

В.В. Козодеров, В.С. Косолапов

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ СПУТНИКОВЫХ СКАНЕРНЫХ СИСТЕМ

В развитие концепции «яркости почвы» и «показателя зеленого цвета растительности» получены новые результаты оценки показателя плодородия почв по многоспектральным аэрокосмическим изображениям. Приведены примеры влияния неточного знания свойств атмосферы, погрешностей измерения и ряда других влияющих факторов на точности восстановления содержания гумуса в распаханых почвах.

Введение

В новых задачах атмосферной оптики, связанных с дистанционным зондированием из космоса поверхности суши, существенно понимание принципов формирования спектральных образов растительности и почв в поле уходящего оптического излучения. В [1] описана постановка задачи трансформации отраженного излучения до уровня верхней границы атмосферы и восстановления параметров почвенно-растительного покрова по многоспектральным аэрокосмическим изображениям. В [2] показаны точностные оценки решения соответствующих обратных задач атмосферной оптики по восстановлению объема фитомассы (биомассы) растительности.

В данной статье приводятся некоторые результаты решения аналогичной задачи по оцениванию основного показателя плодородия почв из космоса, имея в виду, что отражательная способность почв в период максимальной распаханности чувствительна к содержанию в них гумуса [3]. Иллюстрируемые ниже примеры характеризуют измерения аппаратуры MSS спутников LANDSAT (США) и ее аналог – многоспектральную сканирующую систему МСУ-Э советского спутника «Космос-1939».

Постановка задачи

Ранее рассмотренная нами [1, 2] концепция B –, G – координат дает возможность дистанционной оценки не только характеристик растительности (в первую очередь, объема фитомассы), но и почв, в частности, оценки содержания гумуса Γ в почвах.

В общем случае, как это уже отмечалось в [1], необходимо знать индикатрису отражения поверхности. Однако во многих случаях выполняются условия квазиизотропии поверхности [1,4] и можно ограничиться рассмотрением более простых Ламбертовых поверхностей.

Как известно [3], отражательная способность почвы зависит от ряда факторов: ее химического и минералогического состава (содержания в ней гумусовых веществ, соединений окислов железа, кремнекислоты и т.д.), типа почвы и степени ее увлажненности, поверхностной структуры (обработанности), структуры облучающего потока (освещенности поверхности прямым и рассеянным излучением Солнца), зависящей от облачности, мутности атмосферы и высоты Солнца.

Наша задача - на основе моделирования полей уходящего излучения для системы «земная поверхность-атмосфера» получить значения характерных признаков («яркость почвы» – B и «показатель зеленого цвета растительности» – G), характеризующих состояние исследуемых объектов поверхности суши на верхней границе атмосферы, применяя вместо чисто модельных (как это часто делается [4]) представлений реальные экспериментальные зависимости спектральной отражательной способности от различных факторов [3] с использованием определенных моделей атмосферы [1]. При обработке многоспектральных спутниковых изображений эти признаки, состояния объектов (в данном случае распаханых полей) рассчитываются по реальным цифровым эквивалентам изображений как некоторые комбинации измерительных каналов сканирующих спутниковых радиометров с известными наборами

коэффициентов, связывающих B , G и спектральные яркости L_1, L_2 в двух соответствующих каналах. Эти коэффициенты характерны для используемых обучающих выборок в форме зависимостей, следующих из (3). В этой связи появляется возможность обоснования точности восстановления искомым параметров G , влияющих на измеряемые со спутников функционалы, в предполагаемой схеме объединения данных моделирования и мониторинга.

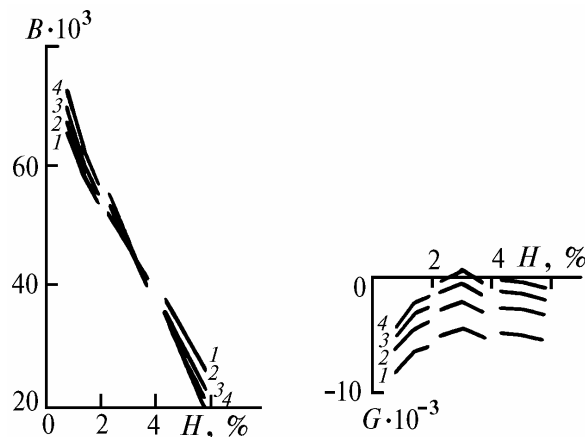


Рис. 1. Зависимости B и G от содержания гумуса для трех типов почв и четырех уровней атмосферного замутнения: от сильно замутненной (1), соответствующей типу a по терминологии [1], до прозрачной (4) (тип z в [1])

На рис. 1 приведены рассчитанные нами зависимости величин B и G в надир от содержания гумуса G в сухих черноземных, темно-серых лесных и дерново-подзолистых почвах, полученные по данным [3], после их соответствующей сортировки, систематизации и последующей свертки с функцией чувствительности для аппаратуры MSS 2-го и 4-го каналов. Характерные дискретные распределения B в зависимости от G связаны с дискретной формой представления в [3] исходных спектров отражения, полученных с низколетящих самолетов, как функции содержания в них гумуса, наиболее типичного для представленных типов почв: 4–6% для черноземных, 2–4% для темно-серых лесных и до 2% для дерново-подзолистых. Мы не обсуждаем здесь степени репрезентативности используемых исходных данных (спектральная отражательная способность как функция основного показателя плодородия почв), а используем только полученные в [3] зависимости для обоснования точностей решения обратных задач восстановления значений G из космоса на основе данной обучающей выборки с учетом искажающего влияния атмосферы. Из рис. 1 видно, что если значения G мало меняются при изменении G , то зависимость B от G проявляется весьма сильно. Кроме того, отчетливо видна обратная зависимость яркости от замутненности атмосферы у темных и светлых почв: у черноземов величина B возрастает с увеличением мутности атмосферы [1,2] (яркости дымки), а у более светлых подзолистых почв величина яркости B уменьшается с возрастанием замутненности атмосферы, что соответствует данным [5].

Это дает основание сохранить для оценки содержания гумуса в почвах по спутниковым двухканальным измерениям уже использованный нами ранее для восстановления биомассы растительности M [1,2] полиномиальный вид зависимости G только от B , как наиболее информативной и единственной характеристики, т.е.

$$G = C_0(k, r, l, n) + C_1(k, r, l, n)B + C_2(k, r, l, n)B^2 + \dots,$$

где k – тип измерительной аппаратуры; r – тип почвы; l – ее влажность; n – тип атмосферных условий.

Так как зависимость B от G близка к линейной (рис. 1), то очевидно, что в формуле можно ограничиться двумя-тремя коэффициентами C_i . Эти коэффициенты находятся по данным (априорным) совместных измерений КСЯ (коэффициенты спектральной яркости) почв и соответствующих им значений G (аналогично подходу расчетов соответствующих коэффициентов для восстановления биомассы растительности [2]).

Влияние различных факторов на точность восстановления гумуса почв

На точность изложенного здесь дистанционного метода восстановления гумуса почв по наблюдениям из космоса наиболее заметное влияние оказывают такие часто присутствующие факторы, как плохой (или вовсе отсутствующий) контроль состояния атмосферы в момент съемки, типа и влажности почв, состояния (обработанности) поверхности; неучет реальной неизотропности отражательных свойств (индикатрисы отражения поверхности), высоты Солнца, неучет угла визирования или неточное знание угловых координат съемки, погрешности измерительной аппаратуры, наличие ошибок в используемой априорной информации. В последнем случае речь идет об исходных данных, используемых для расчета коэффициентов $C_i(k, r, l, n)$, а также в параметрах используемых нами четырех атмосферных состояний P_n, D_n , где P – прозрачность атмосферы; D – яркость атмосферной дымки; n – тип атмосферного замутнения [1]. Прежде всего следует отметить, что методические ошибки (аппроксимации) при использовании «своих» коэффициентов восстановления невелики и в большинстве случаев не превышают 2–3%.

На рис. 2 и 3 приведено влияние атмосферы при сухих и увлажненных почвах (рис. 2, а и 3, а) и при взрыхлении почв (рис. 2, б и 3, б) на точность восстановления гумуса почв при использовании коэффициентов $C_i(k, r, l, n)$, соответствующих третьему типу атмосферы (тип В из [1]) и сухим плотным почвам для разных каналов аппаратуры MSS.

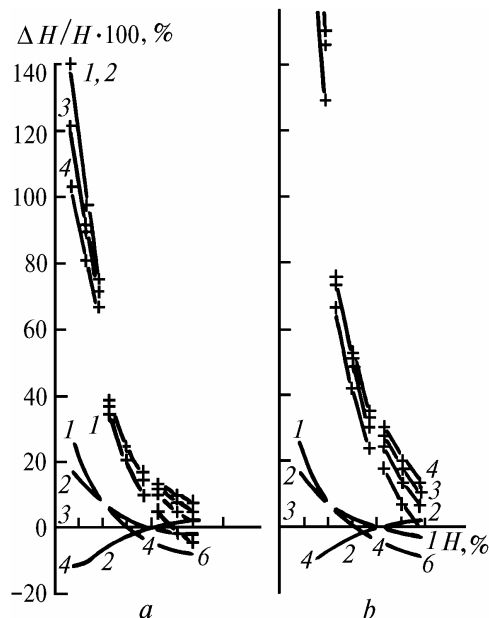


Рис. 2. Влияние неточного знания свойств атмосферы (1, 2, 3, 4, соответственно типы а, б, в, г) в момент съемки при восстановлении содержания гумуса в сухих почвах (сплошные линии) коэффициентами аппроксимации, соответствующими атмосферным условиям типа в для 2-го и 4-го каналов аппаратуры MSS. Крестики характеризуют соответствующие погрешности восстановления Γ теми же коэффициентами увлажнения почв до 50%-й нормальной влагоемкости (а) и рыхлении (шероховатости) поверхности почв (б)

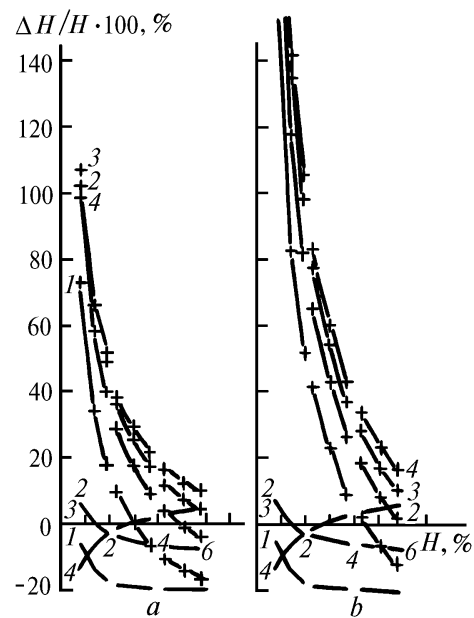


Рис. 3. Те же зависимости, что на рис. 2, для 1-го и 3-го каналов аппаратуры MSS

Видно, что влияние самой атмосферы (при сухих и плотных почвах) на точность восстановления гумуса почв не столь велико, как для восстановления биомассы растительности [2] и в основном не превышает у черноземов 10% для 2-го и 4-го и 20% для 1-го и 3-го каналов MSS, а для подзолов – до 20–25% для 2-го и 4-го и 10–12% для 1-го и 3-го каналов MSS. При этом следует отметить изменение знака ошибки у сильно замутненных и прозрачных типов атмосфер при переходе от темных (черноземных) почв к светлым (подзолистым). Это связано с уже приведенным на рис. 1 различным влиянием замутненности атмосферы на яркость B у темных и светлых почв и, таким образом, при появлении дымки (замутнения) мы будем занижать

восстанавливаемую величину Γ у темных почв и завышать у более светлых почв. Появление и неучет увлажнения или рыхления почв более существенно влияют на точность определения Γ . Это влияние особенно заметно на менее плодородных (подзолистых) почвах, где величина ошибки определения Γ может достигать 100% и более. Как видно из рис. 2 и 3, эти ошибки на 1-м и 3-м каналах несколько меньше, чем на 2-м и 4-м каналах MSS. Так как рыхление и увлажнение всегда дают потемнение почвы, то знак у ошибки определения Γ всегда положителен, т.е. противоположен влиянию дымки у относительно темных почв. Вследствие этого их общая ошибка уменьшается и, вообще говоря, может иметь тот или иной знак в зависимости от возможных сочетаний этих факторов. Из рис. 2 и 3 видно, что при плохом контроле атмосферных условий, влажности и состояния поверхности восстановление значений Γ с удовлетворительной точностью возможно лишь для черноземных и частично для лесных почв. Для подзолистых почв необходим достаточно хороший контроль указанных почвенных и атмосферных характеристик. При этом более предпочтительно для восстановления Γ у черноземных почв использование измерений на 2-м и 4-м каналах, а у подзолов – на 1-м и 3-м каналах MSS.

Сравнительно небольшими оказались ошибки восстановления Γ лесных почв при использовании коэффициентов $C_A(k, r, l, \theta)$ черноземных почв (4–7%), однако для подзолистых почв в этом случае ошибки могут достигать 30–50% (θ – зенитный угол визирования).

При отсутствии или неточном знании угла визирования в в случае изотропных (Ламбертовских) поверхностей и использовании, например, всюду надирных коэффициентов $C_A(k, r, l, \theta = 0)$ ошибки восстановления для объектов с $\theta \sim 15^\circ$ не превышают 5% для 2-го и 4-го и 10% для 1-го и 3-го каналов MSS. Однако для больших углов эти ошибки могут быть весьма значительны и необходимо учитывать угловую зависимость коэффициентов $C_A(k, r, l, \theta)$ (так, для $\theta \sim 45^\circ$ ошибки в Γ порядка 20% для 2-го и 4-го и до 45–60% для 1-го и 3-го каналов MSS).

Неучет неизотропности поверхностей может вносить очень большие ошибки в восстанавливаемую величину Γ , особенно под большими углами измерений θ . Эти ошибки даже при сравнительно небольшой анизотропии поверхностей (не более 20%) могут достигать 20–25% для черноземных и 70–80% для подзолистых почв.

Весьма заметны и ошибки в исходных данных (априорной информации), используемых для расчета коэффициентов восстановления $C_A(k, r, l, \theta)$. Так, например, 10%-е систематические ошибки в КСЯ (коэффициентах спектральной яркости) могут приводить к 5–6%-й ошибке в Γ для черноземной и свыше 30% для подзолистых почв.

Помимо величины КСЯ на точность определения Γ может оказывать влияние и правильность нахождения соответствующих им узловых точек Γ_i , определяющих значения коэффициентов восстановления C_i гумуса почв, что, в свою очередь, может заметно влиять и на величину ошибок других влияющих факторов. Трудность ситуации в данном случае по сравнению, например, с восстановлением биомассы растительности в том, что в связи с малостью диапазона изменения Γ в каждом типе почв при нахождении коэффициентов C_i обычно можно использовать не более трех-четырёх точек, а поэтому любая, даже не очень большая ошибка в положении каждой из точек Γ_i может заметно влиять на результаты. Поэтому требуются особая тщательность измерений и достаточная полнота исходного массива данных, используемого для определения коэффициентов C_i .

Ошибки в параметрах атмосферы $P_{1,2}$ (прозрачность) и $D_{1,2}$ (яркость дымки) для четырех выбранных нами состояний атмосферы [1,2], также являющихся частью априорной информации и используемой для расчета коэффициентов $C_A(k, r, l, \theta)$, менее заметно влияют на точность восстановления Γ . Так, 10%-е ошибки в $D_{1,2}$ вносят ошибки в определение Γ – менее 4–6% для черноземных и лесных и менее 8–10% для подзолистых почв. Ошибки в $P_{1,2}$ (5%) приводят к ошибкам в Γ менее 5–6% для лесных почв и менее 13% для подзолистых.

На рис. 4 показано влияние аппаратных ошибок на точность определения Γ почв при использовании 2-го и 4-го каналов MSS. Эти ошибки зависят от состояния атмосферы и возрастают (особенно по более коротковолновому каналу) с ростом замутненности атмосферы. В нашей предыдущей работе по восстановлению растительности [2] был приведен аналогичный рисунок влияния аппаратных ошибок по 2-му и 4-му каналам MSS для атмосферных условий типа ν . Там влияние четвертого канала значительно больше, чем второго. В данном примере для сильно замутненной атмосферы возрастает влияние более коротковолнового канала, поэтому погрешности определения Γ по второму каналу уже выше, чем по четвертому. На рис. 4 приведены наибольшие ошибки для первого (наименее прозрачного) состояния

атмосферы. Видно, что даже ошибки аппаратуры (~10%) по первому и второму каналам вносят погрешности в определение Γ менее 10% для черноземных почв. Для лесных почв ошибки в Γ в этом случае возрастают до 16%, а для подзолистых даже при 5%-й точности аппаратуры ошибки в Γ могут достигать 20–25%. Использование аппаратуры 1-го и 3-го каналов MSS в случае сильной замутненности атмосферы будет вносить более заметные ошибки в определение величины Γ вследствие большей подверженности атмосферному влиянию более коротковолнового первого канала. В этом случае аппаратурные ошибки (~10%) дают ошибки в определении Γ менее 12–14% для черноземных и до 20% для лесных почв. Для подзолистых почв при 5%-й точности аппаратуры ошибки в Γ могут достигать 30–35%.

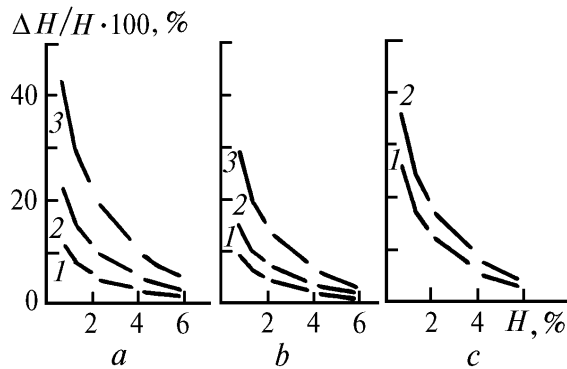


Рис. 4. Влияние погрешностей измерений аппаратуры MSS (2-й и 4-й каналы) на точности восстановления содержания гумуса в распаханых почвах: *a* – при погрешностях δL_1 измерений в канале, равных соответственно 5, 10 и 20% (кривые 1–3); *b* – при δL_2 для канала 4, равных 3, 5 и 10% (кривые 1–3); *c* – при δL_1 и $\delta L_2 = 5\%$ (1), $\delta L_1 = 10$ и $\delta L_2 = 5\%$ (2) (атмосферные условия типа *a*)

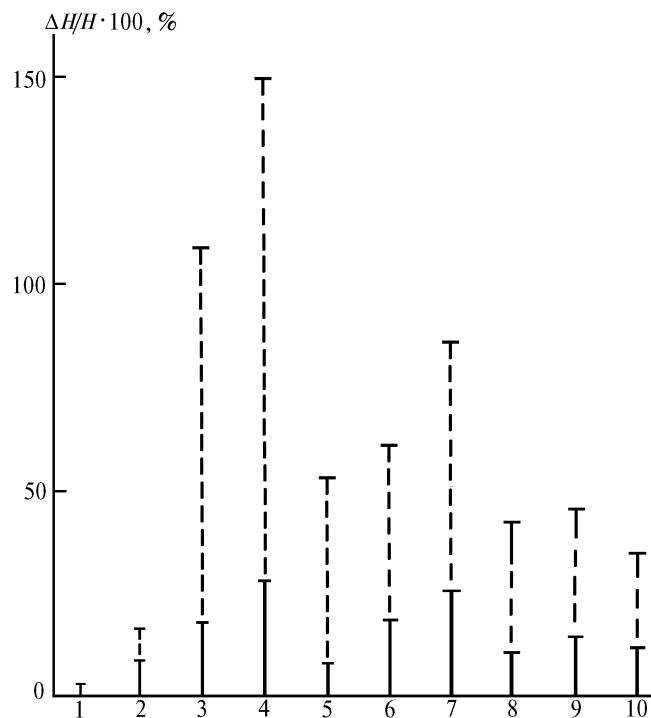


Рис. 5. Влияние различных факторов на погрешности восстановления содержания гумуса в почвах: 1 – теоретическая точность метода; 2 – влияние неточного знания состояния атмосферы в момент съемки; 3 – влияние неконтролируемых условий увлажнения почв; 4 – неучет условий обработки (шероховатость) почв; 5 – эффект неточного знания типа почв в момент съемки; 6 – неучет реального угла визирования; 7 – неучет возможностей неортоградного отражения; 8 – отличие исходной модели от используемой опорной модели [3]; 9 – влияние погрешностей используемой модели прозрачности атмосферы и ее связи с атмосферной дымкой; 10 – влияние случайных погрешностей измерений спутниковой аппаратуры

Заключение

На примере предлагаемых новых методов оценки параметров состояния поверхности суши (объема фитомассы растительности и показателя плодородия почв) по многоспектральным аэрокосмическим изображениям впервые показаны реальные точности восстановления указанных параметров на основе обучающих выборок, полученных в подспутниковых экспериментах. Обоснованы точности количественного восстановления рассматриваемых параметров для больших площадей в пределах отдельных элементов пространственного разрешения спутниковой аппаратуры (для спутниковых MSS-систем около 40 м) в отличие от предшествующих качественных оценок. Показано влияние различных факторов на точность количественной оценки параметров растительности и почв. Среди этих факторов – неадекватность используемых моделей, неточное знание состояния атмосферы и условий почвенно-растительного покрова в момент космической съемки, изменчивость характеристик атмосферы и условий солнечного освещения, флуктуационные погрешности измерений и т.д. Построенные таким образом модели чувствительности результатов восстановления параметров к погрешностям влияющих факторов обосновывают допустимый уровень погрешностей на отдельных этапах спутниковых и подспутниковых измерений, обеспечивая оценку параметров состояния с гарантированной точностью, следующей из отдельных этапов получения выборочных измерений и реальных погрешностей используемой аппаратуры.

1. Козодеров В.В., Косолапов В.С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 8. С. 852–859.
2. Козодеров В. В., Косолапов В. С. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 5. С. 529–538.
3. Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. Л.: Гидрометеиздат. 1981. 232 с.
4. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П., Топчиев А.Г. Биосфера: методы и результаты дистанционного зондирования. М.: Наука, 1990. 224 с.
5. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Дьяченко Л.Н. и др. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 232 с.

Институт вычислительной математики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
28 ноября 1992 г.

V.V. Kozoderov, V.S. Kosolapov. Assessment of soil slate parameters using measurements from optical satellite scanning systems.

As a development of the Brightness-Greenness concept, new results of a soil fertility index assessment are revealed when applied to multispectral air- and space imagery analyses. Some examples are displayed how retrieval precisions of the humus content for the ploughed soils are dependent on uncertainties due to variability of optical state of the atmosphere, measurement accuracies, and other influencing factors.