

В.В. Козодеров, В.С. Косолапов

ОПТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ БИОСФЕРЫ ПО МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫМ АЭРОКОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Предлагается новый метод оценки параметров почв и растительности по многоспектральным самолетным и спутниковым данным. Основу методики составляет усовершенствованная концепция «яркости почвы» и «показателя зеленого цвета растительности», а также модели взаимодействия оптического излучения с атмосферой и поверхностью суши. Показаны некоторые примеры зависимостей между данными спутниковых измерений и биомассой растительности.

Введение

Опыт изучения Земли из космоса в 1980-е годы показал, что с точки зрения проблемы глобальных изменений наибольшие перспективы имеют данные спутниковых сканирующих радиометров невысокого пространственного разрешения (порядка 1 км), позволяющих в течение суток несколько раз оперативно получать информацию о системе «земная поверхность — атмосфера» по всему земному шару [1]. Были продемонстрированы определенные преимущества систем такого временного разрешения перед системами высокого пространственного разрешения (десятки метров), которые служат вспомогательным средством тематической интерпретации получаемых изображений в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра. Такое назначение этих последних систем обусловлено их невысоким охватом территории в момент съемки, что приводит к возможности повторного покрытия одних и тех же регионов лишь через 2—3 недели, а на практике (по условиям освещения, облачности и т.д.) через месяцы. Следствием сказанного является невозможность их использования, например, для мониторинга динамики развития растительности и увлажнения почв.

Было показано, что многоспектральный характер соответствующих измерений в максимальной степени способствует применению упомянутых систем того и другого типа для исследований биосферы, в которых атмосфера выступает в роли помехи при обработке, интерпретации и последующей оценке параметров состояния поверхности суши по данным дистанционного оптического зондирования. Существенный прогресс в этом направлении связан с доказательством существования связей между широко используемыми на практике нормированными вегетационными индексами (NDVI) — некоторыми комбинациями измерительных каналов сканирующих радиометров, поглощенной фотосинтетически активной радиацией (ФАР) и первичной биопродуктивностью растительности (скоростью изменения объема фитомассы за вегетационный период) [2]. До некоторой степени альтернативой концепции вегетационных индексов служит концепция B , G координат [3] — получение других комбинаций измерительных каналов типа «яркость почвы» (B) и «показатель зеленого цвета растительности» (G), что позволяет увязать результаты многоспектральных спутниковых измерений с самолетно-вертолетными и наземными спектрорадиометрическими и биофизическими измерениями, способствуя тем самым обоснованию состава необходимых технических средств при проведении комплексных подспутниковых экспериментов [4].

Мы рассмотрим преимущества второй из упомянутых концепций, развитие которой способствует обоснованному сбору и систематизации априорных, опорных и других данных, необходимых для объективной количественной оценки состояния растительности и почв [5].

Моделирование отражательных свойств растительности и почв

При исследовании биосферы с помощью аэрокосмической аппаратуры в настоящее время наиболее широко используются измерения в отдельных спектральных каналах видимой и ближней инфракрасной (ИК) областях спектра. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые спектральной чувствительности $R(\lambda)$ (λ — длина волны измерений) радиометра AVHRR и аппаратуры MSS, установленных соответственно на спутниках NOAA и LANDSAT (США). Некоторым аналогом аппаратуры MSS является трехканальная аппаратура МСУ-Э (пространственное разрешение 45 м), установленная на советском спутнике «Космос-1939». Описанные типы аппаратур будут использованы далее для иллюстрации результатов предлагаемого нового метода оценки параметров растительности и почв по многоспектральным аэрокосмическим изображениям.

Уходящее излучение в наиболее общем случае для объекта измерения с индексом i в j -м канале измерительной аппаратуры k -го типа вблизи земной поверхности можно записать в следующем виде:

$$L_j(i, n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E_S(n, \lambda, h_{\odot}, \varphi') + H_S(n, \lambda, h_{\odot}, \theta', \varphi')] \rho_i(\lambda, r, M, \theta, \varphi, \theta', \varphi') \times R_j(k, \lambda, \Omega) \cos \theta' d\lambda d\theta' d\varphi', \quad (1)$$

где $E_S(n, \lambda, h_{\odot}, \varphi')$ — прямая солнечная радиация на уровне земли; $H_S(n, h_{\odot}, \theta', \varphi')$ — рассеянное солнечное излучение у поверхности земли; h_{\odot} — высота Солнца; n — тип атмосферы (см. ниже), определяющийся прозрачностью P и яркостью атмосферной дымки $D(1 \leq n \leq 4)$; $\rho_i(\lambda, r, M, \theta, \varphi, \theta', \varphi')$ — функция бинаправленного отражения (индикатриса отражения); M — биомасса растительности (т/га); θ, φ — зенитный угол и азимут визирования; θ', φ' — аналогичные углы для падающего на земную поверхность излучения; r — почвенный параметр, учитывающий тип, влажность, состояние поверхности почвы; $R_j(k, \lambda, \Omega)$ — спектральная чувствительность (приборная функция) аппаратуры в соответствующем канале, заключенном между длинами волн λ_1 и λ_2 с пространственным разрешением, определяемым углом поля зрения Ω . Индекс i в дальнейшем, как правило, будем опускать. Из (1) видно, что угловое распределение интенсивности отраженной радиации зависит от физических свойств и состояния отражающей поверхности, а также от условий облучения поверхности падающей радиацией. Условия облучения определяются главным образом высотой Солнца (h_{\odot}), прозрачностью атмосферы и облачностью. Таким образом, интенсивность отраженной радиации для данной поверхности является функцией углов: угла падения освещающей радиации (θ'), угла отражения (θ) и разности азимутов углов направления падающей и отраженной радиации, определяющих функцию $\rho_i(\dots, \theta, \varphi, \theta', \varphi')$, называемую индикатрисой отражения поверхности (или бинаправленной функцией отражения).

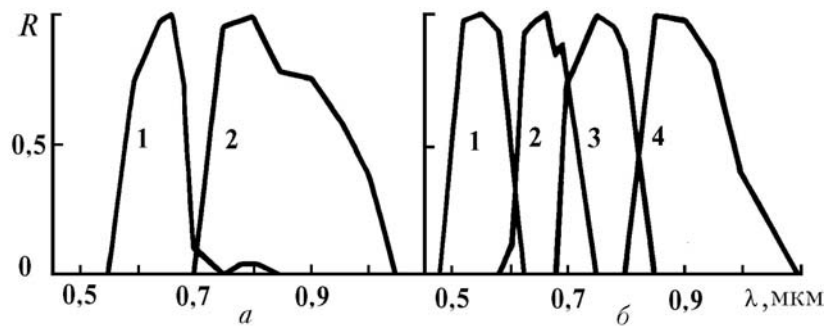


Рис. 1. Спектральные каналы аппаратуры AVHRR (а) и MSS (б)

В практических приложениях, как правило, используются значения L , нормированные на какую-либо характерную, достаточно большую величину излучения, например, на энергетическую яркость приходящего прямого солнечного излучения в соответствующем канале измерительной аппаратуры (т.е. измерять $L_{1,2}$ в долях солнечной яркости):

$$\hat{L}_1(i, n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) = \frac{L_1(i, n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot})}{L_1^{\circ}(k)},$$

$$\hat{L}_2(i, n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) = \frac{L_2(i, n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot})}{L_2^{\circ}(k)}, \quad (2)$$

где $L_{1,2}^{\circ}(k) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_S^{\downarrow}(\lambda) R_j(k, \lambda, \Omega) d\lambda$, $E_S^{\downarrow}(\lambda)$ — прямая солнечная радиация, приходящая на верхнюю границу атмосферы (измеряемая на уровне спутника). Для краткости далее будем опускать верхний значок нормировки у L , а также её зависимость от всех упомянутых параметров.

Объекты почвенно-растительного покрова при наблюдении на различных измерительных каналах спутниковой или самолетной аппаратуры и их отображения в координатах L_1, L_2 могут группироваться вокруг «линии почв» или «линии растительности» (рис. 2).

В первом случае разброс точек характеризует переход от темных почв (увлажненные почвы или почвы с большим содержанием гумуса) к светлым, сухим, менее плодородным. Во втором случае заметен переход от редкой растительности к густой ярко-зеленой с большим объемом фитомассы. Так возникла концепция анализа данных аэрокосмических съемок почвенно-растительного покрова в координатах «яркость почвы» B (*brightness*) — «показатель зеленого цвета растительности» G (*greenness*), которые дают возможность отнести отдельные элементы спутниковых изображений к клас-

сам «почва», «нормальная растительность» и «растительность, находящаяся в стрессовом состоянии». Величины B и G являются линейными комбинациями значений уходящего излучения (L_1, L_2) в измерительных каналах (x_1, x_2), и в случае приземных измерений эта связь имеет наиболее простой вид

$$B(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) = a_1^b(n, k, r, \theta, \varphi, h_{\odot}) L_1 + a_2^b(n, k, r, \theta, \varphi, h_{\odot}) L_2 ;$$

$$G(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) = a_1^g(n, k, r, \theta, \varphi, h_{\odot}) L_1 + a_2^g(n, k, r, \theta, \varphi, h_{\odot}) L_2 , \quad (3)$$

где $a_{1,2}^{b,g}(n, k, r, \theta, \varphi, h_{\odot})$ – коэффициенты преобразования при переходе от «старой» (L_1, L_2) к «новой» (B, G) ортогональной системе при левом повороте системы (L_1, L_2) на угол $\alpha_j = \arcsin a_2^{b,g}(n, k, \theta, \varphi, h_{\odot})$. Эти коэффициенты определяются методом наименьших квадратов: сначала находится тангенс угла наклона ($\text{tg} \check{z}$) регрессионной прямой для множества «почвенных точек» без растительности ($M = 0$), после чего новая система координат (B, G) определяется левым поворотом старой системы (L_1, L_2) на угол $\alpha_j = \arctg \check{z}$. Соответственно коэффициенты поворота имеют вид

$$a_1^b(n, k, \dots, h_{\odot}) = \cos \alpha_j, \quad a_2^b(n, \dots, h_{\odot}) = \sin \alpha_j ,$$

$$a_1^g(n, \dots, h_{\odot}) = -\sin \alpha_j, \quad a_2^g(n, \dots, h_{\odot}) = \cos \alpha_j . \quad (4)$$

Сказанное относительно указанных преобразований проиллюстрировано на рис. 2. Выбрав в качестве координаты B направление возрастания яркости почв, соответствующее нулевой фитомассе растительного покрова, можно видеть и появление другой (перпендикулярной к оси почв) координатной оси в направлении возрастания показателя зеленого цвета G , определяющего рост наземной фитомассы растительности. Данные рис. 2 основаны на результатах самолетных спектротометрических измерений при разных значениях фитомассы M (пшеница) от 1 до 30 т/га при наблюдении в надир [6]. Из рис. 2 видно, что с ростом M все измерительные точки сливаются, объединяясь в единый класс «сплошной растительный покров». Очевидно, что промежуточные состояния растительности между «классом почв» и «сплошной растительности» в ряде случаев могут рассматриваться как «растительность, находящаяся в стрессовом состоянии».

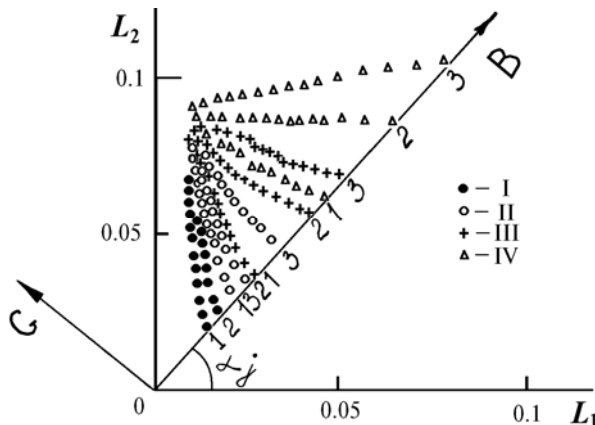


Рис. 2. Результаты самолетных измерений величин L_1, L_2 для 2 и 4 каналов MSS растительности (озимая пшеница) со значениями фитомассы M от 0 (вдоль оси B) до 30 т/га (область сгущения точек) и разными типами почв: I – чернозем; II – темно-каштановые; III – дерново-подзолистые; IV – сероземные; кривая 1 – при полном увлажнении почв, 2 – при 50%-м увлажнении, 3 – сухие. B, G – новая система координат, α_j – ее угол поворота относительно осей L_1, L_2

Искажающее влияние атмосферы

Мы рассматриваем здесь простейшую модель влияния атмосферы на трансформацию излучения, отраженного системой «почва – растительность».

Для принимаемого на спутнике излучения L_j^* будем использовать простейшую модель его связи с L_j , измеряемой у земной поверхности, в виде

$$\left. \begin{aligned} L_1^* &= L_1 P_1(n, k, \theta) + D_1(n, k, \theta) \\ L_2^* &= L_2 P_2(n, k, \theta) + D_2(n, k, \theta) \end{aligned} \right\} , \quad (5)$$

где $P_{1,2}(n, k, \theta)$ и $D_{1,2}(n, k, \theta)$ — соответственно прозрачность атмосферы и яркость атмосферной дымки в каналах 1 и 2 (1 — коротковолновый, 2 — длинноволновый). Строгие выражения для обеих этих величин в случае необходимости могут быть представлены в терминах теории переноса излучения [7]. Используя эти соотношения, а также выражения (3), получаем:

$$\begin{aligned}
 B(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) &= \frac{a_1^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)} L_1^* + \frac{a_2^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)} L_2^* - \left(\frac{a_1^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)} D_1(n, k, \theta) + \right. \\
 &+ \left. \frac{a_2^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)} D_2(n, k, \theta) \right); \\
 G(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) &= \frac{a_1^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)} L_1^* + \frac{a_2^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)} L_2^* - \left(\frac{a_1^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)} D_1(n, k, \theta) + \right. \\
 &+ \left. \frac{a_2^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)} D_2(n, k, \theta) \right). \tag{6}
 \end{aligned}$$

Если аналогично (3) для значений яркости и показателя зеленого цвета, измеряемых со спутника, предположить, что

$$\begin{aligned}
 B^*(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) &= a_1^{*b}(n, \dots, h_{\odot}) L_1^* + a_2^{*b}(n, \dots, h_{\odot}) L_2^*; \\
 G^*(n, k, r, M, \theta, \varphi, h_{\odot}) &= a_1^{*g}(n, \dots, h_{\odot}) L_1^* + a_2^{*g}(n, \dots, h_{\odot}) L_2^*, \tag{7}
 \end{aligned}$$

то, используя выражение (6), можно связать «старые» (на уровне земли) и «новые» (на уровне спутника) значения яркости и показателя зеленого цвета:

$$\begin{aligned}
 B(n, \dots, h_{\odot}) &= B^*(n, \dots, h_{\odot}) - \Delta B_D(n, \dots, h_{\odot}); \\
 G(n, \dots, h_{\odot}) &= G^*(n, \dots, h_{\odot}) - \Delta G_D(n, \dots, h_{\odot}), \tag{8}
 \end{aligned}$$

где $\Delta B_D(n, \dots, h_{\odot})$ и $\Delta G_D(n, \dots, h_{\odot})$ — поправки за счет влияния атмосферы (эти поправки в (6) взяты в скобки), зависящие от яркости атмосферной дымки, а связь между «новыми» и «старыми» коэффициентами очевидна:

$$\begin{aligned}
 a_1^{*b}(n, \dots, h_{\odot}) &= \frac{a_1^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)}, \quad a_2^{*b}(n, \dots, h_{\odot}) = \frac{a_2^b(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)}; \\
 a_1^{*g}(n, \dots, h_{\odot}) &= \frac{a_1^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_1(n, k, \theta)}, \quad a_2^{*g}(n, \dots, h_{\odot}) = \frac{a_2^g(n, \dots, h_{\odot})}{P_2(n, k, \theta)}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

Если бы для каждого класса растительности была собрана следующая полная информация: для разных высот Солнца h_{\odot} , разных типов растительности и значений их биомасс M найдены их индикатрисы $\rho_i(\lambda, r, M, \theta, \varphi, \theta', \varphi')$, угловое распределение прямой и рассеянной солнечной радиации, то можно было бы последовательно по вышеприведенным формулам вычислить коэффициенты $a_{1,2}^{*b,g}$, а также B -, G -характеристики с учетом их угловой неизотропности.

К сожалению, в настоящее время мы не располагаем такими систематизированными данными об индикатрисах различных растительных культур.

Можно, однако, указать, основываясь на известных литературных данных [6, 8], что при определенных условиях наблюдения при высотах Солнца $h_{\odot} \geq 30^\circ$ и углах визирования до $25-30^\circ$, а также при азимутах визирования φ , удаленных от плоскости солнечного вертикала, т.е. при φ , близких к 90 и 270° , — анизотропия отражения системы «почва—растительность» в видимом и ближнем ИК-диапазоне спектра относительно невелика (менее 15%), и можно в первом приближении не учитывать угловую изменчивость отражательных свойств системы «почва—растительность».

Ограничиваясь теперь условиями относительно изотропных (Ламбертовых) растительных поверхностей (при выполнении вышеуказанных условий), для уходящего излучения вблизи объекта измерений имеем

$$L_j(n, k, r, M, h_\odot) = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [E_S(n, \lambda, h_\odot) + H_S(\lambda, h_\odot)] \rho_i(n, \lambda, r, M) R_j(k, \lambda, \Omega) d\lambda. \quad (1')$$

Далее сохраняется весь вышеприведенный подход, включающий в себя нормирование значений $L_{t,2}$ на яркость приходящего прямого солнечного излучения, нахождение искаженных атмосферой значений $L_{1,2}^*$ и т.д.

Таблица 1

Значения прозрачности атмосферы и атмосферной дымки (Вт/м² · ср) для четырех состояний атмосферы и аппаратуры MSS при наблюдении в надир

Параметр	MSS, 2- и 4-й каналы				MSS, 1- и 3-й каналы			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
D_1	1,90	1,35	0,95	0,65	4,00	2,90	2,10	1,50
D_2	1,60	1,15	0,80	0,55	1,30	0,90	0,65	0,45
P_1	0,78	0,82	0,86	0,89	0,71	0,75	0,80	0,85
P_2	0,86	0,89	0,92	0,96	0,82	0,86	0,89	0,93

Задача оценки влияния атмосферы на спутниковые изображения упрощается в силу существования связи величин $P_{1,2}$ и $D_{1,2}$. Поэтому для исследования ее влияния вместо двухпараметрического семейства (P, D) можно использовать характеристику «тип атмосферы» n . В табл. 1 для примера приведены четыре типа возможных сочетаний значений $P_{1,2}$ и $D_{1,2}$ (для наблюдений в надир ($\theta = 0^\circ$)) и аппаратуры MSS, которые, по-видимому, перекрывают весь диапазон встречающихся состояний атмосферы и соответствуют следующим состояниям замутненности атмосферы; a и b — сильное, c — умеренное и d — слабое замутнение. При наблюдении под углом θ для связи $P_{1,2}$ и $D_{1,2}$ с их значениями в надир имеем

$$P_{1,2}(\theta) P_{1,2}(0)^{m(\theta)}, \quad D_{1,2}(\theta) = D_{1,2}(0) + \frac{\partial D_{1,2}(0)}{\partial P_{1,2}} (P(\theta) - P(0)),$$

где $m(\theta)$ — оптическая масса атмосферы

В табл. 2 приведены коэффициенты $a_{1,2}^{*b,g}$ перевода значений L_1^*, L_2^* в координаты B^*, G^* для четырех вышеупомянутых состояний атмосферы, некоторых углов θ и h_\odot и аппаратуры MSS, 2- и 4-й каналы.

Таблица 2

Коэффициенты $a_{1,2}^{*b,g}$ перевода измеренных со спутника значений L_1^*, L_2^* в координаты B^*, G^* для различных состояний атмосферы, углов θ и h_\odot и аппаратуры MSS, 2- и 4-й каналы

θ	Коэффициенты	h_\odot							
		70°				33°			
0°	a_1^{*b}	0,741	0,720	0,698	0,675	0,796	0,749	0,720	0,693
	a_2^{*b}	0,955	0,910	0,867	0,833	0,917	0,890	0,852	0,820
	a_1^{*g}	-1,046	-0,994	-0,938	-0,898	-1,005	-0,972	-0,922	-0,885
	a_2^{*g}	0,676	0,659	0,645	0,626	0,726	0,686	0,665	0,642
15°	a_1^{*b}	0,759	0,734	0,709	0,683	0,816	0,765	0,731	0,701
	a_2^{*b}	0,970	0,921	0,874	0,836	0,931	0,900	0,859	0,824
	a_1^{*g}	-1,073	-1,014	-0,953	-0,909	-1,030	-0,922	-0,936	-0,895
	a_2^{*g}	0,686	0,667	0,651	0,628	0,738	0,694	0,670	0,645

На рис. 3 представлены рассчитанные по (7) в надир зависимости B, G и B^*, G^* от M для 1- и 3-го каналов MSS (атмосферные условия типа a , почвы сухие). Видны значительные вариации зависимости $B(M)$ при разных почвах, в отличие от более устойчивой зависимости $G(M)$. При увеличении M величины B и G стремятся к некоторым асимптотическим значениям. Характерным является отрицательный сдвиг кривых на уровне верхней границы атмосферы относительно соответствующих кривых G на уровне земли. Этот сдвиг определяет влияние атмосферы как помехи.

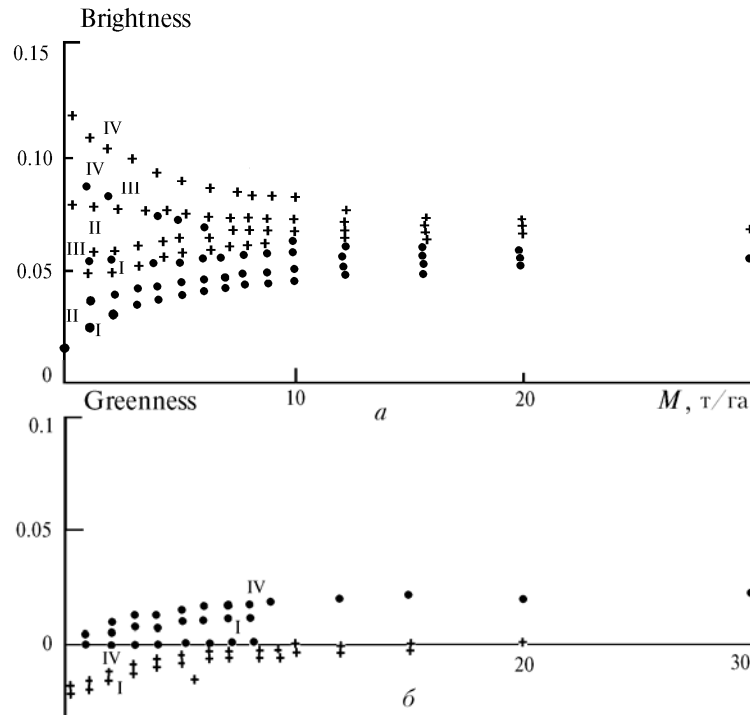


Рис. 3. Зависимость яркости почвы (а) и показателя зеленого цвета (б) от биомассы растительности по данным [6] вблизи земной поверхности (точки) и на верхней границе сильно замутненной (а) атмосферы (крестики). Аппаратура MSS, 1- и 3-й каналы. Римскими цифрами обозначены типы почв, которые соответствуют рис. 2

Наличие зависимости B^* от почвенных параметров (рис. 2) и G^* от M растительности (рис. 3) позволяет использовать эти характеристики для восстановления почвенных и растительных параметров на основе специальных математических преобразований, использующих процедуры полиномиальной аппроксимации. При этом, однако, необходимо оценить влияние различных мешающих факторов, найти пути для уменьшения этого влияния, а также сформулировать обоснованные требования к аэрокосмической измерительной аппаратуре и условиям съемки. Соответствующие результаты будут продемонстрированы в последующих наших публикациях.

1. Asrar G. Theory and application of optical remote sensing. New York: John Wiley and Sons. 1989. 890 p.
2. Prince S.D. and Justice C.O. //Int. J. Remote Sens. 1991. № 12. P. 1133– 1422.
3. Cicone R.C. and Metzler M.D. Comparison of Landsat MSS, Nimbus-7, CZCS, and NOAA-7 AVHRR features for land-use analyses. Remote Sens. Environ.. 1984. № 14. P. 257–265.
4. Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П., Топчиев А.Г. Биосфера: методы и результаты дистанционного зондирования. М., 1990. 224 с.
5. Козодеров В.В. Математическая модель восстановления параметров растительности и почв по данным спутниковых измерений //Фундаментальные науки – народному хозяйству. М.: Наука, 1990. С. 13–16.
6. Рачкулик В.И., Ситникова М.В. Отражательная способность и состояние растительного покрова. Л., Гидрометеониздат, 1981. 288 с.
7. Surran P.J., Foody G.M., Kondratyev K.Ja., Kozoderov V.V., Fedchenko P.P. Remote sensing of soils and vegetation in the USSR. London: Taylor and Francis. 1990. 203 p.
8. Кондратьев К.Я., Биненко В.И., Дьяченко Л.Н. и др. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 232 с.

Институт вычислительной математики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
20 апреля 1992 г.

V.V. Kozoderov, V.S. Kosolapov. **Remote Optical Sensing of the Biosphere using Multispectral Images.**

A new technique to estimate soil and vegetation parameters is proposed using multispectral airborne and satellite data. The technique is based on improved brightness- greenness concept and models of interaction of the atmosphere and earth's surface with optical radiation. Some examples of interrelation between the biomass of vegetation and satellite data are presented.