

**Государственное учреждение  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»**

на правах рукописи

Покровский Игорь Олегович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЬБЕДО СИСТЕМЫ ПОЧВА-РАСТИТЕЛЬНОСТЬ ПО  
ДАНЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ МНОГОУГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2007**

Диссертация выполнена в Государственном учреждении  
«Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова»

**Научный руководитель:** проф., доктор физико-математических наук  
Олег Михайлович Покровский

**Официальные оппоненты:** проф., доктор физико-математических наук  
Игорь Леонидович Кароль

проф., доктор физико-математических наук  
Александр Витальевич Кондратьев

**Ведущая организация:** Российский государственный  
гидрометеорологический университет.

Защита состоится 23 мая 2007 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д327.005.01 при Государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7.

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

Автореферат разослан 21 апреля 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор географических наук

*А. Мещер*

А.В. Мещерская

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы и состояние вопроса.

В последней четверти двадцатого века наблюдается резкое изменение климата Земли. К числу важнейших компонентов климатической системы относится альbedo, которое представляет собой долю солнечной энергии, отраженной от земной поверхности. Альbedo также характеризует долю солнечной энергии, поглощенной поверхностью и преобразующейся в явное и скрытое тепло. По современным оценкам на долю альbedo приходится около 8% энергетического баланса Земли. В отличие от альbedo морской поверхности альbedo суши подвержено значительным пространственным и временным изменениям. Наиболее существенные колебания характерны для альbedo снежного и ледового покрова, что обуславливает особую важность решения данной задачи с учетом климатических условий России. Часть изменчивости альbedo непосредственно связана с хозяйственной деятельностью человека: сведение лесов, расширение площадей сельскохозяйственного назначения и др. Изменения климата (количества выпадающих осадков, температуры воздуха и почвы), влияющие на сдвиг фаз вегетации, оказывают определенное влияние на годовые и месячные величины альbedo, их годовой ход. Это, прежде всего, касается *системы почва-растительность* (СПР), характерной для большей части поверхности суши. Поэтому на протяжении многих лет именно альbedo растительных покровов привлекает особое внимание исследователей. Если сравнивать масштаб пространственной изменчивости альbedo СПР со стандартными метеорологическими величинами (температура воздуха, атмосферное давление, скорость ветра, осадки), то становится понятно, что он минимален по сравнению с тем, чем нам приходится иметь дело в метеорологии. Для температуры и давления в свободной атмосфере характерны масштабы, составляющие тысячи км, для скорости ветра – сотни км, для осадков – десятки км. Для альbedo СПР за исключением протяженных однородных поверхностей (пустыни, степи) характерны масштабы, составляющие десятки или сотни м. Поэтому, измерения альbedo, проводимые на площадках метеорологических станций, которые представляют собой лужайки с травяным покровом летом и снежным покровом зимой, следует считать недостаточно репрезентативными при изучении климата и его изменений. На заре радиационных исследований делались предположения о применимости изотропного закона отражения солнечного света поверхностью суши. Однако, позднее было показано, что в случае СПР, такое упрощение неприемлемо, поскольку оно не учитывает многократное рассеяние света внутри растительного покрова, а также рассеяние между соседними кронами (стеблями), поверхностью почвы и атмосферой. Это привело к развитию теории и практики изучения *бинаправленной функции распределения отражения* (БФРО) солнечной радиации для растительных покровов (в английском оригинале Bidirectional Reflectance Distribution Function - BRDF). БФРО описывает отражение света, пришедшего в одном направлении и ушедшего в другом. Развитие работ по изучению БФРО шло параллельно и согласованно с

разработкой спутниковых систем *многоугловых дистанционных измерений*, которые должны были обеспечивать определение БФРО для земных ландшафтов путем решения обратной задачи теории переноса коротковолновой (КВ) радиации в СПР. Для информационного обеспечения спутникового мониторинга альbedo СПР в 1970-1990-х годах было проведено много полевых и лабораторных исследований БФРО. Наиболее полный и всесторонний цикл натурных исследований провел Каймс, который изучил БФРО для всех важнейших типов поверхностей (лиственные и хвойные леса, тундра, поля зерновых и масличных культур, кустарники, степи, луга, почвы и пашня) в различных районах Земли. Его работы послужили основой для постановки и решения обратных задач дистанционного зондирования объектов СПР, включая альbedo. До недавнего времени считалось, что спутниковая информация об альbedo СПР, прежде всего, должна использоваться в климатических моделях, например, моделях общей циркуляции атмосферы. Однако, позднее стало ясно, что область применения указанных данных оказывается значительно шире и включает следующие области исследований: 1) Реанализ данных наблюдений; 2) Землепользование и менеджмент в области охраны окружающей среды; 3) Применение в лесном и сельском хозяйстве; 4) Изучение биомассы растительности и солнечной энергии с точки зрения оценки возобновляемых источников энергии и стока углекислого газа из атмосферы; 5) Климатологические оценки изменений климата на основе анализа временных рядов данных.

### **Цель работы и задачи исследования.**

Данная работа ориентирована на разработку и реализацию методов восстановления альbedo СПР по данным многоугловых дистанционных измерений с целью положить начало отечественным исследованиям в этой области. В задачи исследования входили: формирование ансамблей угловых зависимостей БФРО и альbedo для разных типов поверхностей, выбор оптимальных условий измерений и разработка методов регуляризации, обеспечивающих устойчивое решение обратной задачи даже в условиях недостаточного числа дистанционных угловых измерений.

### **Научная новизна работы**

Впервые в отечественной практике предпринята попытка целостного рассмотрения задачи восстановления БФРО и альbedo по данным многоугловых дистанционных измерений. Благодаря использованию нового статистического метода решения обратной задачи, впервые удалось получить теоретические оценки погрешностей восстановления угловых зависимостей БФРО и спектрального альbedo для разных типов поверхностей. Более того, впервые в мировой практике поставлена и решена задача определения оптимальных условий проведения эксперимента. Выявлены наиболее информативные направления визирования применительно к различным типам растительных покровов. При использовании оптимальных углов визирования достигается наиболее высокая точность восстановления угловых зависимостей БФРО и спектрального альbedo.

### **Практическая значимость**

Результаты диссертации позволяют сформулировать основные рекомендации для разработки предложений, касающихся характеристик бортового спутникового сканирующего радиометра, предназначенного для мониторинга альbedo поверхности суши и биофизических свойств растительности. Статистический метод решения обратной задачи с учетом накопленной априорной информации может быть использован в оперативной схеме обработки многоугловых дистанционных измерений при восстановлении спектральных БФРО и альbedo при недостаточном числе угловых измерений, часто имеющем место на практике.

### **Достоверность**

Достоверность изложенных результатов обеспечена положительными результатами сравнения значений БФРО и альbedo для разных типов поверхностей, полученных по спутниковым данным, относящимся к разным спутниковым системам, и по сопоставимым наземным измерениям.

### **На защиту выносятся следующие положения**

1. Соответствие между разными типами поверхностей системы почва-растительность (леса, поля зерновых и масличных культур, луга, степи, пашня, и др.) и параметрическими моделями БФРО, которое обеспечивает наиболее точное восстановления альbedo поверхности.
2. Новый статистический метод решения обратной задачи восстановления угловых зависимостей БФРО и спектрального альbedo, позволяющий получить теоретические оценки погрешностей для разных типов поверхностей.
3. Диапазоны угловых координат (зенитный и азимутальный углы визирования, высоты Солнца), обеспечивающие наиболее высокую точность восстановления БФРО и альbedo при минимальном числе измерений для разных типов поверхностей.
4. Статистические характеристики ансамблей угловых зависимостей БФРО и альbedo для разных видов поверхностей, полученных по данным наземных и спутниковых наблюдений.

### **Личный вклад автора**

Автор участвовал в определении целей и задач исследования, самостоятельно проводил численные эксперименты по решению прямой и обратной задачи восстановления БФРО и альbedo для разных типов СПР. Автором выполнена обработка многочисленных массивов данных наземных и спутниковых многоугловых измерений, осуществлено применение традиционных и разработка новых методов при решении задачи обращения данных многоугловых дистанционных измерений для определения альbedo. Установлены наиболее информативные области для угловых измерений и условий освещенности при визировании разных видов объектов СПР. Продемонстрированы перспективы применения метода оптимального планирования эксперимента для повышения точности определения альbedo. Проведена оценка точности решения обратной задачи при разных условиях проведения многоугловых наблюдений.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты представляемой работы докладывались на четырех международных конференциях:

- Международная конференция по дистанционному зондированию окружающей среды IGARSS (Тулуза, Франция, 2003).
- XXXI-ый международный симпозиум по дистанционному зондированию окружающей среды-ISRSE (Санкт-Петербург, 2005)
- Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация» МСАР-2006 (Санкт-Петербург, 2006);
- XIII-ый международный симпозиум по оптике атмосферы и океана (Томск, 2006)

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 работ, список которых приведен в конце автореферата. 4 статьи опубликовано в рецензируемых журналах.

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 111 наименований. Объем диссертации составляет 109 страниц, из которых 23 страницы заняты 27 рисунками. В тексте диссертации приводится 7 таблиц.

Работа частично выполнена при поддержке гранта РФФИ № 02-05-64757. Автор участвовал в работах по созданию оперативной системы восстановления альbedo суши в рамках европейского проекта LANDSAF в Meteo-France (Франция), получая поддержку от Европейского Агентства по Метеорологическим Спутникам (EUMETSAT) в 2002-2003 гг.

## **2 СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Во введении** дается обоснование актуальности проблем, которые решаются в диссертации, формулируются цели и основные задачи работы, показывается ее новизна и практическая ценность, излагается краткое содержание работы.

**Глава 1** содержит обзор состояния рассматриваемой проблемы и литературы, посвященной анализу данных наземных и спутниковых наблюдений БФРО и альbedo суши. В **п.1.1** представлена общая схема решения задачи определения альbedo суши (рис.1). Эта схема включает следующие блоки: многоугловые измерения отраженной радиации на верхней границе атмосферы, модуль атмосферной коррекции, обеспечивающий пересчет значений радиации на уровень нижней границы атмосферы, блок решения обратной задачи восстановления БФРО, модули расчета значений спектрального и интегрального альbedo по данным БФРО. В **п.1.2** даны определения основных физических величин, используемых в исследовании: спектральное и интегральное альbedo, альbedo «белого» и «черного неба», БФРО. Представлено описание БФРО с помощью параметрической линейной модели, представляющей собой

комбинацию нескольких ядер, каждое из которых отвечает за определенный вид рассеяния света в СПР: внутри кроны растения, между соседними кронами, между кронами и грунтом (п.1.3). Показано, что матрица решения обратной задачи восстановления БФРО оказывается плохо обусловленной, ввиду слабой зависимости ядер модели БФРО от условий освещенности и углов визирования. Рассмотрены примеры схем угловых измерений, предусмотренных в существующих спутниковых системах AVHRR/NOAA, SEVIRI/MSG, POLDER/ADEOS, MODIS/AQUA.



**Рис.1.** Общая схема алгоритма определения альбедо СПР по данным спутниковых многоугловых измерений

Показано, что геометрия угловых измерений обеспечивает необходимый диапазон вариации углов визирования и высот Солнца только для двух последних спутниковых систем. Это обстоятельство ставит на повестку дня вопрос об определении оптимальных условий измерений, которые бы обеспечивали повышение точности решения обратной задачи. В п.1.4 дается описание метода расчета передаточного оператора для атмосферной коррекции спутниковых измерений. Методы расчета спектральных альbedo по данным БФРО рассмотрены в п.1.5. Переход от спектральных к интегральным значениям альbedo обсуждается в п.1.6. Делается заключение, что основным ресурсом для повышения точности восстановления БФРО и альbedo является оптимальный выбор геометрии эксперимента (углы визирования, высота Солнца) и совершенствование методов решения обратной задачи путем привлечения априорной информации о БФРО и альbedo.

**Глава 2** посвящена изучению вопросов приближенного представления БФРО для разных видов почв и растительности с помощью параметрических моделей. В п.2.1 рассматривается линейная форма представления БФРО:

$$\rho(\theta_v, \theta_s, \phi, \lambda) = k_{iso}(\lambda) + k_{vol}(\lambda)f_{vol}(\theta_v, \theta_s, \phi) + k_{geo}(\lambda)f_{geo}(\theta_v, \theta_s, \phi) \quad (1)$$

где  $\rho$  функция отражения при зенитном угле Солнца (ЗУС)  $\theta_s$  и зенитном угле визирования (ЗУВ)  $\theta_v$ , соответственно, при относительном азимуте (ОА)  $\phi$ , и на длине волны  $\lambda$ . Первый член в правой части (1) выражает вклад изотропного отражения. Фазовые функции для БФРО:  $f_{vol}$  и  $f_{geo}$  связаны с формированием отраженной радиации за счет основных механизмов многократного рассеяния в СПР: изотропное отражение, объемное рассеяние и геометрическая оптика. Весовые коэффициенты  $k_{iso}$ ,  $k_{vol}$  and  $k_{geo}$  характеризуют относительный вклад каждого из упомянутых механизмов и являются коэффициентами модели, которые должны быть определены из угловых измерений. Далее рассмотрены пять наиболее распространенных моделей БФРО: *Roujean (R)*, *Li-Sparse (LS)*, *Li-Sparse-Wanner (LSW)*, *Li-Dense (LD)*, *Walthal (W)*. В п.2.2 рассмотрена прямая задача расчета функции отражательной способности  $\rho$  для разных типов поверхностей. С этой целью система (1) представлена в матричной форме:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{c} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

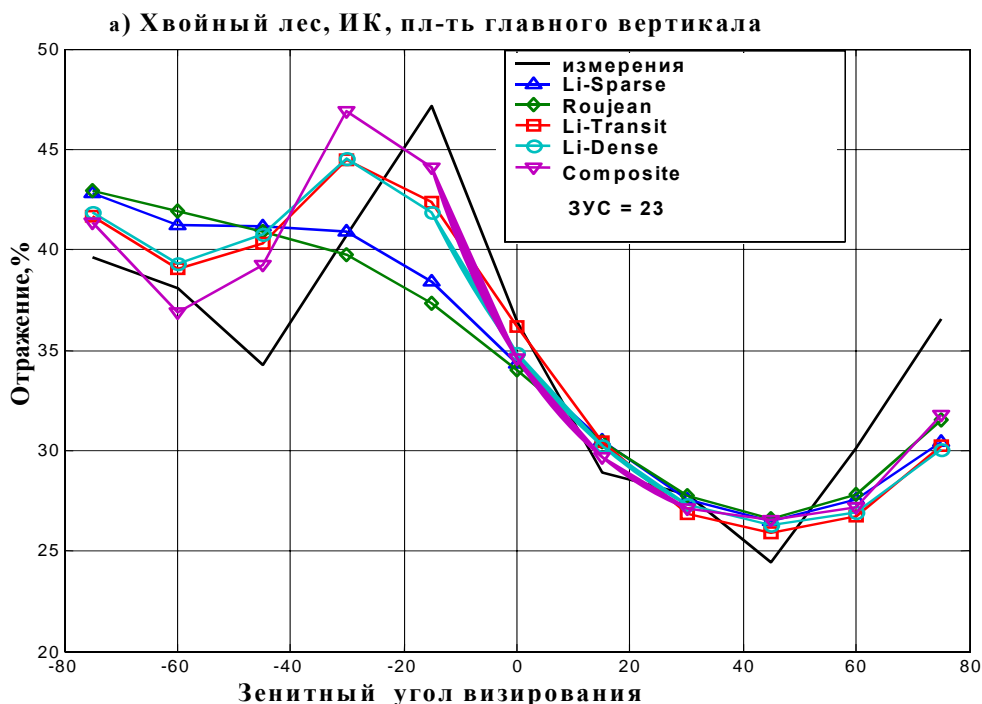
Располагая решением (2)  $\hat{\mathbf{c}}$ , полученным методом наименьших квадратов (МНК), получаем вектор остатков модели БФРО в виде:

$$\mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{A} \cdot \hat{\mathbf{c}} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (3)$$

Вектор остатков (3) модели (2) количественно характеризует степень аппроксимации каждой модели БФРО применительно к рассматриваемому объекту СПР. В этой связи введены несколько стандартных статистик для (2) и (3) (дисперсия вектора остатков, доля предсказанной дисперсии, множественный коэффициент корреляции, статистика Фишера), позволивших осуществить сравнение эффективности моделей БФРО на



количественной основе. В п.2.3 представлено описание массива данных многоугловых измерений отраженной радиации, полученных Каймсом в 1985-87 гг. в натуральных условиях на уровне нижней границы атмосферы для разных видов почвы и растительности. Этот массив включает 12 типов ландшафтов таких, как пашня, луг, степь, саванна, лиственные и хвойные леса, поля ряда зерновых культур, сои. Измерения проводились в Азии, Южной Америке, Северной Африке и в нескольких штатах США с помощью одной и той же аппаратуры. При этом угловое сканирование осуществлялось по одной и той же схеме в диапазоне ЗУВ в диапазоне от  $0^\circ$  до  $75^\circ$  с шагом  $15^\circ$ , и во всем диапазоне азимутальных углов (АУ) с шагом  $45^\circ$ . Таким образом, общее число угловых измерений одного пикселя составляло 41. Измерения велись в двух спектральных областях: в видимом (0.58-0.68 мкм) и в ближнем ИК (0.73-1.1 мкм) диапазонах. Использовался радиометр с полем зрения, равным  $12^\circ$ . Для каждого типа растительности производились измерения при трех значениях ЗУС, которые можно условно классифицировать как низкое ( $\theta_s = 45^\circ-70^\circ$ ), среднее ( $\theta_s = 30^\circ-45^\circ$ ), и высокое положение Солнца ( $\theta_s = 20^\circ-30^\circ$ ). В п.2.4. представлены результаты сравнения разных моделей БФРО при описании отражательных свойств отдельных видов почв и растительности из массива данных измерений Каймса. На рис.2 приведена детальная информация о степени аппроксимации функции отражения БФРО для хвойного леса с помощью каждой из параметрических моделей, описанных в п.2.1. Область положительных значений ЗУВ соответствует области прямого рассеяния, отрицательных – обратного рассеяния (Солнце находится за спиной наблюдателя). Область максимальных значений отражения (“hot spot”) соответствует ЗУВ= $-20^\circ$ , т.е. направлению обратного рассеяния.



**Рис. 2.** Сравнение результатов аппроксимации БФРО для хвойного леса в плоскости главного вертикала (зенитный угол Солнца -  $23^\circ$ ) в ближнем ИК диапазоне при использовании различных моделей

Приведенные данные показывают, что только модель Li-Dense, которая, в целом, имеет более низкую погрешность аппроксимации, обеспечивает наиболее точное описание функции БФРО для лиственных и хвойных лесов в области углов “hot spot”. Применение этой модели приводит к получению завышенных значений функции отражения для ряда поверхностей, например, для неполивной пшеницы, для которой характерна низкая плотность пространственного распределения стеблей. Модель W, которая рассматривается, как наименее физически обоснованная, является аутсайдером в случае поверхностей со сложной архитектурой растительности (хвойный и лиственный лес кустарники, поля зерновых). В этом случае она недостаточно хорошо описывает перенос радиации внутри крон (объемное рассеяние) и взаимодействие между кронами, стволами деревьев и стеблями растений (геометрический член модели). В тоже время, модель W дает удовлетворительные результаты для пашни и луговой травы, архитектура которой является относительно простой. В этом случае, в частности, область “hot spot” оказывается менее выраженной, а функция отражения слабо зависит от азимутального угла визирования. Путем анализа статистических характеристик подтверждается (п.2.5), что применение параметрических моделей LS, LSW и R позволяет получить наилучшие результаты для большинства типов поверхностей. Кривые, отвечающие другим моделям, лежат дальше от данных измерений. Поэтому указанные модели целесообразно использовать при решении обратной задачи.

**Глава 3** посвящена рассмотрению методов решения обратной задачи восстановления БФРО и альбедо, а также их применению для обработки данных многоугловых спутниковых измерений. В п.3.1 представлено описание используемых методов решения обратной задачи (2). Наиболее распространенными являются два таких метода: SVD и QR декомпозиции матрицы  $\mathbf{A}$  в (2). Метод QR декомпозиции основан на представлении матрицы  $\mathbf{A}$  в виде произведения  $\mathbf{A} = \mathbf{Q} \cdot \mathbf{R}$  ортогональной матрицы  $\mathbf{Q}$  и верхней треугольной матрицы  $\mathbf{R}$ . Метод SVD основан на разложении матрицы в виде произведения  $\mathbf{A} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Lambda} \cdot \mathbf{V}^T$ , в котором матрицы  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{V}$  образованы из левых и правых собственных векторов матрицы  $\mathbf{A}$ . Диагональная матрица  $\mathbf{\Lambda}$  содержит соответствующие сингулярные значения матрицы  $\mathbf{A}$ . В этом случае МНК решение (2) имеет вид:

$$\hat{\mathbf{c}} = \mathbf{A}^+ \cdot \mathbf{y} \quad (4)$$

В (4) использовано SVD представление для псевдообратной матрицы:

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Lambda}^{-1} \cdot \mathbf{V}^T \quad (5)$$

Наряду с этими алгоритмами, нами рассматривались два новых метода: расширенной регрессии (ridge regression) и регуляризации. Первый метод основан на использовании формулы для расширенной регрессии:

$$\hat{\mathbf{c}}(\beta) = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A} + \beta \cdot \mathbf{I})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{y} \quad (6)$$

где  $\beta$  является положительной константой. Рассматривается метод выбора параметра  $\beta$ . Известно, что решение по методу наименьших квадратов уравнения (2) может быть получено путем минимизации функции  $\min_{\mathbf{c}} (\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{y})^T \cdot \Sigma_{\mathbf{e}}^{-1} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{y})$ , с  $\Sigma_{\mathbf{e}} = \sigma^2 \mathbf{I}$ . Формулы Байеса для условной вероятности позволяют прийти к обобщенной форме целевой функции при использовании априорной статистики искомого решения:

$$\min_{\mathbf{c}} \{(\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{y})^T \cdot \Sigma_{\mathbf{e}}^{-1} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{c} - \mathbf{y}) + (\mathbf{c} - \bar{\mathbf{c}})^T \cdot \Sigma_{\mathbf{c}}^{-1} \cdot (\mathbf{c} - \bar{\mathbf{c}})\} \quad (7)$$

Минимум (7) является регуляризованным решением проблемы (2). **П.3.2** посвящен сравнению результатов решения обратной задачи восстановления БФРО для нескольких типов объектов СПР с использованием разных алгоритмов обращения. **П. 3.3** посвящен оценке точности восстановления коэффициентов модели БФРО. Погрешности восстановления коэффициентов модели БФРО в (2) описываются формулой:

$$\delta \bar{\mathbf{c}} = R_{MSE} T_{inv} \left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right) \mathbf{c}_R \quad (8)$$

где  $T_{inv} \left(1 - \frac{\alpha}{2}, \nu\right)$  обратная функция кумулятивного распределения

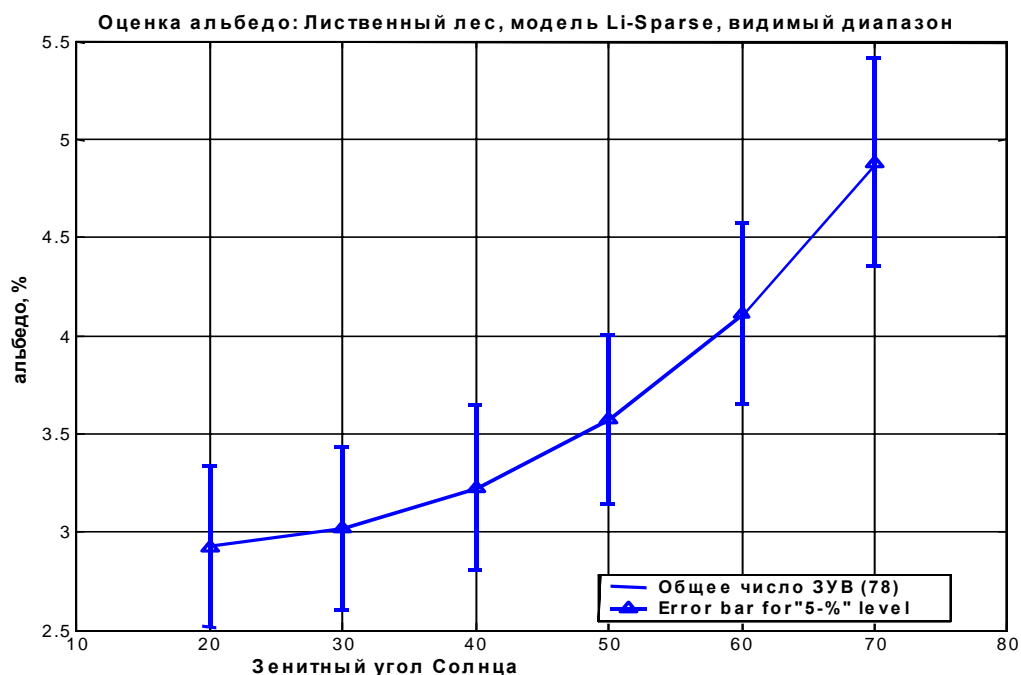
Стьюдента, отвечающего уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $\nu$ , вектор  $\mathbf{c}_R$ , входящий в (8), зависит от матрицы  $\mathbf{R}$ , фигурирующей в QR-декомпозиции, упомянутой выше. В приведенных иллюстрациях для модели LS (рис.3, рис.4) использовался 5%-ый (0,05) уровень значимости, соответствующий значению вероятности 95%. Это означает, что результаты приближенного решения обратной задачи (коэффициенты параметрической модели) с вероятностью 95% отклоняются от соответствующих истинных значений в пределах доверительных интервалов. На рис.3 представлены доверительные интервалы, полученные для разных типов поверхностей. Приведенные данные показывают, что имеет место существенная неопределенность в оценках коэффициентов параметрических моделей. Большие неопределенности, составляющие 20 - 70% относительной величины, обнаруживаются для коэффициентов, отвечающих объемному рассеянию и геометрическому взаимодействию и меньшие неопределенности (7-10%) связаны с определением изотропного отражения. Наиболее широкие доверительные интервалы получены для лиственного и хвойного лесов. При использовании 90%-го уровня вероятности (10%-го уровня значимости) второй и третий коэффициенты моделей определяются с погрешностью порядка 10-30%. При этом погрешность определения члена, ответственного за изотропное отражение составляет 10-15%. Погрешности



**Рис. 3.** Доверительные интервалы для коэффициентов модели Li-Sparse (LS) с вероятностью 95% для различных типов поверхностей: а) изотропное отражение, б) геометрическое взаимодействие, в) объемное рассеяние.

определения угловой зависимости БФРО рассмотрены в п.3.3. Нами рассмотрены результаты восстановления БФРО, основанные на 78 и 26 угловых измерений данного пикселя. Первый набор соответствует трем значениям ЗУС  $\theta_s$  ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$ ), второй – одному значению ЗУС  $\theta_s$ . Ширина доверительных интервалов, полученных для 78 угловых

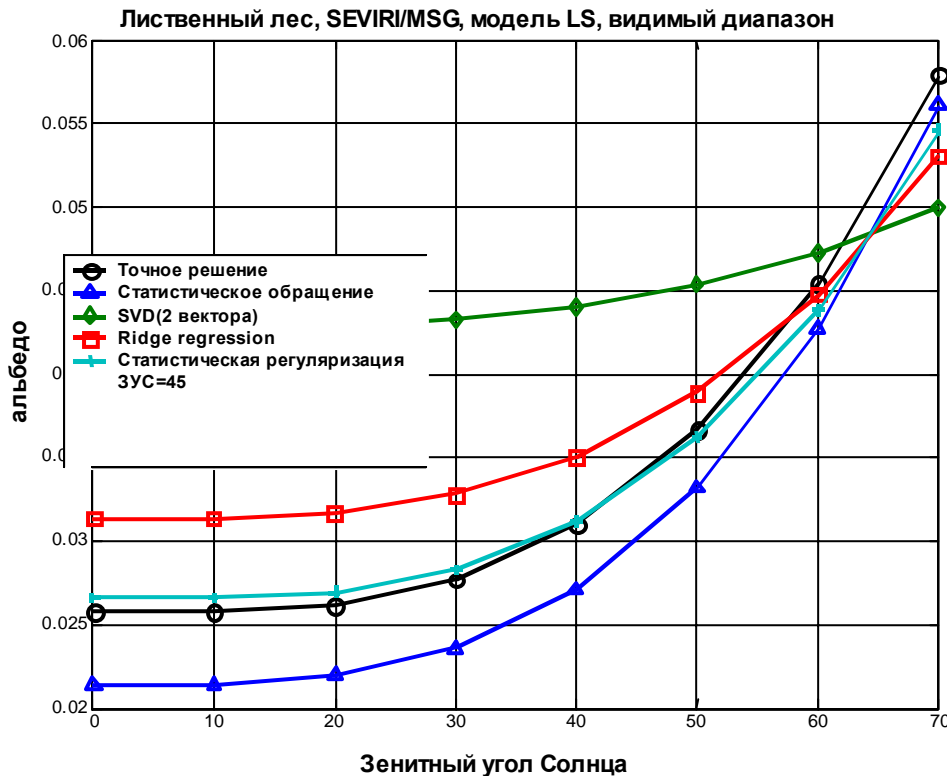
измерений, оказывается в 2-3 раза больше той, которая соответствует случаю 26 измерений. Сами восстановленные кривые расположены ближе к экспериментальным кривым также в случае использования измерений при одном значении ЗУС. Это означает, что использование данных измерений, полученных при нескольких ЗУС  $\theta_s$ , приводит к снижению точности восстановления угловой функции отражения. Отметим, что здесь мы использовали измерения при оптимальном значении ЗУС, которое обеспечивает минимальную погрешность решения обратной задачи (см. ниже результаты главы 4). Таким образом, можно считать, что измерения, полученные при других ЗУС, могут рассматриваться как избыточные. Погрешности определения угловой зависимости спектрального альbedo для разных видов объектов СПР исследованы в п.3.4. Нами использовались полиномиальные аппроксимации, описывающие зависимость альbedo от ЗУС для перехода от функции отражения БФРО к альbedo. Пример восстановления альbedo лиственного леса представлен на рис.4. В общем, полученные распределения альbedo соответствуют



**Рис.4.** Теоретическая оценка погрешностей восстановления альbedo лиственного леса в видимом диапазоне при измерениях для трех зенитных углов Солнца ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$ ) с использованием модели Li-Sparse.

принятому характеру зависимости от ЗУС  $\theta_s$ : минимум достигается в полуденное время, максимальные значения имеют место в начале и в конце светового дня. Зависимость от  $\theta_s$  характеризуется вариацией значений альbedo, составляющей, в среднем, около 20 %. Погрешности определения альbedo составляют 1-2% в видимом диапазоне спектра и 5-10% - в ближнем ИК диапазоне. Следует, однако, отметить, что

представленные результаты относились к идеализированным случаям равномерного распределения измерений по угловым координатам. В случае спутниковых измерений равномерное распределение угловых координат является скорее исключением, чем правилом. В п.3.5 представлены результаты сравнения эффективности альтернативных методов обращения, описанных в п. 3.1. Проводилось восстановление альbedo по данным измерений спутниковой системы SEVIRI/MSG. Нами было осуществлено моделирование решения обратной задачи для разных типов объектов СПР в условиях геометрии измерений с помощью системы дистанционного зондирования SEVIRI/MSG. Были вычислены значения отражательных способностей для каждого из рассмотренных типов поверхностей с помощью модели БФРО LS при постоянных значениях ЗУВ и изменяющихся значениях ЗУС и относительного азимута, соответствующих дневному ходу Солнца для точки на поверхности Земли с координатами  $45^\circ$  с.ш. и  $0^\circ$  в.д. Эта точка находится на юго-западе Франции. Далее моделированные значения БФРО были «возмущены» случайной погрешностью, составляющей 10%. Указанные погрешности должны характеризовать сумму неучтенного вклада, вносимого атмосферой в сигнал, приходящий на приемник спутникового радиометра, и ошибками измерений. Точное решение соответствует невозмущенным значениям БФРО, представленным на равномерной сетке углов. Рассмотрим лиственный лес.



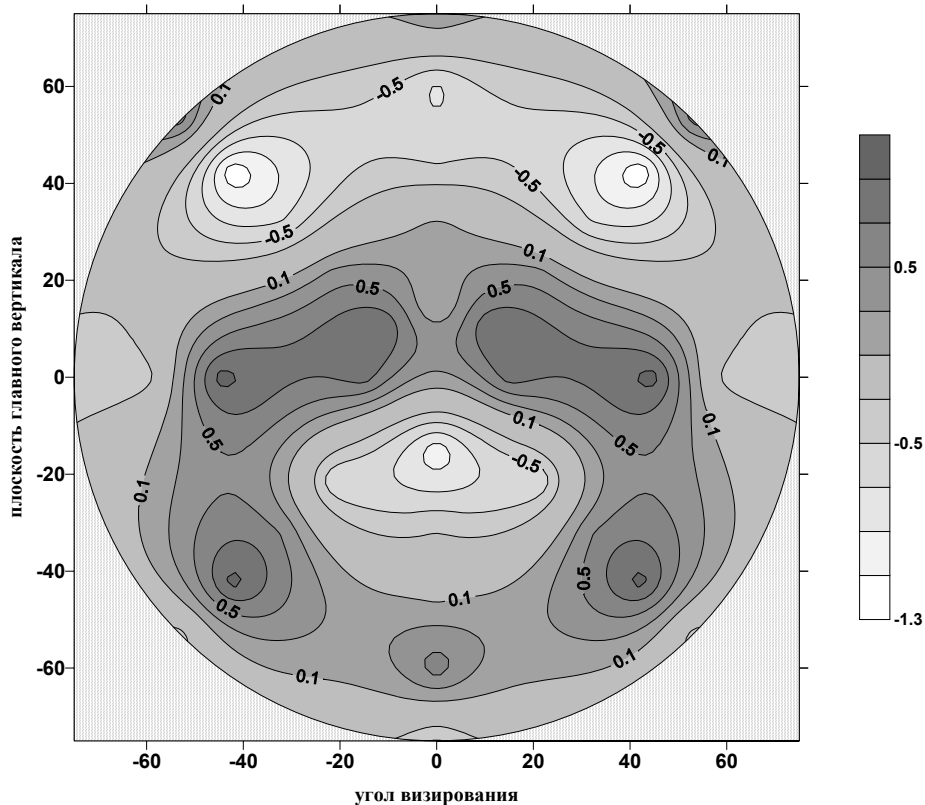
**Рис.5.** Сравнение различных методов восстановления альbedo лиственного леса в видимом диапазоне по данным измерений спутниковой системы SEVIRI/MSG

Здесь (рис.5) зависимость альbedo от ЗУС является наиболее существенной: значения меняются в 3 раза. Метод SVD дает наиболее сглаженную зависимость альbedo от ЗУС. Наиболее точное восстановление достигается с помощью метода статистической регуляризации. В этом случае относительная ошибка составляет несколько процентов. Методы статистического обращения и расширенной регрессии (*ridge regression*) дают сходные результаты по точности решения обратной задачи. Суммируя полученные результаты, полученные для разных видов объектов СПР, отметим, что наиболее выраженная зависимость альbedo от ЗУС, имеющая место для плотной растительности (леса, поливная пшеница, травостой), лучше всего восстанавливается с помощью метода статистической регуляризации. Напротив, в случае слабых зависимостей альbedo от ЗУС для пашни и редкой растительности успешными оказываются более простые методы: QR обращения и расширенной регрессии. В целом, наши оценки показывают, что погрешности определения альbedo составляют 1-4% в видимом диапазоне спектра и 8-15% - в ближнем ИК диапазоне.

**Глава 4** посвящена решению задачи определения оптимальных условий многоугловых измерений. В п. 4.1. определено понятие ядро и образ для матрицы  $A$ , информационной матрицы Фишера. Формулировка задачи оптимального выбора угловых наблюдений представлена в п.4.2. Дается постановка задачи оптимального планирования эксперимента. Представлены выражения для «А» и «Д» критериев оптимизации («след» и определитель матрицы Фишера), описан пошаговый алгоритм поиска максимума целевого функционала. Дается определение плана эксперимента и выражение для соответствующей функции отклика. В п.4.3 рассмотрено применение этой теории к данным измерений Каймса, выполненным для разных типов СПР. Анализ вклада погрешностей моделей БФРО при оценках информативности измерений представлен в п.4.4 (рис.6). Для поля неполивной пшеницы графики угловых зависимостей, полученных с помощью БФРО моделей LS и R, в целом схожи. Но имеются некоторые отличия в двух плоскостях: главного вертикала ( $\phi=0^\circ$ ) и в перпендикулярной плоскости ( $\phi=90^\circ$ ). Например, максимум невязки достигается в перпендикулярной плоскости при использовании модели LS и в плоскости главного вертикала для модели R. Для первой модели эффект обратного рассеяния в области углов *hot spot* (т.е., где коэффициент отражения достигает максимальных значений) является недостаточно выраженным из-за низкой пространственной плотности стеблей, предусмотренной в данной модели. Следует отметить, что для обеих моделей невязки становятся отрицательными в плоскости, отвечающей азимутальному углу  $\phi = 135^\circ$ . Это может быть объяснено тем, что обе модели используют одинаковую параметризацию для объемного рассеяния. В целом, обе рассмотренные модели БФРО дают завышенные значения отражательной способности СПР в области рассеяния вперед и вне плоскости главного вертикала из-за недостатков аппроксимации

физического механизма объемного рассеяния. Напротив, модельные оценки в области углов *hot spot* регулярно занижены. Хотя невязки между модельными оценками и измерениями являются лишь одним из факторов, влияющих на точность восстановления БФРО и альbedo, учет их позволяет

Отклонения Li-Sparse модели от измерений для неполивной пшеницы в видимом диапазоне ЗУС=32

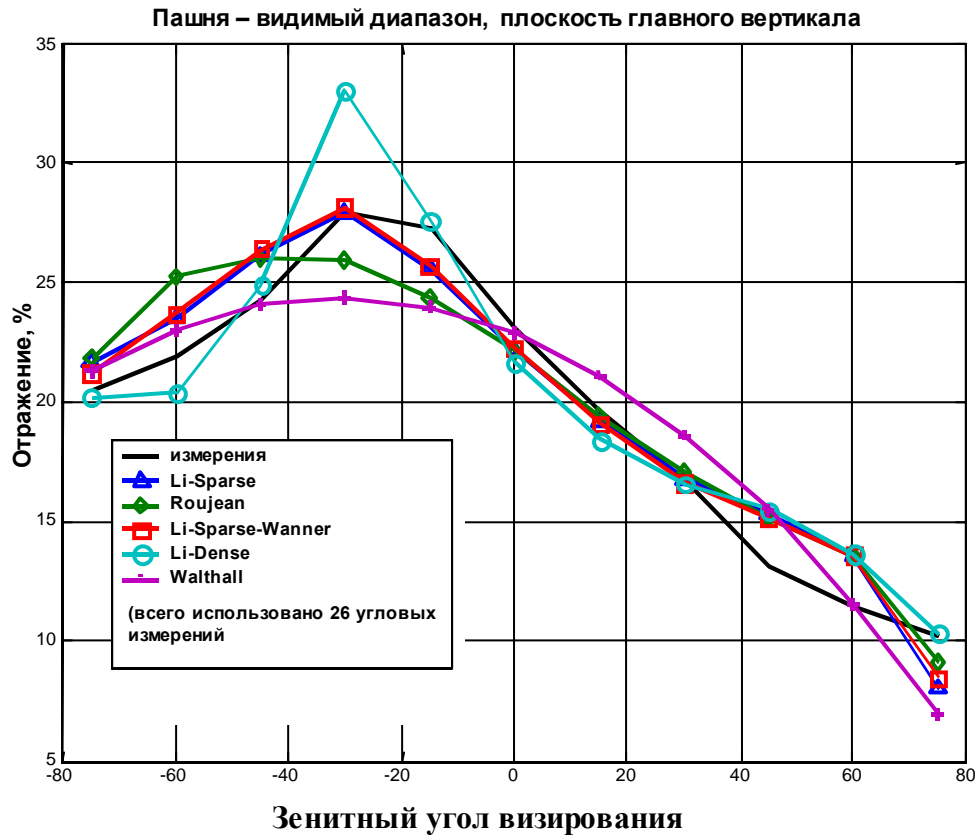


**Рис. 6.** Расхождение между измеренными значениями БФРО (по данным (Kimes, 1983)) и результатами моделирования БФРО для *неполивной пшеницы* в полярной системе координат: зенитный (радиус-вектор) и азимутальный (азимут) углы визирования для видимой области спектра в случае ЗУС=32°(Li-Sparse модель).

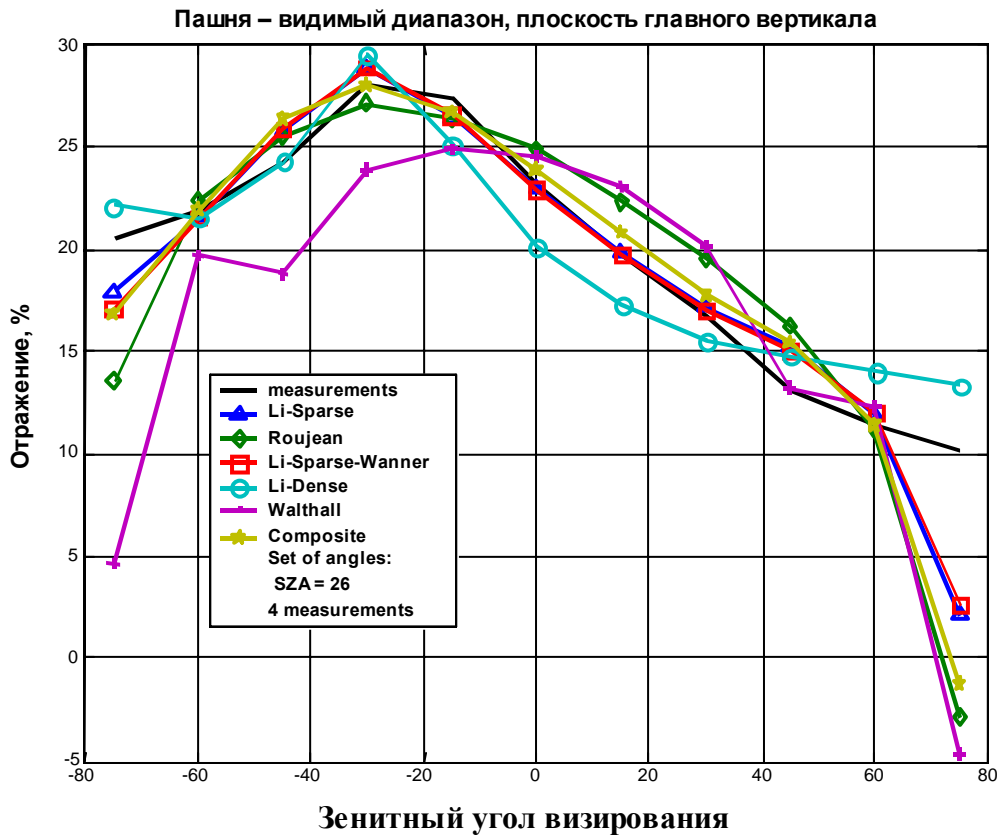
заранее определить некоторые перспективные области углов при планировании многоугловых измерений. Анализ функций отклика представлен в п.4.5. При ЗУС=30°, функция отклика модели LS имеет минимум для  $\phi=180^\circ$ , т.е. в области прямого рассеяния. Функция отклика быстро возрастает при приближении азимутального угла к положению главного вертикала  $\phi=0^\circ$ . Ее величина превышает среднее значение, достигаемое в области *hot spot*, при ЗУС=30° и ЗУС=45°. Для ЗУС=60°, функция отклика для обеих моделей демонстрирует наиболее обширную область минимальных значений функции отклика по сравнению с другими ЗУС. Это указывает на то, что указанная область больших значений ЗУС может быть рекомендована для уменьшения вклада «шума» модели и наблюдений. В п.4.6 представлены примеры оптимальных схем измерений. Информационное насыщение наступает, как правило, после отбора 4-6



а)



б)



**Рис.7.** Сравнение результатов восстановления БФРО пашни в зависимости от числа измерений (в видимом диапазоне): а) 26 измерений, б) 4 измерения

углов визирования с помощью алгоритма оптимизации. Этот результат позволяет прийти к заключению, что минимальное число углов визирования составляет 5. Оптимальные направления визирования расположены как в плоскости главного вертикала, так и в плоскости азимута  $\phi=135^\circ$ , а для ряда типов СПР в плоскостях, отвечающих азимутальным углам  $\phi=45^\circ$  и  $\phi=90^\circ$ . Оценка эффективности оптимальных схем измерений осуществлялась двумя способами: 1) экспериментами по восстановлению БФРО и альбедо, 2) диагностикой статистических характеристик. В п.4.7 представлены результаты сравнений точности решения обратной задачи при использовании полного набора угловых измерений Каймса (26 измерений при каждой высоте Солнца) и сокращенного оптимального набора, включающего 3-5 угловых измерений. Сокращенные оптимальные планы обеспечивают сходные результаты восстановления БФРО для *хвойных и лиственных лесов* в плоскости главного вертикала. В случае *неполивной пшеницы и пашни* сокращение числа угловых наблюдений позволяет получить улучшение качества восстановления БФРО в области углов «*hot spot*» (рис.7). Показано, что сокращение числа наблюдений позволяет уменьшить негативный эффект плохой обусловленности матричного оператора обратной задачи и подавить связанные с этим «выбросы» значений численного решения. В целом, оптимальная схема многоугловых наблюдений полностью оправдала себя в части касающейся точности восстановления отражательных свойств растительных поверхностей. Сокращение числа измерений в этом случае не только сохраняет точность определения БФРО, но даже улучшает качество восстановления в наиболее чувствительной области углов: «*hot spot*». В п.4.8 нами представлен анализ наиболее распространенных статистических критериев, связанных с регрессионной постановкой обратной задачи, при разном числе угловых измерений. Использовались три статистических средства диагностики: (1) стандартное отклонение, (2) статистика Фишера, (3) статистика  $R^2$ . Указанные характеристики обнаруживают наиболее существенные изменения на шагах алгоритма оптимизации  $N=3-6$ . Поскольку рассматриваемые модели БФРО включают три неизвестных коэффициента, то на первых двух шагах оптимизации выявляются сингулярные свойства решения обратной задачи: число измерений меньше числа неизвестных. Наиболее быстрая сходимость всех статистик к уровню, соответствующему полному набору, состоящему из 26 наблюдений, обнаруживается для *поливной пшеницы*. В этом случае оптимальное число угловых измерений составляет 4. Более медленная сходимость характерна для *лиственного леса*, когда статистики достигают стационарного уровня после 8 шагов оптимизационного алгоритма. В случае *пашни* мы получили результат, который можно рассматривать как промежуточный между случаями *поливной пшеницы и лиственным лесом*. В целом, полученные результаты позволяют с большей уверенностью говорить о принципиальной возможности эффективно решать обратную задачу восстановления БФРО

для растительных поверхностей по сокращенному числу угловых наблюдений, которое могут обеспечить современные спутниковые системы.

### **Заключение и выводы**

В работе получены следующие основные результаты:

1. Впервые в отечественной научной практике на систематической основе исследована проблема определения БФРО и альbedo поверхности суши по данным многоугловых дистанционных измерений.
2. Установлено соответствие между типами поверхностей системы почва-растительность и моделями БФРО, которое обеспечивает наиболее точное восстановления альbedo.
3. Выявлены зоны наиболее информативных угловых измерений отраженной солнечной радиации и условий освещенности, отвечающие разным типам растительности и почв.
4. Сформированы статистические ансамбли параметров для наиболее распространенных моделей БФРО, отвечающие разным типам объектов системы почва-растительность.
5. Выполнен значительный объем восстановления значений БФРО и альbedo для разных типов поверхностей в разных районах мира по данным спутниковых измерений, даны оценки точности получаемых величин, как на основе теоретических выражений, так и на основе сопоставления с данными наземных наблюдений.
6. Осуществлено сравнение нескольких методик обращения данных спутниковых измерений SEVIRI/MSG. Показано, что при решении данной обратной задачи методы регуляризации являются наиболее эффективными в случае плотной растительности (леса, кустарники, полевая пшеница, соя). При ограничении числа угловых измерений, имеющего место для спутниковой системы SEVIRI/MSG, методы регуляризации с использованием априорной информации являются единственным средством для получения оценок БФРО и альbedo с приемлемой точностью.
7. Представлены оптимальные схемы для многоугловых измерений, относящихся к разным видам объектов СПР: пашня, зерновые культуры, луга, лиственные и хвойные леса. Выявлены наиболее информативные направления визирования применительно к различным типам почв и растительных покровов. Использование наборов оптимальных углов измерений обеспечивает максимальную точность восстановления альbedo.

Выполненные разработки открывают пути для проведения дальнейших исследований в этом направлении. Отметим только некоторые из них:

- Разработка рекомендаций для разработки отечественных образцов бортовой аппаратуры, обеспечивающей многоугловые измерения отраженной солнечной радиации.
- Расширение круга решаемых задач в части, касающейся определения биофизических параметров системы почва-растительность, на основе использования результатов восстановления БФРО (листовой индекс, биомасса, скорость поглощения углекислого газа при фотосинтезе и др.).

- Создание оперативной системы определения альbedo системы почва-растительность на территории России по доступным данным зарубежных ИСЗ.

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Покровский И.О., Покровский О.М. 2003. Определение альbedo системы почва-растительность по данным многоугловых дистанционных измерений отраженной солнечной радиации. - *Исследования Земли из космоса*, 2003, N 5, с.6-19.
2. Покровский И.О., Покровский О.М., 2007. Многоугловые дистанционные измерения системы почва-растительность: оптимальные условия эксперимента. - *Исследования Земли из космоса*, 2007, N 1, с.14-37.
3. Pokrovsky I.O., Pokrovsky O.M. and J.-L. Roujean. 2003. Development of an operational procedure to estimate surface albedo from the SEVIRI/MSG observing system by using POLDER BRDF measurements: I. Data quality control and accumulation of information corresponding to the IGBP land cover classes. - *Remote Sensing of Environment*, v. 87, issues 2-3, p.198-214.
4. Pokrovsky I.O., Pokrovsky O.M. and J.-L. Roujean. 2003. Development of an operational procedure to estimate surface albedo from the SEVIRI/MSG observing system by using POLDER BRDF measurements: II. Comparison of several inversion techniques and uncertainty in albedo estimates. - *Remote Sensing of Environment*, v. 87, issues 2-3, p.215-242.
5. Pokrovsky I.O., Pokrovsky O.M., et J.-L. Roujean, 2003. Development of an operational procedure to estimate surface albedo from the SEVIRI/MSG observing system by using POLDER BRDF measurements. *Proceedings of IGARSS conference, Toulouse, IEEE publication*, v. VI, p.3905-3907.
6. Pokrovsky I.O., Pokrovsky O.M., et J.-L. Roujean, 2005, Operational procedure to estimate the surface albedo from the SEVIRI/MSG observing system. *Proceedings of the 31-th International symposium on remote sensing of environment, CD, Publ. by Arizona University*. - Paper PS2-3.7.
7. Покровский И.О. 2006. Применение многоугловых дистанционных измерений отраженной солнечной радиации для определения оптических свойств системы почва растительность: оптимальное планирование эксперимента.- *Международный симпозиум стран СНГ «Атмосферная радиация», тезисы докладов*, изд-во С-Пб ГУ, с. 36.
8. Pokrovsky I.O., Pokrovsky O.M., 2006. Multi-Angular Remote Sensing Measurement Implementation to Retrieve The Soil-Vegetation Land Cover Properties: Experiment Optimal Design. – *Proceedings of The XIII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics"*, Tomsk, с.78.