

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

О. И. СМОКТИЙ

Санкт-Петербургский Институт Информатики и Автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-ая линия В.О., д.39, Санкт-Петербург, 199178

<soi@ias.spb.su>

УДК 528.8, 519.6 - 551.521

Смоктий О. И. Применение теории переноса излучения при оценке информативности многоспектральных спутниковых данных // Труды СПИИРАН. Вып. 5. — СПб.: Наука, 2007.

Аннотация. *Предложена концепция единого и взаимосвязанного формализованного описания решений прямых и обратных задач теории переноса излучения и имитационного моделирования множества входных оптических параметров системы «атмосфера - подстилающая поверхность», которые необходимо определить в результате дистанционного зондирования Земли из космоса. Показано, что информативность первичных оптических характеристик указанной системы и информационное содержание измеряемых (моделируемых) полей излучения играют важную роль для построения оптимальных планов космической съемки природной среды из космоса. — Библ. 22 назв.*

UDC 528.8, 519.6 - 551.521

Smokty O. I. The application of radiative transfer theory for the estimation of multispectral satellite data informational contents modeling // SPIIRAS Proceedings. Issue 5 — SPb.: Nauka, 2007.

Abstract. *The conception of joint and conciliated mathematical description connected with a direct-invers problems solutions of advanced radiative transfer theory and a modeling of input optical parameters for "the atmosphere - underlying surface" having been retrieved by making use environment remote sensing from space. It is shown that the informational contents initial optical characteristics mention above system likewise measured environment's radiation fields play important role in the construction of optimal plans connected with carrying out of environment's remote sensing from space. — Bibl. 22 items.*

1. Введение

Моделирование информационного содержания (информативности) оптических параметров природной среды, восстанавливаемых с помощью многоспектральной спутниковой съемки Земли в видимой области спектра (400 - 800нм), играет важную роль при тематическом анализе и оптимальном планировании космического мониторинга природных образований. В настоящей работе рассмотрено применение классической теории переноса излучения в задачах, связанных с исследованием информативности моделей входных параметров системы «атмосфера - подстилающая поверхность», а также решений «прямых - обратных» задач теории переноса излучения на основе использования двух единых и взаимосвязанных формализованных подходов. Ядром этих подходов является совмещенное информационно-математическое описание бортовых спутниковых измерительных систем и самих трендов дискретных измерительных данных, с одной стороны, и ансамблем входных (первичных) оптических моделей системы «атмосфера - подстилающая поверхность» и множеством операторов решений «прямых - обратных» задач теории переноса излучения, с другой. Используемая комплексная и репрезентативная многоспектральная модель состоит из трех независимых, но совместно рассматриваемых множеств спектральных субмоделей:

- 1) множество G : субмодели входных оптических параметров объединенной системы «атмосфера - подстилающая поверхность»;
- 2) множество $L(G)$: субмодели полей излучения, использующие множество G входных оптических параметров окружающей среды, где L — множество выбранных операторов решений прямых задач теории переноса излучения;
- 3) множество $L^{-1}\{L(G)\} = G$: субмодели восстанавливаемых выходных оптических параметров объединенной системы «атмосфера - подстилающая поверхность», где L — множество выбранных операторов решений обратных задач теории переноса излучения.

В общем случае все указанные субмодели являются статистическими ансамблями. Однако в большинстве случаев их вероятностным характером пренебрегают вследствие больших трудностей построения статистических рядов входных оптических параметров системы «атмосфера - подстилающая поверхность» и сложной структуры взаимодействия электромагнитных волн со случайно-неоднородными рассеивающими и поглощающими средами.

В случае использования спектральных детерминированных субмоделей G -параметров природной среды, а также множеств прямых L и обратных L^{-1} операторов их информативность будет определяться дискретностью первоначально выбранной сетки g и ошибками вычислений в узлах этой сетки, включая меру их неадекватности реальным субмоделям G и множествам

L, L^{-1} . В указанных случаях для оценки моделируемого информационного содержания данных, кроме соответствующей базисной информационной метрики, используется также известная теорема Найквиста-Котельникова, определяющая максимальный уровень выбираемой сеточной дискретизации данных и представлений операторов L и L^{-1} . В качестве множества входных оптических G -субмоделей системы «земная атмосфера - подстилающая поверхность» выбирались известные и широко используемые аэрозольные модели Элтермана, модели Международной комиссии по радиации (RADCOM) и LOWTRAN-7 [1-3], а также разработанные в последние годы новые адаптивные многослойные аэрозольные модели [4-5].

Множество операторов прямой задачи теории переноса излучения L , действующих на множество входных оптических параметров G , выбиралось в виде точных интегральных уравнений Фредгольма II рода [6], линейных сингулярных уравнений для фотометрических инвариантов полей излучения [7], операторов модифицированного метода Гаусса-Зайделя [8], а также известных классических представлений коэффициентов яркости плоского однородного слоя, использующих функции Амбарцумяна [9] и соответствующие нелинейные интегральные уравнения [10]. При этом подстилающая поверхность, ограничивающая снизу атмосферу, первоначально выбиралась в виде произвольного неортогонального горизонтально-однородного дна. Поле излучения системы «атмосфера - подстилающая поверхность» моделировалось на основе следующего полуаналитического приближения [11]. Однократное рассеяние излучения в атмосфере и однократное отражение фотонов от подстилающей поверхности учитываются точно для реальных оптических параметров системы «атмосфера - отражающее дно». Многократное рассеяние света в атмосфере и многократное переотражение фотонов от земной поверхности учитываются приближенно для оптических параметров, усредненных по высоте многослойной атмосферы

при угловом сглаживании (ортотропии) отраженного от реального отражающего дна излучения. В этом случае для приближенного описания поля излучения природной среды использовался принцип зеркальной симметрии полей излучения, соответствующие фотометрические инварианты и интегральные уравнения [7].

Множество оптических параметров G восстанавливалось при решении обратных задач теории переноса излучения в видимой области спектра (400 - 800нм) на основе точного структурно-углового метода, предложенного в [12]. Численный анализ информативности решений обратных задач, определяемый дискретностью выбираемой сетки g и уровнем ошибок s для используемых множеств $L(G)$ и $L^{-1}(L(G))$, проводился совместно сквозным образом. Соответствующие численные результаты, включая рекомендации по оптимизации условий дистанционного зондирования природной среды из космоса, имеют важное значение для планирования спутниковых съемок Земли, учитывая большую стоимость их проведения и трудоемкость обработки соответствующих данных. К сожалению, в настоящее время мы располагаем лишь фрагментарными имитационными подходами и весьма приближенными методами для адекватного описания и решения таких сложных комплексных научных и технологических проблем, какими являются исследования информативности, информационной калибровки и построение оптимальных планов космической много-спектральной съемки природной среды. Фактически, сегодня нам необходимы такие средства, методы и алгоритмы исследования, которые могли бы помочь в формировании соответствующих распределенных баз данных (знаний) и экспертных систем для оценки, контроля, пространственно-временного прогноза и управления количественными и качественными параметрами состояния геосферы и биосферы в региональном и глобальном масштабах. Естественно, в полной мере реализация всех отмеченных исследовательских трендов возможна только в будущем. Поэтому в данной работе даны лишь некоторые примеры комплексного системного подхода, иллюстрирующего реальные возможности для единого формализованного описания одного из наиболее важных имитационных математических трендов, связанных с взаимно коррелированными множествами входных оптических моделей природной среды, результатами прямого моделирования ее полей излучения и решениями соответствующих обратных задач теории переноса излучения (рис. 1).

2. Концепция и ключевые проблемы космического мониторинга природной среды

Решение задач оптимального планирования и определения информационного содержания (информативности) космической съемки Земли невозможно без четкого представления о концепции и ключевых проблемах современных глобальных экологических исследований. При использовании системного подхода ключевые концептуальные проблемы глобального космического мониторинга Земли вытекают из следующих основных положений:

- 1) окружающая среда является частью геосферы и биосферы. Она является открытой динамической синергетической системой, существующей благодаря потокам солнечной энергии и силам гравитации. Стабильность такой системы и ее структура определяются внутренними замкну-

тыми циклами обмена (циркуляции) энергетических потоков, вещества и информации. Кроме этого, стабильность природных сред и их динамика обеспечиваются формированием естественных структур и физико-химических образований различного пространственно-временного масштаба. Эти структуры и их компоненты существуют в постоянном взаимодействии, претерпевая различные синергетические изменения и циклы флюктуаций.

- 2) с системной точки зрения биосфера и геосфера перерабатывают входящие в нее потоки энергии, массы, и, особенно важно подчеркнуть, информации. При этом каждая компонента комплексной геосферно-биосферной системы может рассматриваться как статистический пространственно-временной динамический и информационный фильтр для других элементов (подсистем) общей системы.
- 3) с экологической точки зрения окружающая среда подвергается постоянной и все увеличивающейся антропогенной и техногенной нагрузкам на зоны действия природных факторов, что уменьшает их масштабы и в то же время нарушает их энергетический баланс и циркуляцию в общей системе «атмосфера - подстилающая поверхность». Все эти негативные обстоятельства приводят к тому, что биосфера начинает эволюционировать в критическом направлении, неблагоприятном для процессов жизнеобеспечения на Земле. Наблюдаемое в настоящее время значительное превышение допустимого порога нагрузок на биосферу приводит к уменьшению ее продуктивности, динамической нестабильности и необратимости природных процессов, которые обуславливают природные катастрофы и опасные явления.

Указанные выше комплексные проблемы на данном этапе развития экологических исследований чрезвычайно сложны для их теоретического исследования и имитационного численного моделирования. Единственный перспективный путь их решения в настоящее время состоит в совместном использовании и анализе данных глобального космического мониторинга природной среды и численного моделирования ее полей излучения на основе теории переноса излучения и соответствующего информационного обеспечения.

3. Информационная емкость и оптимальное планирование спутниковых измерений полей излучения природной среды

Большие потоки многоспектральной космической информации, связанные с измерениями полей излучения природной среды, а также различия технических, природных и физических условий проведения дистанционного зондирования Земли из космоса наряду с многообразием приборного и технологического оборудования, методик измерений, алгоритмов обработки и форматов получаемых данных, порождают значительные трудности в сопоставимости, валидации и сравнении обширных массивов экспериментальных данных, конечных результатов их интерпретации и тематического анализа. Принимая во внимание большую стоимость указанных выше комплексных исследований и экспериментов, основной подход в преодолении отмеченных трудностей может состоять в проведении предварительной оценки информационной емкости бортовой спутниковой многоспектральной аппаратуры и моделировании информативности измеряемых полей излучения природной среды. Заметим, что только на этой общей основе возможно последующее корректное проведение опти-

мального планирования дистанционного зондирования природной среды из космоса при условиях, когда информационная емкость бортовой измерительной аппаратуры и информативность полей излучения природной среды максимальны. Общая функциональная структура дистанционного зондирования Земли из космоса представлена на рис. 2.

Как уже отмечалось выше, важной составляющей космического мониторинга окружающей среды является его информационное обеспечение. С помощью специально организованных баз данных, экспертных систем, локальных информационных сетей и соответствующего алгоритмического и программного обеспечения проводятся процедуры обработки, анализа, тематической интерпретации, конвертации и распределения космической природно-ресурсной информации заинтересованным потребителям. На рис. 3 представлена общая схема информационного обеспечения космического мониторинга окружающей среды.

Для реализации отмеченных выше исследовательских трендов необходимо, прежде всего, выполнить имитационное моделирование полей излучения системы «атмосфера - подстилающая поверхность», учитывающее все разнообразие условий космической съемки Земли. После этого для проведения оптимизационных процедур необходимо построить функцию чувствительности (отклика) указанной выше системы по всем ее оптическим параметрам, включая спектральные и геометрические параметры дистанционного зондирования природной среды. Для того, чтобы в полной мере осуществить весь цикл решений данной проблемы, следует использовать теоретические, эмпирические или полуэмпирические корреляционные модели, позволяющие исследовать взаимную связь между входными оптическими характеристиками системы «атмосфера - подстилающая поверхность» и измеряемыми или моделируемыми величинами полей излучения природной среды в наиболее информативных спектральных зонах космической съемки и при максимально возможных вариациях технических, природных и физических условий ее проведения.

Представим измеряемый на борту космического носителя коэффициент отражения ρ природной среды в виде функционала, зависящего от многих параметров и характеристик

$$P = F(A, \lambda, \Delta\lambda, \theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0, D, x(\cos \gamma), L, A)_2 \quad (1)$$

$$(\rho, S, \theta, q, l)_3, (a, b, c, \dots)_4, (b, \Gamma_1, \Gamma_2, \dots)$$

Первая группа параметров в (1) представляет спектральные параметры: A — длина волны, λ — спектральное разрешение, $\Delta\lambda$ — спектральный диапазон измерений. Вторая группа представляет оптические параметры атмосферы и подстилающей поверхности, а также геометрические условия визирования и освещения земной поверхности. Входными параметрами этой группы являются: θ_0 — оптическая толщина земной атмосферы, углы (θ, φ) и (θ_0, φ_0) — определяющие направление визирования и освещения прямым солнечным излучением соответственно, D — метеорологическая дальность видимости, $x(\cos \gamma)$ — атмосферная и поверхностная индикатрисы рассеяния, L — вероятность выживания фотона при элементарном акте рассеяния (альbedo частицы) и A — альbedo подстилающей поверхности. Третья группа параметров представляет приборно-геометрические характеристики работы бортовой измерительной спутниковой аппаратуры: ρ — угол обзора, размер площади съемки S , угол визирования этой площадки θ , динамические параметры опти-

ческой аппаратуры $q, \dots/l$. Четвертая группа представляет природные условия космической съемки, определяющие количественные параметры состояния природной среды (a, b, c, \dots): влажность атмосферы, соленость океанов и морей, физико-химические структурные характеристики почв и растительности, степень созревания сельскохозяйственных культур и т. д. Пятая группа объединяет технические параметры космической съемки: H_{orb} — высота орбиты космической станции, характеристики стабилизации, ориентации и динамики движения станции на околоземной орбите ($\Gamma_1, \Gamma_2, \dots$) и т.д.

Процедура оптимального планирования дистанционного зондирования Земли из космоса выбирает такие параметры, характеристики и переменные по каждой из указанных выше групп, которые могли бы обеспечивать максимум информационного содержания (информативности) данных спектральной космической съемки природной среды. При этом определение информативности спутниковых данных подразумевает, что природные образования, атмосфера, океан и спектральная бортовая аппаратура рассматриваются не по отдельности, а как единый и взаимосвязанный по элементам и структурам информационно-динамический канал, подобный комплексной линейной оптической системе (рис. 4).

Хорошо известно, что в общем случае указанной оптимизационной проблемы необходимые решения для соответствующих комплексных линейных оптических систем еще не получены. Однако для ряда реальных оптических систем дистанционного зондирования единое информационно-динамическое описание спутникового оптического канала может быть выполнено с одновременным включением всего множества компонентов, формирующих работу этого канала, на базе использования основных понятий энтропии, информационных метрик (согласно представлению Шеннона) [13] и теории линейной динамической фильтрации оптических сигналов [14]. В этом случае информационная емкость спутникового канала будет определяться масштабами пространственно-угловой, спектральной и временной дискретизациями измеряемых спектральных яркостей природных образований в каждом элементе оптической системы и собственной величиной допустимого уровня отношения «сигнал - шум». При этом экстремальные значения соответствующих энтропийных функций, являющихся мерой неупорядоченности состояний оптической системы, будут определяться такими динамическими условиями, в которых информативность космических данных будет также экстремальной.

Рассмотрим теперь основную концепцию информационной емкости системы бортовой спутниковой аппаратуры на примере спектрального оптического прибора с тремя пространственно-временными степенями свободы и двумя независимыми компонентами, характеризующих степень линейной поляризации измеряемого излучения для когеррентного и некогеррентного случаев. Данная концепция основывается на теореме инвариантности для информационной емкости линейного оптического канала [15]. Согласно этой теореме для оптических систем фиксируется не пространственно-временная ширина полосы частот, а определенное число степеней свободы этой системы. При этом число степеней свободы характеризует уровень пространственно-угловой, спектральной и временной дискретизации оптических сигналов, т.е. число отдельных измерений системы, которое требуется для их полной валидации. Используя результаты, представленные в [15-16], получаем в некогеррентном случае сле-

дующее выражение для информационной емкости J бортовой оптической системы дистанционного зондирования Земли из космоса:

$$J = L_x L_y L_z L_A L_A T \log_2 \frac{1 + A_p}{1} \quad (2)$$

В когеррентном случае аналогичное выражение имеет вид

$$J = L_x L_y L_z L_A L_A T \log_2 \frac{1 + A_p}{1 + A_p J} \quad (3)$$

В соотношениях (2)-(3) используются следующие обозначения: p — средняя спектральная яркость системы «атмосфера - подстилающая поверхность», A_p — дополнительная («шумовая») спектральная яркость этой системы (например, яркость подстилающей поверхности), $\frac{1}{1 + A_p J}$ — отношение «сигнал - шум» (число возможных уровней дискретизации), L_x, L_y, L_z — пространственные частоты (размер пространственных элементов при пространственной дискретизации оптических измерений) по координатам x, y, z . Спектральный элемент дискретизации оптического сигнала обозначен L_A , а временной элемент этой дискретизации — через $L_A T$.

Соотношения (2)-(3) показывают логарифмическое ослабление информационной емкости J в зависимости от увеличения отношения «сигнал - шум». Кроме этого, информационная емкость когеррентной оптической системы в два раза больше, чем в некогеррентном случае. Последний вывод легко объяснить, приняв во внимание то обстоятельство, что при равенстве числа всех других параметров бортовой оптической системы в когеррентном случае каждое измерение содержит полезную информацию в амплитуде и фазе измеряемого сигнала. В некогеррентном случае такая информация заключена только в амплитуде оптического сигнала. Аналогично этому выводу увеличение информационной емкости спектральных спутниковых оптических данных по сравнению со скалярным случаем должно наблюдаться для поляризационных яркостей природных образований и измерений степени поляризации отраженного Землей излучения.

Остановимся теперь на проблеме оптимизации спутниковой оптической системы в случае реальных условий космического мониторинга. Актуальность этой проблемы определяется не только высокой стоимостью проведения космической съемки, ограничениями по весу и размерам бортовой аппаратуры, пределами энергопитания и большими объемами получаемой информации. Необходимо также принять во внимание некоторые математические аспекты проблемы, связанной с решениями обратных задач дистанционного зондирования. Хорошо известно, что при решении подобных задач, требующих построения обратных операторов L^{-1} по отношению к прямым задачам, точность восстанавливаемых параметров природной среды существенно зависит от углов ее визирования и освещения Солнцем. Так, выбор одинаковых интервалов для угловых параметров дистанционного зондирования может привести к достаточно неэффективному решению собственно обратных задач из-за недостатка необходимой информации, получаемой из измерений. С другой стороны, пренебрежение данными, связанными с анализом информативности измерений, может привести к их информационной избыточности и снижению ценности решений рассматриваемой проблемы в целом. Не останавливаясь на исследовании

некорректности обратных задач по Адамару и их регуляризации с помощью априорной информации, отметим, что с математической точки зрения, существо обратных задач дистанционного зондирования состоит в установлении наиболее информативных параметров и интервалов их измерений с последующим определением набора собственных векторов в формализованном функциональном пространстве требований [17-18]. Располагая множеством векторов-требований $x(x^j)$ ($j = 1,2,3,\dots,M$), можно поставить и решить проблему получения

величин x , минимизирующих или максимизирующих приведенный выше функционал F в (1). Если рассмотреть полный набор векторов $X\{x^j\}$ как статистический ансамбль, проблема оптимизации может быть решена с помощью соответствующих статистических методов, основанных, например, на методе главных компонент и факторном анализе [17]. В табл. 1 согласно [18] для выбранных групп предметной области, именно 1 — океанология, 2 — гидрология, 3 — геология, 4 — лесное и сельское хозяйства, приведены оптимальные спектральные интервалы дистанционного зондирования Земли из космоса. Заметим, что при решении указанной оптимизационной проблемы необходимо предварительное проведение процедур атмосферной коррекции полей отраженного излучения. Поэтому, данные табл. 1 требуют дальнейшего уточнения после проведения процедур атмосферной коррекции спутниковой многоспектральной информации согласно [19-20].

Таблица 1

Оптимальные спектральные зоны дистанционного зондирования Земли из космоса

Предметная область	Спектральные зоны зондирования, мкм								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Океанология	0,42-	0,45-	0,50-		0,62-	0,64-	0,70-		0,95-
	0,44	0,53	0,57		0,64	0,69	0,75		1,1
Гидрология		0,44-	0,51-		0,62-	0,67-	0,70-		0,96-
		0,53	0,57		0,67	0,74	0,75		1,1
Геология		0,42-	0,51-		0,62-		0,70-		0,96-
		0,51	0,57		0,7		0,75		1,1
Лесное и сельское хозяйства		0,42-	0,51-	0,55-	0,62-		0,70-	0,76-	0,96-
		0,51	0,57	0,57	0,7		0,74	0,78	1,1

В табл. 2 согласно [17] представлены данные, относящиеся к оптимальным высотам Солнца, углам визирования, пространственного разрешения, углам обзора и периодичности космической съемки.

Таблица 2

Оптимальные параметры космической съемки природных сред

Предметная область	Параметры			
	I	II	III	IV
Высота Солнца (град)	15-30	15-30	15-30	15-60
Угол визирования (град)	30	30	30	30
Полоса зондирования(км)	40-1000	200-400	400-1000	50-200
Периодичность (сутки)	1	1	3-20	2-30

Также как и данные, представленные в табл. 1, оптимальные параметры космической съемки природных сред, приведенные в табл. 2, требуют корректировки

после учета влияния атмосферы Земли на результаты ее многоспектрального дистанционного зондирования.

4. Основные уровни информативности при моделировании прямых и обратных задач теории переноса излучения

Реализация указанных в предыдущих разделах исследовательских трендов основывается на использовании репрезентативных оптических моделей многослойной земной атмосферы и подстилающих поверхностей совместно с современными моделями полей излучения природных сред, получаемыми в результате аналитических, полуаналитических или численных решений соответствующих краевых задач теории переноса излучения. Представим строгую модель поля излучения в математических терминах точного оператора прямой задачи L и множества G точных значений входных оптических параметров системы «атмосфера - земная поверхность». Аналогичные приближенные операторы и множество приближенных значений входных оптических параметров обозначим соответственно L и G . Тогда возможные взаимодействия операторов L и L с множествами G и G можно представить в виде следующей функциональной комбинации:

$$\{L[G] \circ L[G]\} \circ \sim [G] \circ L[G]. \quad (4)$$

Схемы точного и приближенного радиационного моделирования измеряемых яркостей природных образований I можно описать следующим образом:

$$I_L = \{L[G] \circ L[\sim] \circ I\} \sim = \{I[G] \circ \sim [G]\}. \quad (5)$$

Аналогичная функциональная схема может быть описана в рамках решений обратных задач по восстановлению точных G^* и приближенных значений G^* входных оптических параметров с помощью построения соответствующих точных L^{-1} и приближенных L^{-1} обратных операторов:

$$G_{L^{-1}} = [L^{-1} \{L[G]\} \circ L^{-1} \{L[\sim]\} \circ G_{\sim}^{-1}] \sim = [\sim^{-1} \{L[G]\} \circ \{L[G]\}]. \quad (6)$$

Информативность входных параметров модели «атмосфера - подстилающая поверхность» будет полностью определяться выбранными уровнями дискретизации $N_{G \circ G}$ и соответствующих ошибок s/N при представлении множеств G и G в каждой точке используемой сетки g . То же самое заключение относится к информативности решений прямой задачи теории переноса излучения:

$$N\{G \circ G\} \quad L^0 \quad q \quad G \circ G\}, \quad (7)$$

$$s\{[L^{-1}] \circ [L(G) \circ L(G)]\}. \quad (8)$$

Аналогично заключению относительно зависимости информативности от уровней дискретности M и ошибок δ в решениях обратных задач теории переноса излучения имеем:

$$s\{[L^{-1}] \circ [L(G) \circ \sim(G)]\}, \quad (9)$$

$$M\{G^* \circ G^*\} = M[L^{-1} \{L(G) \circ L(G)\} \circ L^{-1} \{L(G) \circ L(G)\}]. \quad (10)$$

Для того, чтобы провести анализ информационного содержания данных космической съемки Земли, необходимо на первом этапе определить полный набор оптических параметров вертикально-неоднородной (многослойной) ат-

мосферы и ограничивающих ее снизу подстилающих поверхностей. С общих позиций имитационного моделирования они описываются множествами G или G , введенных в предыдущем разделе данной работы. Такие множества содержат точную или приближенную оптическую информацию, позволяющую проводить прямое моделирование полей излучения природных сред в зависимости от длины волны λ , величины оптической толщины земной атмосферы $T_0(\lambda)$, альbedo частиц $L_{атм}(\lambda, T)$ и аналогично для поверхности $L_{пов}(\lambda, T)$, атмосферной индикатрисы рассеяния $x(\cos \mu, T, \lambda)$ и поверхностной индикатрисы $x_{атм}(\cos \mu, T, \lambda)$ отражения. Выбирая, например, множество G , реализуем его первоначально в виде $G\{T_0(\lambda), L(\lambda, T), x_{атм}(\cos \mu, T, \lambda)\}$. Так как земная атмосфера в реальных условиях ограничена снизу отражающим дном, в множество G необходимо дополнительно включить информацию об индикатрисах отражения подстилающей поверхности $x_{пов}(\cos \mu, \lambda)$ и альbedo однократного отражения поверхности $L_{пов}(\lambda)$. Тогда окончательная реализация множества G будет дана в виде $G\{T_0(\lambda), L_{атм}(\lambda, T), x_{атм}(\mu, T, \lambda), L_{пов}(\lambda), x_{пов}(\mu, T, \lambda)\}$. Очевидно, что информативность модели множества входных оптических параметров G будет определяться выбранными сетками Q_j для текущих углов рассеяния μ , оптических толщин $T_0(\lambda)$, оптических глубин $T(\lambda)$ и длин волн λ , а также уровнем ошибок s_j при представлении атмосферных и поверхностных оптических параметров в каждой из точек выбранных сеток g_j . Таким образом, на первом этапе информационное содержание моделей полей излучения $\{I\}$ и $\{E\}$ будет зависеть не только от операторов L и L , но и в первую очередь, от используемых сеток g_j и уровней ошибок s_j входных оптических параметров моделей G и G .

Второй уровень информативности входных оптических параметров коэффициентов отражения системы «атмосфера - подстилающая поверхность» определяется при заданных уровнях дискретизации g_j и погрешностей s_j их представления с помощью классических линейных преобразований Фурье:

$$x_{атм}^m(T, \lambda, \lambda A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x_{атм}(T, \mu, \phi) \cos m\phi, \quad m=0,1,\dots, M_1, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} x_{атм}^m \\ p_{атм}^m \end{bmatrix} (T, \mu, \phi, A) = \begin{bmatrix} x_{атм}^0 \\ p_{атм}^0 \end{bmatrix} (T, \mu, \lambda, A) + \sum_{m=1}^{M_1} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_{атм}^m \\ p_{атм}^m \end{bmatrix} (T, \mu, \lambda, A) \cos m\phi, \quad (12)$$

$$x_{пов}^m(T, \lambda, \lambda A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x_{пов}(T, \mu, \phi, A) \cos m\phi, \quad m=0,1,\dots, M_2, \quad (13)$$

$$x_{пов}^m(T, \mu, \lambda, \phi, A) = x_{пов}^0(T, \mu, \lambda, A) + \sum_{m=1}^{M_2} \frac{1}{2} x_{пов}^m(T, \mu, \lambda, A) \cos m\phi. \quad (14)$$

При этом базовый набор параметров второго уровня информативности состоит из общего числа азимутальных гармоник M_1 для атмосферных оптических параметров и M_2 — для оптических характеристик отражающего дна. Отметим,

что для дальнейшего рассмотрения необходимо выбрать только одно общее число азимутальных гармоник $M = \max\{M_1, M_2\}$.

Третий уровень информативности определяется процессом суммирования азимутальных гармоник r^M , x^v , $R_{\text{пов}}$ и последующими процедурами их информационного сжатия после соответствующей сеточной калибровки (рис. 5). Заметим, что отмеченная выше проблема нахождения азимутальных гармоник x^M , $R_{\text{атм}}(Y, T, A)$ и x^v , $R_{\text{тов}}(Y, t, A)$ фактически является задачей нахождения спектра аналитических функций при первоначальном заданном уровне их угловой дискретизации. Кроме того, следует подчеркнуть, что требуемый уровень дискретизации для них не может быть произвольным согласно теореме Найквиста-Котельникова [15]. Именно, текущая частота (уровень) дискретизации K должна, по крайней мере, в два раза превышать максимальную частоту сигнала M :

$$K > 2M . \quad (15)$$

На практике при проведении процедур дискретизации оптических параметров часто используются схемы численной интерполяции с некоторой наперед заданной точностью и последующим вычислением моментов для индикатрис рассеяния $x_{\text{атм}}$ и отражения $x_{\text{пов}}$. В рамках такого подхода уровни дискретизации этих функций полностью определяются желаемой точностью их аппроксимаций \sim для интерполированных величин $x_{\text{атм}}$, $\sim_{\text{атм}}$ и $x_{\text{пов}}$, $\sim_{\text{пов}}$ [21]. Согласно численному моделированию, выполненному в [21], в случае индикатрисы Хеньи-Гринштейна (Х-Г)

$$x_{\text{атм}}(\cos Y) = \frac{1 - \epsilon^2}{(1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos Y)^2} \quad (16)$$

и использовании кубической сплайн-интерполяции относительно углов рассеяния Y , имеем следующую точную оценку для величины шага интерполяции ΔY :

$$\Delta Y < \frac{24 \sim_{\text{атм}}^4 (1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos Y)^4}{945 \epsilon^4} \quad (17)$$

Аналогично (17) получаем соответствующую точную оценку для уровня дискретизации по азимутальному углу ϕ :

$$\Delta \phi < \frac{24 \epsilon^4 (1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos Y)^4}{945 (1 - \epsilon^2 \cos^2 Y)^4} \quad (18)$$

Аналогичные численные результаты, представлены в табл. 3-4.

Таблица 3

Оценки шагов интерполяции по углу рассеяния Y при численном моделировании атмосферных индикатрис рассеяния $x_{\text{атм}}(\cos Y)$ (модель Хеньи-Гринштейна, $\epsilon = 0.9$, $\sim = 10^{-4}$)

Угол рассеяния Y	0	1	2	3	5	10	15	20	30	45	60	90
Необходимый шаг интерполяции ΔY	2,2	1,4	1	0,85	0,73	0,84	1,1	1,4	2	3	4,2	7,4

Оценки шагов интерполяции Дф по азимуту ф при численном моделировании атмосферных индикатрис рассеяния $\chi_{\text{атм}}(\cos y)$ (модель Хензи-Гринштейна, $I = 0.9$, $\sim < 10^{-4}$)

	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	5/п
0	0,7	1	2	4	6	8	12	17	24	0
0,1		0,7	1	2	4	6	9	13	20	0,1
0,2			0,7	1	2	4	6	10	16	0,2
0,3				0,8	1	2	4	8	13	0,3
0,4					0,8	1	3	5	10	0,4
0,5						0,9	1	3	7	0,5
0,6							0,9	1	4	0,6
0,7								0,9	2	0,7
0,8									1	0,8
0,9										0,9

Численное моделирование и последующий анализ, выполненные для реальных атмосферных индикатрис рассеяния $\chi_{\text{атм}}(\cos y)$, показывают корреляционную связь между общим числом ее азимутальных гармоник M и относительной погрешностью ~ 12 ее аппроксимации при разложении по полиномам Лежандра $P_n(\cos y)$ и в ряд Фурье (12):

$$s_i = \max_{Y_i} \frac{\chi^{(\cos Y_i)} - \sum_{n=0}^M \chi_n P_n(\cos Y_i)}{\chi(\cos Y_i)} \quad (19)$$

$$S_2 = \max_{\Phi_k} \frac{\chi(\Phi_k) - \sum_{n=0}^M P_n^m(n, \Phi_k) \cos m\phi_k}{\chi(\Phi_k)} \quad (20)$$

Основной вывод здесь следующий: общее число членов M , необходимое для аппроксимаций (12), в случае реальной атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi^{\text{атм}}(\cos Y)$, в пределах точности $\sim 1 - 10^{-4}$ равно $M - 200-300$ (рис. 6). Соответствующие численные результаты в случае использования аппроксимационных рядов Фурье (11) в рамках такой же относительной точности $\sim 2 - 10^{-4}$ представлены в табл. 5.

При переходе от моделей первичных оптических характеристик системы «атмосфера - подстилающая поверхность» к численному имитационному моделированию ее полей излучения возникает проблема, аналогичная рассмотренной выше для атмосферной индикатрисы рассеяния. Именно, необходимо выяснить, каков должен быть уровень дискретизации по независимым переменным функции $I(t, \pm p, \Phi, A)$ и какова должна быть относительная погрешность \sim ее аппроксимации в узлах выбранной сетки g , чтобы в пределах заданной точности обеспечить необходимый уровень информационного содержания (информативности) моделируемого поля излучения указанной выше системы.

В [6] для случая произвольной вертикально-неоднородной планетной атмосферы, ограниченной снизу анизотропно отражающим дном, получена система точных интегральных уравнений Фредгольма II рода, определяющая ази-

мутальные гармоники $I^m(\tau, \pm p, \Gamma, \Phi D)$ для отраженного ($-p$) и пропущенного ($+p$) излучения I .

Таблица 5

Общее число азимутальных гармоник M при разложении в ряд Фурье коэффициента отражения $p(\tau, \Gamma, \Phi)$

(индикатриса рассеяния Хенни-Гринштейна, $I = 0.9, \sim = 10^{-4}$)

	0,8	0,6	0,4	0,2	0
-0,8	5				
-0,6	6	8			
-0,4	7	11	15		
-0,2	9	14	20	32	
0	11	18	32	65	150
0,2	13	26	60	150	
0,4	18	48	140		
0,6	32	120			
0,8	87				

Данная система может рассматриваться как общая математическая основа для решения поставленной выше задачи с помощью точных операторов L прямого радиационного моделирования и выбранных множеств точных (G) или приближенных (G) значений первичных оптических параметров системы «атмосфера - подстилающая поверхность». Однако подчеркнем, что одна из важных целей данной работы состоит в едином формализованном описании комплексных информационно-динамических систем, описываемых следующими линейными или нелинейными трансформациями:

$$Gg, s^{\wedge} Lg, \sim(G)^{\wedge} L \sim X^{\wedge} L(G) \Rightarrow G^* \quad * \quad \vee \quad (21)$$

$g \sim \quad g, e$

прежде всего, на основе взаимной связи между конструкциями прямых операторов L и соответствующим им конструкциям обратных операторов L^{-1} . В этом отношении необходимо, по возможности, использовать математически строгое описание взаимной связи прямых и обратных операторов $Lg, \sim(GL \sim \sim [L(G)])$ для определения азимутальных гармоник p^m и a^m коэффициентов отражения p и пропускания a ,

$$p^m(\tau, \Gamma, \Phi) = -\Gamma I^m(0, -\tau, \Gamma, \Phi), \quad (22)$$

$$a^m(\tau, \Gamma, \Phi) = I^m(\tau, \Gamma, \Phi), \quad (23)$$

где Γ — спектральная солнечная постоянная

Используя классическое представление p^m и a^m в случае вертикально-однородной атмосферы конечной оптической толщины ($\tau_0 < 0$), ограниченной снизу ортотропным отражающим дном с альбедо A в виде [9]:

$$\begin{aligned}
 & \rho m(, \xi) _ \Pi \Gamma _ c m -) + m \frac{\Phi T(\Pi, T_0) \Phi T(\xi \wedge 0) - \Phi T \wedge 0 F E \wedge Q}{n + \xi} + \\
 & + \frac{\Pi \zeta (\Pi, T \wedge \text{Ы} _ 1}{1 - \wedge C(T_0)} m _ 0, 1, _ m \quad ; \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & m(\xi) _ \frac{\Pi _ M}{4 _ i=m} m \Phi T(\Pi, T_0) \Phi T _ 0) - \Phi T(\Pi, X_0) \Phi T(\wedge) \\
 & + \frac{\Pi \wedge _ T _ p _ \text{И} _ \xi _ T _ 0)}{1 - \wedge C(T_0)} , \quad m _ 0, 1 _ m \quad (25)
 \end{aligned}$$

Определяем вид и структуру точного прямого оператора L для последующего построения точного обратного оператора L^{-1} .

В (24)-(25) структурные базисные функции $\Phi T(n, T_0)$ и $\Phi T(\xi, T_0)$ — хорошо известные функции Амбарцумяна, определяемые с помощью линейных интегральных уравнений, полученных В. В. Соболевым [9]. Величины $c(T_0)$, $d(\xi, T_0)$ и $v(\xi, T_0)$ определяются следующим образом:

$$c(T_0) _ \frac{1}{4} \int_0^1 J_n \wedge n J_p^0(n, \xi) \xi d\xi, \quad (26)$$

$$|d(\xi, T_0)| _ e^{-\xi} + 2ja^0(n, \xi) ndn, \quad (27)$$

$$v(\xi, T_0) _ \int_0^1 2J_p^0(n, \xi) dn. \quad (28)$$

Коэффициенты в (24)-(25) c^m равны

$$c_l^m _ \frac{(l - m)!}{(l + m)!} x^l. \quad (29)$$

Коэффициенты x^l в разложении атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi_{\text{атм}}(\cos y)$ по полиномам Лежандра $P_n(\cos Y)$ определяются следующим образом:

$$x_l _ \frac{2l + 1}{2} \int_0^{\pi/2} \chi_{\text{атм}}(\cos Y) P_l(\cos Y) \sin Y dY. \quad (30)$$

Функции Амбарцумяна $\Phi T(\xi, T_0)$ и $\Phi T(n, T_0)$ вычислялись в случае атмосферной индикатрисы Хеньи-Гринштейна (16) при $l _ 0.5$ и $l _ 0.9$ для атмосферной модели Элтермана [1] на основе решения линейных интегральных уравнений [9]. Кроме того, использовался другой подход, основанный на вычислении Φ^T -функции Соболева и функций Амбарцумяна X^m и Y^m . Соответствующие

представлениям (24)-(25) прямые L и обратные операторы L^{-1} для реализации связи (21) конструировались на базе использования строго аналитического подхода, развитого в [11-12].

Связь между текущей частотой K угловой дискретизации коэффициентов яркости (p^m , a^m) и общим числом M их азимутальных гармоник может быть установлена с помощью приведенной выше теоремы Найквиста-Котельникова (15). Обширное численное моделирование величин $p^m(n, T_0)$ и $a^m(n, \xi, T_0)$ и последующий анализ его результатов, выполненный для реальных оптических моделей системы «атмосфера - подстилающая поверхность» и атмосферной индикатрисы Хенли-Гринштейна [21], показали, что оптимальное соотношение между текущей частотой дискретизации K и общим числом азимутальных гармоник M в рамках точности $s = 10^{-4}$ имеет вид

$$s \sim 2M + 30 \quad (31)$$

в случае однократного рассеяния света в атмосфере и однократного отражения излучения от подстилающей поверхности. В случае многократно рассеянного излучения в атмосфере и многократного переотражения фотонов от подстилающей поверхности эмпирическая оценка (31) может быть ослаблена, учитывая значительное информационное сжатие общего числа азимутальных гармоник M для многократно рассеянного излучения. Снова принимая во внимание теорему Котельникова-Найквиста (15) и возможность отмеченного сжатия общего числа азимутальных гармоник M , в пределах относительной точности $s > 10^{-4}$ получаем для коэффициентов яркости p^m и a^m в случае реальных моделей системы «атмосфера - подстилающая поверхность» следующее эмпирическое корреляционное соотношение между величинами K и M :

$$K > 2cM, \quad (32)$$

где параметр сжатия c общего числа M азимутальных гармоник равен приблизительно $\frac{1}{6}$. Принимая во внимание, что значения величины M для реальных

атмосферных индикатрис рассеяния $x_{\text{атм}}(\cos y)$ расположены в интервале $M \sim 200 - 300$, получаем в случае заданной точности $\sim 10^{-4}$, для вариации текущей частоты угловой дискретизации K оценку: $130 - 200 < K < 400 - 600$. Заметим, что данная выше эмпирическая оценка (32) вполне соответствует аналогичным результатам, полученным ранее М. Кингом в [22].

5. Обратные задачи теории переноса излучения

Как было отмечено выше, математической основой для восстановления параметров состояния природной среды по данным космического мониторинга Земли являются решения соответствующих обратных задач теории переноса излучения [11]. В случае системы «атмосфера - подстилающая поверхность» обозначим через $x(, X_2 \dots x_n)$ множество параметров, характеризующих состояние природной среды. Спектральные яркости, измеряемые из космоса, обозначим через Y_2, \dots, Y_k . Тогда каждая реализация измерений спектральных яркостей y_k связана с параметрами состояния x_n следующими линейными регрессионными отношениями:

$$Y_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + \dots + A_{1n}x_n$$

$$Y_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + \dots + A_{2n}x_n$$

()

$$Y_k = A_{k1}x_1 + A_{k2}x_2 + \dots + A_{kn}x_n$$

где A_{kl} — набор неизвестных коэффициентов линейной регрессии. Выбирая число $k = 1, 2, 3, \dots, N$ реализаций измеряемого сигнала Y_k , равное числу N неизвестных параметров состояния природной среды x_n , получаем систему линейных регрессионных уравнений для определения неизвестных величин x_n .

Предложенный в [12] строгий метод решения обратных задач теории переноса излучения, использующий угловую структуру коэффициентов яркости (24)-(25), в отличие от линейного регрессионного подхода в виде (33) позволяет восстановить полный набор оптических параметров системы «атмосфера - подстилающая поверхность» на основе использования точных интегральных соотношений между коэффициентами яркости ρ , a и соответствующими функциями Амбарцумяна $\Phi_T(\mu, \mu_0)$, $\Phi_M(\mu, \mu_0)$. Поскольку априорная информация об истинных значениях восстанавливаемых оптических параметров природной среды, как правило, отсутствует, в качестве критерия качества устойчивого и истинного решения обратной задачи выбиралась невязка измеренных и восстановленных значений полей излучения. Именно, малым отклонением Δx_j вариаций восстанавливаемых оптических величин b_{uj} (индикатриса рассеяния, оптическая толщина атмосферы, альbedo частицы, альbedo поверхности) должны соответствовать малые отклонения вариаций Δy_j восстанавливаемых полей излучения b_{uj} . Таким образом, согласно [11], вариации восстановленных и входных оптических параметров среды (x , и соответствующих им полей излучения (y, y))

$$\Delta y = b_{uj} - \delta x_j, \quad (34)$$

$$\Delta x_j = S_{uj} - b_{uj} \quad (35)$$

должны соответствовать следующим условиям, гарантирующим качество и устойчивость решения обратной задачи:

$$\sum_{j=1}^N |j| <^b s, \quad \sum_{i=1}^N |i| <^b s. \quad (36)$$

На рис. 7 представлена общая функциональная схема, характеризующая связь между величинами отклонений Δy_j и Δx_j .

Естественно, для определения единого и замкнутого математического описания взаимосвязанных решений прямых и обратных задач теории переноса излучения в системе «атмосфера - земная поверхность» необходимо использовать не регрессионную систему уравнений (33), а по возможности точную схему восстановления оптических параметров этой системы. Разумеется, представление азимутальных гармоник коэффициентов яркости ρ^T и a^m в виде соотношений (24)-(25) не является единственным. Существуют и другие

точные их представления, основанные на использовании линейных интегральных уравнений [9]. Однако именно на базе представлений (24)-(25) удалось развить строгий метод «обращения» прямой задачи [11]. Согласно этому методу, полагая слева (24) $p = 0$ или $E = 0$, получаем следующую точную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных оптических параметров x_j , Λ и A :

$$B = Ax, \quad (37)$$

где матрицы A , B и X имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} 0, & a_{11} & a_{0N} & \Lambda \\ 0, & 0, & a_{1N} & \\ 0, & 0, & a_{2N} & \\ 0, & 0, & 0, & \dots & \dots \\ 0, & 0, & 0 & \dots & a_{NN} \end{pmatrix} \downarrow, \quad \theta = \begin{pmatrix} \Gamma \Lambda_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X} = \Lambda \begin{pmatrix} \Gamma X_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \quad (38)$$

Матричные элементы $b_m(\cdot, \tau_0)$ и $a_m(\xi, \tau_0)$ равны

$$b_m(\xi, \tau_0) = 4\xi p(\xi, 0, \tau_0), \quad (39)$$

$$0, \quad m > j$$

$$a_m(\cdot, \tau_0) = \quad (40)$$

При выводе системы (37) использовались известные классические соотношения, связывающие функции Амбарцумяна $\phi''(\tau, \tau_0)$ и $\phi_m(\tau, \tau_0)$ с азимутальными гармониками коэффициентов яркости $p^m(p, \xi, \Phi, \tau_0)$ и $a^m(p, \xi, \Phi, \tau_0)$, а также следующие свойства функций $\phi_m(\xi, \tau_0)$ и $\phi_m(\xi, \tau_0)$ [9]:

$$\phi''(0) = P \gg, \quad \phi_m(0) = 0, \quad (41)$$

$$\phi_m(\cdot, \tau_0) = P''(\cdot) + P''(-p) p''(p, \tau_0) p, \quad (42)$$

$$\Phi_m(\cdot, \tau_0) = P''(0^e \xi + P''(p) a^m(p, \xi, \tau_0) \quad (43)$$

Нетрудно показать, что определитель $\det A$ системы (37) равен произведению диагональных элементов матрицы A и имеет вид

$$\det^* = \prod_{m=1}^N P_m(0) \Phi_m(p). \quad (44)$$

Поскольку всегда $\det A \neq 0$, алгебраическая система (37) всегда имеет единственное решение. Например, в случае трехчленной индикатрисы рассеяния $x(\cos y) = 1 + X_1 \cos y + x_2 P_2(\cos y)$ точное решение системы (37) имеет вид:

$$\Lambda x_1 = \frac{8\xi p^1(\xi, 0, \tau_0)}{a_{11} \Phi(\xi, \tau_0)} = \frac{8\xi p^1(\xi, 0, \tau_0)}{P_1^1(\xi) + P_1^1(-p) p^1(\xi, p, \tau_0)} \quad (45)$$

$$A_{x_2} = \hat{L} = 32\Gamma P^2(\Gamma, 0, \tau_0) \int_0^{\tau_0} \Phi^2(\Gamma, \tau) P_2^2(\Gamma) + 2\Gamma |P_2^2(-\Gamma)| P^2(\Gamma, \tau, \tau_0) d\tau \quad (46)$$

$$A = \hat{L} = 4\Gamma P^0(\tau_0) \int_0^{\tau_0} \Phi_0(\Gamma, \tau) \Phi_2(\Gamma, \tau) d\tau \quad (47)$$

Используя в (24)-(25) высшую азимутальную гармонику $m = N$, находим величину оптической толщины атмосферы τ_0 :

$$\tau_0 = \Gamma \ln \left[\frac{PN(\Gamma)}{P_N(\Gamma, \tau_0)} \right] - 2PN(0) \int_0^{\tau_0} \Phi_N(\Gamma, \tau) - 2\Gamma |PN(n)| a^N(n, \Gamma, \tau_0) d\tau \quad (48)$$

В случае чистого рассеяния $A = 1$ на основе информации о нулевой Фурье-гармонике $P^0(n, \Gamma, \tau_0, A)$ легко определяется неизвестная величина альbedo земной поверхности $A(\Gamma)$:

$$A(\Gamma) = \frac{P^0(n, \Gamma, \tau_0) - P^0(n, \Gamma, \tau_0, A = 0)}{P(n, \Gamma, \tau_0) - P(n, \Gamma, \tau_0, A = 0)} \quad (49)$$

На рис. 8 представлена общая структурная схема восстановления полного комплекса оптических параметров системы «атмосфера - земная поверхность» согласно алгоритму, предложенному в [11]. Если метод нахождения неизвестных оптических характеристик природной среды приводит к качественному и устойчивому решению соответствующей обратной задачи теории переноса излучения, тогда с неизбежностью возникают следующие приоритетные вопросы, на которые прежде всего необходимо ответить в ходе реализации используемых алгоритмов:

- 1) каков должен быть первоначальный уровень ошибок s , шаг пространственно-угловой дискретизации g и спектральное разрешение $\Delta\lambda$ измеренного (заданного) коэффициента отражения $\rho(n, \Gamma, \Phi, \tau_0)$, чтобы восстановить входные оптические параметры системы «атмосфера - земная поверхность» с желаемой точностью δ . Другими словами, какова должна быть информативность задаваемого коэффициента яркости $\rho(n, \Gamma, \Phi, \tau_0)$, чтобы получить решение обратной задачи теории переноса излучения с необходимой точностью. Ясно, что не для каждого уровня информативности используемых моделей можно получить корректные решения подобных обратных задач.
- 2) каков должен быть оптимальный план (информативные значения углов визирования, освещения Солнцем, азимутов и спектральных интервалов) для восстановления оптических параметров природной среды, удовлетворяющих заранее заданной точности δ .

На рис. 9-13 представлены численные результаты решений обратных задач теории переноса излучения, иллюстрирующие их точность и устойчивость в зависимости от числа азимутальных гармоник и шага дискретизации, угловых

условий визирования и освещения Солнцем. При решении указанных обратных задач входное поле излучения рассчитывалось согласно представлениям (24)-(25) для реальных и модельных (параметризованных) атмосферных индикатрис рассеяния $x(\cos Y)$. Величины альbedo земной поверхности варьировались в пределах $A = 0.1-0.9$. Угловые переменные варьировались в следующих интервалах: $\mu^e[-1,1]$, $\lambda^e[0, \pi/2]$, $\Phi^e[0, 2\pi]$. Спектральный интервал соответствовал видимой области $\lambda = 400 - 800\text{нм}$. Численное моделирование и последующий анализ полученных решений обратных задач теории переноса излучения показал, что в видимой области спектра $\lambda = 400 - 800\text{нм}$ всегда можно выбрать такие интервалы изменения угловых переменных μ , λ и Φ , а также использовать такие шаги дискретизации при необходимом числе азимутальных гармоник p^m и a^T , при которых всегда возможно устойчивое восстановление оптических параметров из множества G с необходимой точностью ε .

6. Заключение

Рассмотренное выше единое и замкнутое формализованное описание системы моделей первичных оптических параметров атмосферы и земной поверхности, их спектральных полей излучения и информативности решений соответствующих прямых и обратных задач теории переноса излучения позволяет на комплексной и системной основе осуществлять необходимый информационный контроль за работой бортовых космических систем дистанционного зондирования природной среды, включая выбор оптимальных спектральных зон и оптимизацию условий космической съемки.

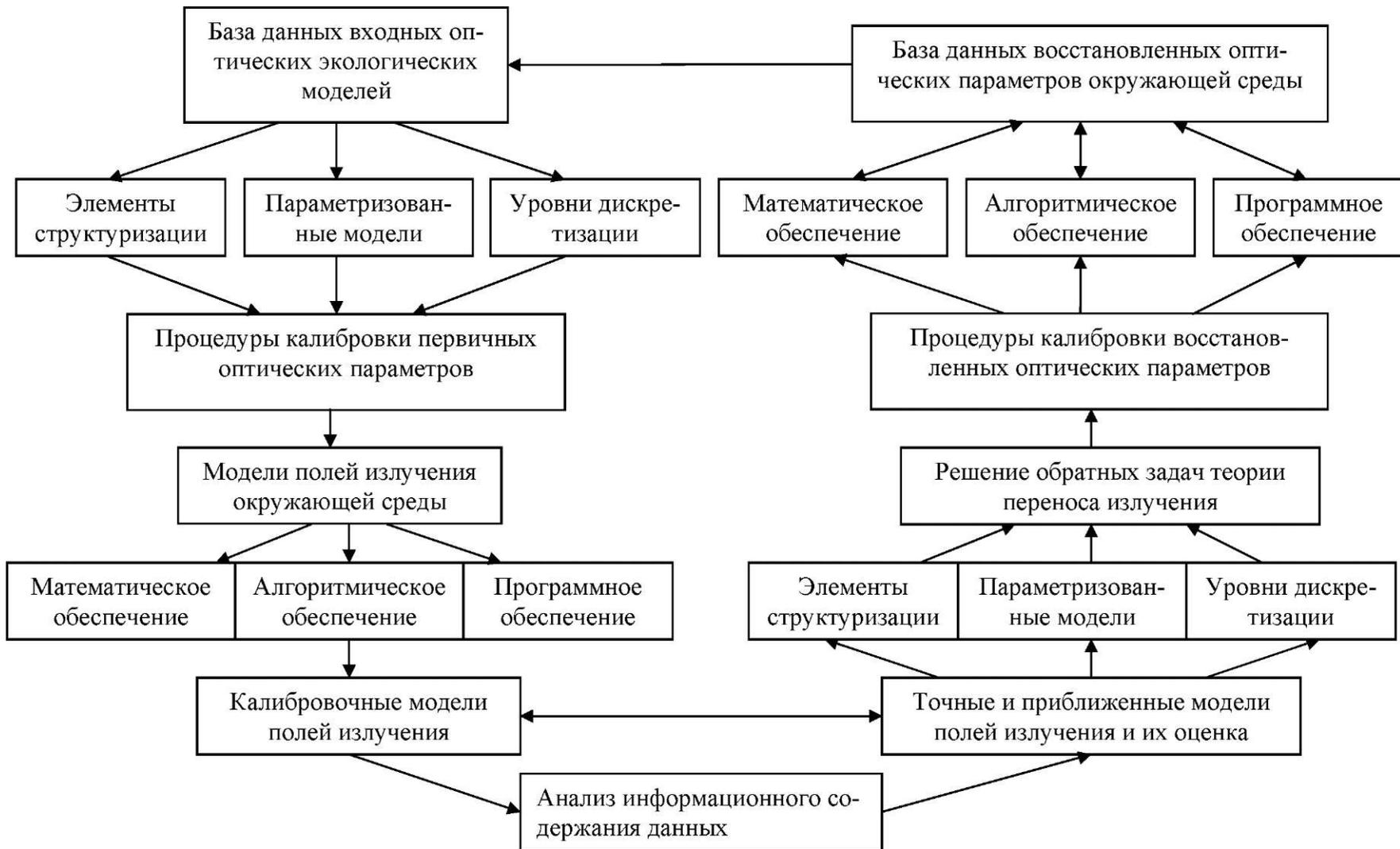


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема замкнутого имитационного моделирования полей излучения природных сред.

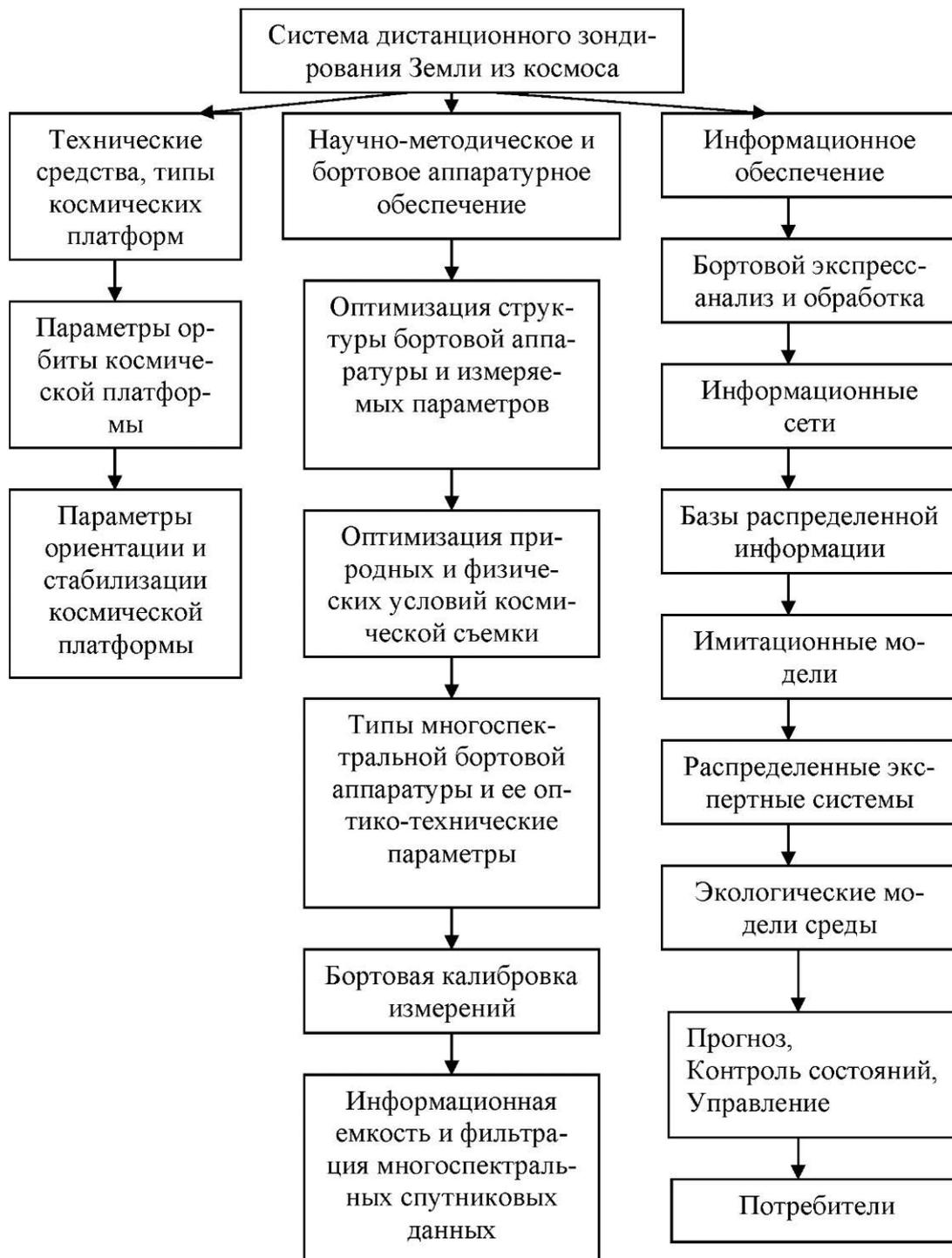


Рис. 2. Общая структурная схема дистанционного зондирования Земли из космоса.



Рис. 3. Общая структурная схема информационного обеспечения космического мониторинга Земли из космоса.

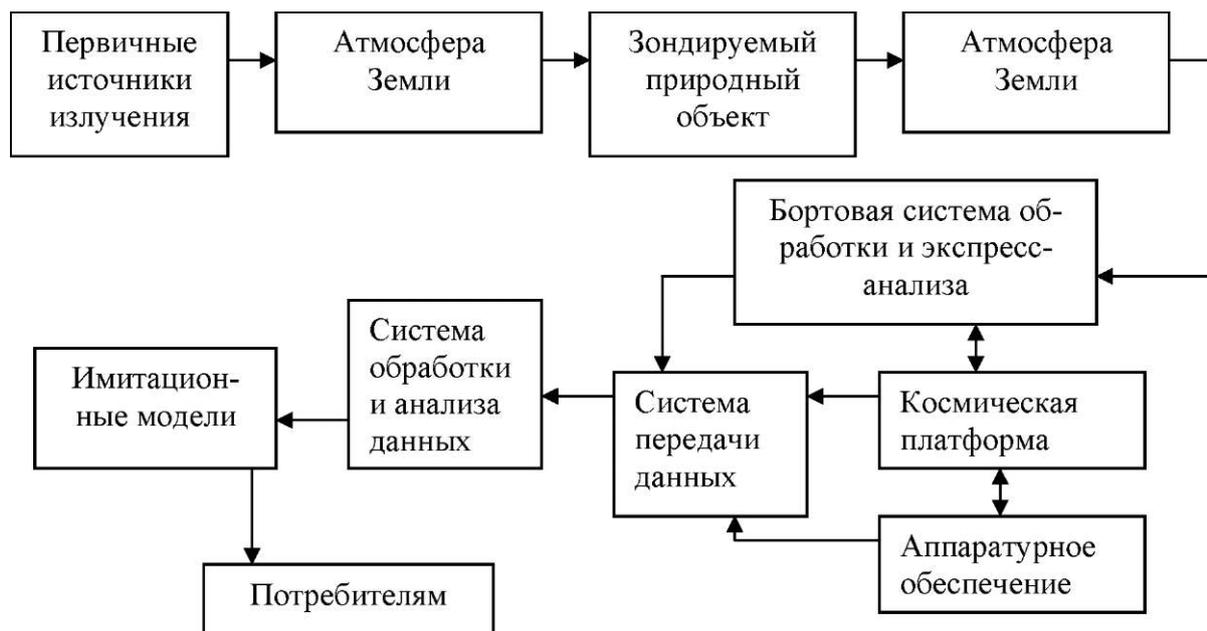


Рис. 4. Структура информационно-динамического спектрального оптического канала при дистанционном зондировании Земли из космоса.

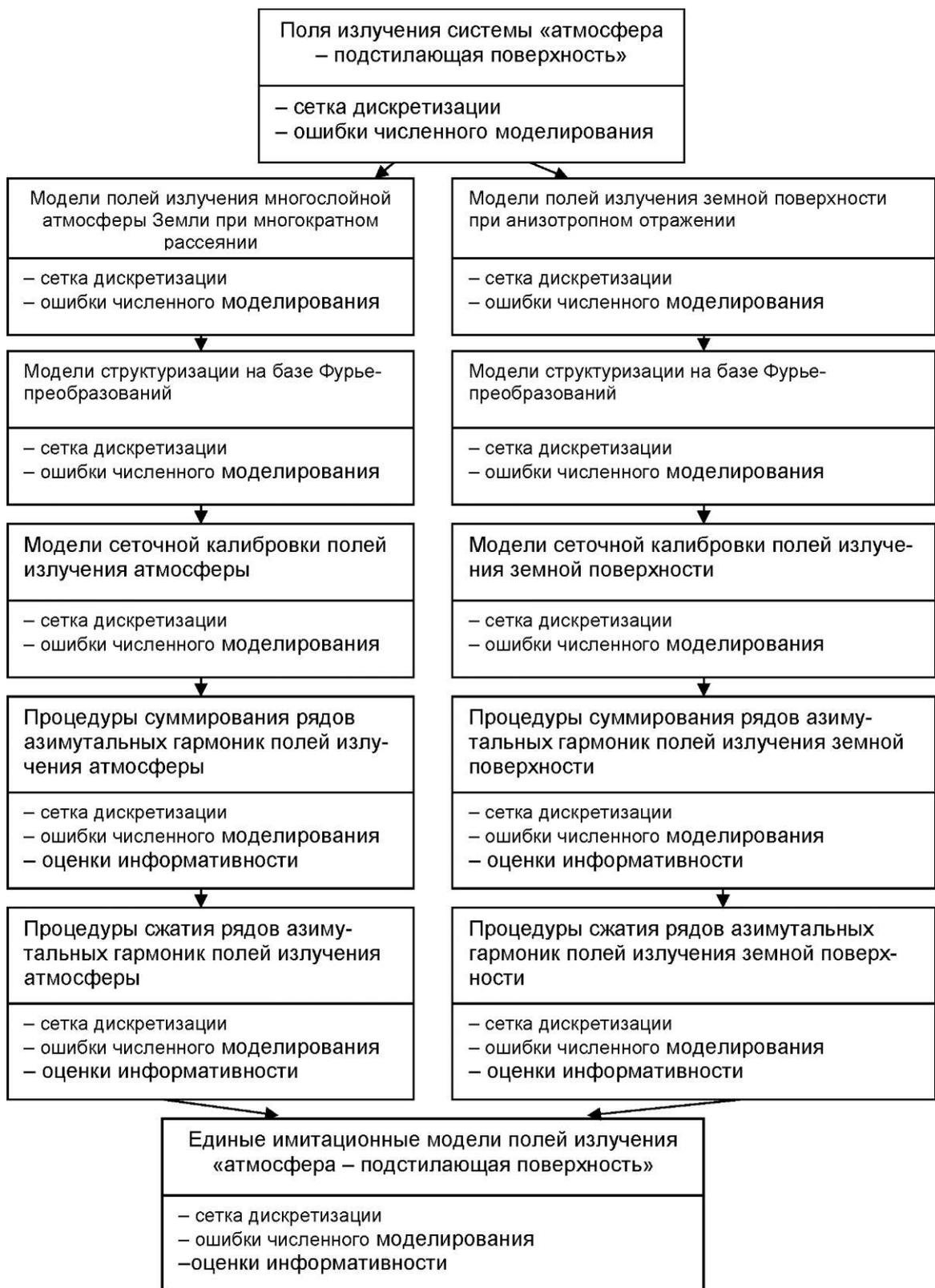


Рис. 5. Основные информационные уровни имитационного моделирования полей излучения природной среды.

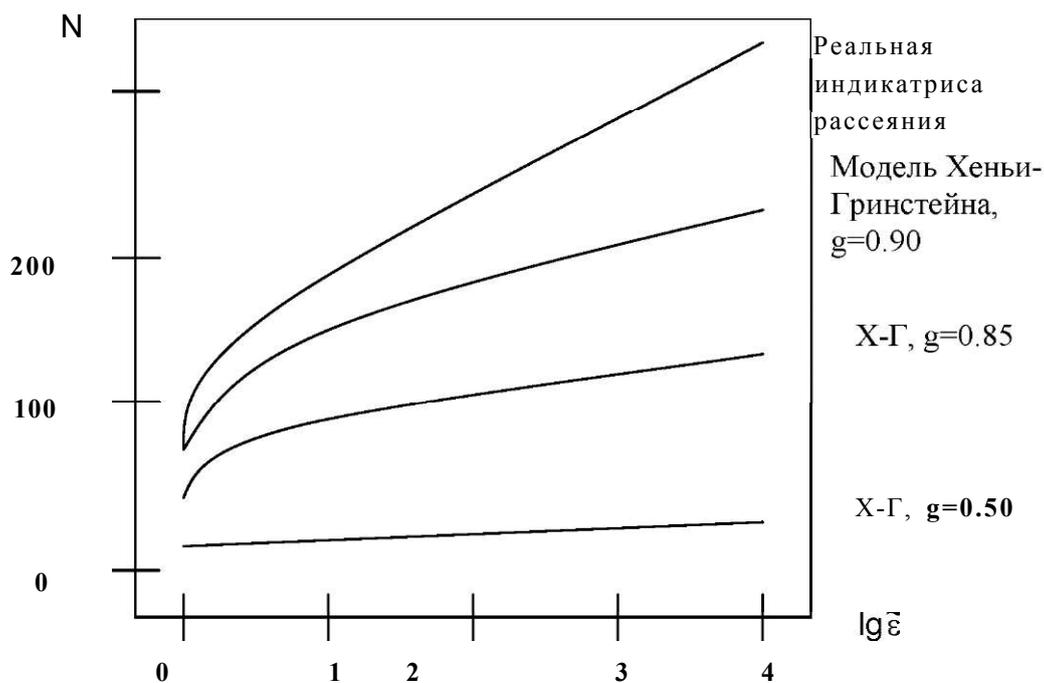


Рис. 6. Зависимость между общим числом азимутальных гармоник M и точностью аппроксимации \sim реальной атмосферной индикатрисы рассеяния $\chi^{\wedge}(\cos Y)$ моделью Хенни-Гринштейна (Х-Г).

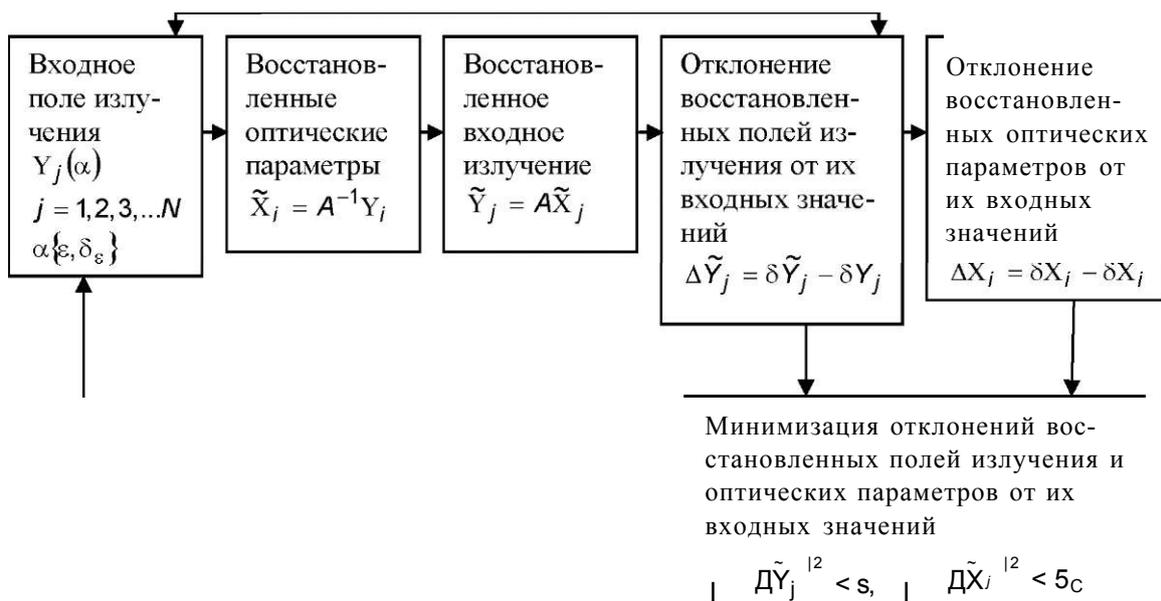


Рис. 7. Обобщенная схема уровней дискретизации (i, j) и вариаций (α) для входных и восстановленных оптических параметров x_j и полей излучения природной среды Y .

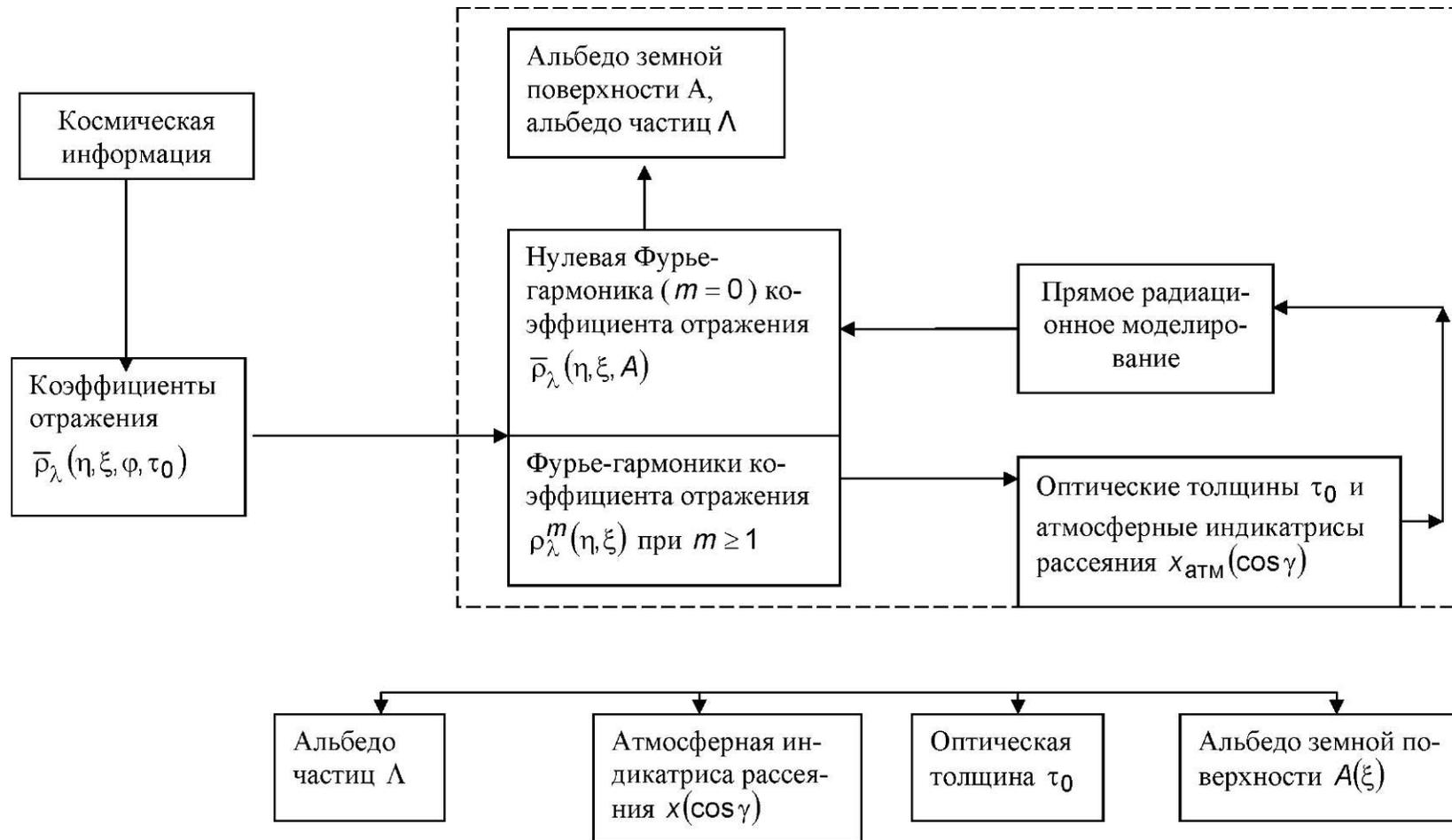


Рис. 8. Общая схема решений обратных задач теории переноса излучения при дистанционном зондировании из космоса для системы «атмосфера - подстилающая поверхность».

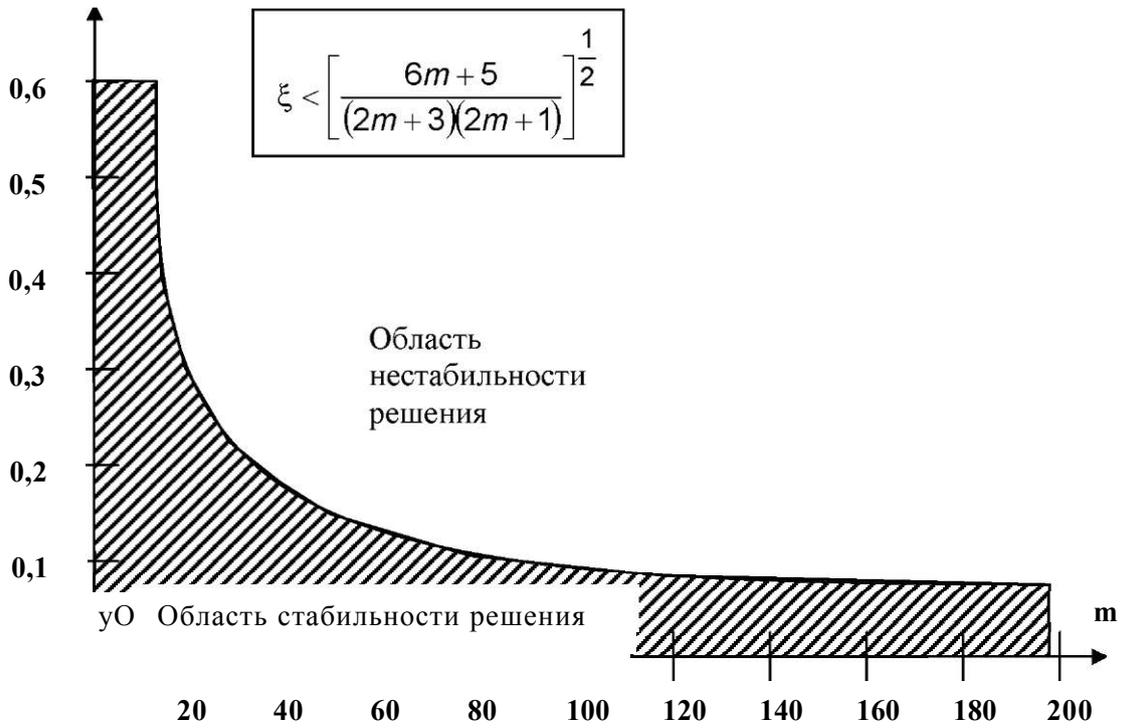


Рис. 9. Критерий стабильности точного решения обратных задач теории переноса излучения структурно-угловым методом.

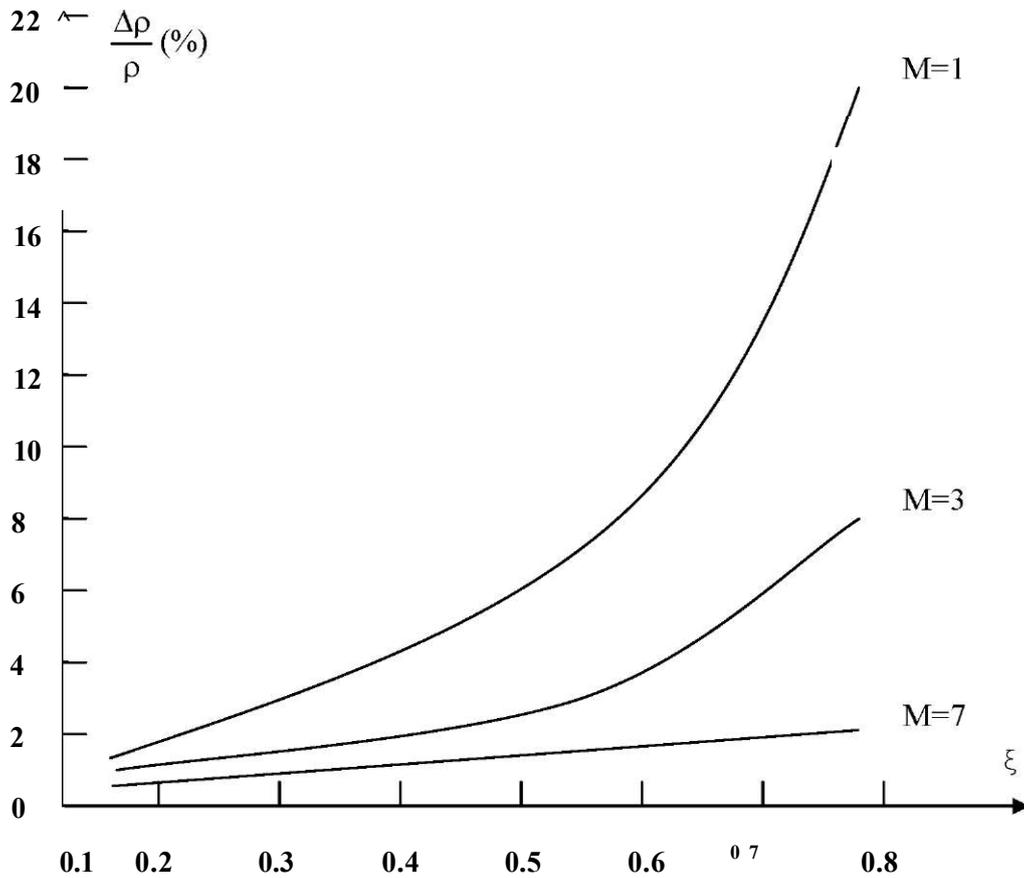


Рис. 10. Погрешность восстанавливаемых коэффициентов отражения ρ в зависимости от числа M их азимутальных гармоник ρ^m и зенитного расстояния Солнца ξ .

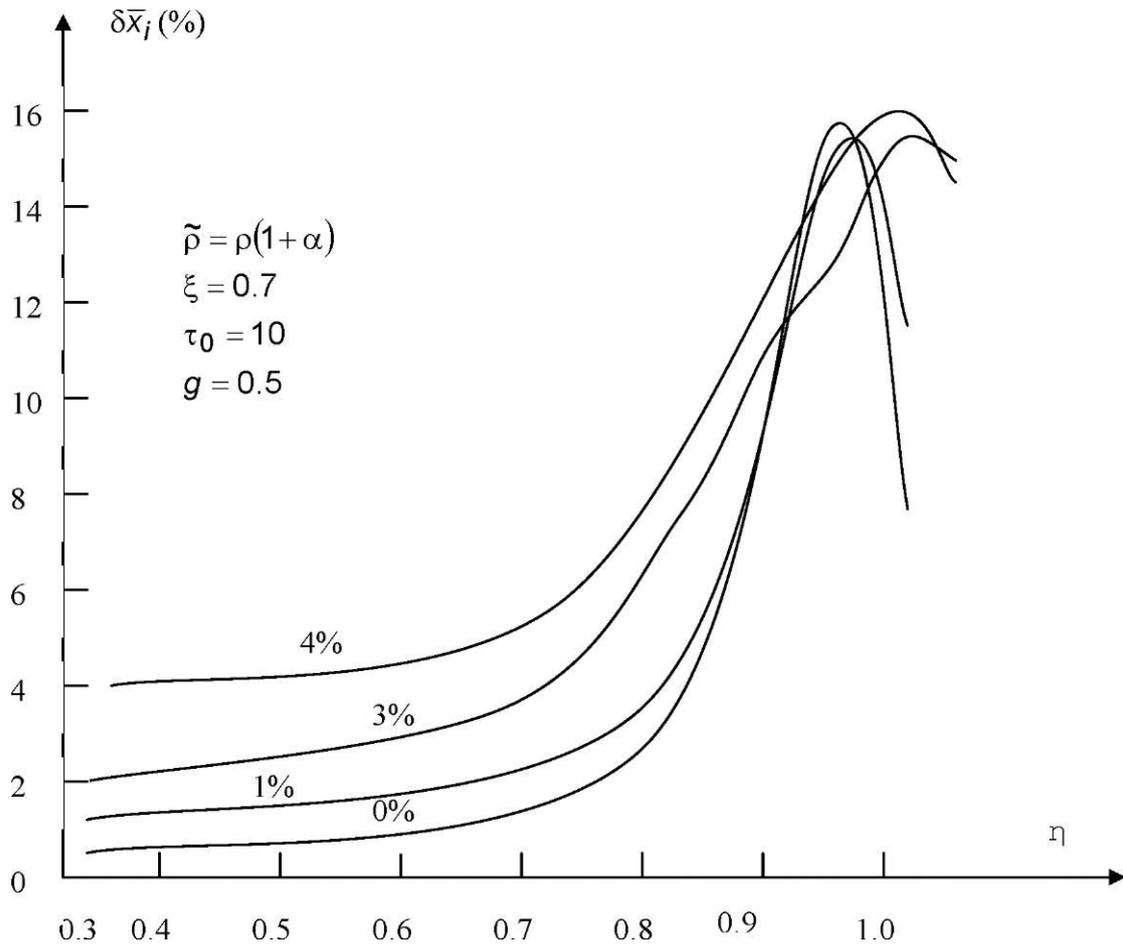


Рис. 11. Вариации восстанавливаемых коэффициентов X_j атмосферной индикатрисы рассеяния $x_{\text{атм}}(\cos Y)$ в зависимости от параметра возмущения α и угла визирования η .

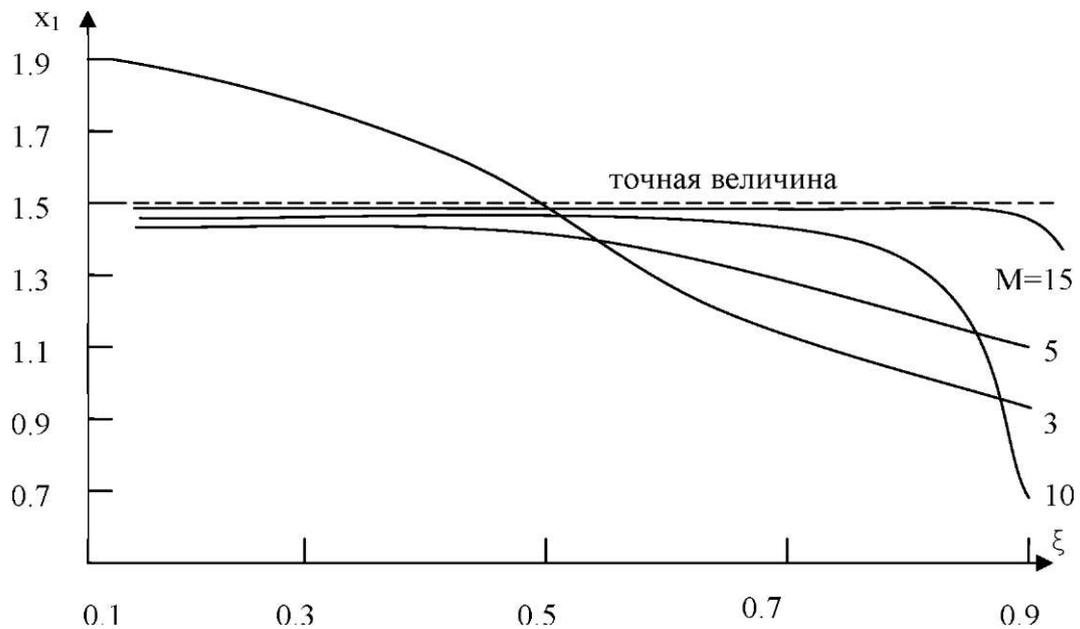


Рис. 12. Восстановление коэффициентов X_1 индикатрисы рассеяния $x_{\text{атм}}(\cos Y)$ в зависимости от зенитного расстояния Солнца ξ и числа азимутальных гармоник M

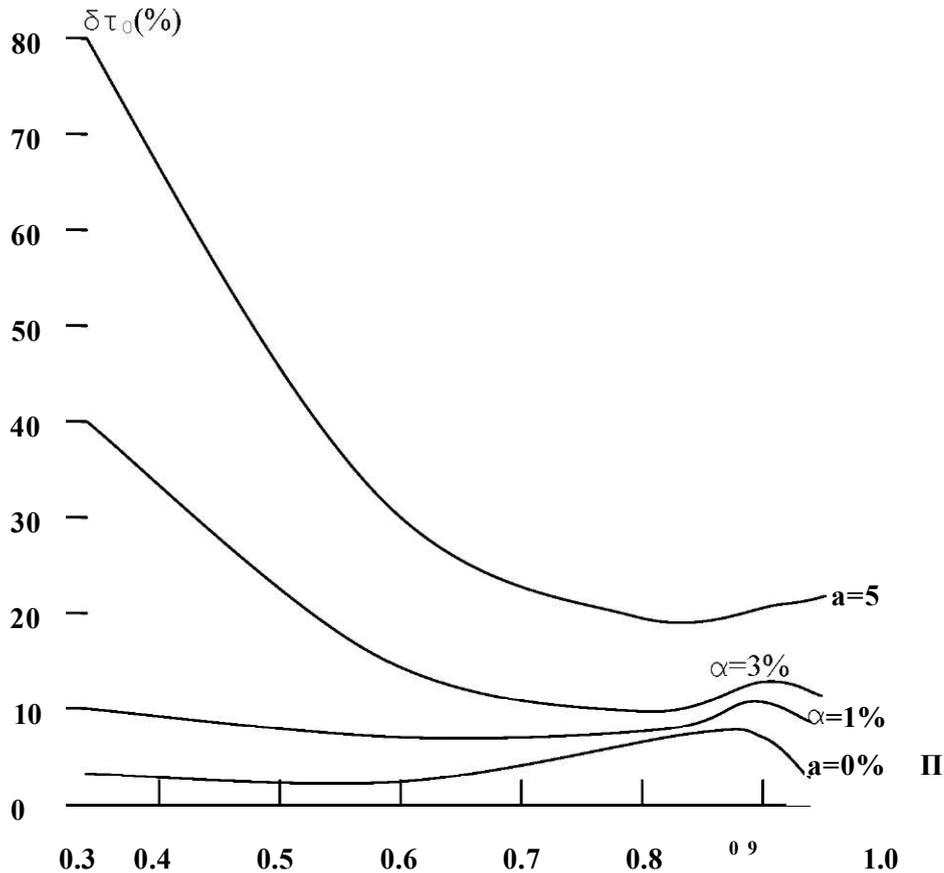


Рис. 13. Ошибки восстановления оптической толщины τ_0 в зависимости от параметра возмущения a и угла визирования Γ ($\rho = \rho(1 + a)$, $L = 0.3$, $\tau_0 = 10$, $l = 0.5$).

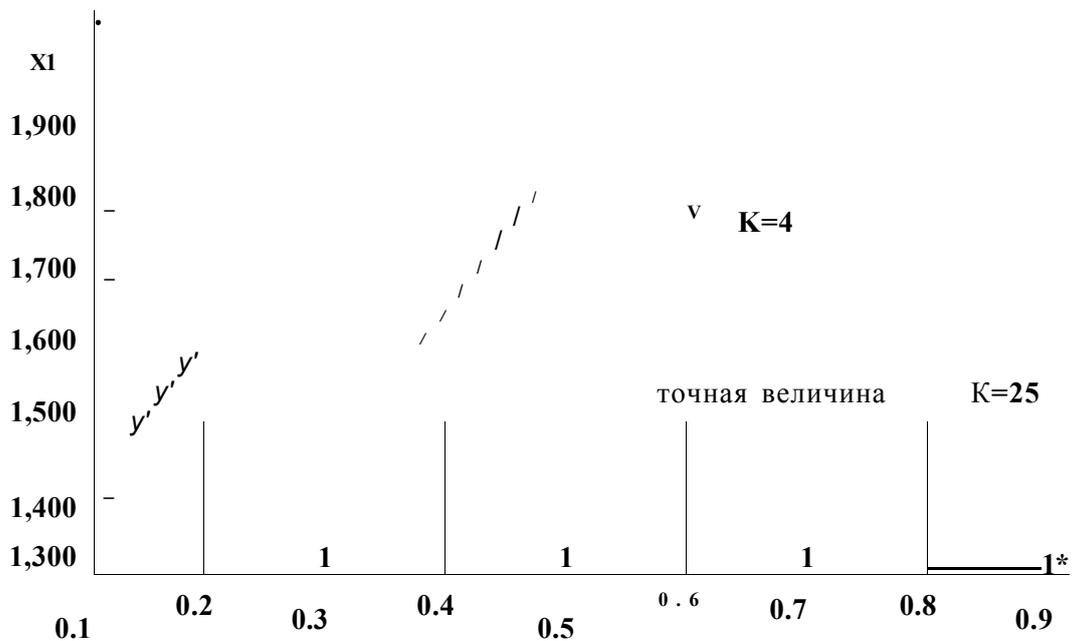


Рис 14. Зависимость восстановления коэффициентов x_1 атмосферной индикатрисы рассеяния $x_{атм}(\cos \gamma)$ от уровня угловой дискретизации K и зенитного расстояния Солнца Γ

Литература

1. *Elterman L.* UV, Visible and IR Ettenuation for Altitudes to 50 km // *Envir. Res. Papers. Rep. AFCRL-68-0153.* 1968. No. 285. P. 40.
2. *Kneizys F. X., Shettle E. P., Chetwynd J. H., Andersen G. P., Callery W. O., Selby J. E., Clough S. A.* Users Guide to LOWTRAN-7. Massachusetts: Computer Code LOWTRAN-7, Air Forse Geophysical Laboratory USA. AFGL-TR-88-0177 (NTIS AD A206773). 1988.
3. A Preliminary Cloudless Standard Atmosphere for Radiative Computation. Radiation Commission, JAMAP. Genewa: World Meteorological Organization. No. 24. P. 112.
4. *Смоктий О. И., Аниконов А. С., Кобякова Н. В.* Комплексные аэрозольные модели в задачах экологии и радиационного моделирования. Л.:ЛИИАН. 1990. Препринт № 124. 39 с.
5. *Смоктий О. И., Кобякова Н. В.* Адаптивное аэрозольное моделирование в задачах атмосферной коррекции аэрокосмической видеоинформации. СПб.: СПИИРАН. 1997. С. 376-380.
6. *Smokty O. I.* The Radiative Transfer in a Vertically Nonuniform Atmosphere Bounded from Below by an Arbitrary Reflecting Bottom // *IMGA-CNR Technical Report.* Modena. 1995. No. 1/95. 29 p.
7. *Smokty O. I.* The Photometrical Invariants in the Radiative Transfer Theory // *Proc. PIERS'94.* 1994. P. 509-510.
8. *Smokty O. I.* The Application of Multigrid Relaxation Methods to the Environment Radiation Fields Modelling // *IMGA-CNR Technical Report.* Modena. 1995. No. 1/95. 29 p.
9. *Соболев В. В.* Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука. 1972. 336 с.
10. *Амбарцумян В. А.* Научные труды. Т. 1, Т. 2. Ереван: АН Арм. ССР. 1960.
11. *Смоктий О. И.* Моделирование полей излучения в задачах космической спектрофотометрии. Л.: Наука. 1986. 352 с.
12. *Smokty O. I.* The Angle-structure Method of Inverse Problems Solutions of Radiative Transfer Theory // *Proc. IGARSS'93.* 1993. P. 2155-2157.
13. *Козодеров В. В.* Информационно-динамические аспекты описания природных явлений по наблюдениям из космоса // *Исследования Земли из космоса.* М. 2001. № 5. 27-44 с.
14. *Смоктий О. И., Фабриков В. А.* Методы теории систем и преобразований в оптике. Л.: Наука. 1989. 312 с.
15. *Cox I., Sheppard Y.* Information Capacity and Resolution in Optical System // *Journ. Opt. Soc. Amer.* Vol. 3, no. 3. 1986. P. 1152-1164.
16. *Smokty O. I.* The Basic Informational Content Levels for Satellite Ecological Investigation. *Proc. Intern. Conf. on Informatics and Control (ICI@C'97).* Vol. 3. St. Petersburg. 1997. P. 1137-1144.
17. *Покровский О. И.* Определение информационных характеристик систем дистанционного зондирования из космоса // *Оптика атмосферы и океана.* 1993. № 3. С. 227-235.
18. *Кондратьев К. Я., Григорьев Ал. А., Покровский О. М.* Информационное содержание данных космической индикации параметров среды. Л.: ЛГУ. 1975. 145 с.
19. *Kondratyev K. Ya., Kosoderov V. V., Smokty O. I.* Remote Sensing of The Earth from Space: Atmospheric Correction. Heidelberg: Springer-Verlag. 1992. 478 p.
20. *Kawata Y., Kusaka T., Ueno S., Smokty O. I.* Atmospheric Correction Algorithm for Remote Sensing Data with Multiviewing Angles // *Proc. IG ARSS'93.* Vol. 4. Tokyo. 1993. P. 1113-1115.
21. *Смоктий О. И., Аниконов А. С., Ильин А. Е., Кобякова Н. В.* Калибровочные модели оптических характеристик земной атмосферы. СПб.: СПИИРАН. 1992. Препринт № 158. 107 с.
22. *King M.* Number Terms Required in Fourie Expansion of the Reflection Function for Optically Thick Atmosphere // *Journ Quant. Spectrosc. Radiative Transfer.* 1986. Vol. 30, no. 2. P. 143-161.