

**В.В. Козодеров**

## **ОБОБЩЕННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ ИЗ КОСМОСА**

Дано обобщенное описание методов количественной оценки параметров состояния природных образований по многоспектральным, многоугловым и поляризационным измерениям сканирующих спутниковых радиометров. От предшествующей постановки задачи предлагаемая отличается разделением спектральной отражательной способности в функциональном описании полей уходящего излучения на полезный сигнал, который содержит информацию о взаимодействии оптического излучения с объемом исследуемого природного объекта, и шумовую составляющую, которая обусловлена прямым отражением солнечного излучения от верхней границы соответствующего объемного слоя.

Итогом реализации предлагаемых методов является представление каждого элемента обрабатываемого изображения, классифицируемого на основе стандартных процедур распознавания образов и анализа сцен, в терминах параметров состояния выборочных наземных измерений, характеризующих конкретный класс на изображении.

### **Введение**

Основной возможностью решения различных прикладных задач по оценке состояния природных образований по снимкам или изображениям, получаемым с помощью космических средств, являются пространственные распределения яркостных образов этих образований, несущие информацию о физических свойствах, строении, структуре, контрастах, различиях в условиях солнечного освещения и т.д. Возникшие еще из аэрофотосъемки первые методы визуального дешифрирования снимков получили в дальнейшем свое развитие при интерпретации и анализе многоспектральных изображений с помощью компьютерных средств обработки данных. На смену визуально-инструментальным методам обработки спутниковых снимков стали приходиться интерактивные методы обработки матриц цифровых эквивалентов изображений разного пространственного разрешения, что позволило поставить задачу оптимальных критериев выделения различных типов природных образований в виде комбинаций типа <вегетационные индексы> [1], <показатель зеленого цвета растительности> [2] и др.

Другое направление поиска дополнительных информационных возможностей практического применения спутниковых данных связано с получением угловых распределений яркости с помощью радиометров, сканирующих поперек направления движения спутника, по конусу или даже вдоль траектории пролета. Последний вариант, который испытывался в некоторых первых спутниковых системах, строился на том предположении, что изменения спектральных образов одного и того же природного образования в конкретный момент времени под разными углами могут быть значительными, т.е. при таком сканировании можно получить дополнительные признаки различий спектральных образов исследуемых природных объектов. При этом, естественно, снижалась эффективность использования космических средств, отличительной чертой которых является стремление разработчиков к охвату больших территорий.

Вместе с тем формулировка требований к спутниковой аппаратуре определяется, как известно, характером решаемой задачи: при высоком пространственном разрешении (десятки метров) для наиболее распространенных солнечно-синхронных и полярно-орбитальных спутниковых систем полоса охвата измерениями невелика, вероятность повторного наблюдения одной и той же территории становится реальной лишь через несколько недель, а по условиям облачности – лишь через месяцы; наоборот, при низком пространственном разрешении (например, около 1 км) имеется реальная возможность регулярного покрытия измерениями всего земного шара несколько раз в сутки.

Таким образом, важной проблемой исследований Земли из космоса становится необходимость обоснования, какие конкретно задачи могут быть решены с помощью многоспектральных спутниковых изображений разного пространственного разрешения.

Большие надежды в развитии перспективных спутниковых систем связывают с получением стереоизображений одних и тех же территорий с двух разных спутников и с поляризационными спутниковыми измерениями. В первом случае появляются новые возможности одновременного развития многоспектральных и многоугловых методов, и тем самым повышается эффективность исследований различных природных образований из космоса. То же самое можно сказать об использовании поляризационных измерений, однако их роль с точки зрения дополнительного увеличения информационных возможностей спутниковой аппаратуры до конца не ясна.

Отличительная особенность поперечных электромагнитных волн (в отличие, например, от скалярных продольных волн в акустике), обуславливающая их векторное описание, приводит к тому, что одни и те же объекты (растительность, водные поверхности и т.д.) выглядят по-разному в естественном и поляризованном свете. Измерения поляризации отраженного солнечного излучения могут служить, таким образом, дополнительным признаком состояния исследуемых объектов. Многократное рассеяние отраженного излучения атмосферным аэрозолем приводит к деполаризации излучения, поэтому оценка информационного содержания спутниковых данных с точки зрения, например, поляризации отраженного от верхней границы полога леса излучения является далеко не очевидной проблемой, т.к. возможные изменения поляризации уходящего излучения могут быть связаны, в частности, с наличием слоя ориентированных ледяных кристаллов полупрозрачной перистой облачности между визируемым объектом и спутником, а не с изменениями свойств земной поверхности. Здесь и далее под пологом леса подразумевается тот объем, взаимодействие с которым падающего излучения определяет уровень полезного сигнала в поле уходящего излучения.

Рассмотрим общую постановку задачи формирования функционала яркости уходящего излучения с акцентом на изучение связей этого функционала со спектральной отражательной способностью, которая, в свою очередь, зависит от параметров, характеризующих состояние объектов исследования. Одним из таких параметров является, например, объем фитомассы растительности как один из важнейших параметров, инвариантных относительно условий визирования из космоса соответствующих типов растительности и их освещения Солнцем [3]. Будем ориентироваться на самые сложные объекты типа пространственного распределенного лесного полога, где уходящее излучение представляет собой сумму по крайней мере двух составляющих: прямого отражения от его верхней границы, не содержащего информации о свойствах полога; диффузно рассеянного излучения полога, которое несет полезную информацию о параметрах состояния типа упомянутого выше объема фитомассы. В отличие от традиционного использования теории переноса излучения и смежных с ней вопросов [4] сосредоточим основное внимание именно на функциональном описании данной проблемы, имея в виду разработку новых методов оценки параметров состояния по многоспектральным, многоугловым и поляризационным данным дистанционного зондирования с использованием наших новых приближений в решении прямых и обратных задач атмосферной оптики [5] и дополнительных подспутниковых (наземных и самолетных) измерений [3].

### **Математическая постановка задачи**

Обычно используемые при обработке аэрокосмических изображений принципы распознавания образов и анализа сцен составляют научную базу классификации объектов на обрабатываемых изображениях. Результатом классификации является представление конкретного многоспектрального изображения в виде однородных подмножеств, сгруппированных по определенным правилам принятия решений о принадлежности каждого элемента изображения к тому или иному классу с использованием заданных <алфавитов классов>, <словарей признаков> и математических процедур распознавания. Предлагается не останавливаться только на этих традиционных методах обработки данных, а для каждого из выделенных подмножеств на втором этапе обработки восстанавливать параметры состояния исследуемых объектов по наборам выборочных совместных измерений спектральных образов этих классов и соответствующих параметров состояния. Число таких <точечных> выборочных измерений или измерений на отдельных наземных трансектах в идеале должно соответствовать числу полученных классов в каждом конкретном случае обработки, т.е. каждый контур выделенных классов должен иметь

свою выборочную последовательность для дальнейшего <обучения> по ней в процессе решения обратной задачи восстановления параметров. Объектом исследования в такой постановке задачи является некоторый  $i$ -й класс, ассоциируемый с соответствующим однородным подмножеством на обрабатываемом изображении, так что термины <объект> и <класс> в данном смысле равнозначны.

Итогом реализации предлагаемых новых методов является такое преобразование расклассифицированных изображений, которое позволит представить каждый элемент соответствующего изображения в терминах инвариантных параметров состояния в отличие от неинвариантных (относительно условий освещения и визирования) спектральных образов либо неинвариантных комбинаций измерительных каналов типа упоминавшихся выше вегетационных индексов.

Исходя из всего сказанного, запишем основной функционал  $L$  отраженного излучения от  $i$ -го объекта земной поверхности в  $j$ -м спектральном канале  $k$ -й аппаратуры в виде

$$L_{ijk}^{h,v}(z_0; \theta, \varphi; \Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta s; M) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi} \cos\theta' d\theta' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [S(z_0; \lambda) + H(\theta', \varphi'; \lambda)] [\rho_i^{h,v}(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda) + \rho_i^{(1)}(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda; M)] \Pi_{jk}(\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta s; \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где каждый  $i$ -й класс характеризуется:

– условиями съемки (высота Солнца  $z_0$  и прямая солнечная радиация  $S$ , зенитный угол визирования  $\theta$  и азимут  $\varphi$ , а соответствующие углы  $\theta'$  и  $\varphi'$  определяют приходящее диффузно рассеянное излучение  $H$ );

– свойствами измерительной аппаратуры с угловым разрешением  $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ , с пространственным  $\Delta s$  и чувствительностью  $\Pi$  на длинах волн  $\lambda$ ;

– спектральной отражательной способностью  $\rho$ , которая определяется внешним строением данного класса, обуславливающим его специфическое отражение на горизонтальной  $h$  и вертикальной  $v$  поляризациях, и внутренними свойствами (объем фитомассы  $M$ ), определяющими характер взаимодействия излучения с данным типом природного образования при его разных состояниях.

Кроме перечисленных внешних условий существования конкретного  $i$ -го объекта, представленного соответствующим классом на обрабатываемом изображении, другими факторами его описания при наблюдениях из космоса являются прозрачность атмосферы и яркость атмосферной дымки (см. ниже).

Представленное в данной общей постановке задачи разделение  $\rho$  на два слагаемых  $\rho^{h,v}$  и  $\rho^{(1)}$  для каждого  $i$ -го класса связано с необходимостью выделения полезного сигнала  $\rho^{(1)}$ , несущего информацию о свойствах исследуемого объекта, на фоне шумовой компоненты  $\rho^{h,v}$ , обусловленной <чистым> отражением излучения от верхней границы соответствующего объема. Для водных объектов слагаемое  $\rho^{h,v}$  определяет Френелевское отражение от верхней границы раздела. Это слагаемое определяет также характер поляризации излучения вместе с появлением зеркальной составляющей отражения в отличие от обратного диффузного неполяризованного излучения  $\rho^{(1)}$ , несущего информацию о содержании хлорофилла, взвесей в воде и т.д.

Для таких сложных объектов, как лесные экосистемы,  $\rho^{h,v}$  определяет внешнюю сторону строения, конструкции и солнечного освещения данной конкретной системы: раскидистость крон, сомкнутость деревьев, шероховатость верхней границы полога, ориентация листьев верхнего яруса, их затенение и др. Внутреннее строение полога характеризуется соответствующими значениями  $\rho^{(1)}$ , определяющими ажурность полога, взаимодействие прошедшего под полог излучения и выходящего через верхнюю границу, пропускание полога в прямом и обратном направлениях. Понятно, что при плотном пологе полезный сигнал  $\rho^{(1)}$  будет значительно меньше, чем  $\rho^{h,v}$ . В опубликованных материалах не существует убедительных доказательств, в какой степени и когда эти величины соизмеримы или существенно различаются. Основные надежды в понимании данной проблемы связаны с проведением прецизионных измерений в наземных полевых экспериментах.

Из интуитивных соображений следует, что чем более сомкнут лесной полог и чем больше его плотность, тем более существенны трудности извлечения полезного сигнала об объеме фитомассы  $M$  из данных дистанционного зондирования. Для травянистой степной раститель-

ности эти два слагаемые оказалось возможным соединить в одно [3] при решении обратной задачи восстановления  $M$ . Необходимые доказательства возможности решения данной задачи для лесной растительности могут быть получены, очевидно, при проведении прецизионных измерений вертикальных профилей радиационных полей и строения полога леса в подспутниковых экспериментах.

Значения  $\rho^{h,v}$  ассоциируются с так называемыми функциями бинаправленного отражения  $BDRF$  (*Bidirectional Distribution Reflectance Function*) [3], хотя с помощью существующих измерений (например, с помощью аппаратуры типа *PARABOLA – Portable Apparatus for Radiation Bidirectional Observations of Land and Atmosphere*) этих функций изучается суммарный эффект направленного отражения и диффузного излучения, идущего вверх от полога леса или любого другого природного объекта. Наша уточненная постановка задачи количественной оценки параметров  $M$  диктует новые требования к составу измерительных средств соответствующих подспутниковых экспериментов.

В данной постановке задачи, как видим, такая величина, как степень поляризации излучения ( $L^h / (L^h + L^v)$ ) является лишь дополнительным признаком, характеризующим строение верхней границы полога леса, а не его внутреннюю структуру. При плотном пологе ( $\rho^{(1)} \rightarrow 0$ ) зависимость  $L$  от  $M$  становится несущественной, т.е. приходим к стандартной (вместо предлагаемой новой) постановке задачи. В другом предельном случае ( $\rho^{h,v} \rightarrow 0$ ) измерения поляризации излучения теряют смысл, но на практике это маловероятный случай, т.к. всегда существует отражение от верхней границы полога.

### Методы решения прямых и обратных задач

С точки зрения нахождения оптимальных спектральных признаков оценки состояния природных объектов и оптимизации измерительных каналов сканирующих спутниковых радиометров естественной является усовершенствованная нами концепция использования таких комбинаций каналов, как <яркость почвы>  $B$  и <показатель зеленого цвета растительности>  $G$  [6]. В отличие от исходной постановки задачи усовершенствования касаются максимального использования дополнительных (подспутниковых) измерений в общей структуре расчета коэффициентов связи ( $B, G$ ) с ( $L_1, L_2$ ) в линейных комбинациях двух выбранных каналов с номерами 1 и 2.

Наши исследования являются альтернативой уже упоминавшейся концепции вегетационных индексов – комбинаций только самих спутниковых данных без их увязки с другими (подспутниковыми) измерениями. Информационное содержание используемых нами комбинаций выше, чем при использовании вегетационных индексов, поскольку в нашем случае при анализе задействуется большее число измерительных данных, что уменьшает неопределенности результатов анализа.

Понятно, что не всегда привлечение дополнительных данных увеличивает информационное содержание конкретных данных дистанционного зондирования (многое зависит от функции ценности этих дополнительных данных для решения соответствующих задач), однако наше стремление максимально использовать существующие базы данных (например, о бореальных лесах) является положительным симптомом в деле развития геоинформационных систем (ГИС) и ГИС-технологий обработки и интерпретации данных всех типов измерений.

В обобщенной постановке задачи роль предних значений  $L_{j=1}, L_{j=2}$  из левой части (1) в выражениях для  $B$  и  $G$ :

$$B = a_1^{(B)} L_1 + a_2^{(B)} L_2; \quad (2)$$

$$G = a_1^{(G)} L_1 + a_2^{(G)} L_2, \quad (3)$$

где матрицы  $\hat{A} = \begin{pmatrix} a_1^{(B)} & a_2^{(B)} \\ a_1^{(G)} & a_2^{(G)} \end{pmatrix}$  получаются из синхронных данных дистанционных и наземных измерений на выделенных тестовых участках или трансектах методом наименьших квадратов, выполняют разности

$$\tilde{L}_{j=1} = L_{i,j=1,k}^{h,v} - \bar{\Gamma}_{i,j=1,k}^{h,v} \quad \text{и} \quad \tilde{L}_{j=2} = L_{i,j=2,k}^{h,v} - \bar{\Gamma}_{i,j=2,k}^{h,v},$$

где

$$\bar{\rho}_{ijk}^{h,v} = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{\pi} \cos \theta' d\theta' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [S(z_0; \lambda) + H(\theta', \varphi'; \lambda)] r_i^{h,v}(\theta, \varphi; \theta', \varphi'; \lambda) \Pi_{jk}(\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta s; \lambda) d\lambda \quad (4)$$

– осредненные по приходящим углам ( $\theta'$ ,  $\varphi'$ ) и спектральным каналам  $\Delta\lambda$  с границами ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ) значения отражательной способности  $i$ -го объекта в  $j$ -м канале  $k$ -й измерительной аппаратуры на горизонтальной ( $h$ ) и вертикальной ( $v$ ) поляризациях. Разные наборы матриц  $\hat{A}$  для разных наборов  $i, k, h, v$  характеризуют различия неспектральных свойств исследуемых классов природных объектов.

Наряду с таким осреднением по угловым координатам приходящего излучения и в пределах спектральных каналов используемой измерительной аппаратуры, с точки зрения понимания законов формирования спектральных образов, т.е. увязки теории с экспериментом, неизбежно осреднение полученных таким образом значений  $\tilde{L}$  по горизонтальным координатам в пределах углов  $\Delta\theta, \Delta\varphi$  поля зрения соответствующей аппаратуры с пространственным разрешением  $\Delta s$ :

$$\langle \tilde{L}(\langle M \rangle) \rangle = \int_{\Delta\theta} \int_{\Delta\varphi} \int_{\Delta s} \tilde{L}[\Delta\theta, \Delta\varphi, \Delta s, M(s)] ds d\varphi d\theta, \quad (5)$$

где осредненные значения  $\langle \tilde{L} \rangle$  характеризуют отдельные элементы разрешения спутниковой аппаратуры в пределах каждого из выделенных классов и зависят теперь лишь от  $\theta$  и  $\varphi$ . Очевидный парадокс данного осреднения по полю зрения конкретной аппаратуры дистанционного зондирования, охватывающей определенную площадь  $\Delta s$ , для <точечных> наземных измерений обусловлен необходимостью знать закон преобразования <точки> в <площадь>. В конечном итоге, нужны какие-то априорные сведения о средних значениях и соответствующих пространственных дисперсиях, характеризующих данный класс или тип природного образования.

Получение осредненных значений  $\langle \tilde{L} \rangle$  затрагивает аналогичное осреднение  $\langle M \rangle$  в пределах тех же контуров исследуемых объектов на расклассифицированных изображениях. Дальнейшим шагом в исследованиях процессов формирования спектральных образов различных природных объектов при их наблюдениях из космоса является трансформация данных  $\langle \tilde{L} \rangle$  в атмосфере с целью приведения этих данных к уровню верхней границы атмосферы на основе соответствующих моделей, обычно ассоциируемых с моделями переноса излучения [4].

Наша ориентация на максимальное использование наземных измерений при обработке спутниковых данных диктует широкое применение наземных спектрофотометрических измерений прозрачности атмосферы, характеризующей экспоненциальное ослабление прямой солнечной радиации, и найденных нами функциональных связей прозрачности атмосферы в данном спектральном интервале с яркостью атмосферной дымки, т.е. рассеянной в атмосфере радиацией, не достигающей земной поверхности [5].

Как следствие из вышеизложенного, остающаяся правая часть (1) (за вычетом из исходных спутниковых данных  $L_{ijk}^{h,v}$  значений  $\bar{\rho}_{ijk}^{h,v}$ , не зависящих от  $\langle M \rangle$ ), состоящая из значений  $\bar{\rho}_{ijk}^{(1)}$ , аналогичных (4), подвергается тем же стандартным преобразованиям, которые использовались нами для демонстрации возможностей предлагаемых методов на примере травянистой растительности [3]. Здесь имеется свой парадокс: восстанавливаемые значения  $\langle M \rangle$  по данным о  $\bar{\rho}_{ijk}^{(1)}$  (характеризующим, с одной стороны, априорные сведения о связях этой части отражательной способности с биомассой растительности, а с другой стороны, представленными конкретными значениями  $\langle \tilde{L} \rangle$  на тестовых участках обрабатываемых изображений) не зависят от измерений поляризации данных дистанционного зондирования. Связано это с тем, что, как упоминалось выше, поляризационные измерения (в применении, например, к лесному пологу) дают ценную информацию лишь о структуре верхней границы этого полога, а не о его внутреннем строении. В итоге обобщенной реализации предлагаемых методов увеличивается число наборов соответствующих коэффициентов аппроксимации, связывающих  $\langle M(z=0) \rangle$  с  $\langle G(z=H) \rangle$ , при сохранении последовательности этапов оценивания  $\langle M \rangle$ :

$$\langle M(z=0) \rangle = C_0 + C_1 \langle G(z=H) \rangle + \dots, \quad (6)$$

где  $z=0$  соответствует уровню земной поверхности;  $z=H$  – верхней границы атмосферы, а осреднение  $G(z=H, z_0, \theta, \varphi, M)$  производится в указанном выше смысле для конкретных матриц  $\hat{A}$ , определяемых значениями  $i, k, h, v$ . При этом трансформация в атмосфере интегральных для выбранных каналов спектральных сигнатур при переходе от  $z=0$  к  $z=H$  осуществляется в виде тех же преобразований типа

$$\langle \tilde{L}_j(z=H) \rangle = \langle \tilde{L}_j(z=0) P_j + D_j \rangle$$

для конкретных  $i, k, h, v$ . Здесь  $P$  – прозрачность атмосферы и  $D$  – яркость атмосферной дымки являются соответствующими матрицами преобразований, разных для  $h$  и  $v$  компонентов поляризованного излучения [4]. Тем самым исчерпывается проблема теоретического решения рассматриваемой прикладной задачи.

### Прикладные аспекты реализации новых методов

Переходя от теоретической постановки задачи к практической реализации предлагаемых методов, отметим следующие этапы:

- необходимость знания угловых координат съемки ( $z_0, \theta, \varphi$ ) для каждого элемента изображения в процедурах классификации в упомянутом выше смысле; знание этих координат является стандартным требованием в существующем математическом обеспечении обработки спутниковых изображений;

- для каждого тестового участка подспутниковых измерений, характерного для соответствующего класса на изображении, вычисляются разности исходных яркостей и отражательной способности (4) верхней границы объемного слоя ( в частности, лесного полога ); тем самым отфильтровывается полезный сигнал на фоне шумов – сигнал исключительно о свойствах объемного слоя в значениях получаемых таким образом разностей; фильтрация становится возможной, благодаря прецизионным наземным измерениям на тестовых участках;

- методом наименьших квадратов для каждого тестового участка рассчитываются матрицы  $\hat{A}$ , характеризующие взаимосвязи указанных разностей для любых двух спектральных каналов спутниковой аппаратуры с соответствующими значениями  $\langle G \rangle$  ( в случае необходимости для почвенного покрова с  $\langle B \rangle$  ); эти матрицы содержат в себе функциональные связи данных дистанционного зондирования и параметров состояния ( например, биомассы растительности ) через измеряемые значения отражательной способности выбранных тестовых участков в соответствующих спектральных каналах;

- полученные матрицы  $\hat{A}$  уточняются с точки зрения их трансформации при пересчете к уровню верхней границы атмосферы на основе измерительных данных о прозрачности атмосферы и ее функциональных связях с яркостью атмосферной дымки для каждого тестового участка;

- процесс обучения по полученным матрицам  $\hat{A}$  для каждого тестового участка заключается в использовании соответствующих матричных значений с учетом конкретных геометрических координат и условий съемки; итогом процесса обучения является преобразование текущих значений  $\langle \tilde{L} \rangle$  и  $\langle G \rangle$ , отфильтрованных в соответствии с их полезной <нагрузкой> указанными выше методами, в значения  $\langle M \rangle$  для каждого элемента спутникового изображения, но по своей обучающей выборке; всеобщая проблема оптимальной интерполяции <точечных> данных с тестовых участков в пределах выделенных контуров однородных подмножеств соответствующих классов является неотъемлемой составной частью решения обратной задачи восстановления  $\langle M \rangle$ .

Значительная часть требуемых дополнительных наземных измерений является достаточно стандартной для наземных экспериментов и наземной сети: прямое ( $S$ ) и рассеянное ( $H$ ) падающее солнечное излучение (требуется, однако, спектральные измерения в отличие от обычно используемых сетевых интегральных данных); спектральные измерения прозрачности атмосферы ( $P$ ); измерения биомассы ( в частности, объема фитомассы  $M$  ) растительного покрова.

Последние измерения чаще ассоциируются с более количественно обоснованной величиной индекса листовой поверхности  $LAI$  ( *Leaf Area Index* ). В частности, для лесного полога в

стандартных полевых измерениях вертикального профиля пропускания спектральной радиации (как отношение падающей на верхнюю границу полого радиации к приходящей на данной высоте полого) показатель экспоненты ослабления радиации содержит величину  $LAI$ . Уточнение требований к составу спектральных измерений вертикального профиля радиации внутри полого и вне его должны позволить разделить <полезную> и <паразитную> составляющую уходящего излучения в обсуждаемом здесь смысле.

Менее стандартными являются измерения величин типа  $BDRF$ , о которых говорилось выше. Эти измерения на выбранных тестовых участках также являются необходимыми в реализации предлагаемых новых методов количественной оценки параметров состояния по многоспектральным аэрокосмическим изображениям.

Понимание законов формирования отдельных элементов разрешения, характеризующих выделенный класс природных образований, потребует дополнительной информации о степени репрезентативности конкретного тестового участка для всего класса, описываемого значениями  $\langle M \rangle$  и  $\langle \tilde{L} \rangle$  (содержащего осреднение  $\langle BDRF \rangle$ ), а также их пространственными дисперсиями.

Основной научной проблемой исследований в данном направлении является понимание закономерностей формирования спектральных образов разных объектов на уровне отдельных элементов разрешения с привлечением региональных баз данных полевых экспериментов, сетей станций, биосферных заповедников и т.д. ГИС-технологии, интегрирующие соответствующие базы данных, являются основой реализации данных методов, позволяющих представить многоспектральные изображения в терминах параметров состояния, инвариантных относительно условий съемки конкретных природных образований. Эти новые информационные и методические возможности позволяют обоснованно решать насущные проблемы глобальных и региональных изменений.

## Заключение

Была изложена обобщенная постановка задачи количественной оценки параметров состояния природных образований по многоспектральным аэрокосмическим изображениям и выборочным дистанционно-наземным дополнительным измерениям на отдельных тестовых участках обрабатываемых изображений. Основой решения соответствующей задачи являются методы решения прямых и обратных задач атмосферной оптики с использованием функционального описания полей уходящего излучения в зависимости от спектральной отражательной способности, одна часть которой характеризует внешнее строение соответствующих природных объектов, а вторая зависит от параметров состояния, подлежащих восстановлению с помощью предлагаемых новых методов обработки данных дистанционного зондирования. Показаны прикладные аспекты реализации этих методов, что способствует представлению отдельных элементов классифицируемых изображений в терминах параметров состояния, получаемых при наземных измерениях на тестовых участках.

1. Curran P.J., Foody G.M., Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Fedchenko P.P. Remote sensing of soils and vegetation in the USSR. Taylor and Francis, London, 1990. 303 p.
2. Козодеров В.В., Косолапов В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 8. С. 852–859.
3. Козодеров В.В., Диринг Д.У. // Исследование Земли из космоса. 1993. № 2. С. 63–75.
4. Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Smokty O.I. Remote sensing of the Earth from Space: atmospheric correction. Springer-Verlag, Heidelberg, 1992. 410 p.
5. Козодеров В.В., Косолапов В.С. // Исследование Земли из космоса. 1993. № 5. С. 40–57.
6. Козодеров В.В., Косолапов В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 5. С. 529–538.

Институт вычислительной  
математики РАН, Москва

Поступила в редакцию  
28 марта 1994 г.

## V. V. Kozoderov. Generalized Formulation of the Problem on Assessment of the Natural Formations State from Data of Spaceborne Optical Measurements.

This paper presents a generalized description of the techniques for quantitative estimation of the state parameters of natural formations from data of spectral, angular, and polarization measurements with the spaceborne scanning radiometers. This approach differs from earlier formulations of the problem by the separation of spectral reflectivity of layers, in its functional description of the outgoing radiation fields into two parts. The first one describes interaction of optical radiation with the target volume under study while the second one represents the noise due to direct reflection of incident solar radiation from the upper boundary of the layer. As a result the use of the proposed techniques enables one to represent each pixel of the image processed, earlier classified using standard procedures of image recognition and scene analysis, in terms of the state parameters obtained from data of ground based measurements. These state parameters are characteristic of a particular class from the image.