором теория позволяет не только связать коэффициенты яркости с параметрами функции  $f(\tau)$  в случае горизонтально неоднородных облаков, но и решить обратную задачу по определению  $f(\tau)$  из измеренных функций распределения  $F(R)$ . В частности, мы получаем в видимом диапазоне

$$f(\tau) = bt^2 F(R(\tau)) u_0(\mu_0) u_0(\mu), \quad (9)$$

где  $b = 0.75(1-g)$ ,  $t = (\alpha + b\tau)^{-1}$ . Аналогичные по простоте формулы были получены для ИК каналов, где существенны эффекты поглощения света каплями и кристаллами. Полученные формулы являются достаточно общими и могут использоваться в других задачах оптики мутных сред.

В атмосфере часто встречаются слоистые облачные системы. Автором предложен простой метод учета вклада произвольного числа слоев под верхним оптически толстым облаком с коэффициентом яркости  $R$ , а именно, было показано, что коэффициент яркости слоистой системы  $R_\Sigma$  может быть записан в виде

$$R_\Sigma = R + \frac{t_d(\mu_0)t_d(\mu)r^*}{1 - rr^*}. \quad (10)$$

Здесь  $t_d$  – коэффициент диффузного пропускания верхнего слоя при направленном освещении,  $r$  – сферическое альbedo верхнего облака,  $r^*$  – сферическое альbedo системы облаков нижнего яруса. Автором предложен алгоритм расчета  $r^*$  и исследованы погрешности приближения с использованием радиационного кода SCIATRAN. Результаты были обобщены также на случай пропускания света слоистой облачностью. В частности, было получено для системы из  $N$  слоев

$$T = t_{ef} u_0(\mu_0) u_0(\mu), \quad (11)$$

где

$$t_{ef} = \frac{\prod_{j=1}^N t_j}{\prod_{j=1}^N (1 - r_j r_{j+1})}, \quad (12)$$

$t_j$  – коэффициент диффузного пропускания  $j$ -слоя,  $r_j$  – сферическое альbedo  $j$ -слоя,  $r_{N+1}$  – альbedo подстилающей поверхности. Погрешности приближений в большинстве случаев не превышают 5% (если  $\tau \geq 5$ ,  $\omega_0 \geq 0.97$ ).

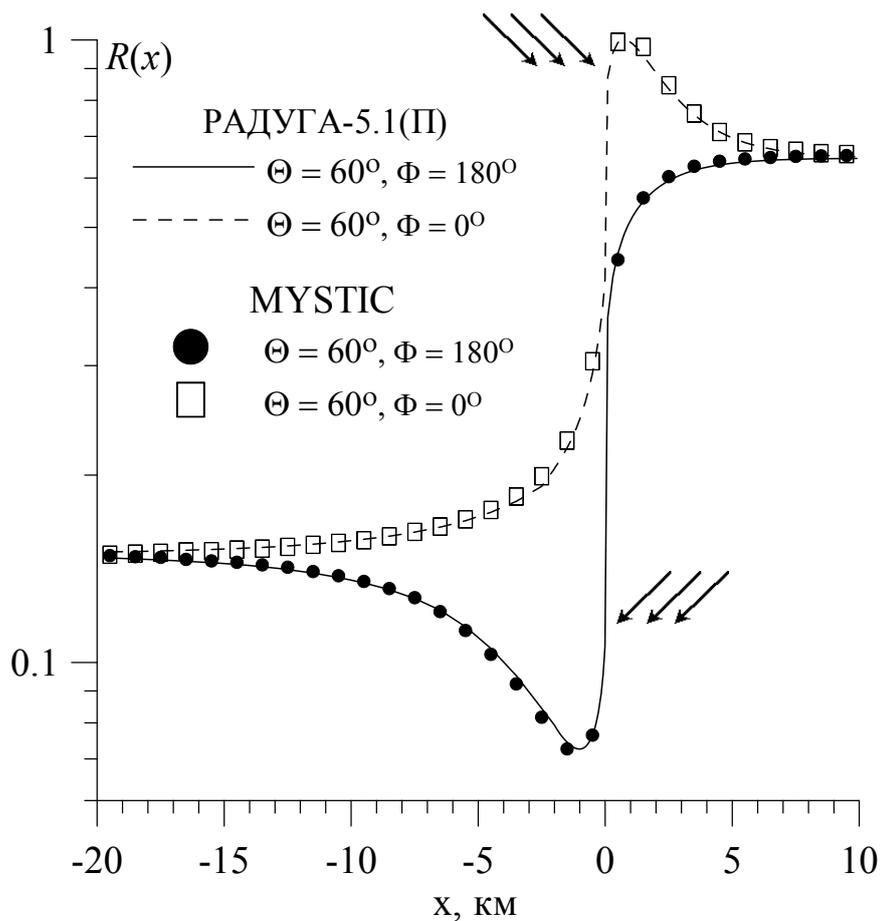


Рис. 1. Зависимость СКЯ (440 нм) в надир от расстояния от края облака ( $x=0$ ), рассчитанная с использованием MYSTIC и РАДУГА-5.1(II) кодов для различных значений солнечного зенитного  $\Theta$  и азимутального  $\Phi$  углов (наблюдение – в надир).

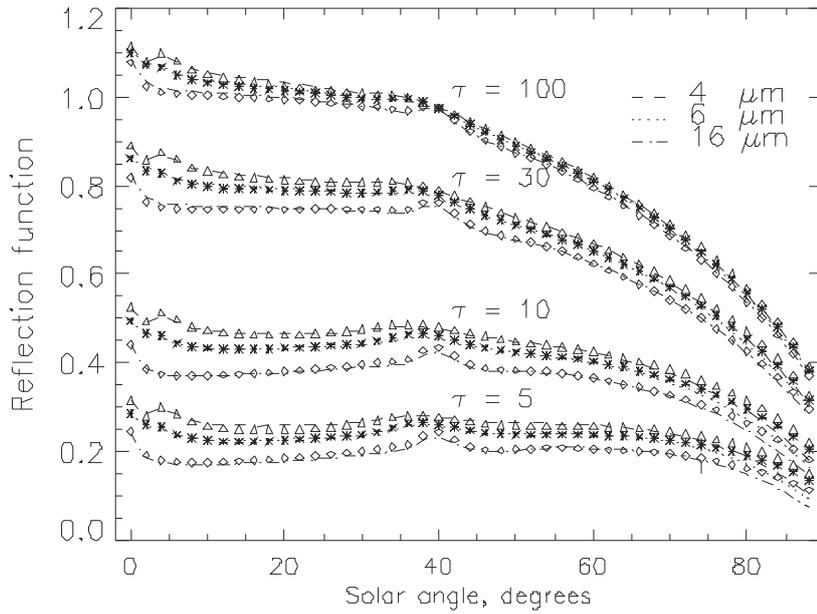


Рис. 2. Зависимость СКЯ (675 нм) от солнечного зенитного угла при различных значениях (символы – точный расчет, линии – приближение) оптической толщи  $\tau$  и эффективного радиуса капель (наблюдение в надир).

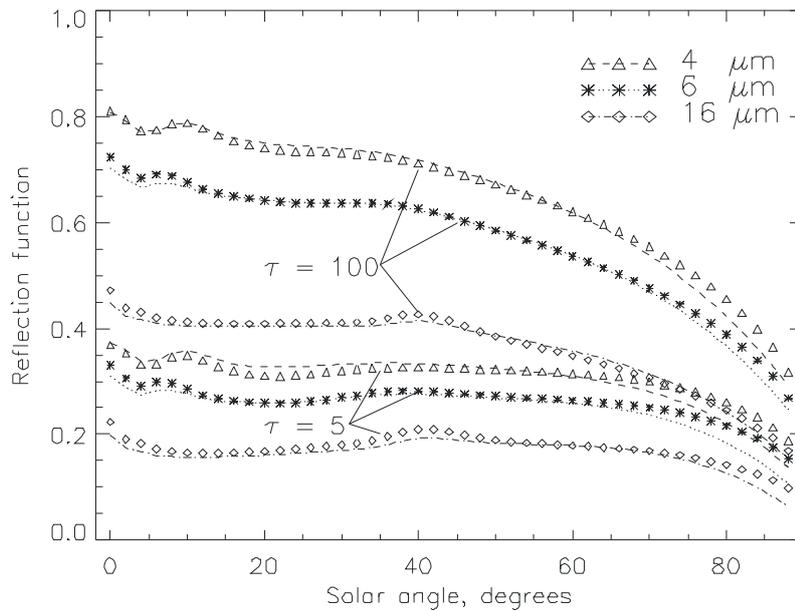


Рис. 3. То же, что на Рис. 2, но на длине волны  $\lambda = 1.55$  мкм.

**Во второй главе** диссертации рассматриваются обратные задачи оптики сильнорассеивающих сред, где существенен вклад актов многократного рассеяния. В частности, описан метод линеаризации с использованием присоединенного УПИ. Описан табличный метод, основанный на предварительном расчете таблиц спектральных коэффициентов яркости облаков, а также их производных по искомым параметрам. Полученные таблицы используются для ускорения решения обратной задачи теории переноса излучения. В заключительной части второй главы приводятся полученные автором соотношения, позволяющие свести задачу определения параметров облачности (размеры капель, полное содержание жидкой воды на единицу сечения облака, оптическая толщина) по измерениям СКЯ на двух длинах волн (например, 0.443 мкм и 1.6 мкм) к решению простого трансцендентного уравнения.

В частности, использовалось обобщение уравнения (1) на случай подстилающей поверхности с альбедо  $A \neq 0$ :

$$R(\mu, \mu_0, \varphi, \tau) = R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi) \exp[-y(1 - t\mu)u_0(\mu_0)u_0(\mu)R_{0\infty}^{-1}(\mu, \mu_0, \varphi)] - (13)$$

$$(t - \Delta) \exp(-x - y)u_0(\mu_0)u_0(\mu) + At^2u_0(\mu_0)u_0(\mu)(1 - rA)^{-1},$$

где  $r = \exp(-y) - t \exp(-x - y)$  – сферическое альбедо облака.

В видимом диапазоне облака практически не поглощают свет ( $\omega_0 = 1$ ), и основные уравнения сильно упрощаются

$$R(\mu, \mu_0, \varphi, \tau) = R_{0\infty}(\mu, \mu_0, \varphi) - t_0u_0(\mu_0)u_0(\mu) + At_0^2u_0(\mu_0)u_0(\mu)(1 - (1 - t_0)A)^{-1}, \quad (14)$$

где коэффициент пропускания  $t_0$  может быть записан в виде

$$t_0 = \frac{1}{1.07 + 0.75(1 - g)\tau}. \quad (15)$$

Величина  $\tau$  прямо пропорциональна водозапасу облака  $W$

$$\tau = \frac{3W}{2\rho a_{ef}} \left( 1 + \frac{B}{(ka_{ef})^{2/3}} \right). \quad (16)$$

Здесь  $a_{ef}$  – эффективный радиус капель, равный отношению третьего ко второму моменту функции распределения капель по размерам,  $\rho$  – плотность воды,  $B = 1.1$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны. Из уравнений (14)–(15) можно получить аналитическое выражение для  $W$  через измеренный СКЯ  $R(\mu, \mu_0, \varphi)$  и величину  $a_{ef}$ , которое после подстановки в (13) и даст искомое трансцендентное выражение для нахождения эффективного радиуса через измеренные значения СКЯ на двух длинах волн (в

видимой и ближней ИК области спектра). При этом используются высокоточные аналитические связи между величинами  $\omega_0$ ,  $g$  и эффективным радиусом капель, полученные автором на основе теории Ми и методов геометрической оптики. Алгоритм был также обобщен автором на случай кристаллических и смешанных облаков. При этом использовалась модель фрактальных ледяных частиц и расчеты методом Монте-Карло в рамках приближения лучевой оптики. Введенное понятие длины поглощения PAL (внутри частицы) позволило уменьшить влияние неизвестной формы кристаллов на результаты обращения. Уравнение (14) может использоваться для нахождения  $t_0$  и, следовательно, сферического альбедо (СА)  $r = 1 - t_0$ . Пример восстановленного сферического альбедо приведен на рис.4. Там же приведены данные полученные путем непосредственного измерения величины СА с использованием самолетного радиометра. Как видно, предложенный метод обладает высокой точностью.

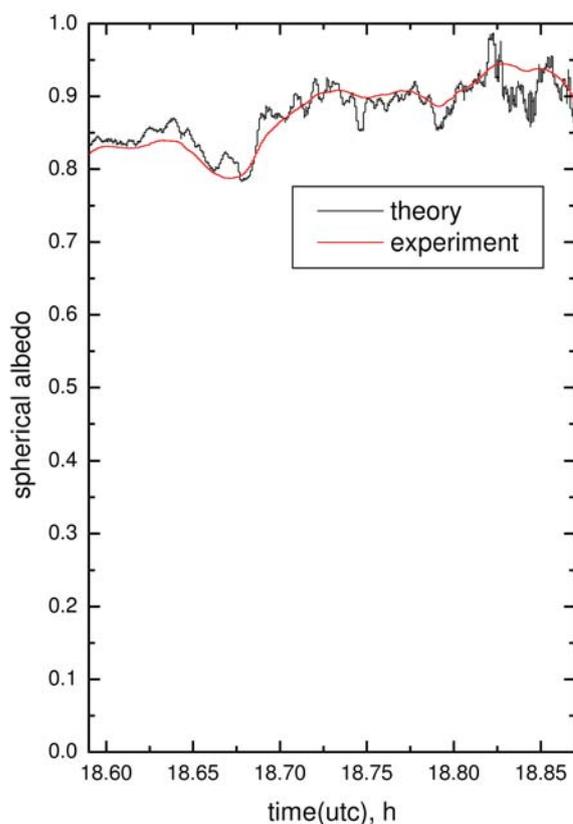


Рис.4. Восстановленное и измеренное альбедо облака при  $\lambda = 555$  нм.

Пример восстановленного распределения шкалированной оптической толщи

$ROT = (1-g)\tau$  приведен на Рис.5 на примере урагана Катрина(28.08.2005, Мексиканский залив). При этом использовались СКЯ измеренные MODIS. Здесь приводится не значение оптической толщины, а произведение  $(1-g)\tau$  поскольку именно оно определяет альbedo облачности и восстанавливается с наилучшей точностью в случае кристаллических облаков.

August 28th, 2005

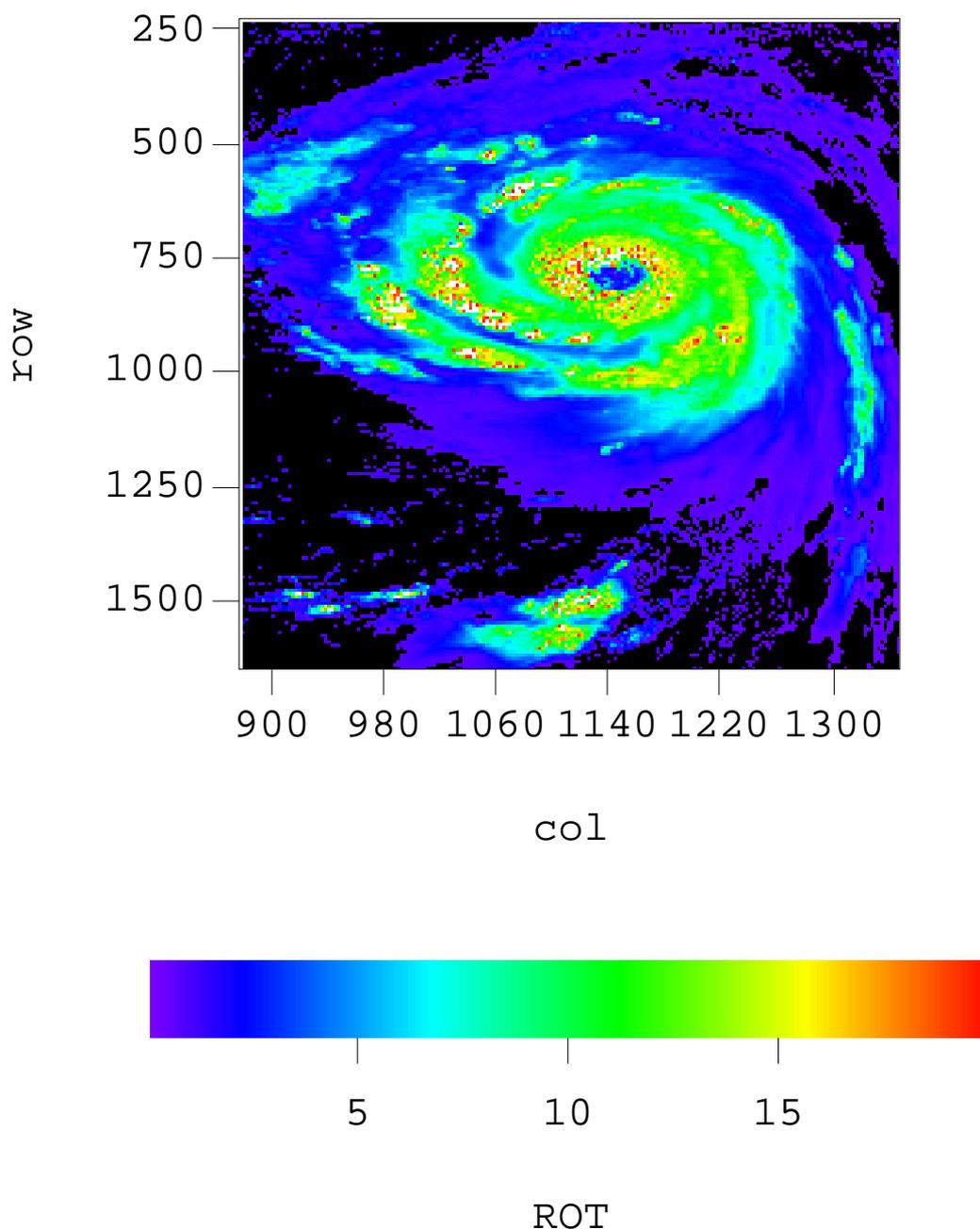


Рис.5. Пример восстановленного распределения шкалированной оптической толщии.

Важным вопросом является определение фазового состояния облака (лед, вода, смешанное состояние). В диссертации предлагаются два подхода для определения наличия льда в облаке:

- с использованием фазового индекса, который чувствителен к наличию льда в облаке в связи с различным спектральным ходом СКЯ вблизи полосы поглощения жидкой воды и льда, расположенной в спектральной области, близкой к 1.6 мкм,

- с использованием впервые введенной автором Р-Т диаграммы, где по оси ОУ откладывается значение фазового индекса, а по оси ОХ – яркостная температура облака  $T$  на длине волны 12 мкм (см. Рис. 6).

Положение верхней кромки облака определяется по измерениям СКЯ в диапазоне 758–777 нм, где расположена полоса поглощения молекулярного кислорода. Облака экранируют приземный кислород, приводя к увеличению СКЯ в полосе поглощения. СКЯ (761 нм) практически равен нулю при отсутствии облака и увеличивается с высотой верхней кромки облака (см. Рис. 7). Этот эффект используется в работе для анализа функции распределения высот глобального поля облачности.

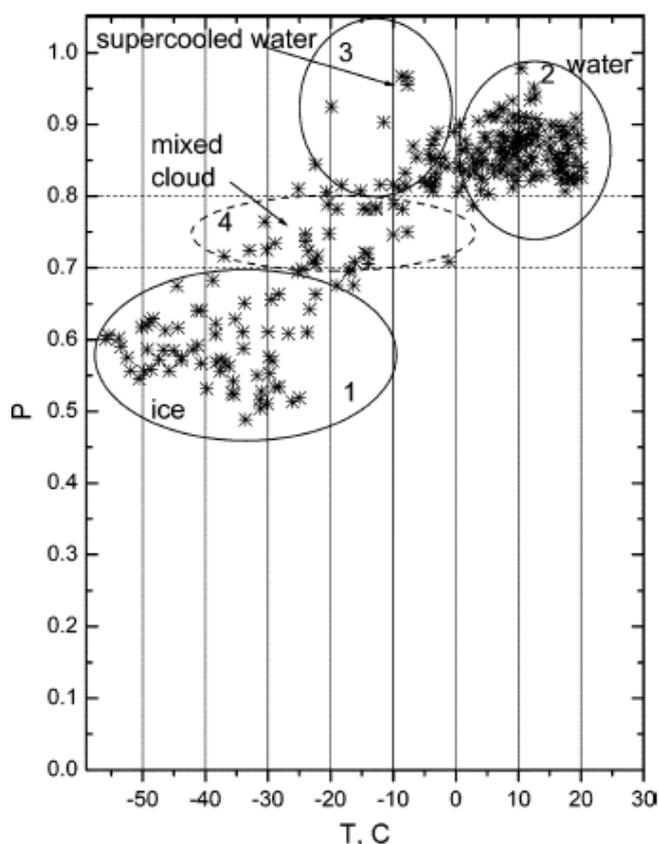


Рис. 6. Р-Т диаграмма.

Сплошной линией на рис. 7 представлены расчеты по точному радиационному коду (SCIATRAN), прерывистая линия дает результаты расчетов по предлагаемому приближенному решению задачи при  $\mu_0 = 0.5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\tau = 5$  и геометрической толщине облака  $H = 1$  км. Приближенное решение является обобщением уравнения (13) на расчеты в полосе поглощения кислорода и обеспечивает высокую скорость расчетов, что важно для задач спутниковой обработки информации в операционном режиме. Интересно, что СКЯ в полосе кислорода зависит от величины  $H$  (см. Рис.8), что использовалось автором для нахождения нижней границы облаков (совместно с наблюдениями вблизи полосы прозрачности 12 мкм). На Рис.9 исследуются ошибки восстановления при  $\tau = 10$ .

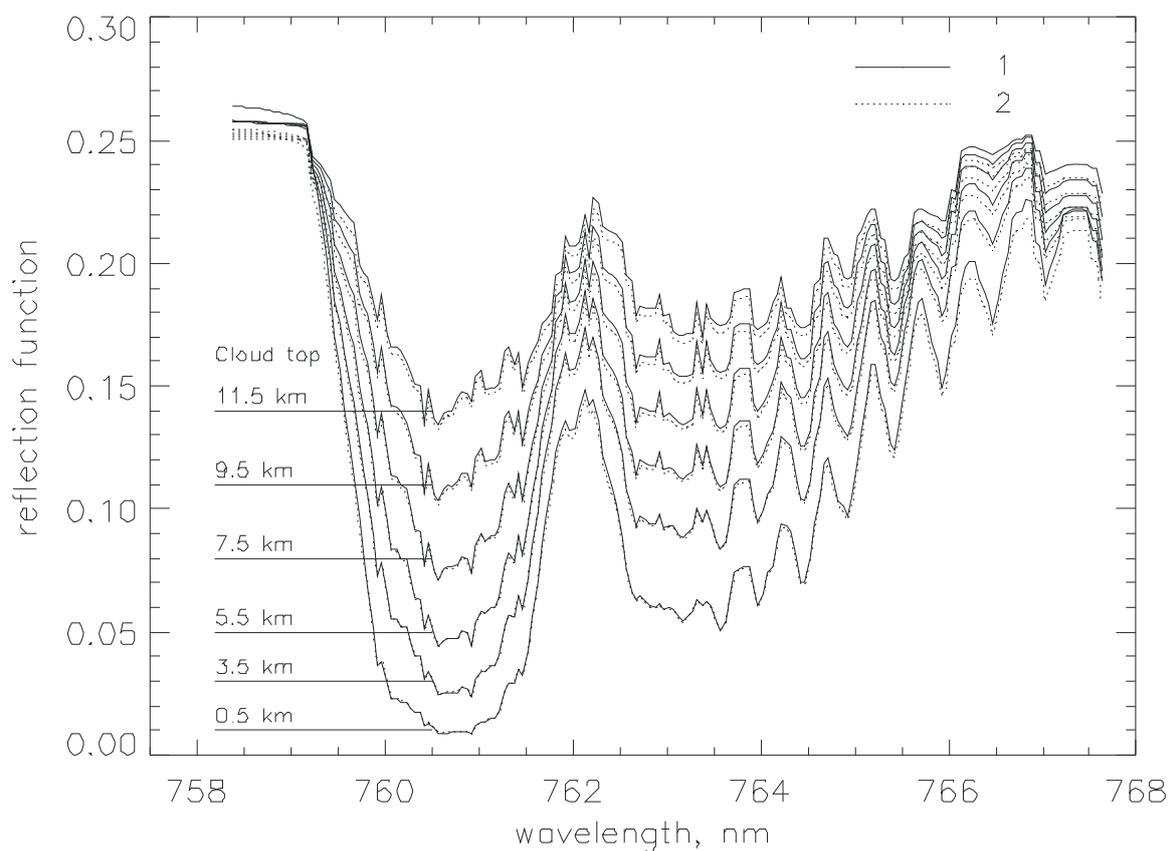


Рис. 7. Зависимость СКЯ от высоты облака (1 – точный расчет, 2 – приближенный).

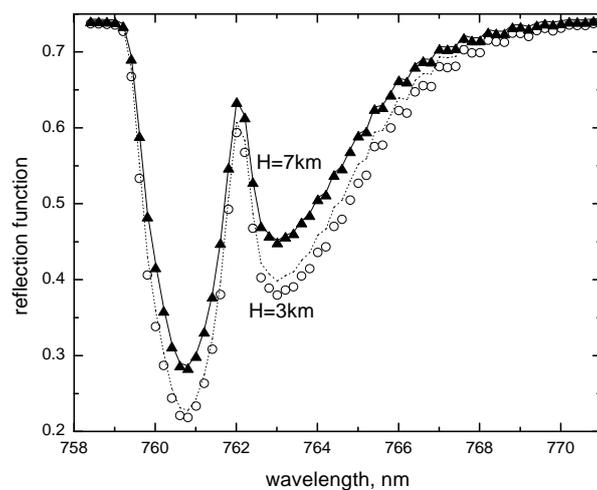


Рис.8. Зависимость СКЯ от геометрической толщины облака  $H$  при высоте верхней кромки облака равной 9 км,  $\mu_0 = 0.5$ ,  $\mu = 1$ ,  $\tau = 50$  (линии – SCIATRAN, символы – приближение).

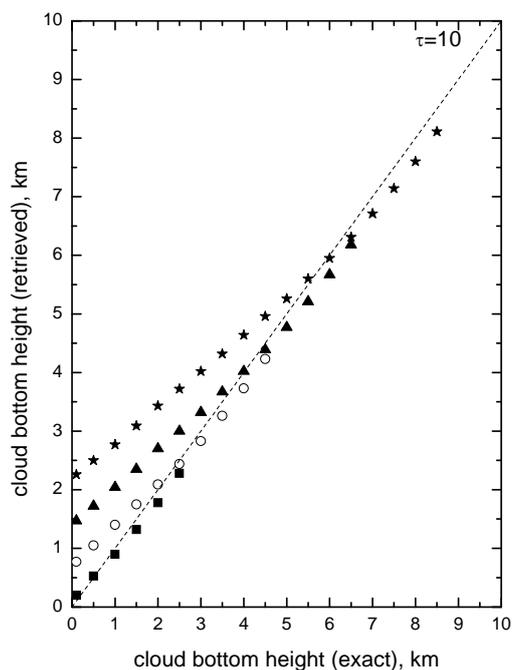


Рис. 9. Зависимость восстановленной нижней границы облака от точного значения границы при  $\tau = 10$ , и четырех значениях верхней границы облака: 9км (звездочки), 7км (треугольники), 5км (круги), 3км (квадраты). Предполагалось, что значения верхней границы известны (например, получены с использованием самолетного лидара).

Размер пикселя SCIAMACHY  $30 \times 60 \text{ км}^2$ . В связи с этим встает вопрос о точности измеренных высот облаков в случае разорванной облачности при условии, что в алгоритме обработки данных используется приближение независимых пикселей. В этом приближении имеем

$$R = cR_c + (1-c)R_s, \quad (17)$$

где  $c$  - степень покрытия пикселя облаком,  $R_c$  - СКЯ облака,  $R_s$  – СКЯ чистого неба.

Погрешности этого приближения были оценены с использованием прямых расчетов Монте-Карло в полосе поглощения кислорода 761нм в предположении абсолютно черной подстилающей поверхности. Результаты расчетов представлены на Рис. 10, а погрешности исследуются на Рис.11. Видно, что погрешности могут достигать 30% и они несколько убывают с увеличением зенитного угла солнца. Это приводит к ошибкам в определении положения верхней границы облака до 1км (см Рис.12).

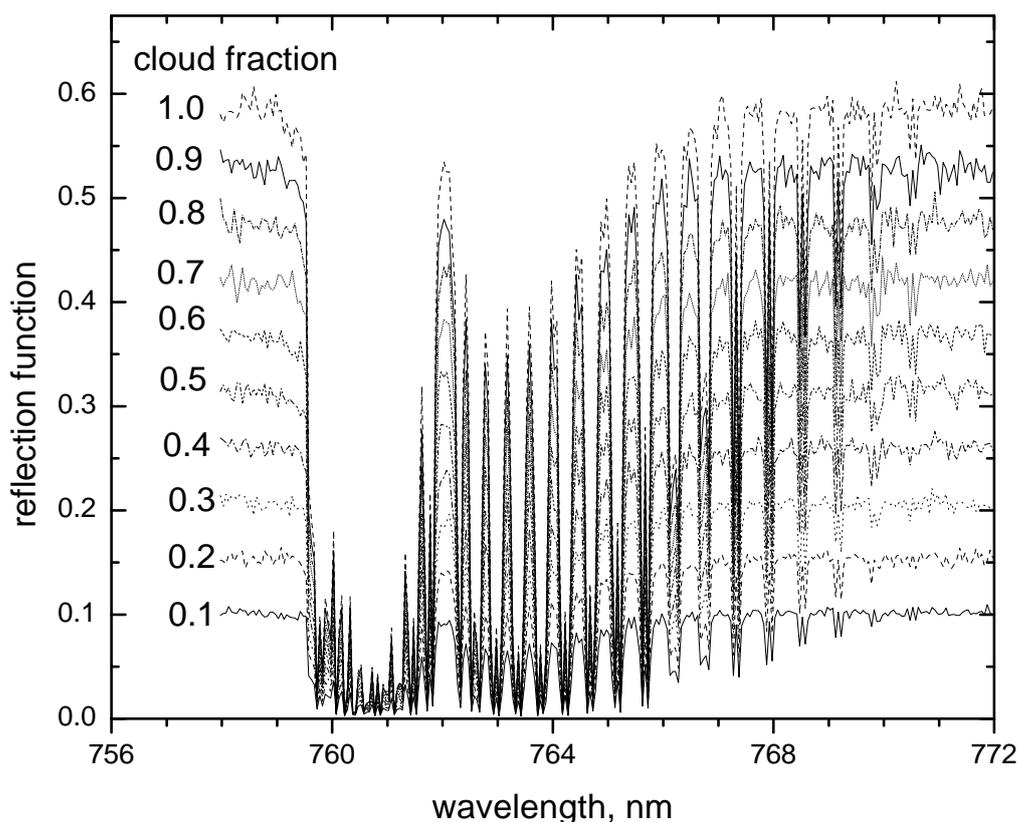


Рис.10. Результаты расчетов СКЯ разорванной облачности при различном балле облачности,  $\tau = 20$ ,  $\vartheta_0 = 60^\circ$ ,  $\vartheta = 0^\circ$ .

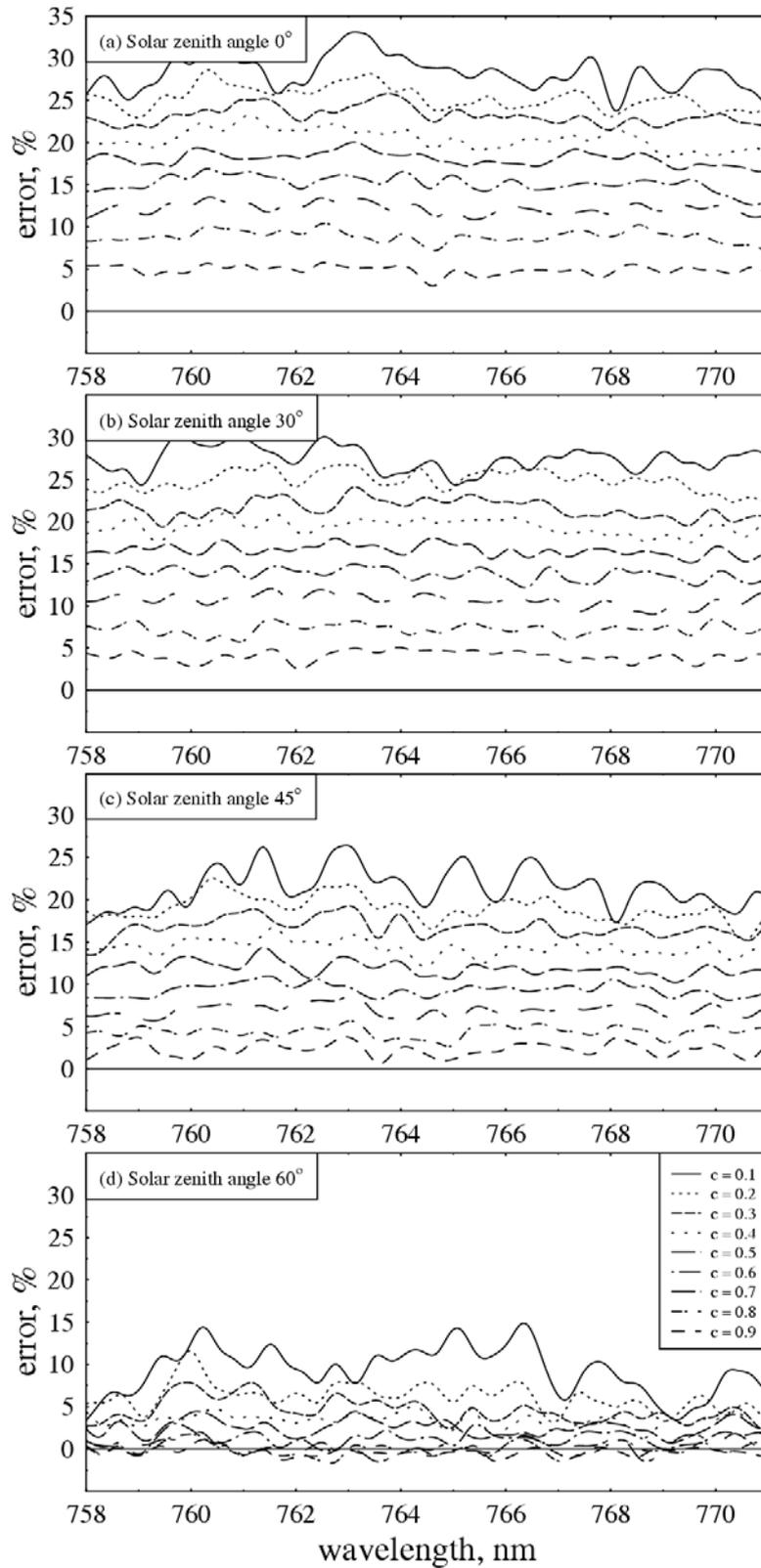


Рис.11. Ошибка приближения независимых пикселей для зенитного угла солнца 0, 30, 45 и 60 градусов,  $\vartheta = 0^\circ$ ,  $\tau = 20$ .

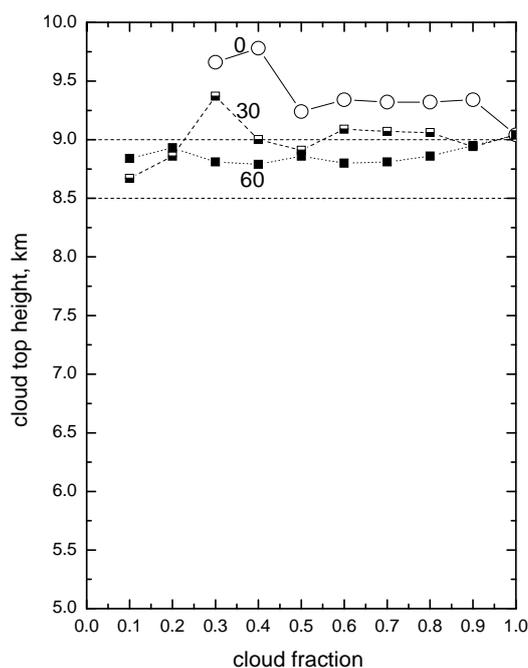


Рис.12. Ошибка в высоте облака. Приближение независимых пикселей использовалось при обращении СКЯ для зенитного угла солнца 0, 30 и 60 градусов,  $\vartheta = 0^\circ$  для облачного слоя расположенного между 8.5 и 9км и  $\tau = 20$ . Символы дают восстановленные значения положения верхней кромки облака.

**Третья глава** диссертации посвящена приложению развитой аналитической теории к восстановлению параметров облачности с использованием спектрометра SCIAMACHY на борту спутника Европейского Космического Агенства ENVISAT. Основные параметры SCIAMACHY приведены в Таблице 1. Эффективный радиус капель  $a_{ef}$  (отношение третьего момента функции распределения частиц по размерам ко второму) и водозапас  $W = c\rho H$  (в предположении однородности облака), где  $c$  – объемная концентрация жидкости в облаке,  $\rho$  – плотность воды и  $H$  – толщина облака, определяются с использованием измерений СКЯ на длинах волн 0.443 и 1.55 мкм. СКЯ на первой длине волны определяется в основном оптической толщиной облака  $\tau$  (см. Рис. 2), вторая длина волны чувствительна в основном к величине  $a_{ef}$  (см. Рис.3). В случае разорванной облачности степень покрытия пикселя облаком оценивается с использованием радиометров AATSR и MERIS (см. Таблицы 2,3) на борту ENVISAT. Обратная задача решается следующим образом:

- Величина водозапаса выражается через значение СКЯ (0.443 мкм) с использованием асимптотических формул теории переноса излучения, справедливых при оптической толщине облаков  $\tau \geq 5$ .
- Полученное значение подставляется в приближенное решение для СКЯ (1.55 мкм), что позволяет найти  $a_{ef}$  из решения трансцендентного уравнения методом Брента.
- Оптическая толщина определяется из найденных значений  $(a_{ef}, W)$  по формуле (16).

Значения  $a_{ef}$ ,  $\tau$  являются важнейшими климатическими параметрами. Автором была предложена методика по определению вероятности дождя с использованием граничных условий для этих параметров. Оценка погрешностей была проведена с использованием радарных данных.

Обратная задача по нахождению верхней границы облака  $h$  решается следующим образом. Спектральный коэффициент яркости в полосе поглощения кислорода представляется как

$$R(\lambda) = R(\lambda, h_0) + q(\lambda)(h - h_0), \quad (18)$$

где  $h_0$  – начальное положение верхней границы облака,  $q$  – производная СКЯ по верхней границе облака. Значения  $\tau$ ,  $a_{ef}$  и фазовое состояние облака, используемые в (18), получаются из измерений вне полосы поглощения  $O_2$ . Затем производится минимизация функционала

$$F(\lambda) = \|R(\lambda) - R(\lambda, h_0) - q(\lambda)(h - h_0)\|^2 \rightarrow 0 \quad (19)$$

по параметру  $h$  и организация итерационного процесса.

В алгоритме используются абсолютные значения коэффициента яркости. В связи с этим вопросы калибровки выходят на первый план. Ошибки в калибровке SCIAMACHY сразу после запуска ENVISAT были достаточно велики (до 20%). Автором была проведена большая работа по нахождению калибровочных констант с использованием других сенсоров на борту ENVISAT (AATSR, MERIS). Результаты проведенной работы были использованы в программах обработки данных SCIAMACHY. Как следует из Рис. 13, 14, в настоящее время SCIAMACHY обеспечивает высокую точность измерений сопоставимую с таковой приборов AATSR и MERIS.

Таблица 1. Каналы SCIAMACHY

N	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм
1	240-314	0.24
2	309-405	0.26
3	394-620	0.44
4	604-805	0.48
5	785-1050	0.54
6	1000-1750	1.48
7	1940-2040	0.22
8	2265-2380	0.26

Таблица 2. Каналы AATSR

N	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм
1	555	20
2	659	20
3	865	20
4	1610	60
5	3700	380
6	10800	900
7	12000	1000

Некоторые результаты обработки измерений даны на Рис. 15. Сравнения результатов восстановления с данными независимых измерений приведены на Рис. 16, 17. Как видно, точность разработанных методик достаточно высока. Результаты восстановления параметров глобального поля облачности (2002-2009) с использованием предложенного алгоритма, а также его детальное описание, приведены на сайте [www.iup.physik.uni-bremen.de/~sacura](http://www.iup.physik.uni-bremen.de/~sacura). Анализ восстановленных параметров облаков привел нас к выводу, что за исследуемый период времени существенных изменений в глобальном поле облачности не наблюдалось.

Таблица 3. Каналы MERIS

N	$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda$ , нм
1	421.5	10
2	442.5	10
3	490	10
4	510	10
5	560	10
6	620	10
7	665	10
8	681.25	7.5
9	708.75	10
10	753.75	7.5
11	760.625	3.75
12	778.75	15
13	865	20
14	885	10
15	900	10

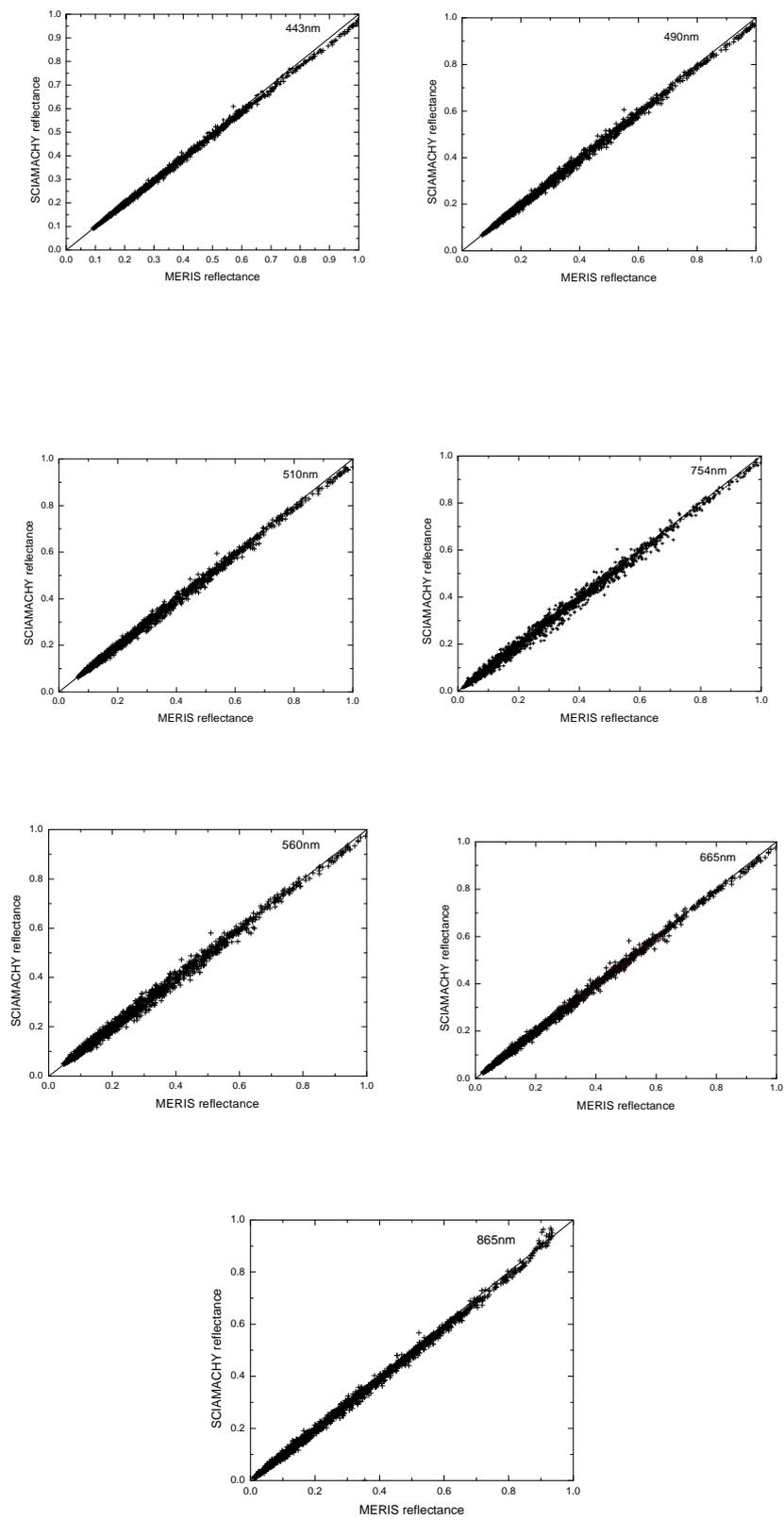


Рис.13. Сравнение MERIS и SCIAMACHY СКЯ.

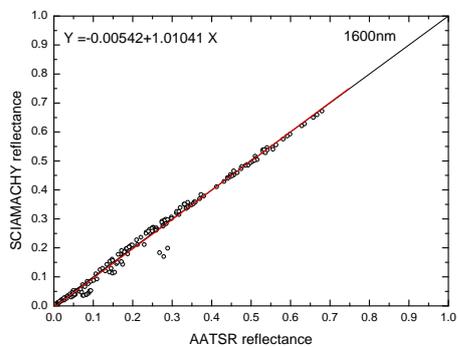
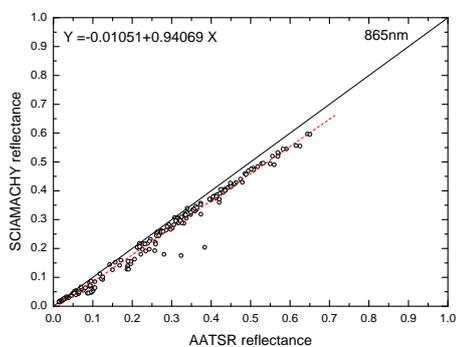
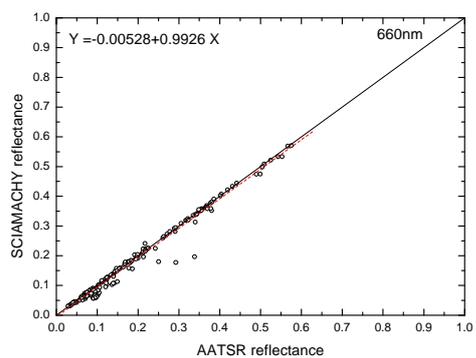
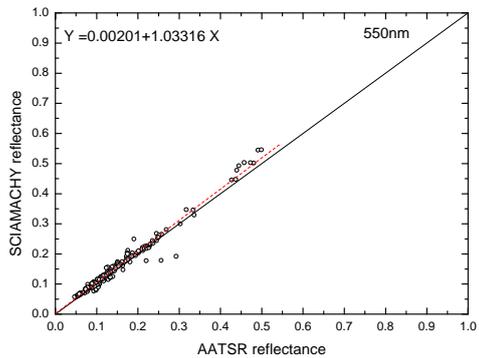


Рис.14. Сравнение ААТРС и СИАМАЧУ СКЯ.

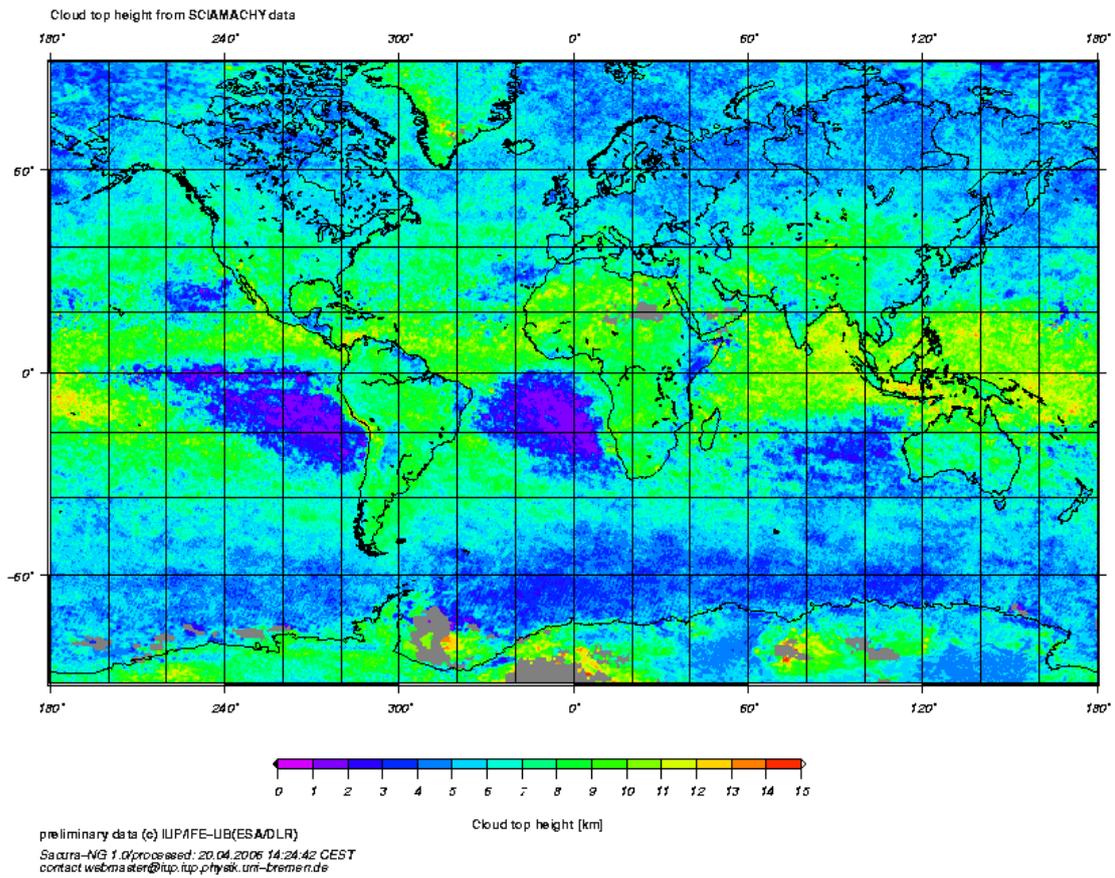


Рис. 15а. Глобальное поле высоты облачности по данным SCIAMACHY (2004).

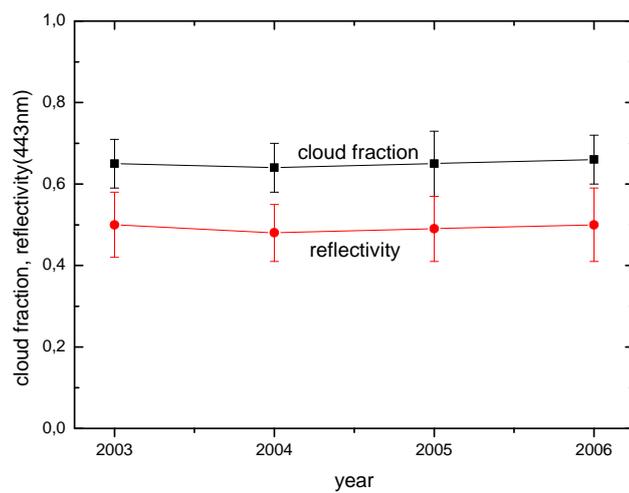


Рис. 15б. Тренды глобального поля облачности по данным SCIAMACHY (балл облачности, СКЯ(443нм)).

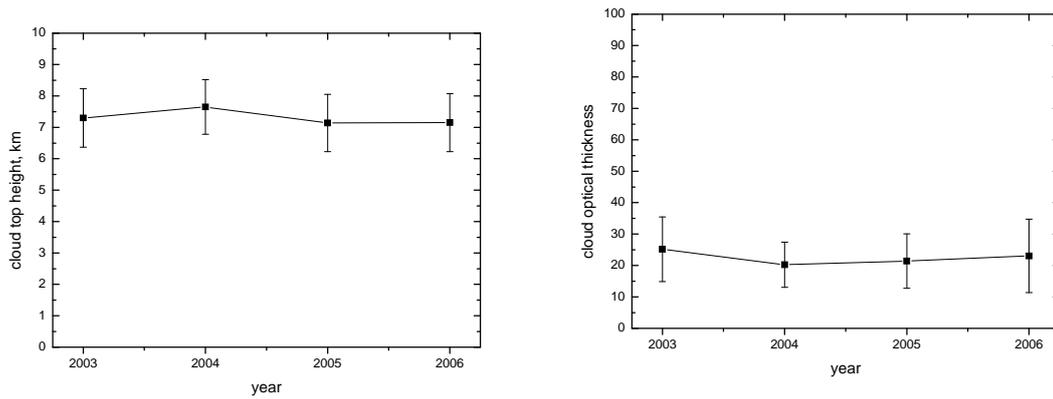


Рис. 15с. Тренды глобального поля облачности по данным SCIAMACHY (высота верхней границы облака (слева), оптическая толща (справа)).

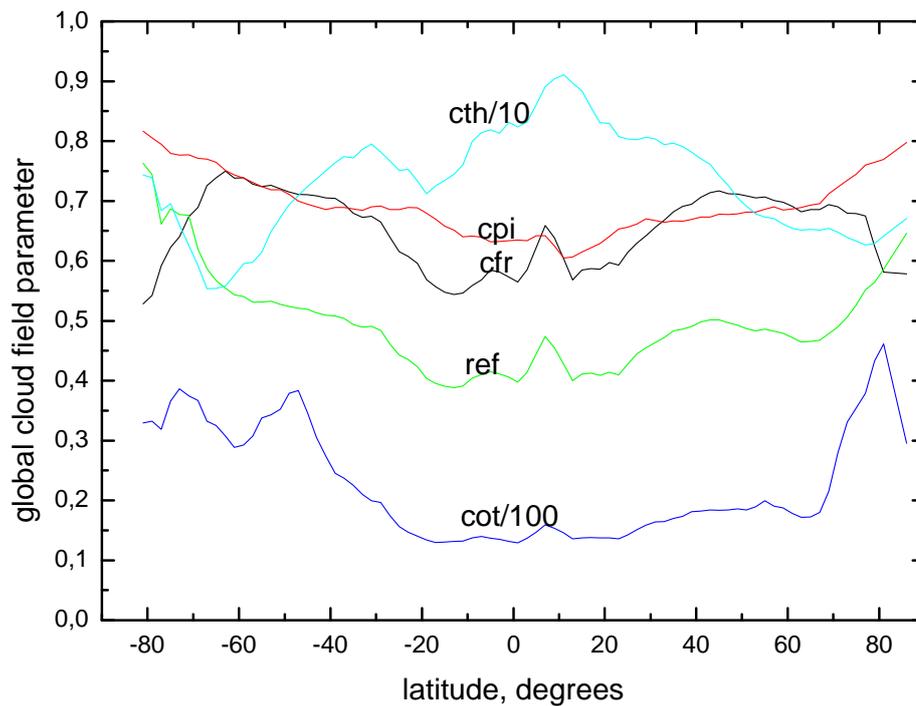


Рис. 15д. Широтное распределение параметров облачности (cth – верхняя граница облака, cpi – фазовый индекс, cfr – степень покрытия, ref – СКЯ(443нм), cot – оптическая толща) по данным SCIAMACHY.

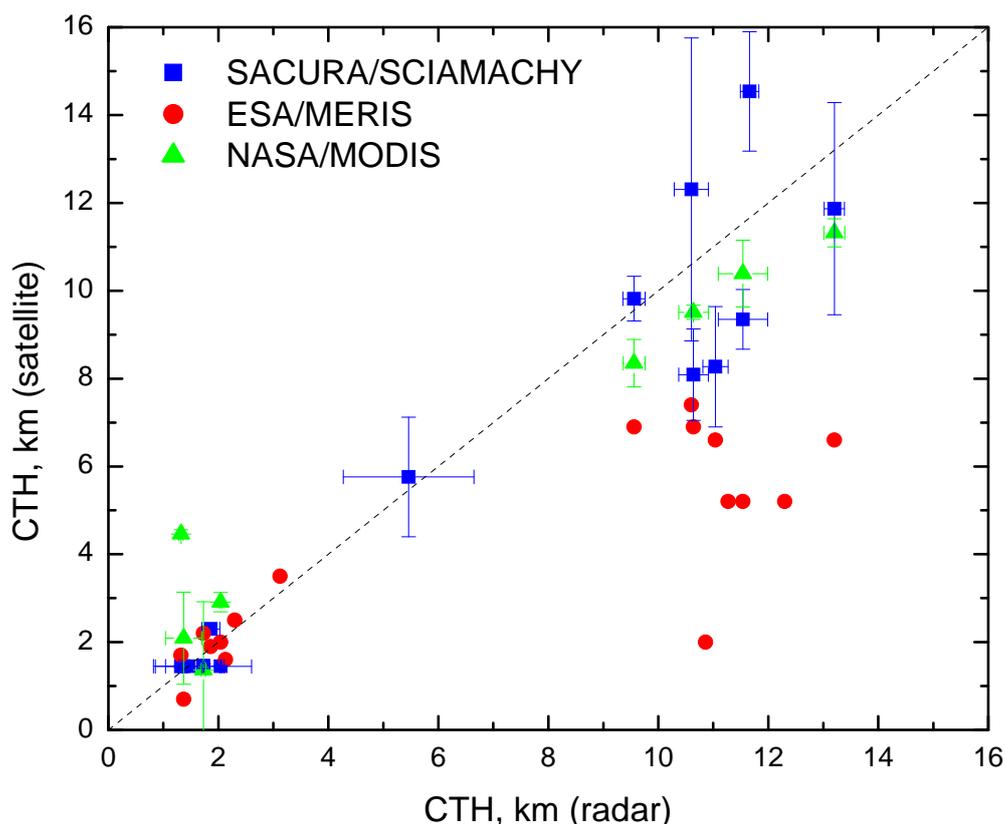


Рис.16. Высота верхней кромки облачности, полученная с использованием различных спутниковых алгоритмов как функция высот, определенных радаром. Квадраты представляют результаты обработки по защищаемому алгоритму.

**В четвертой главе** диссертации излагаются результаты спутникового мониторинга снежного покрова с использованием данных радиометров MERIS, AATSR и MODIS. MERIS и AATSR находятся на европейском спутнике ENVISAT. MODIS установлен на борту американских спутников TERRA и AQUA.

Важными параметрами снежного покрова являются:

- степень покрытия и ее межгодовые колебания;
- размер снежных зерен;
- толщина снежного покрова;
- концентрация загрязнителей;
- альbedo снега.

Степень покрытия определяется достаточно просто с использованием аппаратуры высокого пространственного разрешения (например, 300м\*300м, как в случае MERIS).

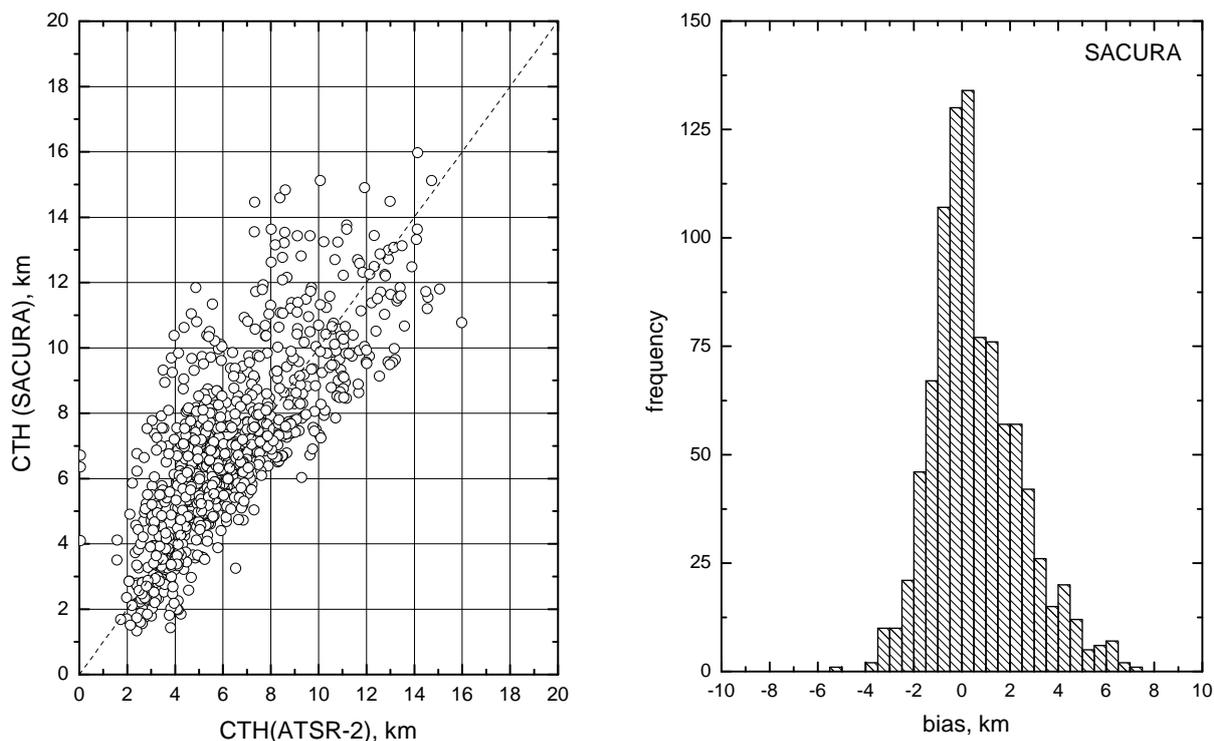


Рис. 17. Корреляция высот облаков полученная с использованием защищаемого алгоритма с использованием данных спектрометра GOME и ИК измерений (ATSR-2) и соответствующая гистограмма отклонений. GOME и AATSR-2 в настоящее время функционируют на борту спутника ERS-2.

Это связано с тем, что яркость снега в видимом диапазоне существенным образом превосходит яркость всех других объектов за исключением облаков. Таким образом, вопросы фильтрации снимков содержащих сплошную либо разорванную облачность выходят на первый план. Для фильтрации облаков над снегом используются каналы 1.38 мкм, 1.6 мкм и 3.7 мкм. Первый канал (1.38 мкм) характеризуется сильным поглощением излучения водяным паром с максимумом концентрации в нижних слоях атмосферы, что приводит к увеличению отражательной способности атмосферы в полосе  $H_2O$  при наличии облачности. Именно эта физическая закономерность используется для фильтрации снимков, содержащих облака. В AATSR этот канал отсутствует. Тогда используются каналы 1.6 и 3.7 мкм, где поглощение излучения снегом выше (за счет более крупных зерен) по сравнению с облаком. Данное обстоятельство приводит к снижению отражательной способности снега на 1.6 мкм, а также к уменьшению величины регистрируемого сигнала на длине волны 3.7 мкм. В приборе MERIS каналы 1.38, 1.6, 3.7 мкм отсутствуют, и для фильтрации облачных

снимков над снегом используют измерения в полосе поглощения кислорода, а также эмпирические соотношения с использованием так называемого индекса снега, равно как и каналы в голубой области спектра, где отражательная способность зависит от вклада молекулярного рассеяния, которое существенным образом отличается для случаев облачности и чистого неба.

В работе предлагается следующая методика для определения альbedo снега по данным измерений с использованием MERIS. Известно, что СКЯ над снежной поверхностью (СП) может быть представлен в виде (в предположении о Ламбертовом законе отражения света снегом)

$$R = R_a + \frac{At_1t_2}{1 - Ar}, \quad (20)$$

где  $A$  – альbedo снега,  $t_1, t_2$  – коэффициенты направленного пропускания света от верхней границы атмосферы до СП и от СП до приемника,  $r$  – сферическое альbedo атмосферы,  $R_a$  – СКЯ для случая той же атмосферы, но с черной подстилающей поверхностью. Из уравнения (20) следует

$$A = \frac{R - R_a}{(R - R_a)r + t_1t_2}, \quad (21)$$

где  $R$  – измеренный СКЯ. Величины  $t_1, t_2, r$  и  $R_a$  определяются в значительной степени оптической толщиной атмосферы  $\tau$ . Как известно,  $\tau$  слабо меняется в арктических регионах. Также обычно значения  $\tau$  (на длине волны 0.55 мкм) не превосходят 0.1. В связи с этим значения  $t_1, t_2, r$  и  $R_a$  часто рассчитываются, пользуясь соответственными атмосферными моделями. В данной работе предлагается новый подход, основанный на интерпретации измерений над водной поверхностью близкой к леднику (например, Гренландия), где величины  $t_1, t_2, r$  и  $R_a$  определяются достаточно легко ввиду того, что значения  $A$  близки к нулю (вне солнечной дорожки) для океана. Результаты восстановления альbedo снега с использованием данной методики приведены на Рис.18. Видно, что суточные вариации альbedo незначительны. Измерения в разные месяцы показывают, что альbedo снега варьирует. В частности, поздней весной альbedo снега уменьшается. Это связано с эффектами таяния, увеличения содержания жидкой воды и аккумуляцией примесей на подтаявшей снежной поверхности. Размер снежных зерен  $a_{ef}$  обычно определяется с использованием измерений на 1.2 и 1.6 мкм. В этих каналах поглощение газами практически отсутствует, но лед поглощает достаточно сильно. При этом поглощение определяется в основном эффективным диаметром снежных зерен.

После соответствующей атмосферной коррекции можно определить альbedo снега, которое зависит от  $a_{ef}$  следующим образом (для чистого сухого снега):

$$A = \exp \left[ -C \sqrt{\alpha(\lambda) a_{ef}} \right], \quad (22)$$

где  $\alpha(\lambda) = 4\pi\chi(\lambda)/\lambda$  – показатель поглощения льда,  $\chi(\lambda)$  – мнимая часть показателя преломления льда и  $C$  – параметр, зависящий от формы зерен. Величина  $C$  была оценена по данным независимых измерений  $A$  и  $a_{ef}$  автором диссертации. Таким образом, из уравнения (22) получаем

$$a_{ef} = \frac{\ln^2 A}{\alpha C^2}. \quad (23)$$

Результаты, полученные в данной главе, опираются существенным образом на возможность моделирования снежного покрова ледяным облаком с фрактальными частицами. В диссертации дается обоснование модели с использованием наземных измерений (см. Рис. 19, 20). В расчетах приведенных на Рис.19а полагалось, что объемная концентрация сажи  $c = 10^{-7}$ , а средний размер частиц – 0.29мкм. Каждая кривая на Рис.20 характеризуется своим альbedo однократного рассеяния найденным с использованием измеренных значений СКЯ  $R(0^\circ, 54^\circ, 90^\circ)$  (см. Таблицу 4).

Table 4. Восстановленные значения  $\omega_0$  и измеренные значения  $R(0^\circ, 54^\circ, 90^\circ)$ .

$\lambda, \mu m$	$\omega_0$	$R(0^\circ, 54^\circ, 90^\circ)$
0.55	1.0	0.917
1.05	0.9958	0.692
1.24	0.9850	0.506
1.64	0.8650	0.141
2.21	0.8938	0.174

Автором был предложен алгоритм нахождения концентрации сажи в снеге, а также среднего размера зерен по данным спутниковых измерений. Алгоритм основан на измерениях СКЯ в видимой и ближней ИК областях спектра. СКЯ снега на длине волны 443 нм ( $R_1$ ) зависит существенным образом от концентрации сажи, а в ближней ИК области спектра ( $R_2$ ) (на длине волны 865, 1020 или 1240 нм) – от величины  $a_{ef}$ . При этом используются аналитические решения для СКЯ, полученные автором

$$R_1 = R_0 \exp \left[ -D \sqrt{\frac{2}{3} B \gamma_1 c a_{ef}} \right], \quad (24)$$

$$R_2 = R_0 \exp\left(-D \sqrt{\beta + \frac{2}{3} B \gamma_2 c a_{ef}}\right), \quad (25)$$

где

$$D = \frac{4u_0(\mu_0)u_0(\mu)}{R_{0\infty}(\mu_0, \mu, \varphi) \sqrt{3(1-g)}},$$

$B = 0.84$ ,  $c = c_s / c_i$ ,  $c_s(c_i)$  – концентрация сажи (снежных зерен),  $\gamma_n = 4\pi\chi_n / \lambda_n$ ,  $\chi_n$  – мнимая часть коэффициента поглощения сажи на длине волны  $\lambda_n$ ,  $\beta(\ell) \equiv 1 - \omega_0(\ell) = \beta(\infty)(1 - \exp(-\ell / \ell_0(\lambda)))$ ,  $\beta(\infty) = 0.47$ ,  $\ell = 2.63a_{ef}$ ,  $\ell_0 = \lambda_2 / 4\pi\chi_{ice}$ ,  $\chi_{ice}$  – мнимая часть показателя поглощения льда. Из первого уравнения получаем для параметра  $X = ca_{ef}$

$$X = \frac{3}{2BD^2\gamma_1} \ln^2 r_1, \quad (26)$$

и, следовательно,

$$\beta = \frac{\ln^2 r_2}{D^2} - \frac{2}{3} BX\gamma_2, \quad (27)$$

где  $X$  определяется уравнением (26) и  $r_i \equiv R_i / R_0$ . Окончательно получаем

$$a_{ef} = 0.38\ell_0 \ln \left[ \frac{\beta(\infty)}{\beta(\infty) - \beta} \right] \quad (28)$$

и концентрацию сажи  $c_s = Xc_i / a_{ef}$ .

При выводе формул (24), (25) использовался тот факт, что отношение  $\xi = R / R_0$  для полубесконечной среды представимо в виде ряда

$$\xi = \sum_{l=0}^{\infty} f_l (1 - \beta)^l, \quad (29)$$

где в рамках теории случайных блужданий

$$f_l = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi}} l^{-3/2} \exp(-\sigma / l). \quad (30)$$

Далее использовалось приближение  $(1 - \beta)^l \approx \exp(-\beta l)$ , замена суммирования на интегрирование, асимптотическое решение  $R = R_0 - 4q\gamma u_0(\mu_0)u_0(\mu)$  (для нахождения  $\sigma$ ), и методы лучевой оптики для нахождения связи  $\beta$  с  $a_{ef}$ . В результате сделанных

предположений уравнения (24), (25) применимы только в случае слабого поглощения (большое число рассеяний  $l$ ).

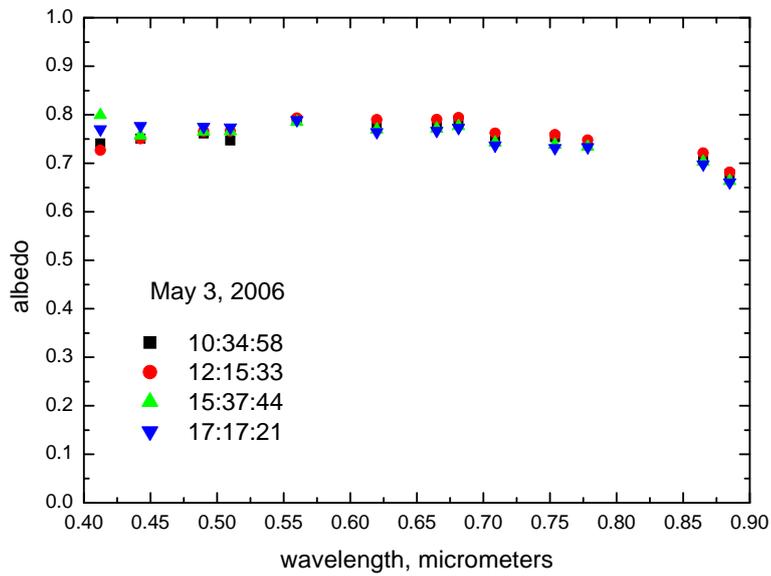


Рис. 18а. Восстановленное альbedo снега с использованием данных MERIS (4 орбиты).

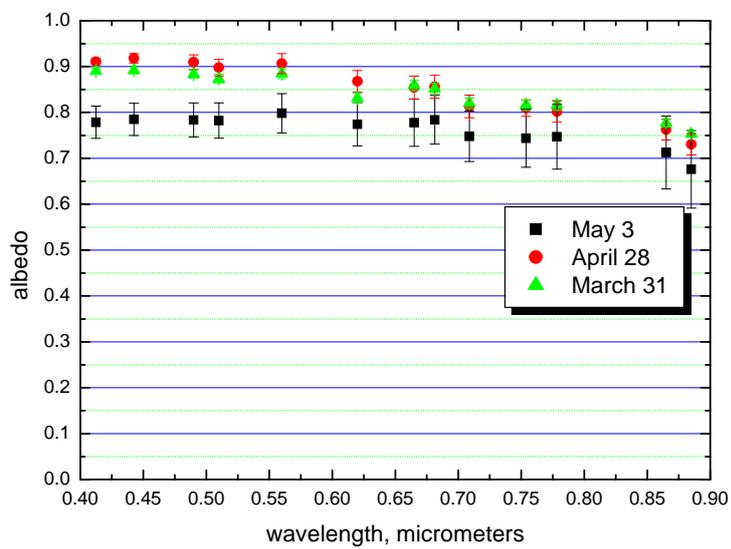


Рис. 18б. Восстановленное альbedo снега с использованием данных MERIS (среднее по всем орбитам).

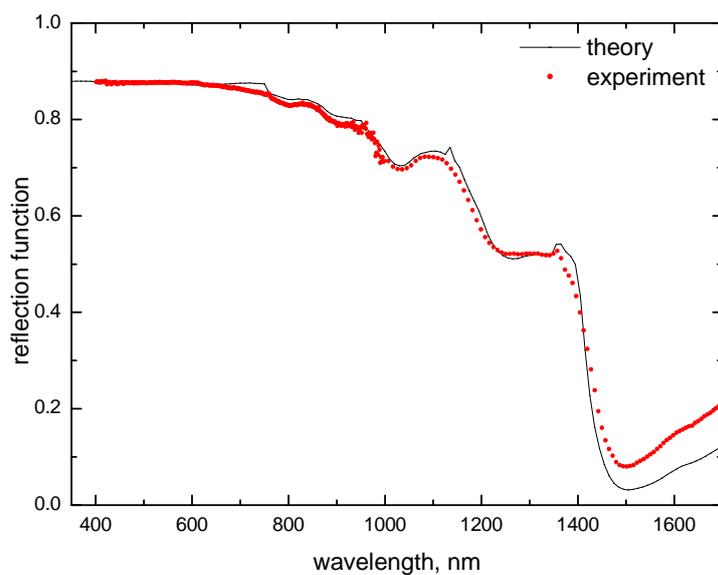


Рис. 19а. Спектральная яркость снега (теория и эксперимент) при солнечном зенитном угле  $54^\circ$  (наблюдение – в надир).



Рис. 19б. Установка использованная при измерениях приведенных на Рис.19а.

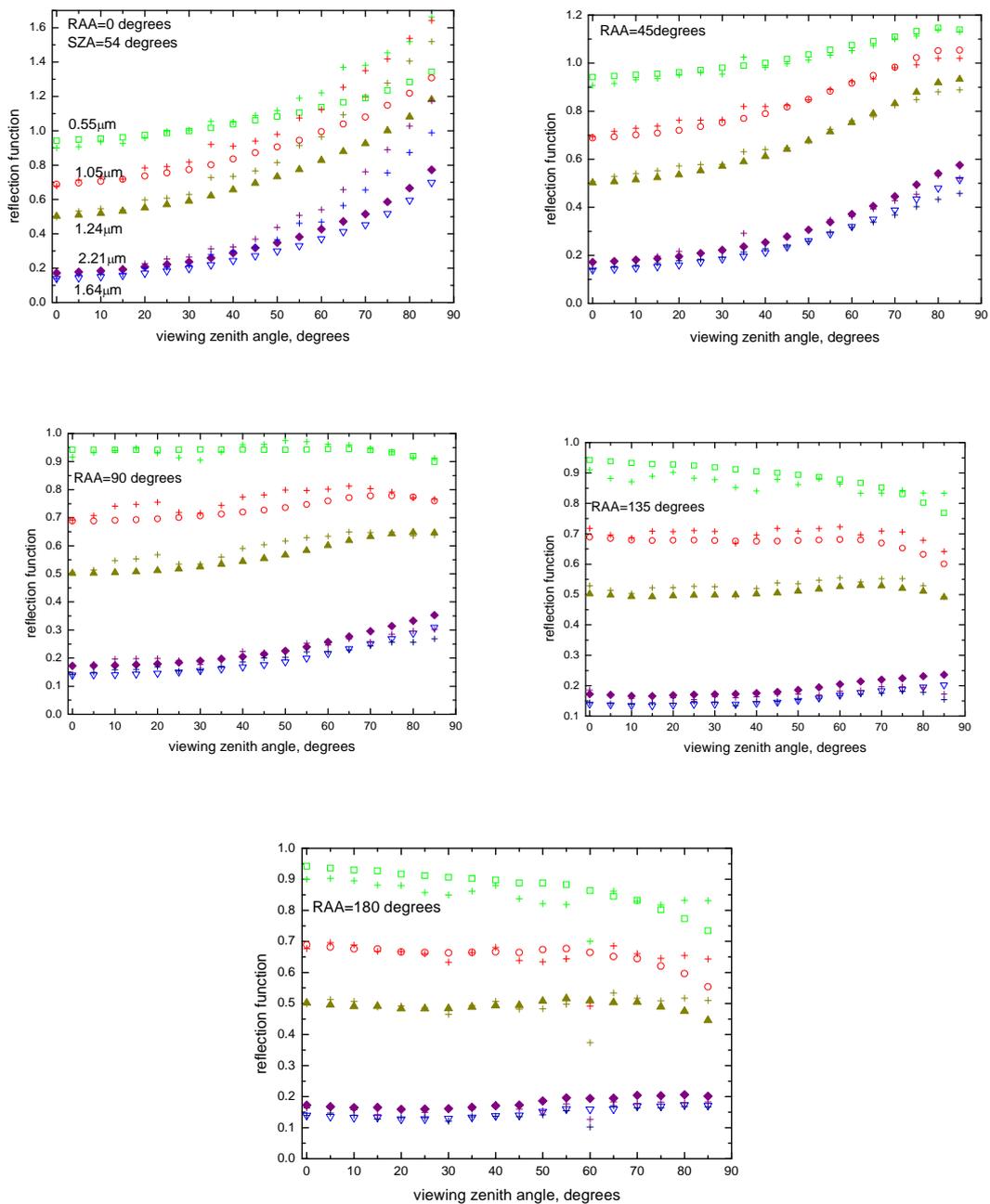


Рис. 20. Спектральная яркость снега (теория и эксперимент) в зависимости от угла наблюдения при солнечном зенитном угле  $54^\circ$  и относительном азимуте равном 0, 45, 90, 135, и 180 градусов. Экспериментальные данные обозначены крестами, символы – результаты расчетов. Длины волн  $\lambda = 0.55, 0.865, 1.2, 1.6, 2.1$  мкм с большими значениями яркости для более коротких волн (за исключением последних двух длин волн).

Результат восстановления размеров снежных зерен в Гренландии по данным MERIS приведен на Рис. 21. Валидация алгоритма проводилась с использованием данных MODIS над Хоккайдо (Япония). При этом данные о размерах снежных зерен во время пролета спутника были получены с использованием наземных измерений. Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмом разработанным в космическом агентстве Японии приведено на Рис.22. Из анализа Рис.23 следует достаточно высокая корреляция наземных и спутниковых измерений. Отличия могут быть объяснены проблемами коллокации, а так же сложностью определения  $a_{ef}$  в наземных измерениях с использованием микроскопа. Подтверждением этому факту служит Рис. 24, где приведена зависимость измеренного СКЯ от размера зерен.

Коэффициент корреляции  $K$  для данных приведенных на Рис.23 равен 0.73. Он уменьшается, если длина волны используемая при обращении равна 865 нм, а не 1240 нм как на Рис.23. Это объясняется падением информативности с уменьшением длины волны (см. Рис. 25).

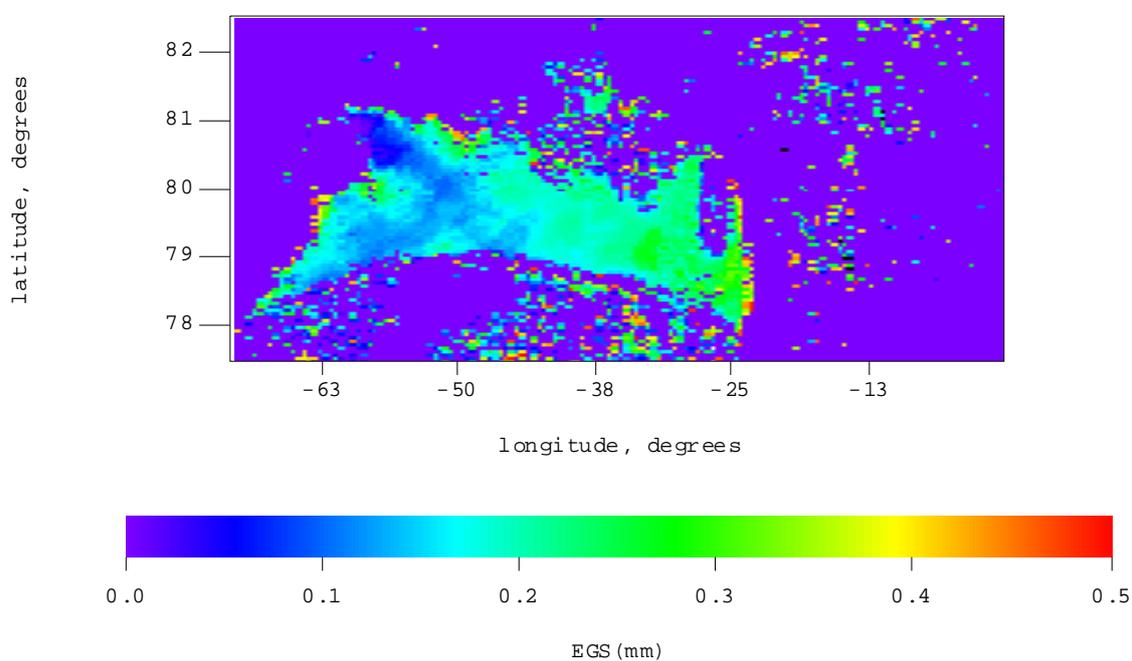


Рис.21. Пространственное распределение размеров снежных зерен в северной Гренландии полученное с использованием данных MERIS.

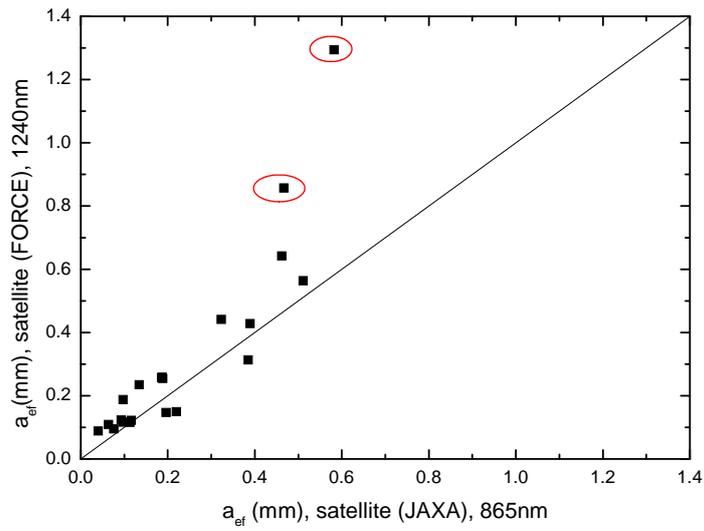


Рис. 22. Корреляция размеров снежных зерен полученных из спутниковых измерений с использованием разных алгоритмов (FORCE – предлагаемый алгоритм, JAXA – алгоритм, разработанный в космическом агенстве Японии).

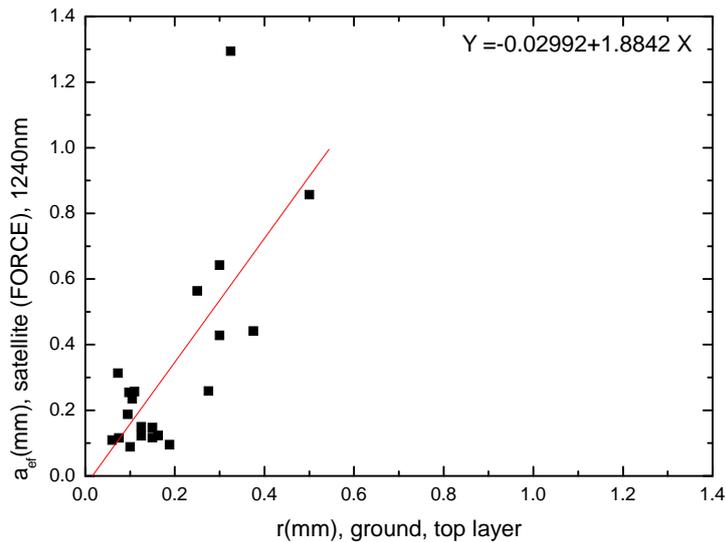


Рис.23. Корреляция размеров снежных зерен полученных из наземных и спутниковых измерений. Коэффициент корреляции равен 0.73.

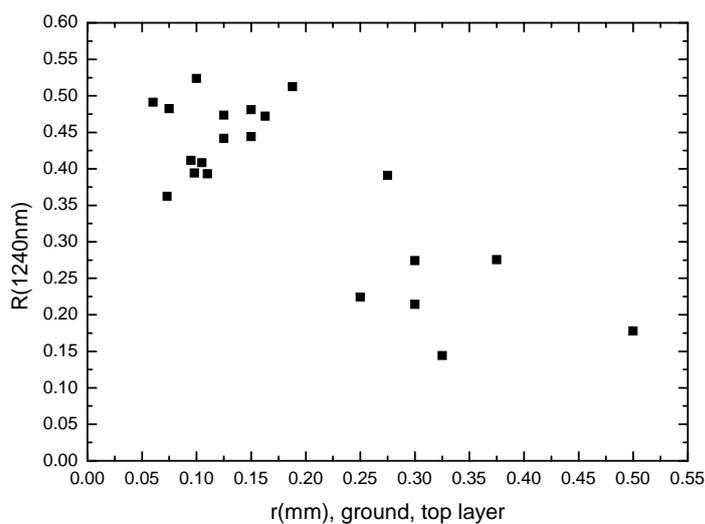


Fig.24. Зависимость СКЯ на длине волны 1240нм от измеренного микроскопом радиуса частиц.

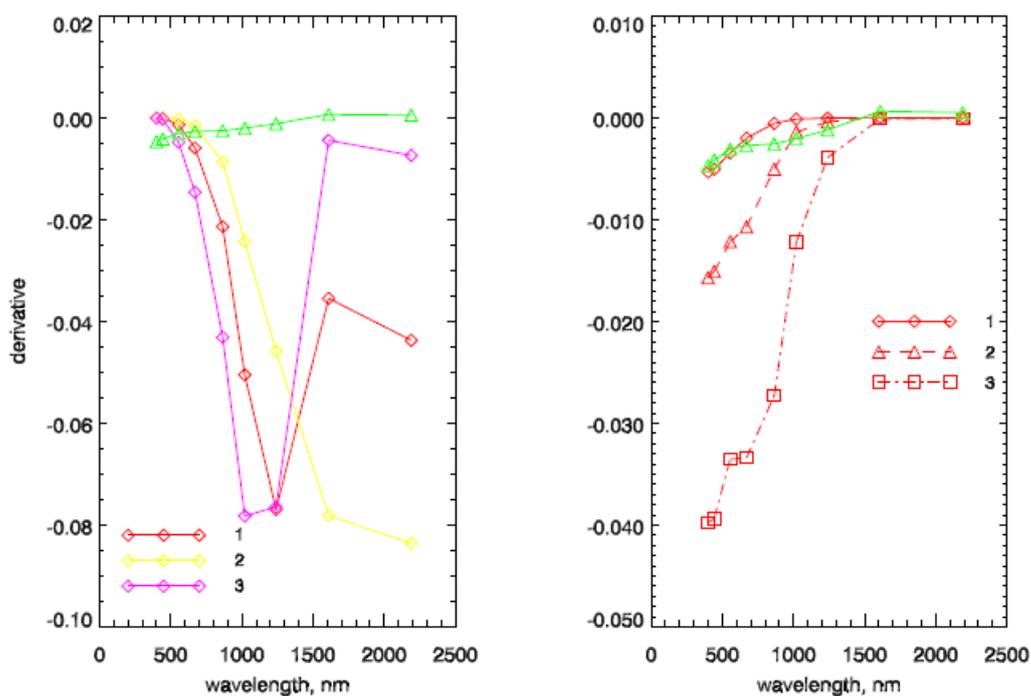


Рис.25. Спектральные зависимости производных СКЯ по  $a_{ef}$  (левый рисунок, 1 –  $a_{ef}=50$ , 2 –  $a_{ef}=350$ , 3 –  $a_{ef}=750 \mu m$ ) и  $c_s$  (правый рисунок, 1 –  $c_s = 30$  нг/г, 2 –  $c_s = 300$  нг/г, 3 –  $c_s = 3000$  нг/г). Верхние кривые (помеченные треугольниками) дают производные относительно аэрозольной оптической толщи (АОТ) при  $AOT(550nm) = 0.05$ . Расчеты проведены с использованием радиационного кода SCIATRAN и решения присоединенного уравнения переноса излучения.

**В Заключении** подведены итоги диссертационной работы и сформулированы ее основные результаты:

- Разработана приближенная аналитическая теория переноса и рассеяния излучения в облаках и снежном покрове.
- Получены приближенные формулы, описывающие локальные оптические свойства ансамблей сферических и несферических частиц.
- Предложены новые методы решения обратных задач оптики облаков и снега с использованием высокоточных приближенных решений уравнения переноса излучения.
- Проведен анализ пространственного распределения глобального поля облачности с использованием спектрометра SCIAMACHY.
- Проведен анализ временных трендов облачности. Установлено, что *соответствующие тренды* за исследуемый период незначительны.
- Разработан и внедрен операционный алгоритм для учета облачности в задачах спутниковой озонотрии. Алгоритм используется в космическом агентстве Германии и Европейском космическом агентстве.
- Разработаны и апробированы алгоритмы по определению размера снежных зерен и альбедо снега по данным MERIS, AATSR и MODIS.

#### ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Kokhanovsky, A. A., 1999: Light Scattering Media Optics: Problems and Solutions, Chichester: Wiley-Praxis (2<sup>nd</sup> edition: 2001, 3<sup>rd</sup> edition: 2004).
2. Kokhanovsky, A. A., 2003: Polarization Optics of Random Media, Chichester: Springer-Praxis.
3. Kokhanovsky, A. A., 2006: Cloud Optics, Dordrecht: Springer.
4. Kokhanovsky, A. A., ed., 2006-2010: Light Scattering Reviews, v.1-5, Berlin: Springer-Praxis.
5. Gottwald, M., H., Bovensmann, G. Lichtenberg, S. Noel, A. von Barga, S. Slijkhuis, A. Piters, R. Hoogeveen, C. von Savigny, M. Buchwitz, A. Kokhanovsky, A. Richter, A. Rozanov, T. Holzer-Popp, K. Bramstedt, J.-C. Lambert, J. Skupin, F. Wittrock, H. Schrijver, J. P. Burrows, 2006: SCIAMACHY. Monitoring the Changing Earth's Atmosphere, Oberpfaffenhofen: DLR.

6. Kokhanovsky, A. A., 2008: *Aerosol Optics*, Berlin: Springer.
7. Kokhanovsky, A. A., G. de Leeuw, eds., 2009: *Satellite Aerosol Remote Sensing Over Land*, Berlin: Springer-Praxis.
8. \* Kokhanovsky, A. A., G. de Leeuw, 2009: Determination of atmospheric aerosol properties over land using satellite measurements, *Bulletin Amer. Meteorol. Society*, 90, 2, 235-237.
9. \* Kokhanovsky, A. A., Schreier M., 2009: The determination of snow specific area, albedo and effective grain size using AATSR spaceborne observations, *Int. J. Remote Sens.*, 30, 4, 919-933.
10. \* Kokhanovsky, A. A. , C. M. Naud, A. Devasthale, 2009: Intercomparison of ground-based satellite cloud-top height retrievals for overcast single-layered cloud fields, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing*, 47, 1901-1908.
11. \* Okada, Y., A. A. Kokhanovsky, 2009: Light scattering and absorption by densely packed groups of spherical particles, *JQSRT*, 110, 902-917.
12. \* Bass, L. P., T. A. Germogenova, O. V. Nikolaeva, A. A. Kokhanovsky, V. S. Kuznetsov, 2009: Numerical simulation of boundary effects in aerosol and cloud optics, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 22, 102-107.
13. \* Kokhanovsky, A. A., 2008: The contrast and brightness of halos in crystalline clouds, *Atmos. Res.*, 89, 110-112.
14. \* Kokhanovsky, A. A., 2008: Phase functions of mixed clouds, *Atmos. Res.*, 89, 218-221.
15. \* Kokhanovsky, A. A., I. Hopkinson, 2008: Some analytical approximations to radiative transfer theory and their application for the analysis of reflectance data, *J. Opt. A: Pure Appl. Optics*, 10, 1-8.
16. \* Kokhanovsky, M. Schreier, W. von Hoyningen-Huene, 2008: The comparison of spectral top-of-atmosphere reflectances measured by AATSR, MERIS, and SCIAMACHY onboard ENVISAT, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Letters*, 5, 53-56.
17. Nauss, T., et al., 2008: Operational discrimination of raining from nonraining clouds in mid-latitudes using multispectral data, in *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction* (ed. by T. Michaelides, C. Silas), Berlin: Springer, 169-192.

18. \* Domine, F., M. Albert, T. Huthwelker, H.-W. Jacobi, A. A. Kokhanovsky, M. Lehning, G. Picard, W.R. Simpson, 2008: Snow physics as relevant to snow photochemistry, *Atmos. Chem. Physics*, 8, 171-208.
19. \* Wendish, M., P. Formenti, T. Anderson, A. Kokhanovsky, B. Mayer, P. Pilewskie, S. Platnick, J. Redemann, J. Remedios, P. Spichtinger, D. Tanre, F. Vanhellemont, 2008: Combining upcoming satellite missions and aircraft activities: Future challenges for the EUFAR fleet, *Bul. American Meteor. Soc.*, ES1-ES9.
20. \* Kokhanovsky, A. A., 2007: Local optical properties of mixed clouds: simple parameterizations, *Atmos. Res.*, 84, 42-48.
21. \* Kokhanovsky, A. A., 2007: Physical interpretation and accuracy of the Kubelka-Munk theory, *J. Physics D: Appl. Physics*, 40, 22110-2216.
22. \* Kokhanovsky, A. A., K. Bramstedt, W. von Hoyningen-Huene, J. P. Burrows, 2007: The intercomparison of top-of-atmosphere reflectivity measured by MERIS and SCIAMACHY in the spectral range of 443-865nm, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, 4, 293-296.
23. \* Kokhanovsky, A. A., T. Nauss, M. Schreier, W. von Hoyningen-Huene, J. P. Burrows, 2007: The intercomparison of cloud parameters derived using multiple satellite instruments, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 45, 195-200.
24. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, W. von Hoyningen-Huene, S. Schmidt, P. Pilewskie, 2007: Retrieval of cloud spherical albedo from top-of-atmosphere reflectance measurements performed at a single observation angle, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3633-3637.
25. \* Kokhanovsky, A. A., F.-M. Breon, A. Cacciari, E. Carboni, D. Diner, W. Di Nicolantonio, R. G. Grainger, W. M. F. Grey, R. Holler, K.-H. Lee, Z. Li, P.R.J. North, A. M. Sayer, G. E., Thomas, W. von Hoyningen-Huene, 2007: Aerosol remote sensing over land: a comparison of satellite retrievals using different algorithms and instruments, *Atmos. Res.*, 85, 372-294.
26. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, V. V. Rozanov, K. Wapler, L. N. Lamsal, M. Weber, J. P. Burrows, U. Schumann, 2007: Satellite ozone retrieval under broken cloud conditions: an error analysis based on Monte Carlo simulations, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 45, 187-194.

27. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, V. V. Rozanov, K. Wapler, J. P. Burrows, U. Schumann, 2007: The influence of broken cloudiness on cloud top height retrievals using nadir observations of backscattered solar radiation in the oxygen A-band, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 103, 460-477.
28. \* Kokhanovsky, A. A., M. Vountas, V. V. Rozanov, W. Lotz, H. Bovensmann, J. P. Burrows, U. Schumann, 2007: Global cloud top height and thermodynamic phase distribution as obtained by SCIAMACHY on ENVISAT, *Int. J. Remote Sensing*, 28, 4499-4507.
29. \* Nauss, T., A. A. Kokhanovsky, 2007: Assignment of rainfall confidence values using multispectral satellite data at mid-latitudes: first results, *Adv. Geosci.*, 10, 1-4.
30. \* Tedesco, M., A. A. Kokhanovsky, 2007: The semi-analytical snow retrieval algorithm and its application to MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 111, 228-241.
31. \* Jourdan, O., A. A. Kokhanovsky, J. P. Burrows, 2007: Calibration of SCIAMACHY using AATSR top-of-atmosphere reflectance over a hurricane, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, 4, 8-12.
32. \* von Hoyningen-Huene, W., A. A. Kokhanovsky, M. Wuttke, M. Buchwitz, S. Noel, K. Gerilowski, J. P. Burrows, B. Latter, R. Siddans, B. J. Kerridge, 2005: Validation of SCIAMACHY top-of-atmosphere reflectance for aerosol remote sensing using MERIS L1 data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 97-106.
33. \* Domine F., M. Albert, T. Huthwelker, H.-W. Jacobi, A. A. Kokhanovsky, M. Lehning, G. Picard, W. R. Simpson, 2008: Snow physics as relevant to snow photochemistry, *Atmos. Chem. Physics Discussions*, 7, 1-96.
34. Rozanov, V. V., A. A. Rozanov, A. A. Kokhanovsky, 2007: Derivatives of the radiation field and their application to the solution of inverse problems, *Light Scattering Reviews*, 2, 205-268.
35. Nikolaeva, O. V., L. P. Bass, T. A. Germogenova, V. S. Kuznetsov, A. A. Kokhanovsky, 2007: Radiative transfer in horizontally and vertically inhomogeneous turbid media, *Light Scattering Reviews*, 2, 295-348.
36. Kokhanovsky, A. A., et al., 2007: Global SCIAMACHY cloud products, ENVISAT Symposium, 23-27 April, Montreux, Switzerland, CD-ROM SP636.
37. von Barga, A., T. Schröder, K. Kretschel, M. Hess, C. Lerot, M. Van Roozendaal, M. Vountas, A. Kokhanovsky, W. Lotz, and H. Bovensmann 2007:

- Operational SCIAMACHY level 1B-2 off-line processor: total vertical columns of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub> and cloud products, ENVISAT Symposium, 23-27 April, Montreux, Switzerland, CD-ROM SP636.
38. Kokhanovsky, A. A., 2006: Asymptotic radiative transfer, in *Light Scattering Reviews* (ed. by A. A. Kokhanovsky), v.1, p. 253-289, Berlin: Springer-Praxis.
  39. \* Kokhanovsky, A. A., 2006: Scaling constant and its determination from simultaneous measurements of light reflection and methane adsorption by snow samples, *Opt. Letters*, 31, 3282-3284.
  40. \* Kokhanovsky, A. A., 2006: On remote sensing of optically thick ice clouds, *Optical Engineering*, 45(4), 046201.
  41. \* Kokhanovsky, A. A., 2006: Radiative properties of a turbid medium-underlying surface system, *Optical Engineering*, 45 (12), doi: 10.1117/1.2402105.
  42. \* Kokhanovsky, A. A., 2006: Modeling of light depolarization by cubic and hexagonal particles in noctilucent clouds, *Atmos. Res*, 79, 175-181.
  43. \* Kokhanovsky, A. A., T. Nauss, 2006: Reflection and transmission of solar light by clouds: asymptotic theory, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 6, 8301-8334.
  44. \* Kokhanovsky, A. A., T. Nauss, 2006: Reflection and transmission of solar light by clouds: asymptotic theory, *Atmos. Chem., Phys.* 6, 5537-5545.
  45. Kokhanovsky, A. A., L. G. Sokoletsky, 2006: Reflection of light from semi-infinite absorbing turbid media. Part 1: Spherical albedo, *Color Res. and Application*, 31, 491-497.
  46. Kokhanovsky, A. A., L. G. Sokoletsky, 2006: Reflection of light from semi-infinite absorbing turbid media. Part 2: Plane albedo and reflection function, *Color Res. and Application*, 31, 498-509.
  47. \* Kokhanovsky, A. A., O. Jourdan, J. P. Burrows, 2006: The cloud phase discrimination from a satellite, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, 3, 103-106.
  48. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, W. von Hoyningen-Huene, 2006: Retrieval of cloud spherical albedo from top-of-atmosphere reflectance measurements performed at a single observation angle, *Atmos. Phys. Chem. Discuss.*, 6, 1-14.
  49. \* Kokhanovsky, A. A., W. von Hoyningen-Huene, S. Noel, K. Gerilowski, H. Bovensmann, K. Bramstedt, M. Buchwitz, J. P. Burrows, 2006: The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY: I. The validation, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1905-1911.

50. \* Kokhanovsky, A. A., W. von Hoyningen-Huene, S. Noel, K. Gerilowski, H. Bovensmann, K. Bramstedt, M. Buchwitz, J. P. Burrows, 2006: The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY: II. The application to MERIS and SCIAMACHY data, *Atmos. Chem. Phys.* 6, 4129-4136.
51. \* Kokhanovsky, A. A., W. von Hoyningen-Huene, S. Noel, K. Gerilowski, H. Bovensmann, K. Bramstedt, M. Buchwitz, J. P. Burrows, 2006: The semianalytical cloud retrieval algorithm for SCIAMACHY: II. The application to MERIS and SCIAMACHY data, *Atmos. Chem. Phys. Discussions*, 6, 1-28.
52. Kokhanovsky, A. A., V. V. Rozanov, M. Vountas, W. Lotz, H. Bovensmann, J. P. Burrows, 2006: The SCIAMACHY cloud products derived using the semi-analytical cloud retrieval algorithm, CD-ROM Proc. of Atmospheric Science Conference, Frascati, May 8-12.
53. \* Nauss, T., Kokhanovsky, A. A., 2006: Discriminating raining from non-raining clouds at mid-latitudes using multispectral satellite data, *Atmos. Chem. Phys. Discussions*, 6, 1-14.
54. \* Nauss, T., Kokhanovsky, A. A., 2006: Discriminating raining from non-raining clouds at mid-latitudes using multispectral satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 5031-5036.
55. \* Rozanov, V. V., Kokhanovsky, A. A., 2006: The solution of the vector radiative transfer equation using the discrete ordinates technique: selected applications, *Atmos. Res.*, 79, 241-265.
56. \* Rozanov, V. V., Kokhanovsky, A. A., 2006: Determination of cloud geometrical thickness using backscattered solar light in a gaseous absorption band, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, 3, 250-253.
57. \* Rozanov, V. V., Kokhanovsky, A. A., D. Loyola, R. Siddans, B. Latter, A. Stevens, J. P. Burrows, 2006: Intercomparison of cloud top altitudes as derived using GOME and ATSR-2 instruments onboard ERS-2, *Remote Sensing of Environment*, 102, 186-193.
58. \* Schreier, M., Kokhanovsky, A. A., Eyring, V., Bulgario, L., Mannstein, H., Mayer, B., Bovensmann, H., Burrows, J. P., 2006: Impact of ship emissions on the microphysical, optical, and radiative properties of marine stratus: a case study, *Atmos. Chem. Phys. Discussions*, 6, 1023-1071.
59. \* Schreier, M., Kokhanovsky, A. A., Eyring, V., Bulgario, L., Mannstein, H., Mayer, B., Bovensmann, H., Burrows, J. P., 2006: Impact of ship emissions on the

- microphysical, optical, and radiative properties of marine stratus: a case study, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4562-4597.
60. von Bargaen, A., K. Kretschel, A. Doicu, M. Hess, S. Hilgers, F. Schreier, T. Schröder, C. Lerot, M. Van Roozendael, M. Vountas, A. Kokhanovsky, W. Lotz, and H. Bovensmann, 2006: The major revision of SCIAMACHY level 1B-2 off-line data processor, CD-ROM Proc. of Atmospheric Science Conference, Frascati, May 8-12.
  61. von Bargaen, T. Schröder, A. Doicu, K. Kretschel, F. Schreier, C. Lerot, M. Van Roozendael, A. Kokhanovsky, M. Vountas, and H. Bovensmann, M. Hess, B. Aberle, F. Schreier, 2006: SCIAMACHY level 1B-2 data processing: update of off-line data processor to version 3.0, SP-642 CD-ROM Proc. of the Third Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of Envisat (ACVE-3), Frascati, December 4-7, 2006.
  62. Noel, S., A. A. Kokhanovsky, O. Jourdan, et al., 2006: SCIAMACHY reflectance and solar irradiance validation, SP-642 CD-ROM Proc. of the Third Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of Envisat (ACVE-3), Frascati, December 4-7, 2006.
  63. Kokhanovsky, A. A., H. Bovensmann, K. Bramstedt, et al., 2006: SCIAMACHY cloud product validation, SP-642 CD-ROM Proc. of the Third Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of Envisat (ACVE-3), Frascati, December 4-7, 2006.
  64. \* Fournier, N., P. Stammes, M. de Graaf, R. van der A., A. Peters, R. Koelemeijer, A. Kokhanovsky, 2006: Improving cloud information over deserts from SCIAMACHY oxygen A-band measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 163-172.
  65. \* Kokhanovsky, A. A., 2005: Microphysical and optical properties of noctilucent clouds, *Earth-Science Reviews*, 71, 127-146.
  66. \* Kokhanovsky, A. A., 2005: Statistical properties of light reflected and transmitted by a thick horizontally inhomogeneous turbid layer, *J. Optical Soc. America*, A22, 2419-2423.
  67. \* Kokhanovsky, A. A., 2005: Reflection of light from particulate media with irregularly shaped particles, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 96, 1-10.
  68. \* Kokhanovsky, A. A., 2005: Phase matrix of ice crystals in noctilucent clouds, *Proc. SPIE*, 5829, 44-52.

69. \* Kokhanovsky, A. A., and T. Nauss, 2005: Satellite based retrieval of ice cloud properties using semianalytical algorithm, *J. Geophys. Res.*, D110, D19206, doi: 10.1029/2004JD005744.
70. \* Kokhanovsky, A. A., and V. V. Rozanov, 2005: Cloud bottom altitude determination from a satellite, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, 2, 280-283.
71. \* Kokhanovsky, A. A., and V. V. Rozanov, 2005: Light reflection and transmission by multilayered turbid media, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 94, 273-290.
72. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, V. V. Rozanov, 2005: A parameterization of the diffuse transmittance and reflectance for aerosol remote sensing problems, *Atmos. Res.*, 73, 37-43.
73. \* Kokhanovsky, A. A., T. Aoki, A. Hachikubo, M. Hori, E. P. Zege, 2005: Reflective properties of natural snow: approximate asymptotic theory versus in situ measurements, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 43, 1529-1535.
74. \* Nikolaeva, O. V., L. P. Bass, T. A. Germogenova, A. A. Kokhanovsky, V. S. Kuznetsov, B. Mayer, 2005: The influence of neighboring clouds on the clear sky reflectance studied with the 3-D transport code RADUGA, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 94, 405-424.
75. \* Kokhanovsky, A. A., V. V. Rozanov, J. P. Burrows, K.-U. Eichmann, W. Lotz, M. Vountas, 2005: The SCIAMACHY cloud products: algorithms and examples from ENVISAT, *Advances in Space Research*, 36, 789-799.
76. \* Rozanov, A. A., V. V. Rozanov, M. Buchwitz, A. A. Kokhanovsky, J. P. Burrows, 2005: SCIATRAN 2.0-a new radiative transfer model for geophysical applications in the 175-2400 nm spectral range, *Adv. Space Res.*, 36, 1015-1019.
77. \* Nauss, T., Kokhanovsky, A. A., T. Y. Nakajima, C. Reudenbach, J. Bendix, 2005: The intercomparison of selected cloud retrieval algorithms, *Atmos. Res.*, 78, 46-78.
78. \* Fournier, N., P. Stammes, M. de Graaf, R. van der A., A. Peters, R. Koelemeijer, A. Kokhanovsky, 2005: Improving cloud information over deserts from SCIAMACHY oxygen A-band, *Atmos. Chem. Phys. Discussions*, 5, 6013-6039.
79. \* Kokhanovsky, A. A., 2004: Optical properties of terrestrial clouds, *Earth Science Reviews*, 64, 189-241.

80. \* Kokhanovsky, A. A., 2004: The depth of sunlight penetration in cloud fields for remote sensing, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1, 4, 242-245.
81. \* Kokhanovsky, A. A., 2004: Reflection of light from nonabsorbing semi-infinite cloudy media: a simple approximation, *JQSRT*, 85, 25-33.
82. \* Kokhanovsky, A. A. and E. P. Zege, 2004: Scattering optics of snow, *Applied Optics*, 43, 1589-1602.
83. \* Kokhanovsky, A. A. and V. V. Rozanov, 2004: The physical parameterization of the top of atmosphere reflection function for a cloudy atmosphere-underlying surface system: the oxygen A-band case study, *JQSRT*, 85, 35-55.
84. Kokhanovsky, A. A. and V. V. Rozanov, 2004: Simple radiative transfer equation solutions for a cloudy atmosphere, *Proc. SPIE*, 5571, 86-93.
85. \* Kokhanovsky, A. A. and W. Hoyningen-Huene, 2004: The optical properties of a hurricane, *Atmos. Res*, 69, 165-183.
86. \* Kokhanovsky, A. A., W. Hoyningen-Huene, H. Bovensmann, J. P. Burrows, 2004: The determination of the atmospheric optical thickness over Western Europe using SeaWiFS imagery, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 42, 824-832.
87. \* Kokhanovsky, A. A., Rozanov V. V., W. von Hoyningen-Huene, H. Bovensmann, J. P. Burrows, and H. Klein Baltink, 2004: The determination of cloud altitudes using SCIAMACHY onboard ENVISAT, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., Letters*, v. 1, N3, 211-214 .
88. \* Rozanov V. V. and A. A. Kokhanovsky, 2004: The semi-analytical cloud retrieval algorithm as applied to the cloud top altitude and the cloud geometrical thickness determination from the top of atmosphere reflectance measurements in the oxygen absorption bands, *J. Geophys., Res., D*, 109, 10.1029/2003JD004104.
89. \* Rozanov V. V, A. A. Kokhanovsky, and J. P. Burrows, 2004: The determination of cloud altitudes using GOME reflectance spectra: multilayered cloud systems, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, v. 42, N5, 1009-1017.
90. \* von Savingny, C., A. A. Kokhanovsky, H. Bovensmann, K.-U. Eichmann, J. Kaiser, S. Noel, A. V. Rozanov, J. Skupin, J. P. Burrows, 2004: NLC detection and particle size determination: first results from SCIAMACHY on ENVISAT, *Advances in Space Research*, 34, 851-856.

91. Fournier, N., P. Stammes, J. R. Acarreta, H. Eskes, A. Piters, M. Hess, A. von Barga, A. Kokhanovsky, M. Grzegorski, 2004: SCIAMACHY cloud product validation, Proc. of the Second Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of ENVISAT (ACVE-2), ESA-ESRIN, Frascati, Italy, 3-7 May 2004 (ESA SP-562, August 2004) ESC01ps.
92. \* Kokhanovsky, A. A., 2003: The influence of horizontal inhomogeneity on radiative characteristics of clouds: an asymptotic case study, IEEE Transactions, Geosciences and Remote Sensing, 41, 817-825.
93. \* Kokhanovsky, A. A., 2003: Optical properties of irregularly shaped particles, J. Phys., D36, 915-923.
94. \* Kokhanovsky, A. A., 2003: Optical properties of semi-infinite turbid media: some simple analytical approximations, Optical Engineering, 42, 2040-2046.
95. \* Kokhanovsky, A. A., V. V. Rozanov, 2003: The reflection function of optically thick weakly absorbing turbid layers: a simple approximation, J. Quant. Spectr. Rad. Transfer, 77, 165-175.
96. \* Kokhanovsky, A. A., B. Mayer, 2003: Light reflection and transmission by non-absorbing turbid slabs: simple approximations, J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 5, 43 – 46.
97. \* Kokhanovsky, A. A., V. V. Rozanov, E. P. Zege, H. Bovensmann, and J. P. Burrows, 2003: A semi-analytical cloud retrieval algorithm using backscattered radiation in 0.4-2.4 micrometers spectral range, J. Geophys. Res., 108, D1, 4008, 10.1029/2001JD001543.
98. \* Miao, J., K.-P. Johnsen, S. Buehler, A. Kokhanovsky, 2003: The potential of polarization measurements from space at mm and sub-mm wavelengths for determining cirrus cloud parameters, Atmospheric Chemistry and Physics, Discussions, 3, 39-48.
99. \* Kokhanovsky, A. A., 2002: The statistical properties of a photon gas in random media, Phys. Rev., E, 66, 037601-1 - 037601-1 .
100. \* Kokhanovsky, A.A., 2002: A simple approximate formula for the reflection function of a homogeneous semi-infinite turbid medium, J. Opt. Soc. America, A19, 957-960.

101. \* Kokhanovsky, A.A. , 2002: The accuracy of selected approximations for the reflection function of a semi-infinite turbid medium, *J. Appl. Phys.: D*, 35, 1057-1062.
102. \* Kokhanovsky, A. A., 2002: Reflection and polarization of light by semi-infinite turbid media: simple approximations, *J. Colloid and Interface Science*, 251, 429 - 433.
103. Kokhanovsky, A. A., 2002: Analytical solutions of multiple light scattering problems: a review, *Measurement Science and Technology*, 13, 233-240.
104. Kokhanovsky, A. A., 2002: Optics of turbid slabs, *European Journal of Physics*, 23, 27-33.
105. Kokhanovsky, A. A., 2002: Polarization of light reflected from water clouds: approximate analytical solutions, *Proc. of SPIE*, v. 4539, p.41-48.
106. \* Kokhanovsky, A. A., A. R. Jones, 2002: The cross polarization of light by large nonspherical particles, *J. Appl. Phys., D*, 35, 1903-1906.
107. \* Kokhanovsky, A. A., R. Weichert , 2002: The determination of the droplet effective size and optical depth of cloudy media from polarimetric measurements, *Applied Optics*, 41, 3650-3658.
108. \* Kokhanovsky, A. A., 2001: Reflection and transmission of polarized light by optically thick weakly absorbing random media, *J. Opt. Society America*, A18, 883-887.
109. Kokhanovsky, A. A., 2001: Polarization of light reflected from weakly absorbing media: approximate theory, *J. Aerosol Science*, 32, S985-S986.
110. Kokhanovsky, A. A., 2001: Simple relationships between radiative and microphysical characteristics of cloudy media, *Proceedings of the International Radiation Symposium*, St Petersburg, Russia, 24-29 July 2000 (ed. By W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev), p. 315- 318.
111. \* Kokhanovsky, A. A. and R. Weichert, 2001: Multiple light scattering in laser particle sizing, *Appl. Opt.*, 40, 1507-1513.
112. \* Kokhanovsky, A. A., R. Weichert, M. Heuer and W. Witt, 2001: Angular spectrum of light transmitted through turbid media: theory and experiment, *Appl. Opt.*, 40, 2595 - 2600.
113. Kokhanovsky A. A. , 2000: The determination of the effective radius of drops in water clouds from polarization measurements, *Phys. Chem. Earth (B)*, 25, 471-474.

114. \*Kokhanovsky, A. A., 2000: The tensor radiative transfer equation, *J. Phys. A: Math. Gen.*, 33, 4121 – 4128.
115. \*Kokhanovsky, A. A., and A. Macke, 1999: The dependence of radiative characteristics of optically thick media on the shape of particles, *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, 63, 393-408.
116. \*Kokhanovsky, A. A., 1998: On light scattering in random media with large densely packed particles, *J. Geophys. Res. D*, 103, 6089 -6096 .
117. \*Kokhanovsky A. A.,1998: Reflection of light from semi-infinite turbid media, *J. Opt. Society America*, A15, 2877-2888.
118. Kokhanovsky, A. A., and E. P. Zege, 1998: On remote sensing of water clouds from space, *Advances in Space Research*, 21, 425 - 428.
119. \*Kokhanovsky, A. A., and T. Y. Nakajima, 1998: The dependence of phase functions of large transparent particles on their refractive index and shape, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31, 1329-1335.
120. \*Kokhanovsky, A. A., V. A. Babenko, and V. V. Barun, 1998: Geometrical optics scattering by spherical particles between two angles, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 31, 1817-1822.
121. \*Kokhanovsky, A. A., T. Nakajima., and E. P. Zege, 1998: Physically - based parametrizations of short-wave characteristics of weakly absorbing media: application to liquid water clouds, *Applied Optics*, 37, 4750-4757.
122. \*Кохановский А.А., 1997: К разложению фазовой функции крупных частиц по полиномам Лежандра, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 33, 692-696.
123. \*Кохановский А.А., Э.П. Зеге, 1997: Физическая параметризация локальных оптических характеристик облачных сред, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 33, 209-218.
124. \*Зеге Э.П., А.А. Кохановский, 1997: Сферическое альbedo снежного поля, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 33, 719-720.
125. \*Kokhanovsky, A. A., 1997: On small-angle approximations of the radiative transfer theory, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 30, 2837-2840.
126. \*Kokhanovsky, A. A., and A. Macke, 1997: Integral light scattering and absorption characteristics of large nonspherical particles, *Appl. Opt.*, 36, 8785 - 8790.

127. Kokhanovsky, A. A., and E. P. Zege, 1997: Optical properties of aerosol particles: a review of approximate analytical solutions, *J. Aerosol Sci.*, 28, 1-21.
128. \* Кохановский А.А., В.А. Бабенко, 1996: Параметр асимметрии для крупных сферических частиц, *Оптика и спектроскопия*, 81, 292-298.
129. \* Кохановский А.А., Э.П. Зеге, 1996: К определению эффективного радиуса и водозапаса водных облаков, *Исследование Земли из космоса*, 2, 33-44.
130. \* Зеге Э.П., А.А. Кохановский, 1996: К расчету коэффициентов ослабления облаков и грубодисперсных аэрозолей в видимой и ближней ИК области спектра, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 32, 172-174.
131. \* Кохановский А.А., 1995: Влияние краевых эффектов на поглощение света слабо поглощающими частицами, *Опт. и спектр.*, 78, 875-877.
132. Kokhanovsky, A. A., 1995: Geometrical optics approximation for coefficients of expansion of phase function in Legendre polynomials, *J. Aerosol Sci.*, 26, 289-290.
133. \* Kokhanovsky, A. A., and E. P. Zege, 1995: Local optical parameters of spherical polydispersions: simple approximations, *Appl. Optics*, 34, 5513-5519.
134. \* Зеге Э.П., Кохановский А.А., 1994: Зависимость характеристик светового поля и оптической передаточной функции от параметров микроструктуры, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 30, 777-783.
135. Kokhanovsky, A. A., and E. P. Zege, 1994: Coherence of a light field in an optically dense aerosol layer, *J. Aerosol Sci.*, 25, S511-S512.
136. Kokhanovsky, A. A., and E. P. Zege, 1994: Light scattering and absorption by large aerosol particles: geometrical optics approximation with account for edge effects, *J. Aerosol Sci.*, 25, S517-S518.
137. \* Zege, E. P., and A. A. Kokhanovsky, 1994: Analytical solution for the optical transfer function of a light scattering medium with large particles, *Appl. Optics*, 33, 6547-6554.
138. Zege, E. P., and A. A. Kokhanovsky, 1993: On the problem of optical particle sizing of coarse dispersed aerosols of any optical thickness. *J. Aerosol Sci.*, 24, S77-S78.
139. \* Зеге Э.П., Кохановский А.А., 1992: К определению размеров крупных частиц в условиях многократного светорассеяния, *Опт. и спектр.*, 72, 121-124.

140. \*Зеге Э.П., Кохановский А.А., 1991: Модель амплитудно-фазового экрана в оптике плотноупакованных сред, *Опт. и спектр.*, 70, 367-370.
141. \*Зеге Э.П., И.Л. Кацев, Кохановский А.А., 1991: Феноменологическая модель оптических свойств плотноупакованных сильно рассеивающих слоев и ее применение к оптике пен, *Опт. и спектр.*, 71, 486-489.
142. \*Кохановский А.А., 1990: Рассеяние света крупными двухслойными частицами: приближение геометрической оптики, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 27, 697-701.
143. Zege, E. P., I. L. Katsev, and A. A. Kokhanovsky, 1990: Analytical methods as applied to the aerosol optics. *J. Aerosol Sci.*, 21, S559-S562.
144. \*Кохановский А.А., 1989: Приближение геометрической оптики для сечения поглощения крупной сферы, *Оптика атмосферы и океана*, 2, 908-912.
145. \*Зеге Э.П., Кохановский А.А., 1989: К приближению аномальной диффракции для двухслойных сфер, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 26, 883-887.
146. \*Зеге Э.П., Кохановский А.А., 1988: Интегральные характеристики рассеяния света крупными сферическими частицами, *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*, 24, 508-512.