

В.В. Козодеров, В.С. Косолапов

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ ПРИЛОЖЕНИЕ К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ БИОСФЕРЫ ИЗ КОСМОСА

На основе полиномиальной аппроксимации биомассы растительности от величины «показателя зеленого цвета растительности», получаемой для каждого элемента многоспектральных спутниковых изображений, исследуются точности восстановления биомассы и влияние на них различных факторов развиваемой модели и погрешностей измерений. Даны оценки соответствующих погрешностей восстановления.

В работе (1) авторы изложили основы новой концепции анализа многоспектральных спутниковых данных – концепции B^* , G^* – координат, позволяющей разделить почвенную и растительную компоненты излучения системы «атмосфера–растительность–почва» (B^* – «яркость почвы», G^* – «показатель зеленого цвета растительности»).

Нами получены выражения для B^* и G^* через принимаемое спутниковой аппаратурой излучение в двух каналах $L_{1,2}^*$ видимой и ближней ИК-областях при использовании простейшей модели влияния атмосферы на отраженное системой «почва–растительность» излучение как для условий неизотропных поверхностей, так и для более упрощенных относительно изотропных (Ламбертовых) поверхностей. Последними в первом приближении можно считать большой класс поверхностей при соблюдении следующих условий: при больших высотах Солнца i_0 , углах визирования меньших 30° , не очень сильно отличающихся от надира, а также при азимутах визирования $\varphi \sim 90$ или 270° (т.е. значительно удаленных от плоскости солнечного вертикала).

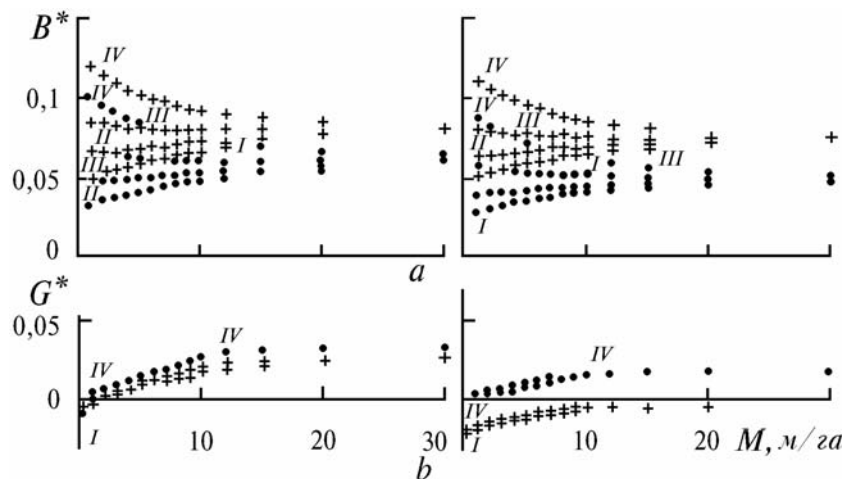


Рис. 1. Зависимость индексов $B^*(a)$ и $G^*(б)$ от M для 2-го и 4-го каналов MSS (левая часть) и 1-го и 3-го каналов MSS (правая) вблизи земной поверхности (точки) по данным [2] и на верхней границе замутненной атмосферы (крестики). Почвы: чернозем (I), темно-каштановые (II), дерново-подзолистые (III) и сероземные (IV)

Было показано существование связи между B^* , G^* и величиной биомассы растительности M (т/га) (рис. 1). Возникает необходимость решения обратных задач восстановления величины M по измеряемым со спутников или самолетов многоспектральным данным, линейные комбинации которых для каждого элемента аэрокосмического изображения и характеризуются координатами B^* и G^* , приведенными к верхней границе или соответствующему вы-

сотному уровню атмосферы. Это новый тип обратных задач атмосферной оптики, в которых атмосфера как помеха накладывает свои ограничения на точности восстановления M . Данный второй этап обработки изображений следует за более традиционным первым этапом их классификации, следствием которого является выделение на основе различных математических процедур и правил принятия решений однородных классов почв и растительности на обрабатываемых изображениях. На втором этапе тематической интерпретации оцениваются количественные параметры, характеризующие состояние выделенных классов. Одним из таких параметров является биомасса растительности M . Исследованию точностей восстановления M по координатам B^* и G^* для верхней границы атмосферы посвящена данная статья.

Восстановление значений биомассы по многоканальным спутниковым данным

Учитывая наличие зависимости B^* и G^* от M (рис. 1), можно попытаться восстановить значения M по спутниковым (или самолетным) изображениям, используя зависимости типа

$$M = C_0^*(n, k, r, \theta, h_\odot) + C_1^*(n, k, r, \theta, h_\odot)G^* + C_2^*(n, k, r, \theta, h_\odot)B^* + C_3^*(n, k, r, \theta, h_\odot)G^*B^* + C_4^*(n, k, r, \theta, h_\odot)G^{*2} + C_5^*(n, k, r, \theta, h_\odot)B^{*2} + \dots, \quad (1)$$

где n – тип атмосферных условий ($1 \leq n \leq 4$); k – тип аппаратуры; r – почвенный параметр, учитывающий тип почвы, влажность, плодородие и т.д.; θ – угол визирования; h_\odot – высота Солнца.

Такие попытки, однако, были безуспешными. Оказалось, что полученные коэффициенты C_i^* сильно зависят от различных параметров, характеризующих состояние системы «почва-растительность-атмосфера», например, от замутненности атмосферы, типа почвы, ее влажности и т.д. Учитывая, что изменчивость характеристики B^* при вариациях вышеупомянутых параметров рассматриваемой системы, как правило, значительно превосходит изменчивость B^* , связанную с вариациями величины M (рис. 1), а также то, что при плохом контроле условий съемки для восстановления M часто используются «не свои» коэффициенты $C_i^*(n, k, r, \theta, h_\odot)$, нетрудно понять, что признак B^* (и коэффициенты при нем) является источником значительных ошибок и разумно вместо (1) использовать зависимости M только от G^* :

$$M = C_0^*(n, k, r, \theta, h_\odot) + C_1^*(n, k, r, \theta, h_\odot)G^* + C_2^*(n, k, r, \theta, h_\odot)G^{*2} + \dots \quad (2)$$

Для нахождения коэффициентов C_i^* использовалась стандартная программа определения коэффициентов переопределенной системы линейных алгебраических уравнений. Как показали расчеты, лучшие результаты в восстановлении M при достаточно хорошей предварительной оценке вышеупомянутых параметров системы дает использование в (2) полиномов более высокой степени. Однако использование полиномов степени выше четырех при плохой контролируемости параметров рассматриваемой системы может приводить к ухудшению результатов восстановления M , особенно при больших ее значениях.

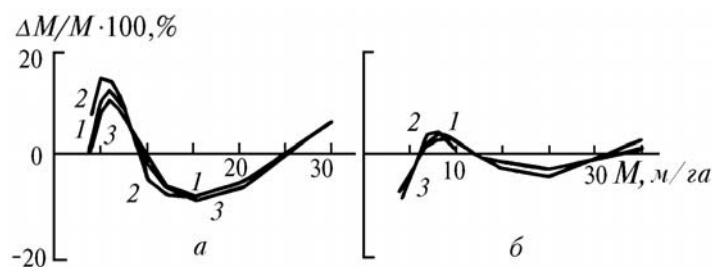


Рис. 2. Теоретические погрешности предлагаемого метода восстановления объема фитомассы растительности для аппаратуры AVHRR, 2-го и 4-го, 1-го и 3-го каналов MSS (кривые 1,2,3) при аппроксимации зависимости M от G^* полиномами четвертой (б) и третьей (а) степени

На рис. 2 приведены усредненные по всем типам почв и влажностям методические погрешности восстановления M (в качестве растительности используется озимая пшеница, исходя из тестового массива исходных данных [2] для зависимостей спектральной отражатель-

ной способности от величины биомассы растительного покрова), т.е. восстановления M «своими» коэффициентами C_i^* для аппаратуры AVHRR и 1, 3 и 2. 4-х каналов MSS при использовании в (2) аппроксимации полиномами третьей и четвертой степени. Видно, что методические погрешности невелики, особенно при использовании полиномов четвертой степени, и составляют не более 3–5% для $M > 3$ т/га. С понижением степени аппроксимации собственные (методические) ошибки несколько возрастают, но в основном не превышают 10–12% независимо от типа используемой аппаратуры.

Так как коэффициенты C_i^* зависят от целого ряда характеристик системы «почва-растительность-атмосфера», то при недостаточно хорошем контроле характеристик рассматриваемой системы в момент съемки возможно использование для восстановления M «не своих» коэффициентов C_i^* . Чтобы исследовать влияние каждого из этих параметров системы, можно использовать для восстановления M коэффициенты C_i^* для неких «средних» атмосферных условий, типов почв, их влажности и т.д., т.е. «не свои» коэффициенты (напомним, что в [1] нами были рассмотрены четыре состояния атмосферного замутнения: a , b – сильное; v – умеренное и z – слабое).

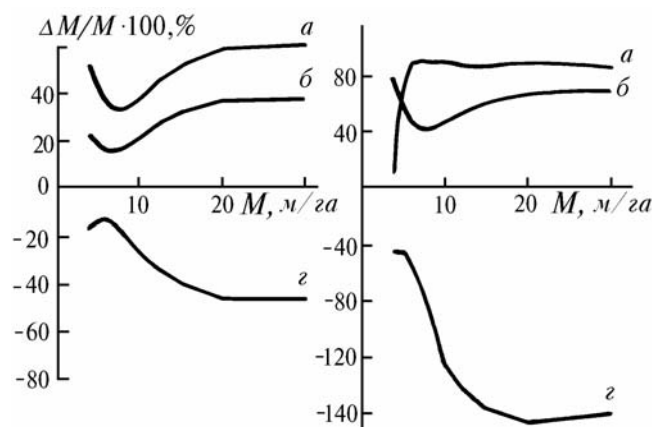


Рис. 3. Влияние неточного знания свойств атмосферы (типы a , b , z) в момент съемки при восстановлении биомассы растительности коэффициентами аппроксимации, соответствующими атмосферными условиями типа v для 2-го и 4-го (левая часть) и 1-го и 3-го каналов MSS (правая часть)

На рис. 3 приведены ошибки восстановления M с помощью коэффициентов третьего типа атмосферы – типа v (a почва и влажность точно соответствуют условиям измерений) для двух типов аппаратуры – 2, 4 и 1, 3-го каналов MSS. Видно, что ошибки весьма велики – до 40–60% для 2-го, 4-го и до 80–160% для 1-го, 3-го каналов MSS (большие ошибки в последнем случае связаны с большим влиянием атмосферных условий на первый коротковолновый канал, см. также рис. 1). Из данных рис. 3 следует, что использование для восстановления M коэффициентов C_i^* для неких «средних» атмосферных условий далеко не всегда обеспечивает высокую точность восстановления M . В тех случаях, когда имеется какая-либо минимальная (приблизительная) информация о состоянии атмосферы (ниже мы приведем схему нахождения «своего» типа атмосферы на момент космической съемки), можно использовать для восстановления M коэффициенты C_i^* не одного, а двух или даже трех типов атмосфер с последующим усреднением полученных значений M , что приведет к уменьшению погрешностей восстановления. Более того, если можно говорить о вероятности t_n того или иного атмосферного состояния, то следует использовать эти весовые коэффициенты t_n при усреднении восстановленных значений M_n , приближая соответствующие кривые рис. 3 к оси абсцисс – нулевой ошибке восстановления (в данном случае для атмосферы типа v). На рис. 4 приведены результаты восстановления M для тех типов аппаратур, что и на рис. 3, с помощью коэффициентов C_i^* двух типов атмосферы (один из которых точно соответствует истинному состоянию атмосферы). Нетрудно видеть, что погрешности восстановления M для любого типа атмосферы в основном не превышают в этом случае 15–20% для 2-го, 4-го и 25–35% для 1-го,

3-го каналов MSS (и лишь для атмосферы типа г в последнем случае ошибки могут возрастать до 60–80%). В тех же случаях, когда наблюдается какое-то промежуточное состояние атмосферы, например, между *б* и *г*, то использование коэффициентов C_i^* атмосфер *б* и *г* будет давать практически близкие к нулю погрешности восстановления M . Таким образом, из сравнения данных рис. 3 и 4 следует, что минимальная априорная или иная информация о текущем состоянии атмосферы в момент съемки со спутника обеспечивает уменьшение погрешностей восстановления биомассы растительности.

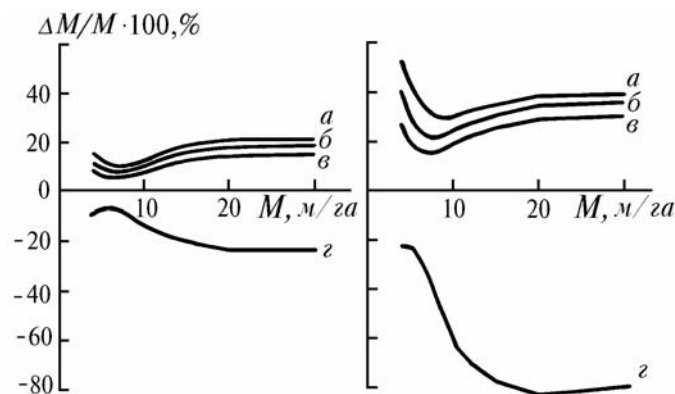


Рис. 4. Уменьшение погрешностей восстановления биомассы растительности по многоспектральным измерениям со спутников при использовании дополнительных сведений об оптическом состоянии атмосферы в момент съемки (обозначения соответствуют рис. 3)

Дистанционный контроль состояния атмосферы

Из вышеизложенного ясно, что непрерывный, желателен дистанционный контроль состояния атмосферы позволил бы существенно снизить погрешности восстановления M . Предлагаемая здесь схема такого контроля весьма проста и не требует привлечения какой-либо дополнительной аппаратуры.

Пусть среди множества объектов на сканерном изображении исследуемого района помимо растительных объектов имеются объекты с $M=0$, например, какие-либо распаханые участки (или просто грунтовые дороги). Эти участки имеют и нулевые приземные значения признака G (так как все почвенные точки находятся на оси B). Подставляя тогда измеренные со спутника яркости этих объектов L_1^*, L_2^* в ранее полученное нами [1] выражение

$$G = a_1^{*g} L_1^* + a_2^{*g} L_2^* - (a_1^{*g} D_1 + a_2^{*g} D_2),$$

(напомним, что D_j – яркость атмосферной дымки в j -м канале используемой аппаратуры), а также последовательно перебирая различные четверки параметров p_1, p_2, D_1, D_2 каждого из четырех введенных нами состояний атмосферы *a, б, в, г* и соответствующие им коэффициенты $a_{1,2}^{*g}$, находим набор этих параметров, при котором значение G наиболее близко к нулю. Необходимо лишь достаточно высокое разрешение аппаратуры и уверенное распознавание таких объектов.

Если по каким-либо причинам невозможно или затруднительно использование почвогрунтового объекта для определения состояния атмосферы, можно использовать в этом случае какую-либо водную поверхность, присутствующую на изображении. Так как спектральные коэффициенты яркости водной поверхности незначительны, то согласно [1] принятое со спутника излучение в основном определяется яркостью дымки ($L_1^* \approx D_1$), что позволяет по одному из параметров (D_1) найти весь набор взаимосвязанных параметров $p_{1,2}, D_{1,2}$, т.е. определить состояние атмосферы.

Как показали расчеты, трудности с практической реализацией вышеизложенной схемы связаны с погрешностями измерительной аппаратуры, в результате чего может оказаться, что значение $G \approx 0$ будет выполняться для каких-либо «соседних» атмосферных параметров $p'_{1,2}, D'_{1,2}, a_{1,2}^{*g}$. Выходом из такого положения является привлечение достаточно большого числа (20–30)

«почвенных» измерений, после усреднения которых существенно снижается случайная аппаратная ошибка.

Влияние различных факторов на точность восстановления M

Кроме атмосферы, ухудшающей точности восстановления M , существенно также влияние возможных ошибок, обусловленных неточным знанием типа и влажности почв. Так, например, при использовании коэффициентов «не своих» типов почв ошибки восстановления M в основном не превышают 10–15%. Однако для полностью сухих почв ошибки в определении M могут возрасти до 20–25%. Ошибки M при неконтролируемости влажности для более темных почв (черноземы), как правило, не превышают 5–10%, однако для более ярких (подзолы, сероземы) эти ошибки могут достигать 15–18%.

Исследовалось нами и влияние погрешностей аппаратуры на точность восстановления M . Как оказалось, эти ошибки различаются, но разным каналам и типам измерительных аппаратур и зависят от атмосферных условий. Так, например, первый (коротковолновый) канал MSS особенно сильно подвержен влиянию атмосферы, и поэтому при использовании первого и третьего каналов MSS ошибки восстановления M в наиболее мутной атмосфере (тип a) значительно возрастают и могут превышать 100% при точности аппаратуры по первому каналу $\sim 20\%$. При использовании более длинноволновых каналов влияние атмосферы сказывается слабее, общий уровень ошибок снижается особенно по первому каналу и, как правило, влияние второго канала превышает влияние первого. На рис. 5 приведено влияние погрешностей измерений 2-го и 4-го каналов аппаратуры MSS на точность восстановления M (при атмосферных условиях типа b). Видно, что требования к точности второго канала будут более жесткими (3–5%), чем для первого (5–10%). При этих условиях возможно достижение 20%-й точности восстановления M .

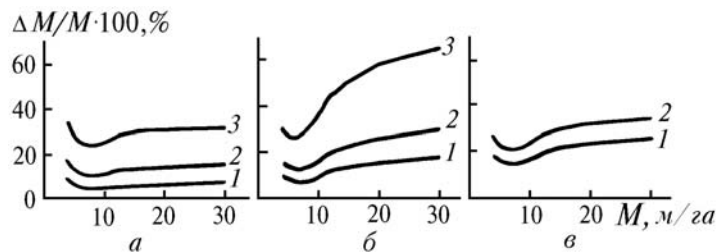


Рис. 5. Влияние погрешностей измерений аппаратуры MSS (2-й 4-й каналы) на точность восстановления биомассы растительности: a – при погрешностях δL_1 измерений в канале 2, равных соответственно 5, 10, и 20% (кривые 1–3); b – при δL_2 для канала 4, равных 3, 5 и 10% (кривые 1–3); v – при $\delta L_1 = 5\%$ и $\delta L_2 = 3\%$ (1), $\delta L_1 = 10\%$ и $\delta L_2 = 3\%$ (2)

Одним из наиболее существенных моментов в изложенном здесь спутниковом методе оценки параметров почвенно-растительного покрова является использование определенной априорной информации, характеризующей зависимостью спектральной отражательной способности от биомассы M [2]. Используя эти априорные сведения, можно рассчитать «координатные» коэффициенты $a_{1,2}^{*bg}$ (коэффициенты перехода от L_1^* , L_2^* , к B^* , G^* – координатам), а также коэффициенты восстановления (аппроксимации) C_i^* , с помощью которых для каждого элемента обрабатываемого изображения может быть восстановлена биомасса растительности M .

Естественно ожидать, что такая исходная информация по ряду причин сама может содержать некоторые погрешности. В числе таких причин могут быть, например, неучет анизотропии почвенно-растительных объектов, высоты Солнца, наличие облачности, мутности атмосферы, погрешности в измерении биомассы растительности, случайные (флуктуационные) и систематические ошибки измерительной аппаратуры.

В зависимости от характера ошибки в спектральных коэффициентах яркости $\rho(\lambda, M)$ удобно разделить на систематические и случайные, а также на ошибки в измерении M и ошибки по спектру.

Проведенные нами расчеты (рис. 6) показали, что для аппаратуры MSS систематические ошибки в установлении связи ρ_λ с M (независимо от причин их возникновения) порядка 5%

приводят к ошибкам восстановления значений M со спутника от 5 до 15% (меняясь по M), но для аппаратуры AVHRR эти ошибки возрастают до 15–28%.

Для случайных (знакопеременных) ошибок в априорной связи ρ с M порядка 3% ошибки восстановления M достигают 5–7% для MSS и 10–15% для AVHRR.

При наличии случайной ошибки в ρ по λ за счет прибора (искажение по спектру) ~ 3% дополнительно возникают ошибки в восстановлении M до 3% для 2 и 4 каналов MSS, до 5–7% для AVHRR и до 6–9% для 2 и 3 каналов MSS.

Другой важной априорной информацией являются четверки взаимосвязанных атмосферных параметров $p_{1,2}, D_{1,2}$ для введенных выше четырех атмосферных состояний a, b, v, z . Вполне вероятно, что реально существующая связь (взаимное соответствие) величин $p_{1,2}$ и $D_{1,2}$ будет несколько отличаться от установленной нами (таких данных, к сожалению, мало, и, возможно, в будущем следует уточнить эти связи).

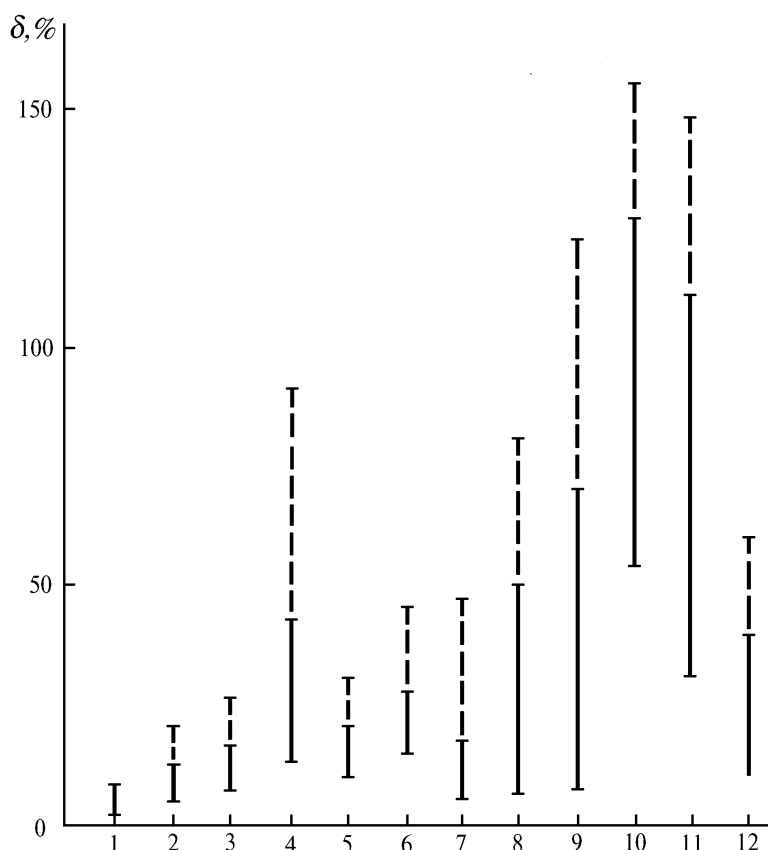


Рис. 6. Влияние различных факторов на погрешности восстановления биомассы растительности. Цифры на оси абсцисс: 1 – теоретическая точность метода; 2 – влияние неконтролируемых условий увлажнения почв; 3 – эффект неточного знания почв в момент многоспектральной съемки со спутника; 4 – влияние неточного знания оптического состояния атмосферы; 5 – отличие исходной модели от используемой опорной модели [2]; 6 – влияние погрешностей используемой модели прозрачности атмосферы; 7 – неучет реального угла визирования; 8 – неучет высоты Солнца в момент съемки; 9 – неучет реальной неортоотропности отражения; 10 – отсутствие стадии классификации многоспектральных изображений; 11 – неучет при восстановлении сезонных изменений спектрального образа растительности; 12 – влияние случайных погрешностей измерений спутниковой аппаратуры

Расчеты показывают, что если параметр D , определен с точностью до 10% (а остальные три параметра определены точно), то возникающая вследствие этого ошибка в восстановлении M не превышает 5–10% для 2-го и 4-го каналов MSS, 10–15% для AVHRR и до 30–40% для 1-го и 3-го каналов MSS (вследствие сильной чувствительности первого канала MSS к замутнению атмосферы).

При погрешности в определении D_2 примерно 10% ошибки в восстановлении не превышают 5–7% при использовании любого типа аппаратуры.

При ошибках в значениях p_1 около 5% ошибки в восстановлении M могут достигать 6–13% при использовании 2-го и 4-го каналов MSS и AVHRR и до 10–15% для 1-го и 3-го каналов MSS, а при неточности в определении $p_2 \sim 5\%$ соответствующие ошибки в оценках M могут достигать 10–20% для 2-го и 4-го каналов MSS и AVHRR и до 15–25 % для 1-го и 3-го каналов MSS. С ростом ошибок в определении p_1 и p_2 – наблюдается практически линейный рост ошибок в восстановлении M . Следует отметить, что так как ошибки одного знака в p_1 и p_2 (а также и в D_1 и D_2) приводят к разным по знаку ошибкам в определении M , то при наличии одновременных ошибок одного знака в p_1 и p_2 (в D_1 и D_2) имеет место частичная взаимная компенсация соответствующих погрешностей восстановления M . Все вышеизложенное относительно влияния разных факторов на точности оценки значений проиллюстрировано на рис. 6, где сплошной линией изображен диапазон возможных ошибок при относительно благоприятных условиях воздействия соответствующих ошибок (при меньшем, но реальном уровне присутствия этих факторов, при использовании наиболее «подходящего» типа аппаратуры и т.д.), а штриховые линии – возможные максимальные ошибки.

Наиболее значительное влияние на ошибки восстановления M оказывают следующие факторы: 1) отсутствие контроля (распознавания) типа растительности и, вследствие этого, использование для восстановления M коэффициентов C_i^* «не своих» типов культур; 2) неучет сезонных изменений растительности (их отражательных характеристик); 3) неучет неизотропности отражения (при невыполнении вышеприведенных условий квазиизотропии).

Упомянутый в начале статьи первый этап обработки аэрокосмических изображений является предметом уточнения первых двух факторов на момент съемки, что снижает тем самым влияние этих факторов на данном втором этапе оценки параметров, осуществляемом на практике для выделенных классов сезонного развития растительности и текущего состояния почв. Влияние третьего фактора сводится к минимуму для солнечно-синхронных полярно-орбитальных спутниковых данных, когда разность азимутов визирования и Солнца для сканерных космических систем близка к 90 и 270°, где анизотропия отражения почв и растительности не столь существенна, как в плоскости солнечного вертикала [2].

Несколько меньшее влияние на результаты восстановления M , но также весьма заметное, оказывают такие факторы, как недостаточная контролируемость состояния атмосферы и высоты Солнца в момент аэрокосмической съемки. Здесь также необходимо максимальное снижение уровня неопределенности в знании этих факторов для более правильного выбора коэффициентов C_i^* .

Остальные факторы при неблагоприятных условиях также могут весьма существенно ухудшать результаты оценки M , но их влияние заметно меньше вышеупомянутых.

Заключение

Изложенный новый метод количественной оценки параметров почв и растительности по многоспектральным аэрокосмическим изображениям открывает новые перспективы мониторинга биосферы из космоса. Были показаны реальные возможности предлагаемого нового метода для формулировки требований к точности спутниковых измерений с учетом погрешностей влияющих факторов исследуемой модели чувствительности параметров B^* и G^* к указанным параметрам. Дальнейшее технологическое внедрение предлагаемого метода позволит получать объективную оценку состояния почв и растительности с анализом погрешностей восстановления параметров состояния для каждого элемента обрабатываемых аэрокосмических изображений.

1. Козодеров В. В., Косолапов В. С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 852-859.

2. Рачулик В. И., Ситникова М. С. Отражательная способность и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 288 с.

Институт вычислительной математики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
28 ноября 1992 г.

V. V. Kozoderov, V. S. Kosolapov. **Inverse problems of atmospheric optics: application to assessments of the biospheric parameters from space.**

Precisions of vegetation biomass retrieval and effects of various factors of the developed model and measurement accuracies on it are studied using polynomial approximations of the biomass from the greenness for every pixel of multispectral satellite images. Assessments of the relevant retrieval accuracies are given.