

Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий



Гидрометеиздат
1986

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И КОНТРОЛЮ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий

21495
Доклады
Всесоюзного
совещания-семинара
Обнинск,
ноябрь, 1983 г.

Под редакцией
д-ра физ-мат. наук, проф. Ю. К. РОССА,
И. Ф. БЕРЕСТОВСКОГО,
д-ра геогр. наук А. Д. КЛЕЩЕНКО



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1986

Сборник посвящен проблеме изучения сельскохозяйственных угодий с помощью аэрокосмических методов.

Рассмотрены вопросы теории взаимодействия потока излучения с растительным покровом. Приводится описание приборов для измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности, а также методов измерений и обработки. Особое внимание уделяется описанию связей КСЯ с биометрическими и агрометеорологическими характеристиками растительного покрова и вопросам использования дистанционных методов для оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур.

Сборник рассчитан на широкий круг специалистов, занимающихся исследованием растительности и почв дистанционными средствами.

These articles are dedicated to the study of farmland by aerial and satellite remote sensing.

Theoretical questions of radiation flux and vegetation cover interrelations are surveyed. The description of devices for measuring coefficients of spectral brightness for the underlying surface is given, along with technique for data measuring and processing. Special attention is paid to the description of correlations of coefficients of spectral brightness with biometrical and agrometeorological characteristics of vegetation cover and to the problem of using remote sensing for crop appraisal and productivity.

The articles are addressed to a wide range of specialists studying vegetation and soils by remote sensing.

ОБЗОР МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Т. Нильсон, Ю. Росс

Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР

К настоящему времени появилось уже значительное количество математических моделей, позволяющих рассчитывать коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) растительности, в частности посевов сельскохозяйственных культур. По принципиальному подходу к проблеме эти модели можно разделить на три группы:

- 1) модели, базирующиеся на уравнении переноса излучения;
- 2) модели, применяющие метод Монте-Карло;
- 3) модели, базирующиеся на уравнениях Максвелла.

Исторически первыми появились модели, позволяющие вычислять поглощение радиации внутри растительности [20] или направленные на получение теоретических формул для альбеда растительности [3, 8, 12]. В 1962 г. Росс [8] сформулировал, а в 1964 г. модифицировал [9] уравнение переноса излучения для растительного покрова, дальнейшее развитие его модель получила в работах Росса и Нильсона [11, 24, 10]. В этой модели растительность моделируется горизонтально однородным анизотропным мутным слоем, состоящим из маленьких тонких пластин (фитоэлементов) с заданной плотностью, с заданной функцией распределения ориентации и индикатрисой рассеяния. В роли оптической толщины фигурирует индекс фитоплощади. Фитоэлементы расположены в пространстве случайно, независимо друг от друга. Интегрально-дифференциальное уравнение переноса, являющееся обобщением уравнений переноса для атмосферы и других мутных сред, решается в общем случае численными методами, точное решение получается только при горизонтальных матовых фитоэлементах. Яркость отраженной от системы почва—растительность радиации (индикатриса отражения) является решением уравнения переноса на верхней границе растительности. Отметим, что большинство опубликованных до сих пор математических моделей радиационного режима растительности по существу является частным случаем модели Росса—Нильсона, так же, как и моделей, предложенных различными авторами для расчета КСЯ растительности [7, 13, 14, 16, 25, 26]. Например, модель Аллена и др. [13, 14] базируется на решении уравнения переноса в двухпоточковом приближении Кубелки—Манка, причем введены различные коэффициенты рассеяния «вперед» и «назад» для направленного излучения (прямая радиация солнца) и диффузного излучения. Двухпоточковым приближением является также модель Гоудриана [16]. В этой модели с большей точностью учитывается архитектура растительности и условия освещения отдельно

для прямой и рассеянной радиации. В последнее время многие исследователи пользуются моделью Сьютса [25]. Его модель удобна тем, что вместо рассмотрения многих классов по распределению угла наклона и ориентации введены только горизонтальные и вертикальные проекции индекса листовой поверхности в каждом горизонтальном слое. Это без существенной потери точности упрощает расчеты. Заслугой Сьютса является еще и то, что он впервые ввел в свою модель полуэмпирическую поправку на эффект обратного блеска [26]. Именно в рамках теории переноса трудно корректно описать эффект, обусловленный статистической зависимостью прозрачности растительного слоя в направлении падения солнечного излучения и в направлении отражения радиации. Отраженная радиация строго в обратном направлении проходит практически одни и те же просветы в растительности, т.е. упомянутая статистическая зависимость превращается в функциональную. При удалении друг от друга направлений визирования и падения радиации эта статистическая зависимость ослабевает. В модели Кууска [5] эффект обратного блеска получается уже теоретически благодаря введению функции автокорреляции расположения фитоэлементов в горизонтальном элементарном слое.

Появляются первые модели поляризационных характеристик растительного покрова. В работе [27] предполагается, что поляризация отраженной от растительности радиации возникает за счет зеркального отражения солнечной радиации от поверхности листьев, покрытых восковым налетом, и описывается законом Френеля.

Принципиальным недостатком моделей, базирующихся на концепции мутной среды, является предположение о горизонтальной однородности «элементарного» горизонтального слоя и о статистической независимости размещения фитоэлементов в различных слоях. Эти модели сравнительно хорошо описывают перенос радиации и отражательные свойства однородных и густых посевов, но менее пригодны для рядковых посевов или для естественной растительности. Усовершенствование уравнения переноса в последних случаях связано с большими принципиальными и математическими трудностями. Поэтому в последнее время началось интенсивное применение метода Монте-Карло, или статистического моделирования, для описания отражения радиации от растительности [2, 17, 23]. Преимуществом метода Монте-Карло является возможность исследования блуждания фотонов в средах различной геометрической структуры, в частности сложной структуры, недоступной для аналитических методов. Метод Монте-Карло может быть применен также для проверки адекватности других моделей, особенно тех, которые базируются на решении уравнения переноса. В СССР метод Монте-Карло применяется в работах Каневского и Росса [2], Анисимова и Менжулина [1].

К третьей группе относится модель, предложенная Козодеровым [4]. В этой модели рассматривается дифракционная задача, базирующаяся на решении уравнений Максвелла. Наиболее

трудной проблемой является здесь учет сложной архитектуры растительности с помощью распределения комплексной диэлектрической проницаемости. Теоретически этот подход наиболее строго обоснован, однако до сих пор решение проблемы получено только для довольно простых частных случаев.

Корректное решение проблемы КСЯ, или индикатрисы рассеяния растительности, невозможно без знания режима радиации внутри растительности. Поэтому важную роль играют также теории прозрачности растительного покрова в различных направлениях визирования [6, 19, 21]. По общим проблемам переноса излучения в растительности опубликовано несколько хороших обзорных работ [10, 15, 18, 22].

По-видимому, дальнейшее развитие моделей отражения радиации от растительности идет в направлении учета пространственных неоднородностей структуры растительности, более точного учета структуры индивидуального растения, учета поляризации, моделей многокомпонентных растительных покровов (различные виды, различные растительные органы) с целью получения довольно простых приближенных или полуэмпирических формул для расчета КСЯ и индикатрис отражения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов О. А., Менжулин Г. В. О статистических закономерностях переноса радиации в неоднородной растительности.— Метеорология и гидрология, 1983, № 7, с. 61—66.
2. Каневский В. А., Росс Ю. К. Математическое моделирование радиационного режима хвойного дерева методом Монте-Карло.— Тарту, 1982.— 30 с.
3. Кастров В. Г. К вопросу о дневном ходе альбедо земной поверхности.— Труды ЦАО, 1955, вып. 14, с. 12—22.
4. Козодеров В. В. Применение уравнений электромагнитного поля к описанию взаимодействия излучения с природными образованиями.— Исследование Земли из космоса, 1982, № 3, с. 69—76.
5. Кууск А. Обратный блеск пластинчатой среды.— Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. 7. Фитоактинометрия. Таллин, 1980, с. 121—124.
6. Нильсон Т. Теория пропускания радиации неоднородным растительным покровом.— В кн.: Пропускание солнечной радиации растительным покровом. Тарту, 1977, с. 5—70.
7. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.— Л.: Гидрометеониздат, 1981.— 287 с.
8. Росс Ю. К. К теории альбедо растительного покрова.— Науч. сообщ. Ин-та геол. и геогр. АН ЛитССР, 1962, № 13, с. 151—165.
9. Росс Ю. К. Математическое моделирование поля фотосинтетически активной радиации (ФАР) в растительном покрове.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. М.: Наука, 1964, с. 251—256.
10. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеониздат, 1975.— 342 с.
11. Росс Ю. К., Нильсон Т. А. Математическая модель радиационного режима растительного покрова.— В кн.: Актинометрия и оптика атмосферы. Таллин: Валгус, 1968, с. 263—281.
12. Шифрин К. С. К теории альбедо.— Труды ГГО, 1953, вып. 39, с. 244—257.
13. Allen W. A., Cayle A., Richardson A. J. Plant canopy irradiance specified by the Duntley equations.— J. Opt. Soc. Am., 1970, v. 60, N 3, p. 372—376.

14. Allen W. A., Richardson A. J. Interaction of light with a plant canopy.— J. Opt. Soc. Am., 1968, v. 58, N 8, p. 1023—1028.
15. Bunnik N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties.— Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen. Nederland, 1978, 78—1, 175 p.
16. Goudriaan J. A. Calculation model and descriptive formulas for the extinction and reflection of radiation in leaf canopies.— Proc. The sun in service of mankind.— Paris, 1973.
17. Kimes D. S., Smith J. A. Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies.— Appl. Optics, 1980, v. 19, p. 2801—2811.
18. Lemeur R., Blad B. L. A critical review of major types of light models for estimating the shortwave regime of plant canopies.— Meded. Fac. Landbouwwetensch. Rijksuniv. Gent., 1974, v. 39, N 4, p. 1535—1585.
19. Mann J. E., Curry G. L., Hartfield D. J., Demichel D. W. A general law for direct sunlight penetration.— Math. Biosciences, 1977, v. 34, p. 63—78.
20. Monsi M., Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaft und seine Bedeutung für die Stoffproduktion.— Jap. Journ. Bot., 1953, v. 14, p. 22—52.
21. Nilson T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands.— Agric. Meteorol., 1971, v. 8, p. 25—38.
22. Norman J. M. Radiative transfer in vegetation.— Heat and Mass Transfer in Biosphere. Part 1. Trans. Process Plant Environ. Washington, 1975, p. 187—205.
23. Oliver R. E., Smith J. A. A stochastic canopy model of diurnal reflectance.— Final report, U. S. Army Research Office—Durham, DAH-ARO-31-124-71-6165. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 80521, 1974.
24. Ross J., Nilson T. Radiation exchange in plant canopies.— Heat and Mass Transfer in Biosphere. Part 1. Trans. Process Plant Environ. Washington, 1975, p. 327—336.
25. Suets G. H. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy.— Remote Sens. Environ., 1972, v. 2, N 2, p. 117—125.
26. Suets G. H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance of vegetative canopies.— Remote Sens. Environ., 1972, v. 2, N 3, p. 175—182.
27. Vanderbilt V. C. A model of plant canopy polarization response.— 6th Ann. Symp. Mach. Process. Remotely Sensed Data and Soil Inf. Syst. and Remote Sens. and Soil Surv., West Lafayette, Ind., 1980. New York, 1980, p. 98—108.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТРАЖЕНИЯ ГОУДРИАНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОСЕВАМ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

И. М. Вагина, Н. Н. Выгодская, И. И. Горшкова

Московский государственный университет

Теоретическая модель отражения системы растительность—почва Гудриана [8], являющаяся усовершенствованным вариантом радиационного блока модели де Вита [9], относится к классу моделей, базирующихся на теории переноса радиации в мутной однородной среде.

Растительный покров (РП) в [8] моделируется бесконечным в горизонтальном направлении слоем с пуассоновским распределением фитоэлементов в пространстве. Слой РП состоит из m тонких элементарных слоев толщиной L_s , в пределах которых отсутствует взаимное затенение. Ориентация фитоэлементов в пространстве задается углом их наклона в предположении о равномер-

ном распределении по азимутальным углам. Принимается, что фитоэлементы являются ламбертовскими рассеивателями с коэффициентом рассеяния $\sigma_\phi = \rho_\phi + \tau_\phi$, где ρ_ϕ — коэффициент отражения и τ_ϕ — коэффициент пропускания отдельного фитоэлемента.

Коэффициент спектральной яркости (КСЯ) РП (β_λ) рассчитывается по формуле

$$\beta_\lambda = \varphi_u(\theta_0, j) / B_u(\theta_0), \quad (1)$$

где $\varphi_u(\theta_0, j)$ — восходящий поток радиации, равный

$$\varphi_u(\theta_0, j) = M_t(\theta_0) \varphi_u(\theta_0, j+1) + 0,5 \sigma_\phi B_e(\theta_0) J_{t, j}, \quad (2)$$

и $B_u(\theta_0)$ — весовая функция, характеризующая вклад радиации от десятиградусного сегмента небосвода.

В выражениях (1) и (2) θ_0 есть направление рассеянных лучей; j — слой, ослабляющий радиацию; $M_t(\theta_0)$ — доля падающего радиационного потока, проходящего слой растительности в направлении θ_0 без ослабления

$$M_t(\theta_0) = 1 - M_i(\theta_0), \quad (3)$$

где M_i — площадь листовой поверхности, взаимодействующей с радиацией в слое толщиной L_s , причем

$$M_i(\theta_0) = L_s \bar{G}(\theta_0) / \sin h_\odot, \quad (4)$$

где $\bar{G}(\theta_0)$ есть средняя проекция всего слоя L на направление θ_0

$$\bar{G}(\theta_0) = \sum_{\theta_\phi=1}^9 f(\theta_\phi) G(\theta_0, \theta_\phi), \quad (5)$$

где $G(\theta_0, \theta_\phi)$ — осредненная по азимуту проекция листовой поверхности с углом наклона θ_ϕ на направление θ_0 , причем θ_0 в [8] задается номером зоны, на которые разделена полусфера. Величина $B_e(\theta_0, \theta_\phi)$ в (6) представляет собой весовую функцию, определяющую угловое распределение радиации, рассеянной слоем j

$$B_e(\theta_0, \theta_\phi) = \frac{B_u(\theta_0) M_i(\theta_0, \theta_\phi)}{\sum_{\theta_s=1}^9 B_u(\theta_s) M_i(\theta_0, \theta_\phi)}, \quad (6)$$

где θ_s — направление падения солнечных лучей. Доля радиации, ослабленная слоем j в (2), определяется как

$$J_{t, j} = \sum_{\theta_s=1}^9 M_i(\theta_s) \{ \varphi_\alpha(\theta_s, j) + \varphi_u(\theta_s, j+1) \}, \quad (7)$$

где φ_α — нисходящий поток радиации между слоем $(j-1)$ и j ; φ_u — восходящий поток радиации между слоем $(j-1)$ и j ;

$$\varphi_\alpha(\theta_s, j) = M_t(\theta_s) \varphi_\alpha(\theta_s, j-1) + 0,5 B_e(\theta_s) J_{t, (j-1)}. \quad (8)$$

На верхней границе РП нисходящий поток Φ_a равен суммарному потоку прямой (S_λ) и рассеянной (D_λ) радиации, поступающей от небосвода с заданным угловым распределением.

На нижней границе восходящий поток Φ_u представляет собой изотропно рассеянную радиацию, дошедшую к подстилающей поверхности

$$\Phi_u(\theta_0, m+1) = \rho_s B_u(\theta_0) \sum_{\theta_s=1}^9 \Phi_a(\theta_s, m+1), \quad (9)$$

где ρ_s — коэффициент отражения почвы при допущении, что отражение от почвы является ламбертовским.

Исходя из принятого в модели случайного размещения фитоэлементов в пространстве, проверка ее адекватности осуществлялась применительно к посевам озимой пшеницы, пространственная структура которых (как большинства естественных и искусственных травяных ценозов) в первом приближении отвечает заданному условию.

Для верификации модели использовались экспериментальные значения КСЯ (β_λ), полученные на основе наземных и вертолетных измерений, которые проводились при ясной погоде в направлении надир. Наземные измерения выполнялись с помощью многоспектрального фотометра «Спектр» ВНИИСХМ конструкции В. А. Коваленко [1]. Угол зрения фотометра 10° , диаметр площадки, попадающей в поле зрения прибора, равен 20–25 см. Погрешность измерения сигнала при $P = 0,95$ составляет 2–3 %; КСЯ 5–6 %. Вертолетные измерения выполнялись с помощью комплекса аппаратуры ГосНИЦИПР. При высоте полета 100 м размер площадки, попадающей в поле зрения прибора, был равен 30×5 м. Погрешность измерения КСЯ зависит от длины волны, но не превышает 5 % [5].

Верификация модели осуществлялась на основе β_λ , полученных для 53 комбинаций относительной поверхности фитоэлементов (L), цвета листьев (заданного значениями ρ_Φ) и высоты солнца ($h_\odot$). В использованных вариантах L изменялось от 0,7 до 5,5 при окраске листьев от зеленой до желтой, высота солнца — от $37,5^\circ$ до $67,5^\circ$.

При расчете β_λ в формулы (2)–(9) вводились значения L , ρ_Φ , ρ_s и θ_Φ для конкретных участков пшеницы, на которых выполнялись измерения β_λ . Задавалось также соответствующее конкретным измерениям соотношение S_λ и D_λ . Последняя величина при фиксированной $h_\odot$ оценивалась на основе измеренной яркости затененной баритованной поверхности и той же поверхности при затенении диска солнца круглым черным непрозрачным экраном. Значения ρ_Φ (рис. 1) определялись на шаровом фотометре ФШМ-56М, значения ρ_s — при измерениях яркости поверхности почвы конкретного участка пшеницы.

Обычно измерения КСЯ проводятся при визировании в надир, т. е. фиксируется поток отраженной радиации, направленный вертикально вверх. Этот поток формируется в основном под влия-

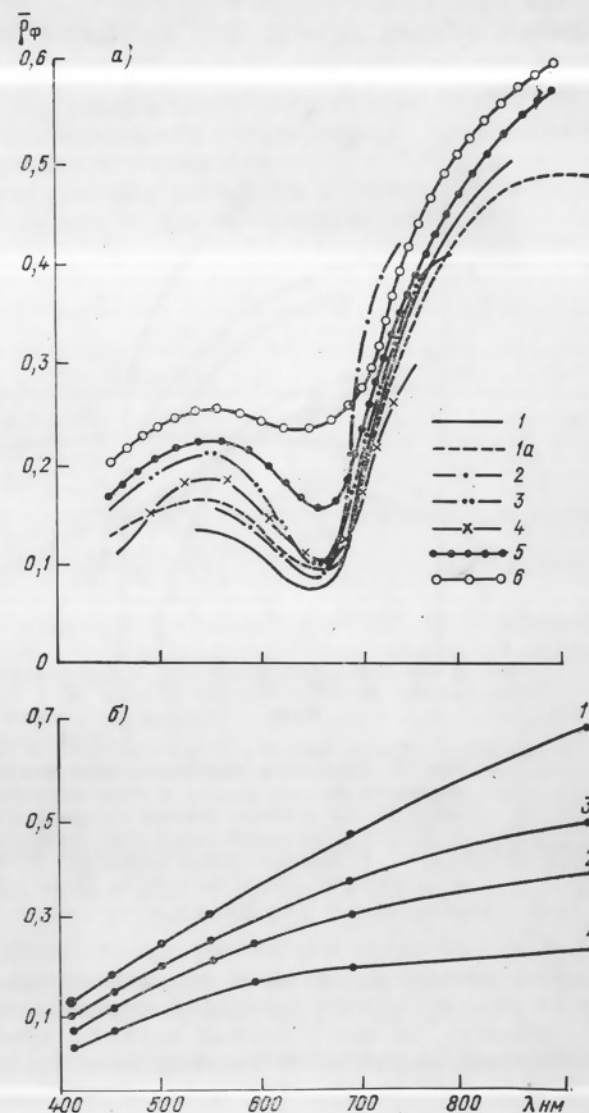


Рис. 1. Изменение коэффициентов спектрального отражения (ρ_Φ) листьев пшеницы в зависимости от длины волны (λ).

а) доминирует зеленый цвет листьев. 1 — средний зеленый лист [6, 7]; 1а — зеленый лист пшеницы без указания сорта [7]; 2 — зеленый лист пшеницы, сорт Мироновская 808 [3]; 3–6 — листья пшеницы, сорт Безостая 1 (Херсонская обл.): 3 — средний зеленый лист, 4 — темно-зеленый лист, 5 — зелено-желтый лист, 6 — желто-зеленый лист; б) листья пшеницы, сорт Безостая 1 (Херсонская обл.). 1 — ярко-желтый лист верхнего яруса, 2 — желто-бурый сухой лист, 3 — желтый сухой лист с незначительным черным налетом, 4 — желтый сухой лист с сильным черным налетом.

нием фитоэлементов, ориентированных под наклонными углами (для пшеницы — листьев), в то время как роль вертикально ориентированных фитоэлементов (стеблей, колосьев) ограничена. Следовательно, в качестве первого приближения посев озимой пшеницы можно рассматривать как растительный полог, состоя-

щий из одних листьев. Однако это приближение справедливо только для начальных фаз вегетации (рис. 2).

Из литературных данных следует, что тонкие листовые пластинки узколистных злаков полупрозрачны [2—4, 6, 7], т.е. можно принять условие $\rho_f = \tau_f$. Это допущение также было сделано нами при верификации модели применительно к посевам озимой пшеницы.

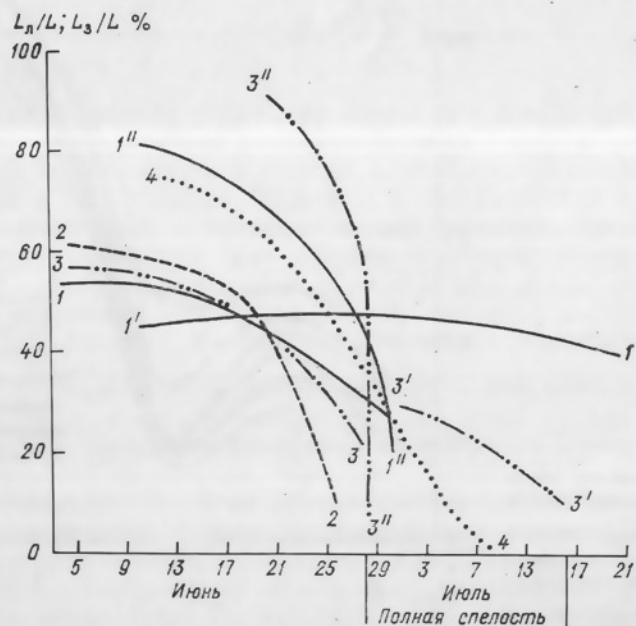


Рис. 2. Тенденции изменения доли относительной поверхности листьев (L_n/L) и доли поверхности зеленого цвета (L_3/L) в посевах озимой пшеницы хорошего (1, 2, 3, 1'', 3'') и удовлетворительного состояния при более поздних сроках посева (1', 3', 4).

L_n/L : 1, 2, 3, 1', 3'; L_3/L : 1'', 3'', 4; 1, 1', 1'') $L > 5$; 2) $L = 2 \dots 3$; 3, 3', 3'') $L \leq 2$; 4) $L > 4$.

При расчете β_λ значения ρ_f задавались в двух вариантах: 1) по общему аспекту площадки, определяемому визуально (т.е., по существу, по цвету листьев верхнего яруса) и 2) как среднее взвешенное значение по соотношению площади листьев различной окраски (см. рис. 2), проинтегрированному по вертикали ($\gamma_3 = L_3/L$), где L_3 — относительная поверхность зеленых фитоэлементов.

В первом случае предполагалось, что ведущая роль в формировании КСЯ принадлежит верхним листьям, так как именно они образуют поток первого порядка радиации, рассеянной в верхнюю полусферу. При этом листья нижнего яруса участвуют в основном при формировании дополнительных потоков за счет много-

кратного рассеяния. Так как в видимой области спектра кратность рассеяния радиации в РП невелика и лучи, рассеянные вниз верхними листьями, быстро поглощаются в нижних ярусах, можно принять, что задание значений ρ_f по общему аспекту справедливо для густых посевов и для видимого диапазона.

Во втором случае предполагалось, что поток отраженной радиации складывается под воздействием листьев всех ярусов. Учитываемая при этом неоднородность распределения по вертикали особенно важна для несомкнутых посевов.

На рис. 3 показаны примеры расчетных и экспериментальных значений КСЯ в зависимости от длины волны, а также от L и h_0 .

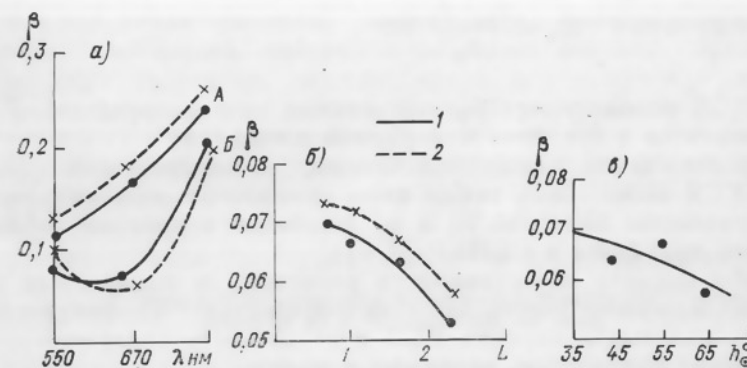


Рис. 3. Сравнение рассчитанных по модели Гюдрриана (2) и измеренных (1) значений КСЯ посевов озимой пшеницы. Визирование в надиар.

а) $L = 1.0 \dots 1.1$; $h_0 = 65^\circ$; А — желтый посев, Б — зеленый посев; б) $\lambda = 670$ нм, $h_0 = 65^\circ$; в) $\lambda = 550$ нм, $L = 3$, $\rho = 0.08$.

Видно, что модель удовлетворительно описывает тенденции изменения КСЯ в зависимости от перечисленных параметров.

Для иллюстрации сходимости расчетных и измеренных значений КСЯ в табл. 1 представлены результаты сравнения β_λ и β'_λ по 52 вариантам наземных измерений. В целом для всех спектральных диапазонов в 30 % случаев расхождения между β_λ и β'_λ не превышают 5 % и в 62 % случаев не превышают 20 %. В видимой области спектра наблюдаются расхождения, разные по знаку, но равные по модулю, в ближней инфракрасной области (БИКР) расчетные значения КСЯ в основном завышены по сравнению с измеренными.

Максимальные отклонения β_λ от β'_λ , как правило, связаны со следующими причинами:

1) в БИКР занижение β_λ обусловлено недоучетом роли стеблей и колосьев, которые имеют высокие значения ρ_f в этой

области спектра [2] и соответственно влияют на дополнительные радиационные потоки, образующиеся за счет многократного рассеяния;

2) в видимой области спектра ошибки расчета возникают в основном при неточном задании значений ρ_f , т. е. когда при рас-

Таблица 1

Повторяемость (%) различий между расчетными и измеренными значениями КСЯ							
$\Delta\beta_\lambda$	5	6—10	11—20	21—30	31—40	41—55	65—75
Повторяемость . . .	29	14	19	13	13	8	4

Примечание. $\Delta\beta_\lambda = \frac{\beta_\lambda - \beta'_\lambda}{\beta_\lambda} \cdot 100$.

четах КСЯ используются ρ_f , полученные не непосредственно для фитоэлементов в пределах измеряемой площадки;

3) расхождение между расчетными и измеренными значениями КСЯ может быть также из-за принятого в модели допущения о равенстве значений ρ_f и τ_f (особенно в красной области видимого диапазона и в БИКР [3, 7]).

Чтобы оценить сопоставимость расчетных и измеренных значений КСЯ, нужно учесть два обстоятельства: 1) фактическую точность полевых измерений КСЯ и 2) точность измерений фитометрических параметров, вводимых в модель.

При обстоятельных фитометрических наблюдениях на площадке, для которой выполняются измерения КСЯ, обычно используется методика полного срезания растений. При этой методике точность оценки основного параметра L достаточно высокая [$\pm(5-10)\%$]. Если значения L оцениваются для посева, то их точность зависит от объема выборки и используемой методики. В среднем ошибка L для посева может достигать $\pm 40\%$.

Отсюда несоответствие расчетных значений КСЯ измеренным определяется диапазоном изменения L ; это несоответствие увеличивается при $L \leq 3$.

Ошибка измеренных значений КСЯ зависит от инструментальной ошибки и вариабельности КСЯ в пределах спектрофотометрируемой площадки. Инструментальная ошибка прибора В. А. Коваленко, данные измерений которого использовались при верификации модели, не превышает $\pm 5\%$. Однако вариабельность КСЯ в пределах визуально выбранных однородных площадок может быть значительной. Так, по измерениям в 15 точках на площадке 3×1 м значения КСЯ для $\lambda = 558$ нм варьировали от 0 до $\pm 21,5\%$ относительно среднего значения. Ошибка расчета среднего составляла $\pm(11-12)\%$. Для $\lambda = 650$ нм отклонения от среднего изменялись в пределах $0 \pm 30\%$ и для $\lambda = 838$ нм — в пределах $\pm(7-25)\%$.

Учитывая сказанное, а также сравнительно невысокую точность прямых измерений фитоплощади и фитомассы на сельско-

хозяйственных полях (10—40 %), данные которых используются при интерпретации дистанционных измерений, достигнутую точность расчетов КСЯ с помощью модели Гоудриана можно оценить как вполне приемлемую. Тем более, что ясен путь усовершенствования расчетной схемы (например, введение условия $\rho_f \neq \tau_f$), а главное условие обеспечения хороших результатов — корректное задание входных параметров.

Рассмотренные выше результаты характеризуют пригодность модели Гоудриана для описания отражательных свойств небольших однородных площадок, спектрофотометрируемых в наземных условиях при детальном описании их структуры.

В практике дистанционного зондирования используются отражательные характеристики, являющиеся интегральными для больших площадей, поэтому необходимо оценить возможность применения численного моделирования для получения значений КСЯ, осредненных по площади, размеры которой имеют порядок, соизмеримый с размерами поля, т. е. 10^4-10^5 м².

С этой целью было проведено сравнение расчетных и измеренных с помощью комплекса аппаратуры ГосНИЦИПР значений КСЯ, осредненных по участку $3,3 \times 10^4$ м² (табл. 2).

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных и измеренных значений КСЯ, осредненных по полю

Длина волны, нм	Расчетное	Измеренное (при $P=0,95$)	$\Delta\beta_\lambda$ %
550	0,075	$0,072 \pm 0,0065$	4
670	0,089	$0,086 \pm 0,0031$	3
780	0,257	$0,227 \pm 0,0096$	13

Всего для указанного участка поля озимой пшеницы выборка измеренных значений КСЯ составляла 30 членов для каждой длины волны. Объем выборки по фитометрическим параметрам, вводимым в модель, составлял 359 измерений для L и 200 измерений для угла наклона фитоэлементов. Поле было практически однородное по окраске (доминировал желто-зеленый цвет), поэтому вариации по ρ_f в пределах поля не учитывались.

Оценивая результаты сравнения, можно сделать вывод: модель Гоудриана вполне применима для получения средних значений КСЯ по полю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В. А. Влияние условий освещения на спектральные коэффициенты яркости растительного покрова.—Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. 7. Фитоактинометрия. Таллин, 1980, с. 108—110.
2. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности.—Л.: Гидрометеониздат, 1982.—216 с.
3. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.—Л.: Гидрометеониздат, 1981.—287 с.

4. Шульгин И. А. Растение и солнце.— Л.: Гидрометеоиздат, 1973.— 251 с.
5. Яковлев С. Г., Доброзраков А. Д., Кондратьев Ю. М., Воякин С. Н. Вертолетный спектрометрический комплекс для подспутниковых экспериментов на полигонах изучения природных ресурсов Земли.— В кн.: Научное космическое приборостроение. М., 1983, вып. 2, с. 28—35.
6. Bunnik N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties.— Wageningen, 1978.— 180 p.
7. Gausman H. W., Allen W. A. Optical parameters of leaves of 30 plant species.— Plant Physiol., 1973, v. 52, N 1, p. 57—62.
8. Goudriaan J. A. Crop micrometeorology: a simulation study.— Wageningen, 1977.— 250 p.
9. De Wit C. T. Photosynthesis of leaf canopies.— Agric. Res. Reports, 1965, N 663, p. 1—57.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ПОСЕВА ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР С УЧЕТОМ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ

Ю. В. Тимофеев

Агрофизический научно-исследовательский институт

Как при изучении отражательных свойств растительного покрова, так и при исследовании радиационного режима в посевах сельскохозяйственных культур и естественных биоценозах сомкнутый растительный покров полезно рассматривать как горизонтальный слой с равномерным хаотическим расположением элементов растений (листьев, стеблей) [4—6]. При изучении структуры такого слоя главное внимание уделяется не размещению и структуре отдельных растений в посевах, а характеристикам, отнесенным к слою в целом или к единице объема слоя. В оптике рассеивающих сред [1, 2] простой и широко применяемой моделью является горизонтально однородная в статистическом смысле оптически мутная среда. Вопрос о том, в какой степени реальные растительные покровы подчиняются модели горизонтально однородной мутной среды, остается открытым. Решение его зависит от того, в какой мере размещение фитоэлементов в растительном покрове случайное и как определяется в растительном покрове «элементарный» объем. По характеру размещения растений одно-видовые группировки подразделяются на четыре типа [6]: 1) равномерное, или регулярное распределение (квадратно-гнездовой посев); 2) полурегулярное распределение — размещение растений отклоняется от равномерного распределения в сторону случайного (рядковый посев); 3) случайное распределение (хаотический посев); 4) групповое распределение — размещение растений отклоняется от случайного распределения в сторону сгущения (естественные группировки). В культурных фитоценозах реализуются преимущественно три первых типа размещения, чет-

вертый встречается редко. Наиболее близки к случайному распределению посевы злаковых культур, однако в начальный период развития растений (фенофазы всходы и 3-й лист) эти посевы подчиняются полурегулярному распределению. В густых посевах злаковых культур структурные элементы распределены в горизонтальной плоскости случайным образом, т.е. подчиняются распределению Пуассона. Горизонтальная однородность в статистическом смысле означает, что математическое ожидание, дисперсия и другие статистические характеристики мутной среды не зависят от координат x и y , а являются функцией только вертикальной координаты z . С густотой посева и размерами листьев связаны и элементарный объем растительного покрова, поскольку последний должен обеспечивать размещение в нем достаточного количества структурных элементов. Поэтому можно заранее утверждать, что описание растительного покрова как горизонтально однородной мутной среды не всегда допустимо. Из реальных растительных покровов к такой модели больше всего приближаются мелколиственные очень густые посевы.

Наиболее полный анализ оптических свойств горизонтально однородной мутной среды можно получить, основываясь на строгих решениях уравнения переноса. Однако на практике часто применяются различные приближенные методы. Особое распространение получил двухпотоковый метод [1]. Использование этого метода позволило найти выражение для коэффициента отражения системы почва—растительность в виде [4]

$$A_{np} = \frac{A_p + (A_n - A_p) e^{-aEm} - A_p^2 A_n}{1 - A_p A_n + A_p (A_n - A_p) e^{-aEm}}, \quad (1)$$

где A_p и A_n — коэффициенты отражения оптически плотного растительного покрова и почвы; a — коэффициент отражения растительного слоя с единичной массой на единицу площади; m — наземная растительная масса на единицу площади;

$$E = (1 - A_p^2)/A_p. \quad (2)$$

В области фотосинтетически активной радиации зеленые растительные покровы обладают весьма низкими отражательными свойствами и для них справедливо условие $A_p \ll 1$. В этом случае выражение (1) можно упростить и представить в виде

$$A_{np} = A_p + (A_n - A_p) e^{-aEm}. \quad (3)$$

Выражения (1) и (3), выведенные для коэффициентов отражения, могут быть использованы также и для описания коэффициентов яркости. Практика показывает, что использование выражения (3) для расчета коэффициентов яркости системы почва—зеленая растительность в ближней инфракрасной области спектра также дает неплохое приближение, если коэффициент яркости почвы больше 0,20. Расчеты, проведенные по формулам (1) и (3),

дают различия не более 2% для подавляющего большинства встречающихся почв [4].

Для описания коэффициента яркости посевов злаковых культур выражение (3) запишем в виде

$$r_{\text{посева}} = \bar{r}_p + (r_n - \bar{r}_p) e^{-\alpha m}, \quad (4)$$

где

$$\alpha = a(1 - \bar{r}_p^2)/\bar{r}_p. \quad (5)$$

Здесь r_n и $\bar{r}_p$ — коэффициент спектральной яркости соответственно почвы и оптически плотного растительного покрова; α — коэффициент рассеяния излучения растительным покровом.

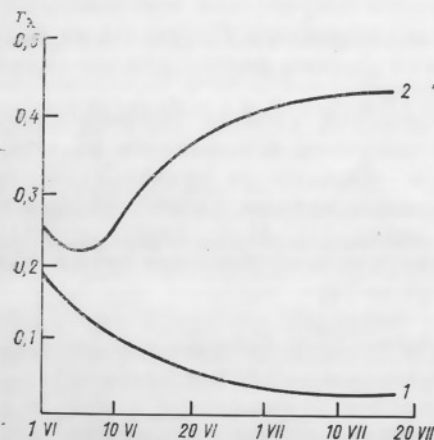


Рис. 1. Динамика коэффициента спектральной яркости посева яровой пшеницы сорта Ленинградка на дерново-подзолистой почве для двух областей спектра.

1) $\lambda_m = 660$ нм; 2) $\lambda_m = 820$ нм.

Расчеты показывают, что коэффициент α (в отличие от коэффициента a) не зависит от длины волны падающего излучения и его можно рассматривать как параметр, характеризующий внутреннюю структуру посева, зависящую от размеров и расположения листьев, архитектоники отдельного растения и взаимодействия растений в ценозе.

Представленная модель растительного покрова находит применение при аэрофотометрическом обследовании посевов пшеницы, кукурузы, хлопчатника, а также растительности пустынных пастбищ [4]. Градуировочная кривая фотометра неплохо описывается выражением (4), т.е. подчиняется экспоненциальному закону. Однако в ближней инфракрасной области спектра при малой растительной массе наблюдается отклонение от закономерности [1]. На рис. 1 представлена динамика отражательных свойств посева пшеницы в период роста для двух областей спектра: видимой (1) и инфракрасной (2). Наблюдаемое снижение коэффициента спектральной яркости в ИК области спектра объясняется затенением почвы в начальные фазы развития растений.

Поэтому данная модель требует дальнейшего развития. Кроме эффекта затенения почвы, модель должна учитывать динамику развития посева, т.е. рост растительной массы, а позже изменение отражательных свойств хлорофиллоносных органов растений в период созревания.

Решение поставленной задачи возможно, если посев рассматривать как горизонтально неоднородную мутную среду. Действительно, при взгляде на посев зерновых культур сверху можно выделить две хаотически расположенные зоны: 1) зону собственно растительности, для которой справедливы представления как об

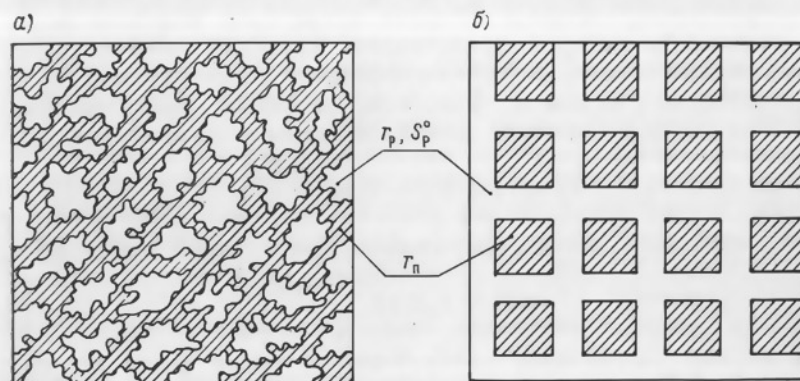


Рис. 2. Представление посева злаковых культур (вид сверху) двумя зонами, одна из которых занята растительностью (светлые участки), а другая свободна от нее (заштрихованные участки).

а — при естественном (случайном) расположении зон; б — при схематическом (регулярном) расположении зон.

однородной в пределах зоны мутной среды; 2) зону промежутков между растениями, где просматривается почва (рис. 2 а). При анализе такой системы со случайным распределением фитомассы в горизонтальной плоскости целесообразно рассмотреть эквивалентную систему с регулярным распределением фитомассы (рис. 2 б), приняв условие: $S_p^0 = \text{const}$, где $S_p^0 = Y_{\text{биол}}/Y_{\text{оп}}$ — относительная площадь, занятая в посеве растениями после окончания фазы кущения. Здесь $Y_{\text{биол}}$ и $Y_{\text{оп}}$ — реальный биологический урожай и урожай, соответствующий оптически плотному растительному покрову. Не останавливаясь на промежуточных выкладках, запишем полученное выражение для коэффициента спектральной яркости (КСЯ) горизонтально неоднородного посева в период роста

$$r_{\text{посева}} = r_p S_p + r_n (1 - S_p) [T + (1 - T) e^{-2f_r \sqrt{S_p} / \sqrt{1 - S_p}}]. \quad (6)$$

Здесь S_p — относительная площадь, занятая в посеве растениями, которая зависит от его биологического возраста τ

$$S_p = S_p^0 (1 - e^{-4.6f_r \tau})^2, \quad (7)$$

где f_r — функция роста, описывающая в общем случае несимметричный S-образный процесс, выражение для которой имеет вид

$$f_r = \left(1 + e^{\sum_{i=0}^n a_i \tau^i}\right)^{-1}. \quad (8)$$

Как показывают расчеты [3], практически все S-образные несимметричные процессы в природе могут быть описаны моделью (8), экспонента которой представляет параболу 4—6-го порядка. В выражении (6) r_n и r_p — коэффициент спектральной яркости соответственно почвы и участков, занятых растительностью. В период роста выражение для КСЯ имеет вид, аналогичный (4)

$$r_p^r = \bar{r}_p + (r_n - \bar{r}_p) e^{-4.6f_r \tau}; \quad (9)$$

T — прозрачность посева, выражение для которой имеет вид

$$T = (1 - r_p S_p) e^{-6.52 S_p f_r}. \quad (10)$$

В период созревания, начинающийся после фазы колошения (при $\tau_0 = 3,6$), ростовые процессы заканчиваются, а основную роль в динамике отражательных свойств посева играет изменение КСЯ растительной массы вследствие постепенной замены хлорофилла различными коротиноидами, связанное с этим пожелтение, а затем и отмирание растений. Выражение для коэффициента спектральной яркости посева в этот период имеет тот же вид (6) при условии $f_r = 1$; $S_p = S_p^0$, а спектральный коэффициент яркости участков, занятых в посеве растительностью, в период созревания описывается выражением

$$r_p^s = \bar{r}_p + (\bar{r}_p - \bar{r}_p) f_s, \quad (11)$$

где $\bar{r}_p$ и $\bar{r}_p$ — коэффициент спектральной яркости оптически плотного растительного покрова соответственно в период роста и после окончания вегетации (эти параметры являются константами для посевов злаковых культур); f_s — функция созревания, которая имеет вид, аналогичный функции роста

$$f_s = \left[1 + e^{\sum_{i=0}^n b_i (\tau - \tau_0)^i}\right]^{-1}. \quad (12)$$

Необходимо сказать несколько слов о том, что из себя представляет биологический возраст посева τ . Это безразмерная величина, тесно связанная с относительной длительностью отдельных фаз. На основе анализа средних многолетних данных по

зерновым культурам было установлено, что каждая фенологическая фаза имеет свою длительность в масштабе биологического возраста. Принято условие, что весь период вегетации соответствует биологическому возрасту $\tau = 7$; из этого срока период роста составляет $\tau = 0 \dots 3,6$; период созревания $\tau = 3,6 \dots 7,0$. Конец и начало каждой фенофазы соответствует определенному биологическому возрасту τ . Переход от реального масштаба времени к биологическому возрасту позволил унифицировать модель по координате времени и тем самым повысить точность расчетов с помощью представленной здесь модели, так как изменение длительности отдельных фенофаз под воздействием изменяющихся агрометеорологических условий не вносит в этом случае дополнительной погрешности.

Особенностью данной модели является использование всего трех обобщенных параметров — $Y_{оп}$, f_r и f_s — для описания динамики отражательных свойств посева зерновых культур. Особенности внутренней структуры посева характеризуются величиной $Y_{оп}$. Изменения отражательных свойств посева в течение вегетации как закономерные (увеличение растительной массы, изменение архитектуры растений при переходе в следующую фенофазу, изменение содержания пигментов в период созревания), так и случайные (под воздействием изменяющихся агрометеоусловий) характеризуются нормированными функциями роста и созревания. Соответствие модели реальным условиям и учет видовых и сортовых особенностей культуры обеспечиваются экспериментальным измерением параметров модели ($Y_{оп}$, f_r и f_s). Поскольку агрометеоусловия оказывают влияние на вид функций роста и созревания, то измерение параметров модели необходимо проводить при определенных базовых агрометеоусловиях, в качестве которых целесообразно принять условия, соответствующие или близкие оптимальным.

В заключение отметим, что данная модель открывает возможность использовать спектрофотометрическую информацию для контроля за динамикой продуктивности и биологическим возрастом посева в течение всей вегетации — от всходов до уборки урожая. Еще одной особенностью модели является возможность с ее помощью контролировать состояние не только злаковых, но и других культур (однолетние травы, подсолнечник, кукуруза, хлопчатник и т.д.), поскольку она описывает свойства горизонтально неоднородного растительного покрова, а учет видовых особенностей обеспечивается экспериментальным определением параметров модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. — Минск: Наука и техника, 1969. — 592 с.
2. Кортюм Г., Браун В., Герцог Г. Принципы и методика измерения в спектроскопии диффузного отражения. — Успехи физических наук, 1965, т. 85, вып. 2, с. 365—379.

3. Плохинский Н. А. Математические модели в биологии.— В кн.: Проблемы современной биометрии. М.: Изд-во МГУ, 1981, с. 15—30.
4. Рачулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.— Л.: Гидрометеиздат, 1981.— 287 с.
5. Росс Ю. К. К теории альbedo растительного покрова.— Науч. сообщ. Ин-та геол. и геог. АН ЛитССР, 1962, № 13, с. 151—165.
6. Росс Ю. К. Радиационный режим и архитектура растительного покрова.— Л.: Гидрометеиздат, 1975.— 339 с.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВО ВНЕЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ, ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ

К. Е. Мелешко

Лаборатория аэрометодов НПО «Аэрогеология»

1. Прямая и обратная задачи спектрофотометрических исследований

Из опыта дистанционного зондирования (ДЗ) природных образований наиболее информативными считаются спектральные отражательные характеристики (СОХ), полученные или в виде фотометрических единиц — коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) r_λ , или в спектрально-энергетических единицах B_λ [1, 2, 5]. По физической сущности данные о r и B (индексы λ опускаем) отображают результат взаимодействия приходящих световых потоков с исследуемыми объектами.

Рассеянное в верхнюю полусферу пространства излучение поступает на вход спектрального прибора. Сигнал на его выходе функционально зависит от значений r , B и может быть записан следующим образом:

$$r_{\omega, n, t}^{\uparrow} \rightarrow B_{\omega, n, t}^{\uparrow} = f(\theta, \theta', \varphi, \varphi', \lambda, \lambda', P, P'), \quad (1)$$

где $\theta, \theta', \varphi, \varphi'$ — углы, описывающие угловое распределение падающего и наблюдаемого излучения в зенитной и азимутальной плоскостях; λ, λ' — длина волны падающего и рассеянного объектом излучения; P, P' — расстояние поляризации приходящего и отраженного излучения; ω — параметр, определяющий размер площадки, попадающей в поле зрения прибора; n — параметр, определяющий пространственную ориентацию фотометрируемой площадки; t — время измерения.

С помощью функций r, B решается прямая задача спектрофотометрических исследований (СИ) — изучается с той или иной детальностью спектральное распределение отраженного природными объектами естественного излучения. Хотя к настоящему

времени накоплен большой экспериментальный материал и опыт изучения КСЯ сельскохозяйственных, геолого-географических и других объектов и информация о КСЯ постоянно пополняется, нет основания утверждать, что все вопросы методики СИ решены. Это объясняется в первую очередь многофакторностью функций r, B . Зависимость аргумента от нескольких, часто взаимозависимых, переменных, многообразие природных объектов, сложность структуры поверхности, трудность формального описания свойств и состояния объектов — вот причины, которые не позволяют использовать физико-математические методы моделирования функций r, B для создания банка данных из-за недостаточной разработанности теории дифракции излучения в случайных неоднородных средах. Основным методом изучения функции r является экспериментально-эмпирический метод, который требует больших финансовых и трудовых затрат.

В свою очередь производительность и эффективность экспериментального метода изучения СОХ определяется состоянием приборной базы, служащей для получения, обработки и представления данных о СОХ конкретных объектов.

Задача сводится к созданию комплекса приборов для получения и автоматизированной обработки данных о СОХ исследуемых объектов, причем параметры аппаратуры должны обеспечивать получение достоверной и надежной информации. С методической точки зрения информация о СОХ такого качества требует создания стандартизированной методики измерения, обработки и представления выходных данных в соответствии с требованиями задач ДЗ. Реализация такого подхода может быть достигнута путем унификации как методики измерения СОХ, так и системы параметров и характеристик спектрофотометрической аппаратуры, условий ее функционирования.

Второй этап использования СОХ предусматривает решение обратной задачи СИ — расчленение сложных объектов на однородные составляющие, их идентификацию (распознавание), определение параметров. Строгого различия между прямой и обратной задачами СИ нет. Так, например, под термином «спектрометрическая съемка», который был введен в 60-е годы, предполагалось решение некоторых задач оценки свойств объектов по данным о спектральном распределении отраженного излучения. Как правило, для решения обратной задачи СИ предусматривается получение материалов либо в виде одномерных регистрограмм, либо в виде строчных изображений. В обоих случаях сканирование местности осуществляется в информативных для данной задачи спектральных каналах, причем под информативностью подразумевается наличие тесной корреляции между физико-биологическими свойствами объектов, отображаемыми СОХ.

Если для прямой задачи СИ могут использоваться данные о r и B , то решение обратной задачи СИ осуществляется, как правило, на основе спектрально-энергетических характеристик объектов, пригодных для формирования массивов видеоинформации.

В функциональной записи процесс двумерного оптического сканирования местности можно представить в следующем виде:

$$B_{\omega, n, t}^{\dagger} = f(\theta, \theta', \varphi, \varphi', \lambda, \lambda', P, P', x, x', y, y'). \quad (2)$$

Уравнение (2) отличается от (1) тем, что в нем добавлены переменные x, x' и y, y' , которые описывают элементарные площадки по координатам x и y местности и их изображениям x' и y' соответственно.

2. Погрешность измерения СОХ, ее структура

С точки зрения метрологии важно проанализировать структуру погрешности измерения СОХ. Кратко рассмотрим способ ее определения, применив хорошо известный вероятностный метод анализа динамических систем [4]. Правомерность применения указанного метода определяется вероятностно-статистическим характером СОХ природных объектов, а анализируемая система объект—измерительный прибор полностью отвечает требованиям, характеризующим динамические системы. Каждый блок рассматриваемой системы обладает своим коэффициентом передачи. Коэффициент передачи объекта функционально связан с измеряемым параметром B и варьирует в силу своей случайной природы и под влиянием внешних факторов. Коэффициент передачи измерительного прибора также варьирует в определенных пределах. Поэтому сигнал на выходе системы носит случайный характер. Придав приращение выходному сигналу и произведя ряд преобразований, получим выражение для дисперсии выходного сигнала. Она зависит от относительной чувствительности метода и состоит из трех компонент. По физическому смыслу первая компонента характеризует дисперсию измеряемого параметра B . Это так называемая статистическая составляющая, она определяется случайной природой величины B . Вторая компонента характеризует дисперсию, обусловленную методом измерения. Это так называемая методическая составляющая, она зависит от воздействия внешних факторов при измерении B , косвенного способа определения r . Третья компонента характеризует дисперсию, зависящую от флуктуаций параметров аппаратуры вследствие случайных изменений коэффициента передачи прибора. Это так называемая приборная составляющая.

В инструкциях и описаниях спектральных приборов приводятся технические параметры и данные об ошибке измерения СОХ, причем эти данные характеризуют, как правило, только приборную составляющую суммарной ошибки.

Ниже остановимся на причинах возникновения методической составляющей ошибки измерения СОХ, значение которой может значительно превосходить значение ошибки приборной составляющей.

3. Факторы, вызывающие варьирование СОХ

Изучение факторов, обуславливающих варьирование СОХ, является важной самостоятельной задачей. В каждой работе, затрагивающей вопросы получения и использования данных о СОХ, различные стороны этой проблемы рассматриваются с той или иной точки зрения. Это вызвано тем, что изменчивость СОХ опосредована через параметры, характеризующие состояние объектов. Сказанное в первую очередь относится к объектам, состояние которых подвержено закономерным изменениям (изменение фенологических аспектов растительных сообществ и сельхозугодий, изменение агрегатного состояния гидрологических объектов и т. п.).

Эффективность спектрометрического метода в значительной степени зависит от состояния изученности зависимостей СОХ от параметров, характеризующих состояние объектов, и обоснованного применения этих зависимостей.

С другой стороны, возможности метода с учетом изменчивости СОХ определяются изменением освещенности исследуемых объектов вследствие изменений высоты Солнца и метеорологических условий, перераспределением яркости по небосводу, влиянием атмосферных помех, экспозицией склонов и др.

Привходящие факторы—увлажненность объектов, ветер, пыль, иней, роса и т. п.—характерны тем, что после прекращения их воздействия параметры, характеризующие состояние объектов, не претерпевают изменений.

С точки зрения важности изучения перечисленных факторов на первом месте находятся факторы, вызывающие изменение состояния объекта. Учет факторов, определяемых условиями освещенности объектов, сводится в основном к обоснованию способов коррекции СОХ.

Также важно знание зависимостей СОХ от некоторых привходящих факторов, например, зависимости от степени увлажненности почв.

4. Особенности методики измерения КСЯ объектов в наземных условиях

Метод получения КСЯ, заключающийся в нормировании спектральной яркости объекта B относительно спектральной яркости эталонной поверхности B_0 , определяет их более высокую инвариантность при колебаниях освещенности [3]. В то же время, когда абсолютные значения B изменяются на порядок и более, варьирование r составляет всего несколько процентов под воздействием рассмотренных выше факторов. Эти свойства функции r позволяют использовать ее в соответствующих справочниках и каталогах.

Точность измерения КСЯ при прочих равных условиях определяется свойствами применяемой эталонной поверхности—сте-

пенью анизотропности отражательных свойств в используемом интервале зенитных и азимутальных углов Солнца и степенью спектральной неселективности в рабочем интервале длин волн. Отклонение свойств фотометрических эталонов от свойств идеальной рассеивающей поверхности требует введения соответствующих коррекций — либо аппаратурных в процессе измерений, либо на этапе обработки данных полевых наблюдений.

Перспективным с точки зрения минимизации методической составляющей погрешности измерения КСЯ является совмещение в пространстве и времени измерений спектральной яркости объекта B и эталона B_0 .

По сути способ реализуется при измерениях КСЯ двухлучевыми приборами фирмы Exotech Inc (США) [3], в спектрофотометрах, созданных в Институте физики СО АН СССР (Красноярск) [6], в Лаборатории аэрометодов НПО «Аэрогеология» [4].

Причиной увеличения методической составляющей погрешности измерения КСЯ может быть также следующее обстоятельство. При измерениях КСЯ требуется поместить эталонную поверхность и объект в одинаковые условия освещения. Выполнить это условие удастся практически в редких случаях (например, если возможно положить баритованную бумагу непосредственно на поверхность изучаемого объекта). В большинстве случаев сделать это невозможно (например, при установке спектрофотометра на подвижной платформе, если спектрофотометр конструктивно выполнен в одном блоке с эталоном). Неточная пространственная ориентация эталонной поверхности относительно объекта в случае ее анизотропности приводит к погрешностям измерения КСЯ, учесть которые трудно. Для устранения данной неопределенности и унификации измерения яркости эталонной поверхности ее следует всегда располагать горизонтально, указывая при этом пространственную ориентацию исследуемого объекта в зенитной и азимутальной плоскостях. Если результаты измерения КСЯ наклонных поверхностей предусматривается использовать как эталонные, т. е. для каталогов, то необходимо их привести к случаю горизонтальной поверхности.

5. Требования к системе параметров и условиям функционирования спектрометрической аппаратуры

Без существенных оговорок можно утверждать, что выполнение основных положений унифицированной методики измерения СОХ с учетом требований фотометрии и метрологии может быть обеспечено только при наличии спектрометрической аппаратуры, обладающей системой параметров и функциональными возможностями, необходимыми для эффективного решения задач ДЗ. Под системой параметров и функциональными возможностями спектрометрической аппаратуры понимаем комплекс характеристик и показателей, обеспечивающих ее эффективное функционирование с точки зрения получения данных о спектральных свой-

ствах исследуемых объектов и набора вспомогательных данных, относящихся к метеорологическим и другим специфическим факторам.

Не касаясь принципов создания полевой спектрометрической аппаратуры, сформулируем общие требования к системе параметров и условиям функционирования:

1. Спектральная аппаратура, предназначенная для использования в наземных условиях, должна обладать быстродействием не более 1 с во всем рабочем спектральном диапазоне. Такое быстродействие может быть реализовано в приборах по двухлучевой схеме, что сделает их менее зависимыми от изменений метеорологических факторов.

2. В наземных условиях спектрометрическую аппаратуру целесообразно использовать для изучения зависимостей СОХ от параметров, характеризующих состояние объектов, самолетную аппаратуру — для сбора данных в объеме, необходимом для получения надежных статистических выводов и обобщений.

3. Параметры наземной и самолетной аппаратуры должны быть согласованы по спектральным и метрологическим характеристикам.

4. В процессе измерения СОХ должна быть обеспечена возможность энергетической и фотометрической калибровки, что позволит получить надежные откалиброванные полевые спектральные данные.

5. Конструкция полевой спектральной аппаратуры должна быть достаточно прочной, удобной и простой в эксплуатации.

Процесс сбора спектрометрической информации в полевых условиях довольно специфичен и при конструировании спектральных приборов необходимо предусмотреть условия функционирования, обеспечивающие измерение СОХ в контролируемых условиях, для чего измерения СОХ должны регулярно сопровождаться служебной информацией, необходимой для правильной их интерпретации при научных исследованиях.

В заключение следует отметить, что круг затронутых вопросов данной проблемы далеко не полный, пути и способы их решения могут отличаться от рассмотренных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов Г. А. Проблемы аэрокосмической спектрометрии земной поверхности. — Исследование Земли из космоса, 1980, № 2, с. 66—75.
2. Дистанционное зондирование: «количественный подход». — М.: Недра, 1983. — 415 с.
3. Лимер Р. В., Майерс В. Д., Сильва Л. Ф. Спектрорадиометр для применения в полевых условиях. — Приборы для научных исследований, 1973, № 5, с. 81—85.
4. Мелешко К. Е. Спектрофотометрические исследования природных покровов Земли. — Л.: Недра, 1976. — 112 с.
5. Многозональные аэрокосмические съемки Земли. — М.: Наука, 1981. — 304 с.
6. Сидько Ф. Я. и др. Оптические методы изучения растительных ценозов суши и моря. — Исследование Земли из космоса, 1980, № 3.

ОБОБЩЕНИЕ АНКЕТНЫХ ДАННЫХ ОБ АППАРАТУРЕ ДЛЯ ВНЕЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

К. Е. Мелешко

Лаборатория аэрометодов НПО «Аэрогеология»

Ю. К. Росс

Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР

В настоящей статье использованы ответы на анкету о тактико-технических данных спектрометрической аппаратуры для внелабораторных измерений оптических характеристик элементов подстилающей поверхности, полученные из 16 организаций, занимающихся разработкой, изготовлением и эксплуатацией указанной аппаратуры. Использованы также тезисы докладов, которые были получены из нескольких организаций при подготовке настоящего совещания.

В ответах на анкету представлена информация о 40 приборах для сбора спектрометрических данных, в том числе об одном обрабатывающем комплексе и об одной многоспектральной сканирующей системе, предназначенной для формирования строчных изображений.

По условиям эксплуатации приборы разделяются следующим образом: 20 предназначено для измерений в наземных условиях, 14 — для измерений с самолетов, один спектрометр использован для измерений спектральных характеристик природных объектов из космоса (две модификации прибора типа МСС-2МВ и МСС-2П, разработанных в Институте физики АН БССР).

Представленная в анкетах информация позволяет классифицировать аппаратуру по функциональному назначению. Большинство имеющихся приборов (14) предназначено для измерения КСЯ, СЯ, индикатрис рассеяния природных объектов, пять приборов — для измерения температуры подстилающей поверхности.

Большинство используемых в различных организациях приборов выполнено в опытном и макетном исполнении, только незначительная часть аппаратных разработок доведена до малой серии, в том числе 12 приборов типа МСС-2МВ, разработанных в ИФАН БССР, пять полевых спектрофотометров типа СФП-1, разработанных в ЛАЭМ НПО «Аэрогеология», 11 биометрических

фотометров разработки ВНИИСХМ, 12 радиационных термометров РТ-2 и 200 радиационных балансометров БМК-2, разработанных в АФИ.

Преобладающее большинство спектральной аппаратуры выполнено по однолучевой схеме. Значительный интерес представляют самолетные спектрометры типа «Бархан-1» и «Бархан-2», созданные в ИФАН БССР по двухлучевой схеме.

В анализируемой аппаратуре используются приемники излучения различных типов. Можно указать на визуальные фотометры (разработка ГОИ 1949 г.), находящиеся в эксплуатации до настоящего времени. В остальных приборах реализован метод фотоэлектрической фотометрии на базе приемников излучения, в качестве которых применяются фотоэлектронные умножители, полупроводниковые фотоэлектрические приборы, диссекторы, болометры, пироэлектрические приемники излучения. Спектральной чувствительностью приемников излучения определяется перекрываемый рабочий спектральный диапазон. В представленных приборах он охватывает участок спектра от 0,4 до 12,5 мкм.

Кроме приборов пассивного типа, имеются сведения о самолетном СВЧ радиометре для измерения разнояркостных характеристик объектов земной поверхности методом активного зондирования (НПОКИ АН АзССР).

В 14 приборах реализована энергетическая калибровка измеряемых оптических сигналов, в 12 приборах применяется метод фотометрического эталонирования. В ответах на анкету отсутствуют сведения о точности энергетической калибровки измеряемых сигналов, точность фотометрической калибровки определяется точностью измерения КСЯ, данные о которых приведены в ответах на анкету.

Данные о значении фотометрической погрешности измерения сигналов, пропорциональных отраженному объектами излучению, варьируют в анкетных данных от 2—10 до 15 %. К сожалению, из-за отсутствия ГОСТа, регламентирующего способ определения фотометрической погрешности, трудно установить ее структуру, т.е. оценить, чем характеризовать указанную погрешность — аппаратной или методической составляющей.

Для диспергирования входного излучения в семи случаях применяются дифракционные решетки, в одном — призма и в 18 приборах — интерференционные фильтры, причем они используются как для выделения отдельных спектральных интервалов, так и для сканирования по длинам волн в заданном диапазоне (например, от 0,4 до 2,9 мкм в быстродействующем клиновом спектро-радиометре разработки ИЭМ).

Представленная аппаратура обладает спектральным разрешением от единиц нанометров до нескольких десятых микрометров, т.е. находится в пределах, определяемых требованиями решаемых задач.

Мгновенный угол поля зрения рассматриваемой аппаратуры в зависимости от решаемых задач имеет значения от десятков

секунд до единиц градусов, а угол визирования (угол обзора) — от единиц до десятков градусов.

Представленная информация, за некоторым исключением, позволила объективно оценить систему параметров аппаратуры для сбора спектральных данных, имеющейся в эксплуатации в различных организациях.

Практически не даны ответы на вопросы анкеты о способах представления одновременно с основными данными служебной (вспомогательной) информации, необходимой для оценки условий проведения спектрометрических исследований (за исключением ИФАН БССР).

По результатам анализа анкетных данных о системе параметров аппаратуры, применяемой в организациях различных ведомств, можно сделать следующие выводы:

1. В рассмотренной аппаратуре реализованы технические параметры, необходимые для проведения научных исследований, базирующихся на использовании спектральных признаков сельскохозяйственных и геолого-географических объектов.

В ряде случаев используется аппаратура для решения производственных задач, что подтверждено выпуском малых серий отдельных приборов.

2. Рассмотренная спектральная аппаратура использовалась в основном для плановых работ организаций и для отработки методических вопросов дистанционного зондирования.

3. Уровень разработок и изготовления спектральной аппаратуры определяется наличием соответствующей материально-технической базы для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию оптико-электронных приборов. Выбор и принятие оптимальных технических решений на этапе разработки спектральной аппаратуры зависит также от квалификации и опыта разработчиков, возможности пользоваться современной элементной базой и комплектующими изделиями, имеющимися на отечественном рынке.

4. Следует отметить внедрение перспективного направления, связанного с решением задачи автоматизации измерений в полевых условиях путем агрегатирования спектральных приборов с микроЭВМ. Машина осуществляет функцию управления прибором, предварительную обработку исходных данных, статистическую обработку, перезапись информации в машинный формат.

5. Чрезвычайно перспективным является направление по созданию информационно-измерительной спектрометрической системы, в состав которой входят также приборы для измерения параметров состояния и свойств объектов.

Задача сводится к разработке межприборного интерфейса для согласования зачастую несовместимых приборов различного назначения в единый комплекс, что существенно удешевит и сократит сроки разработки. Имеется ГОСТ 26.003—80 на создание такого интерфейса, однако проблема далека от решения.

ПОЛЕВОЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИСТАНЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*А. В. Вишневский, А. Я. Грош, Ю. М. Пляшник,
В. Г. Черепанов, В. И. Харук*

Институт леса и древесины СО АН СССР

Коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) являются важнейшими параметрами, описывающими взаимодействие излучения с растительностью в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Известно, что КСЯ тесно связаны с такими показателями, как состояние и продуктивность растительных сообществ. В то же время при сопоставлении и интерпретации КСЯ нередко возникают определенные трудности. Это обусловлено как их значительной естественной изменчивостью, так и несопоставимостью результатов различных экспериментаторов, которая объясняется различиями в методиках измерений [3, 4].

В целях снижения дисперсии КСЯ необходимо наряду с исследованиями факторов их естественной изменчивости совершенствовать методику измерений. В этом плане важная роль отводится автоматизации получения и обработки спектральной информации и совершенствованию приборов-датчиков. Однако этим вопросам в литературе уделяется недостаточно внимания, поэтому данную работу можно рассматривать как попытку частично заполнить существующий пробел.

Исследование факторов воздействия на КСЯ проводится с помощью полевых стационарных или мобильных комплексов, включающих спектрометры и аппаратуру регистрации данных на бумажный носитель или фотоноситель [1, 2]. Спектрометры подобных комплексов в большинстве случаев выполняются на основе монохроматоров и фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) в качестве приемников излучения. Они обладают высокой чувствительностью и линейностью амплитудной характеристики измерительного тракта в широком диапазоне уровня освещенности. С их помощью измерения проводятся по обычной методике: регистрируется спектр эталона, затем спектр объекта, в журнале записываются условия съемки, время, номер эксперимента и т.д. После этого в полевых или камеральных условиях производится вычисление КСЯ.

Опыт показывает, что экспериментатор в процессе работы значительную часть времени тратит на регулировку чувствительности прибора, адаптируя его к изменяющимся условиям съемки, и на ручную коррекцию нуля усилителя. Последнее вызвано необходимостью компенсировать дрейф измерительного канала прибора, в основном обусловленный медленными флуктуациями темнового тока ФЭУ. Ручные операции (адаптация чувствительности, коррекция нуля усилителя, вычисление значений КСЯ) не позволяют эффективно проводить исследования, требующие регистрации и

статистической обработки большого числа измерений. Поэтому в настоящее время для успешного решения задач по исследованию изменчивости КСЯ применяются автоматизированные системы на базе ЭВМ, которые позволяют сократить время эксперимента за счет передачи ЭВМ функций управления спектрометром, оперативной обработки и регистрации конечных результатов в полевых условиях.

К приборам-датчикам, предназначенным для работы в автоматизированных системах, предъявляются требования, из которых наиболее важными являются следующие:

— наличие унифицированного приборного интерфейса (ПИ) для организации дистанционного управления прибором и получения информации о его состоянии;

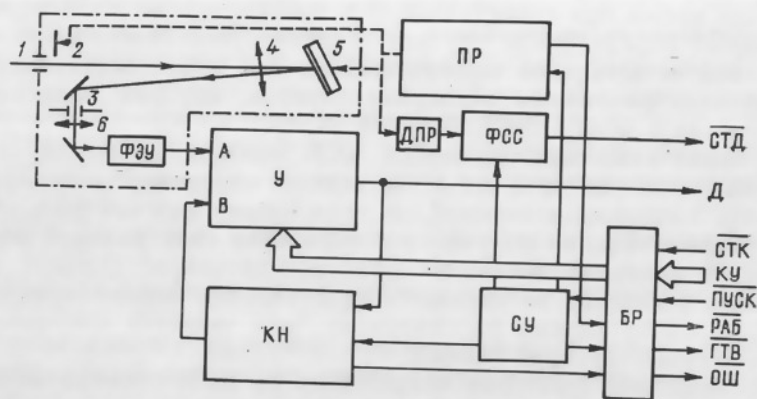


Рис. 1. Структурная схема спектрометра.

— нормирование аналоговых или цифровых сигналов с учетом требований ПИ;

— автоматическая стабилизация параметров прибора, влияющих на его метрологические характеристики.

Кроме того, желательно, чтобы прибор сохранил возможность автономной работы для решения некоторых локальных задач.

С учетом этих требований разработан электронный блок полевого спектрометра (рис. 1). Основу прибора составляет автоколлимационный монохроматор, включающий входную (1) и выходную (3) щели, обтюратор (2), объектив (4), дифракционную решетку (5) и фокусирующую линзу (6). В качестве приемника излучения используется фотоэлектронный умножитель типа ФЭУ-83. Выполнение системных требований обеспечивается применением усилителя (У) с цифровым управлением коэффициентом усиления, корректора нуля (КН) и буферного регистра (БР). Кроме перечисленных узлов, в состав электронного блока входят привод дифракционной решетки (ПР), датчик положения решетки (ДПР), формирователь стробирующих сигналов (ФСС) и схема управления (СУ).

Рабочий цикл прибора инициируется сигналом ПУСК и выполняется автоматически. Развертка спектра (прямой ход) осуществляется поворотом решетки при помощи кулачкового механизма, связанного с элетродвигателем привода. Во время прямого хода сигнал с ФЭУ поступает на вход А усилителя, с выхода которого сигнал Д поступает на вход аналого-цифрового преобразователя системы. Пуск преобразователя производится импульсами стробирования данных (СТД), которые генерирует ФСС по сигналам датчика положения решетки. Во время возврата решетки в начальное положение (обратный ход) обтюратор перекрывает световой поток в монохроматоре и схема управления (СУ) запрещает генерацию сигнала стробирования, разрешает работу кор-

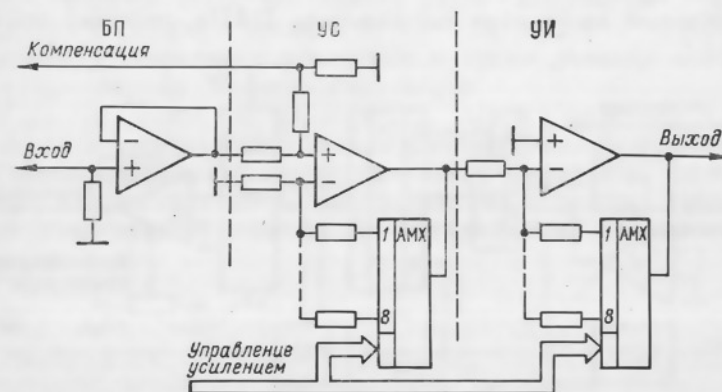


Рис. 2. Функциональная схема усилителя.

ректора нуля. Корректор нуля сравнивает напряжение на выходе усилителя (при закрытом обтюраторе оно определяется темновым током ФЭУ) с нулевым уровнем и, если они не равны, вырабатывает компенсирующий сигнал, поступающий на вход В усилителя. Этот сигнал смещает усилитель до получения на его выходе нулевого уровня. Процесс коррекции происходит постоянно после включения питания и запрещается только на время прямого хода, при этом последнее значение компенсирующего напряжения запоминается корректором до завершения прямого хода. Регулировка усиления производится четырехразрядным управляющим словом (КУ), которое записывается в буферный регистр по стробу команды (СТК) от модуля управления системы. Состояние спектрометра характеризуется сигналами готовности (ГТВ) и рабочей части цикла (РАБ), а также сигналом ошибки (ОШ), который вырабатывается корректором нуля, если смещение усилителя превышает пределы компенсации.

Функциональная схема усилителя (рис. 2) включает буферный повторитель (БП), усилитель-сумматор (УС) и выходной инвертирующий усилитель (УИ). Оба усилителя имеют коммути-

руемые цепи обратной связи, позволяющие изменять коэффициенты передачи. Коммутация цепей обратной связи осуществляется аналоговыми мультиплексорами (АМХ), которые в зависимости от управляющего кода включают в цепь обратной связи один из резисторов, определяющих коэффициент передачи каскада. Применение двух каскадов позволяет изменять чувствительность измерительного тракта на три порядка, что вызвано необходимостью работы с прибором при значительных изменениях уровня освещенности.

Основу корректора нуля (рис. 3) составляет двенадцатиразрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и реверсивный счетчик (СЧ). При включении питания формирователь сигнала начальной установки (ФСНУ) устанавливает на счетчике код, соответствующий выходному напряжению ЦАПа, равному половине

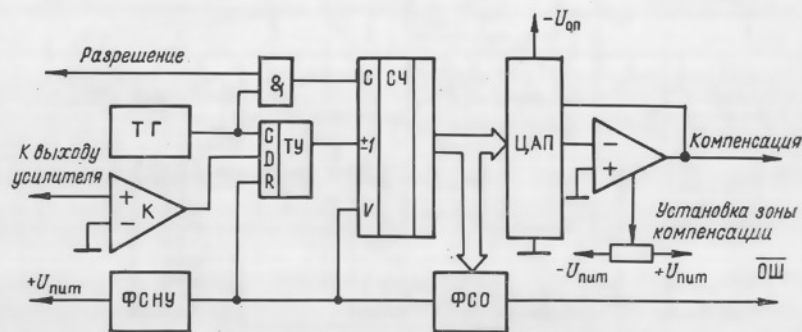


Рис. 3. Функциональная схема корректора нуля.

опорного $U_{оп}$. Это необходимо для уменьшения времени начальной коррекции. Компаратор (К) сравнивает напряжение на выходе усилителя с нулевым уровнем. Если напряжение имеет положительную полярность, выход компаратора устанавливается в состояние «1». Импульсом тактового генератора (ТГ) триггер управления (ТУ) также устанавливается в состояние «1» и разрешает прямой счет (суммирование). При наличии разрешающего сигнала тактовые импульсы поступают на счетный вход счетчика СЧ, и выходное напряжение ЦАПа начинает увеличиваться, вызывая тем самым смещение нуля усилителя. Когда напряжение на выходе усилителя становится равным нулю, сигналом компаратора триггер управления переключается в состояние «0» и счетчик переводится в режим обратного счета (вычитание). Таким образом, процесс коррекции представляет собой переключение компаратора из одного состояния в другое, что вызывает периодические изменения направления счета. При снятии сигнала разрешения счет прекращается и корректор нуля «запоминает» последнее состояние счетчика, т. е. определенный уровень компенсирующего сигнала. Если смещение нуля усилителя превышает максимальное компенсирующее напряжение, узел формирования

сигнала ошибки вырабатывает сигнал $\overline{ОШ}$. Корректор нуля позволяет компенсировать смещение нуля усилителя как положительной, так и отрицательной полярности. Положение зоны компенсации устанавливается при помощи построечного резистора, что бывает необходимо, например при смене ФЭУ.

В связи с применением корректора нуля важными характеристиками спектрометра являются остаточное напряжение смещения усилителя $U_{ост}$ и время компенсации t_k . Первый параметр определяется выражением

$$|U_{ост}| \leq \frac{U_k K_y}{2^n} \left(1 + \text{entiere} \frac{t_y + t_p}{T_{ти}} \right),$$

где U_k — максимальное компенсирующее напряжение; K_y — коэффициент передачи усилителя; n — разрядность ЦАПа; t_y и t_p — время установления усилителя и время реакции корректора нуля; $T_{ти}$ — период тактовых импульсов.

Нестрогое равенство объясняется асинхронностью тактовых импульсов и момента запрещения компенсации. Вследствие этого $U_{ост}$ может принимать любое значение в пределах размаха колебаний напряжения на выходе усилителя в режиме коррекции. Время компенсации зависит от напряжения компенсируемого смещения $U_{см}$

$$t_k = T_{ти} \left(1 + \text{entiere} 2^{n-1} \frac{U_{см}}{U_k} \right).$$

Учитывая вероятностный характер зависимости $U_{см}$ от времени, можно сделать вывод, что при неизменности всех прочих параметров временные и точностные характеристики прибора в режиме коррекции зависят от $T_{ти}$. При увеличении $T_{ти}$ значение $|U_{ост}|$ уменьшается, стремясь в пределе к статической ошибке квантования ЦАПа, но при этом растет t_k , и наоборот, высокая тактовая частота позволяет уменьшить t_k , но это вызывает увеличение $|U_{ост}|$, обусловленное конечными значениями t_y и t_p . В описываемом спектрометре оптимальная тактовая частота принята равной 10 кГц. При этом $t_{k \max} = 0,3$ с, $|U_{ост \max}| = 0,22$ В (при $K_y = 1024$). Более точная коррекция $U_{ост}$ (если это необходимо) производится программным способом. Прибор имеет спектральное разрешение 10 нм и работает в диапазоне 0,45—0,9 мкм. Измерение уровня выходного сигнала прибора производится аналого-цифровым преобразователем системы в 32 точках спектрального диапазона по фронту СТД. Время цикла спектрометра 15 с. Электронный блок реализован на интегральных схемах серий К544, К572, К590, К521, К561. Прибор питается от источника постоянного тока напряжением 27 В, потребляемая мощность 15 Вт.

Разработанный спектрометр включен в состав системы автоматизации дистанционных исследований экспериментальных природных объектов ЗОНД (рис. 4), проводимых на стационарном

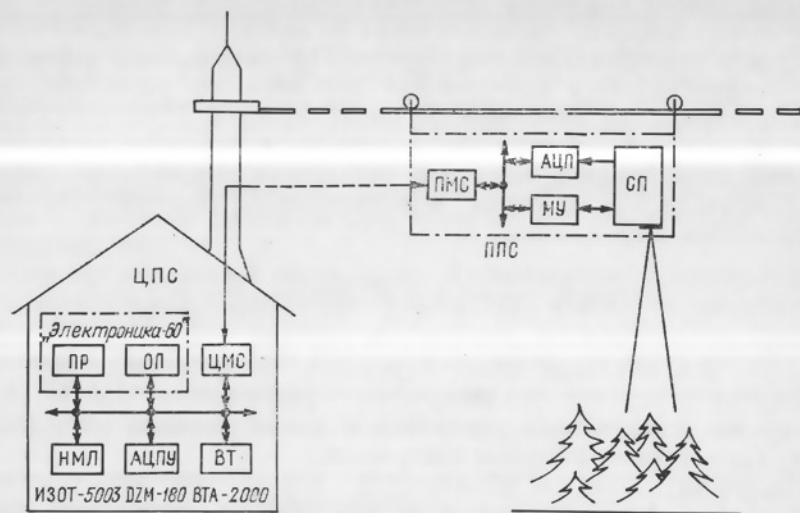


Рис. 4. Структура системы ЗОНД.

полигоне Института леса и древесины СО АН СССР. Для этих исследований на полигоне на расстоянии 250 м друг от друга установлены две стальные вышки-опоры высотой 40 м. Между опорами над опытными посадками древесных растений с помощью электропровода по тросам перемещается платформа, на которой размещена периферийная подсистема (ППС), состоящая из спектрометра (СП), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), модуля управления (МУ) и периферийного модуля связи (ПМС). Периферийная подсистема кабельной линией связи соединена с центральной подсистемой (ЦПС), реализованной на базе мик-

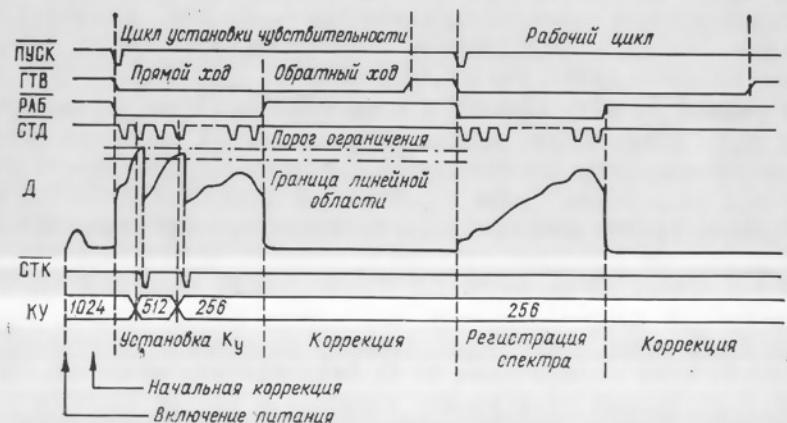


Рис. 5. Временные диаграммы работы спектрометра.

роЭВМ «Электроника-60». Центральная подсистема находится в лабораторном домике под одной из вышек. Кроме оперативной памяти (ОП) и процессора (ПР) микроЭВМ в состав ЦПС входят центральный модуль связи (ЦМС), накопитель на магнитной ленте (НМЛ), алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ) и видеотерминал (ВТ). Данная система позволяет автоматизировать процесс сбора, предварительной обработки и регистрации информации на магнитную ленту (для дальнейшей обработки) или при помощи АЦПУ производить документирование оцифрованных спектрограмм на бумажный носитель.

Цифровое управление трактом усиления спектрометра позволило автоматизировать процесс установки чувствительности в зависимости от условий освещения и характера отражающей способности объекта исследования. Это достигается двухцикловым режимом работы прибора. В первом цикле программным путем производится установка чувствительности спектрометра, во втором — регистрация спектра. Установка чувствительности производится по алгоритму (рис. 5). После включения питания и начальной коррекции нуля осуществляется пуск прибора и начинается прямой ход решетки. Первоначально коэффициент передачи усилителя устанавливается максимальным (1024). Если при очередном отсчете выходной сигнал усилителя превышает заранее установленный уровень, усиление снижается в два раза, если нет — остается прежним. Уменьшение усиления происходит до тех пор, пока максимальный уровень сигнала не останется в пределах линейности амплитудной характеристики усилителя. После завершения обратного хода командой ПУСК инициируется рабочий цикл, причем последнее значение коэффициента передачи сохраняется в памяти машины и помещается в заголовок массива данных регистрируемой спектрограммы. В состав заголовка входят дата, имя объекта, номер спектрограммы, текущее время и другие необходимые сведения, введенные оператором с пульта видеотерминала.

В связи с растущим уровнем автоматизации полевых дистанционных исследований необходимо отметить перспективные, на наш взгляд, направления в этой области.

1. В отношении приборов-датчиков важной задачей является разработка новых или модернизация существующих ПД с учетом необходимого минимума системных требований, приведенных выше. Кроме того, в целях дальнейшего расширения функциональных возможностей приборов необходимо провести работы по включению в них узлов и устройств, позволяющих программировать параметры и режимы работы (например, микропроцессорных блоков управления).

2. Дополнение приборов-датчиков автоматизированными приводами, позволяющими, например, изменять угол зрения прибора, осуществлять смену внешних фильтров, выполнять программируемое перемещение прибора над исследуемым объектом. Это дает возможность полностью автоматизировать проведение ряда экс-

периментов, что значительно повысит эффективность исследований.

3. Введение в состав системы канала регистрации параметров окружающей среды (температура, влажность, скорость ветра и т. д.), а также таймера реального времени позволит автоматически формировать в заголовке спектрограммы массив вспомогательных параметров, освободив экспериментатора от операций введения этих данных с клавиатуры видеотерминала.

4. Для наиболее эффективной реализации потенциальных возможностей технических средств системы, перечисленных в п. 1—3, при разработке математического обеспечения следует предусмотреть:

— организацию диалогового режима оператор—система на естественном языке, включив в состав математического обеспечения подпрограммы обучения пользователя, тестирования приборов и системы, справочные сведения и другие сервисные элементы;

— возможность программирования оператором хода эксперимента путем включения в состав макроопераций подпрограмм типа эталонирования, перемещения прибора, снятия спектра объекта, изменения направления визирования и т. д.;

— возможность включения в состав математического обеспечения наряду с такими подпрограммами обработки, как вычисление КСЯ, статистик и т. д., подпрограмм, позволяющих по мере накопления на магнитной ленте экспериментальных данных производить их целевую обработку и вывод результатов, например графиков дневного хода и сезонной изменчивости КСЯ, его зависимости от метеорологических факторов и др.

Дальнейшие работы по развитию системы ЗОНД планируется проводить на основе изложенных рекомендаций. Кроме того, важным этапом развития системы будет включение в ее состав ИК и СВЧ радиометров, с помощью которых можно проводить исследования излучательных характеристик подстилающих поверхностей для решения задач по определению влажности почв и патологических состояний растительного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешко К. Е. Изучение спектральных коэффициентов яркости природных объектов в полевых условиях.— В кн.: Исследование оптических свойств природных объектов и их аэрофотографического изображения. Л.: Наука, 1970, с. 16—34.
2. Харин Н. Г. Дистанционные методы изучения растительности.— М.: Наука, 1975.— 132 с.
3. Харук В. И., Хребтов Б. А., Тимченко М. И. Изменчивость коэффициентов спектральной яркости лесной растительности.— В кн.: Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: Наука, 1983, с. 74—77.
4. Юцевич Ю. К. Оптические характеристики природных образований: Краткий обзор исследований.— В кн.: Исследование оптических свойств природных объектов и их аэрофотографического изображения. Л.: Наука, 1970, с. 5—15.

ДИСТАНЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*В. А. Каневский, В. Ф. Рязанцев, В. Б. Небесный,
Ю. Р. Шеляг-Сосонко, В. А. Миролюбов, Я. И. Мовчан*

Институт ботаники АН УССР

Ю. К. Росс

Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР

С. М. Кочубей

Институт физиологии растений АН УССР

Математическое моделирование радиационного режима растительного покрова (РП) методом Монте-Карло позволило получить интересные данные об угловой структуре поля рассеянной РП радиации, которые обосновывают целесообразность использования активных лазерных методов зондирования РП тонкими пучками фотонов для получения информации об архитектонике РП [3—5]. Для этой цели было создано несколько действующих макетов лазерной самолетной системы (ЛСС) и начаты их испытания. В ходе летных испытаний выяснилась возможность использовать ЛСС не только для получения информации об архитектонике РП, но и для получения информации о физиологическом состоянии РП по спектральным характеристикам люминесценции растений.

Итак, на сегодняшний день, с нашей точки зрения, представляется возможным решение следующих трех классов задач дистанционного зондирования РП лазерными самолетными системами:

1. Исследование отражательных свойств РП на длинах волн: 260, 337, 440, 530, 630, 1060, 1150, 3390 нм.
2. Исследование параметров архитектоники РП: листовой индекс, ориентация листьев, проективное покрытие.
3. Исследование физиологического состояния РП по характеристикам люминесценции растений.

Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных классов задач.

1. Исследование отражательных свойств РП

Основные преимущества измерения КСЯ активными лазерными методами по сравнению с пассивным спектрометрированием следующие:

1) независимость получаемых данных от зенитного угла солнца — ЛСС работает строго вниз, перпендикулярно к подстилающей поверхности;

2) высокая стабильность мощности лазерного передатчика, а отсюда высокая стабильность условий подсветки РП;

3) высокое разрешение на местности, удобство изменения элементов разрешения от 5—10 см до нескольких метров с помощью расфокусировки лазерного пучка;

4) возможность работать в довольно уникальном и мало доступном для пассивных методов диапазоне — 260 нм. Как следует из последних работ по оптике листьев, исследование отражательных свойств листьев растений в ультрафиолетовом диапазоне несет информацию о верхней структуре листа (эпидермисе), в то время как фотоны ближнего ИК диапазона проникают в глубь листа в ткань мезофилла. Сравнивая данные по отражению в ультрафиолетовом и ближнем ИК диапазонах, можно попытаться дистанционно получить информацию об особенностях структуры листьев, находящихся в различных экологических условиях.

2. Исследование параметров архитектуры РП

Как показано в ряде теоретических работ последних лет [3, 6, 7], индикатриса рассеяния солнечной радиации растительным покровом содержит ценную информацию о геометрической структуре растительности. При этом особый интерес представляет та область индикатрисы, которая определяет рассеяние в направлении на солнце и в близких к нему направлениях. В отечественной литературе эта область углов рассеяния известна под названием «области обратного блеска», а в зарубежной — под названием «hot spot». Интерес к этой области индикатрисы определяется тем, что различные направления рассеяния этой области углов существенно зависимы, причем форма индикатрисы в области обратного блеска определяется степенью зависимости направлений рассеяния. Степень зависимости в свою очередь определяется средним размером листьев, их пространственным размещением и ориентацией.

Экспериментальное исследование индикатрисы рассеяния растительности в малой ($3-4^\circ$) области углов обратного блеска с помощью пассивных методов, например спектрометрирования, сопряжено с большими техническими трудностями [4]. Поэтому была предпринята попытка теоретического обоснования и экспериментальной проверки эффективности использования активных методов лазерного зондирования РП для исследования его индикатрисы в области обратного блеска с целью получения информации об архитектонике растительного покрова.

Экспериментальная оценка вероятности затенения может быть осуществлена с помощью лазерной системы с двумя пространственно-разнесенными приемными каналами (рис. 1). При этом первый фотоприемник должен находиться непосредственно рядом

с излучателем и его оптическая ось должна быть параллельна лазерному лучу, а второй — отстоять от первого на некотором расстоянии так, чтобы его оптическая ось составляла с направлением распространения лазерного луча некоторый малый угол (порядка $3-4^\circ$). Такое расположение приемных каналов обеспечивает отслеживание одновременно двумя приемниками одной и той же точки, которая находится от лазерной системы на расстоянии 30—40 м, при условии, что расстояние между фотоприемниками составляет 1,5 м. Практически можно осуществить такое пространственное разнесение фотоприемников на аэрофотосъемочном варианте самолета Ан-2, который имеет два люка в нижней части фюзеляжа. При этом лазер и два пространственно-разнесенных фотоприемника размещаются на одной платформе. Техническое решение отдельных узлов ЛСС выполнено в соответствии с уже описанными в отечественной литературе ЛСС [1, 2]. Рассматриваемая в статье ЛСС обеспечивает синхронное отслеживание

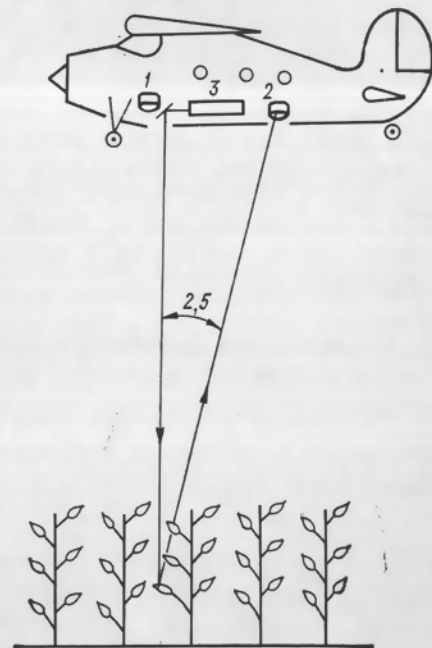


Рис. 1. Схема дистанционного эксперимента по определению основных параметров архитектуры растительного покрова.

1, 2 — пространственно разнесенные фотоприемники; 3 — лазер ЛГ-75 (мощность генерации 15 мВт, длина волны генерации 630 нм). Высота полета 40 м.

лазерного пятна (диаметром 35—40 мм) двумя фотоприемниками с высоты 30—40 м. Модуляция лазерного излучения обеспечивает посылку 1500 световых импульсов в секунду. При полете над полями сельскохозяйственных культур (кукуруза, подсолнечник и т. д.) электрический сигнал на выходе второго фотоприемника по величине совпадает с сигналом на выходе первого, за исключением тех моментов времени, когда первый фотоприемник видит лазерное пятно, а второй — нет по причине затенения листьями. Ввиду того что диаметр лазерного пятна имеет конечные размеры, соизмеримые с областью захвата фотонов, имеет место не полное, а частичное затенение пятна для второго фотоприемника. Поэтому для практического удобства измерений в летных экспериментах фиксировалась разница сигналов с выходов первого и второго фотоприемников. В этом случае при пролете над ровной поверхностью автострады разностный сигнал был равен нулю, в то время как при пролете над сельскохозяйственными полями

наблюдались непериодические отклонения разностного сигнала от нуля, что объясняется затенением листьями пятна для второго фотоприемника. Искомая вероятность затенения может быть оценена как отношение числа не равных нулю импульсов разностного сигнала к общему числу импульсов в единицу времени. При этом следует отметить, что статистическая обработка амплитудных изменений сигнала на выходе первого фотоприемника дает информацию об ориентации листьев и числе листьев на стебле.

Что касается оценки проективного покрытия, то достаточно точное определение его может быть достигнуто в случае, если яркость почвы и листьев сильно отличаются. Скажем, зеленые листья на фоне темной почвы. Тогда, работая лазером с максимумом излучения в зеленой области спектра (аргоновые лазеры 0,52 мкм) в импульсном режиме, мы можем оценить число случаев, в которых наблюдалось минимальное отражение. Эти случаи будут соответствовать прохождению лазерного луча в глубь РП и отражению его от земли. Разделив число этих случаев на общее число импульсов в единицу времени, мы получим оценку проективного покрытия.

3. Исследование физиологического состояния РП по характеристикам люминесценции растений

Получение в короткий срок достоверной физиологической информации о состоянии растительности на большой территории — важная задача лесного и сельского хозяйства. Как показывают результаты лабораторных исследований, характеристики люминесценции растительности достаточно информативны для оценки физиологического состояния растений, находящихся в различных экологических условиях. Поэтому дистанционные исследования спектральных характеристик люминесценции растений с борта летательного аппарата или передвижной наземной лаборатории могут стать полезными для решения ряда важных народнохозяйственных задач.

Вместе с тем дистанционные измерения люминесцентных характеристик до настоящего времени практически не использовались в аэрокосмических методах исследования растительного покрова. Известно лишь небольшое число работ по этому вопросу [8, 9], в которых изучается люминесценция водорослей с борта вертолета и плавающего судна.

Нами в течение последних лет была проведена серия экспериментов по дистанционному исследованию люминесценции различных растений с помощью электронно-оптических систем. Первая серия экспериментов была направлена на получение люминесцентных изображений листьев разных растений с помощью электронно-оптических преобразователей (ЭОП). В этих экспериментах листья растений облучались расфокусированным лучом лазера с расстояния 15—20 м, люминесцентное изображение светящихся листьев фиксировалось на фотопленке с помощью ЭОП «Укус».

При анализе люминесцентных изображений двух листьев кукурузы, выращенной в вегетационных сосудах в песчаной почве при разных дозах фосфорных удобрений, хорошо видно различие интенсивности люминесцентного свечения листьев за счет различия концентрации хлорофилла в листьях, обусловленного различием содержания фосфора в питательной смеси. Этот пример иллюстрирует возможность использования ЭОП в дистанционных исследованиях растительности для решения задач экологии растений и сельского хозяйства. Однако относительно малый коэффициент усиления ЭОП и отсутствие компенсации внешних фоновых засветок ограничивают возможности использования этого класса систем на борту летательных аппаратов. ЭОП типа «Укус» может эффективно использоваться в полевых условиях в ночное время на передвижных автолабораториях.

Другая серия экспериментов была направлена на испытания лазерной самолетной системы для изучения люминесцентных характеристик растений с борта вертолета Ка-26. В ЛСС в качестве фотоприемника используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ-84, обладающий значительно большим по сравнению с ЭОП коэффициентом усиления. Приемная оптика представлена зеркальным объективом системы Кассэгрена с диаметром входного отверстия, равным 22 см. Существенным недостатком ЛСС по сравнению с ЭОП «Укус» является отсутствие возможности получения площадного люминесцентного изображения растительного покрова. Преимуществом ЛСС является возможность быстрой регистрации люминесцентных характеристик растительности с борта самолета или вертолета в дневных условиях. Значительное уменьшение уровня фоновых засветок достигается использованием синхродетектирования в электронном блоке ЛСС и тщательным диафрагмированием фотокатода ФЭУ. Кроме этих средств уменьшения уровня фоновых засветок, нами использовался метод двухканального приема полезного сигнала, при котором осуществлялся синхронный прием двумя объективами как полезного сигнала люминесценции, так и сигнала фоновой засветки. При этом один из объективов отслеживал лазерное пятно, принимая как сигнал люминесценции, так и отраженное от земли рассеянное солнечное излучение, а второй объектив принимал только фоновую засветку, что давало возможность ее дальнейшей вычитания в электронном блоке ЛСС.

Во время наземных испытаний ЛСС были измерены интенсивности люминесценции растений как в ночное, так и в дневное время суток. Одновременно проводились люминесцентные исследования листьев этих же растений на лабораторной спектрофлуорометрической установке. В качестве примера на рис. 2 представлены спектры люминесценции листьев сахарной свеклы, выращенной в вегетационном опыте при разных дозах азотных удобрений. Люминесценция этих же листьев была измерена с помощью ЛСС на земле с расстояния 15 м в условиях сплошной облученности. При этом соотношение сигнал/шум было равно 12.

Максимум интенсивности люминесценции фиксировался на длине волны излучения 688 нм при полуширине пропускания интерференционного фильтра 10 нм. Отношения интенсивностей люминесценции листьев на этой длине волны излучения с нормой и недостаточностью азота совпали при измерениях на ЛСС и лабораторной установке.

Эксперименты, проведенные с борта вертолета Ка-26, показали, что уверенный прием люминесценции растительности в дневное время при условии сплошной облачности возможен с высот порядка 15—20 м. В ночное время максимальная дальность приема люминесценции в наземных измерениях составляла 80—90 м. Увеличение диаметра входного отверстия объектива до 40—50 см и применение мощных импульсных лазеров позволит существенно увеличить высоту дистанционного зондирования люминесценции растительного покрова с борта самолета.

Первые лабораторные результаты по исследованию люминесценции

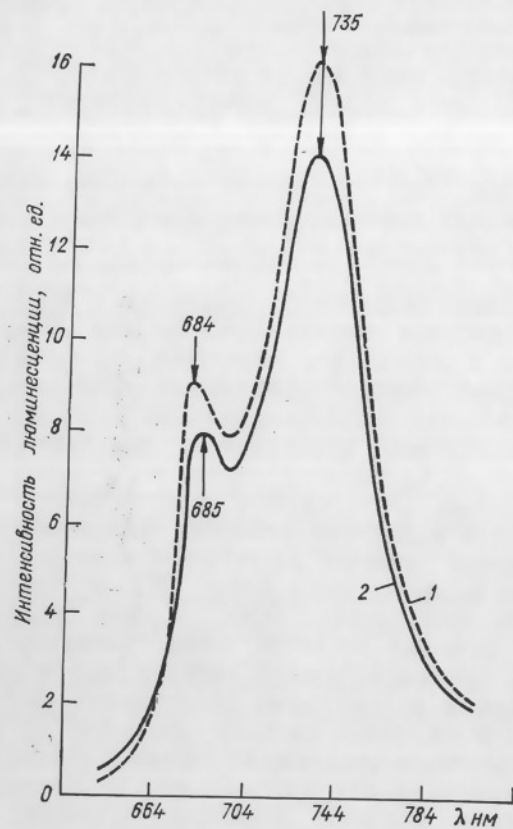


Рис. 2. Спектры люминесценции листьев свеклы.

1 — питательная смесь с нормой азота; 2 — питательная смесь с недостатком азота (% от нормы).

растений, выращенных на почвах с различной концентрацией металлов Sn, Be, Zr, обнаруживают различия как по форме спектра люминесценции растений, так и по интегральной интенсивности излучения. Так, например, отношение люминесценции листьев озимой пшеницы, контрольных и подкормленных оловом растений в дозах, соответствующих концентрации этого металла на естественных месторождениях, составляет 0,8 по значению интегральной интенсивности. Это позволяет надеяться на успешное использование дистанционной люминесцентной спектроскопии растительности для ведения геологической разведки полезных ископаемых.

Приведенные примеры использования различных электронно-оптических систем для дистанционного измерения люминесцентных параметров растительности демонстрируют эффективность этого метода для решения важных задач сельского хозяйства и геологии.

Таким образом, применение активных методов исследования РП в видимом диапазоне открывает новые перспективы для получения информации об архитектонике и его физиологических параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирис Л. Н., Герман А. И., Костко О. К. и др. К определению пространственно-временных вариаций аэрозоля в атмосфере лазерными локаторами с космических аппаратов.— Труды ЦАО, 1979, вып. 138, с. 99—105.
2. Герман А. И. Лазерные самолетные исследования контрастов отражательных свойств морской поверхности, загрязненной нефтью.— Труды ЦАО, 1979, вып. 138, с. 11—14.
3. Каневский В. А., Росс Ю. К. Расчет радиационного режима кроны хвойного дерева методом Монте-Карло.— Тарту, 1982.— 32 с.
4. Каневский В. А., Росс Ю. К., Рязанцев В. Ф. и др. Изучение архитектоники растительного покрова с помощью лазерного зондирования.— Докл. АН УССР, сер. Б, 1982, № 6, с. 56—58.
5. Каневский В. А., Рязанцев В. Ф., Шеляг-Сосонко Ю. Р. и др. Исследование архитектоники растительности по ее обратному блеску с помощью лазерного зондирования.— Исследование Земли из космоса, 1983, № 5, с. 81—84.
6. Кууск А. Обратный блеск пластинчатой среды.— В кн.: Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Таллин, 1980, с. 121—125.
7. Нильсон Т. Расчет эффекта обратного блеска для древостоев.— В кн.: Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Таллин, 1980, с. 117—121.
8. Фадеев В. В. Дистанционное лазерное зондирование фотосинтезирующих организмов.— Квантовая электроника, 1978, т. 5, № 10, с. 2021—2026.
9. Bristow M. P. F., Houston W. R., Measures R. M. Development of a laser fluoressensor for airborne surveying of the aquatic environment.— NASA, SP-375, p. 119—136.

ОПЫТ ОБРАБОТКИ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ АЭРО-И КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ НА ИНТЕРАКТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ «ПЕРИКОЛОР»

В. П. Головин, В. В. Исаев, К. Е. Мелешко, С. Г. Слуцкая

Лаборатория аэрометодов НПО «Аэрогеология»

Французская интерактивная цифровая система анализа изображений «Периколор» в качестве самостоятельного функционального блока входит в состав автоматизированной системы обработки данных аэро- и космических съемок (АСОД АКС), созданной в Лаборатории аэрометодов НПО «Аэрогеология». С помощью системы «Периколор», работающей в автономном режиме, можно осуществлять: телевизионный ввод изображений

с фотоносителей, ввод цифровых массивов видеoinформации с магнитных лент (МЛ) в формате МЛ ЕС-ЭВМ (стандарт ISO) через блок ЕМ1-8800 и с флоппи-дисков через блок дисководов; цифровую обработку изображений; отображение информации на экране дисплея в виде графического, черно-белого и цветного полутонового изображения с нанесением знакового текста; регистрацию обработанных изображений на МЛ, на флоппи-диски, на цветную или черно-белую фотопленку, на бумажную ленту с помощью матричного иглочного печатающего устройства МХ 82FT или АСТ-1. Включение каждого блока осуществляется отдельно. Питание — от однофазной сети 220 В частотой 50/60 Гц. Потребляемая мощность — около 1 кВт. Площадь, занимаемая системой, не менее 10 м². Наибольшая емкость памяти системы «Периколор» соответствует шести изображениям размером 256 × 256 элементов (уровень яркости каждого элемента изображения определяется восемью битами, т. е. имеет 256 градаций) и трем плоскостям маркера 256 × 256 (уровень яркости элемента определяется одним битом, т. е. имеет две градации). Существует дополнительная память емкостью 16К и 128К для создания и использования дополнительных программ обработки. В системе используется микропроцессор INTEL 8080А, который обеспечивает управление системой, диалог с пользователем и обработку изображений. Он имеет постоянную память 32К, содержащую все базовые программы обработки изображения, и оперативную память 8К. Управление осуществляется оператором при помощи буквенно-цифровой клавиатуры, в левой части которой размещен «трек-бол», обеспечивающий перемещение светового индикатора по экрану, изменение параметров системы отображения изображения, цветовой шкалы, построения передаточных функций, очерчивание зон изображения (нанесение карты дешифрирования) и другие функции.

Матобеспечение системы «Периколор» позволяет выполнить: арифметические и логические операции между шестью изображениями; преобразования позитив—негатив; масштабирование; сдвиг изображения; рисовку изолиний плотности; сглаживание; фильтрацию в пространственной области; определение гистограммы, среднего, минимального и максимального значения сигнала изображения всего кадра или оконтуренных зон, а также их площадь; выравнивание гистограммы — эквализацию; фотометрические профили изображения; мультипликацию; любые функции нелинейного преобразования шкалы сигналов; линейаризацию; площадной монтаж снимков на экране дисплея; псевдостереоизображение; цветовое кодирование.

Дополнительное матобеспечение (при наличии дополнительной памяти 128К) обеспечивает обработку изображения методом главных компонент, классификацию объектов по двумерной гистограмме и по другим алгоритмам.

На основе опыта обработки и интерпретации материалов многозональной съемки, разработана технологическая схема обработки

многозональных снимков на системе «Периколор», состоящая из шести этапов:

— I этап — постановка задачи дешифрирования;

— II этап — анализ исходных необработанных снимков и составление предварительной схемы дешифрирования;

— III этап — введение коррекций в исходные снимки с целью обеспечения яркостного подобия изображений, например, коррекция неравномерности распределения освещенности по полю телевизионного ввода системы «Периколор» (или по полю кадра съёмочной камеры МКФ-6) осуществляется методом негативного маскирования; нелинейность амплитудных характеристик любого звена съёмочной системы корректируется с помощью базовой программы «линеаризация»; высокочастотный шум изображения корректируется методом пространственной фильтрации;

— IV этап — преобразование одиночных многозональных снимков, обеспечивающее оптимальное увеличение контраста между объектами, операциями эквализации, нелинейного преобразования шкалы сигналов (амплитудных разрезов), пространственной фильтрации, цветового кодирования и др., и дешифрирование преобразованных снимков;

— V этап — межканальные преобразования исходных многозональных снимков с целью улучшения выделения объектов способом получения разностных, усредненных и т.п. изображений в двух или нескольких каналах, а также методом накопления спектральных контрастов, основанном на управляемых операциях деления и синтеза изображений в различных каналах;

— VI этап — составление окончательной объединенной по IV и V этапам схемы дешифрирования изображения исследуемой территории.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫХ ПРИЗНАКОВ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

В. И. Никифоров

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды

Е. В. Щербенко

Лаборатория мониторинга природной среды и климата
Госкомгидромета и АН СССР

Для анализа пространственно-частотных признаков космических изображений с целью изучения структуры землепользования были выбраны изображения территории лесостепи Высокого

Заволжья (возвышенность Общий Сырт), полученные с ИСЗ «Метеор-природа» аппаратурой МСУ-С в осенне-весенний период. Анализ производился на технических средствах «Периколор-1000». Выбор времени обусловлен тем, что в этот период на космических изображениях наиболее ярко прослеживается структура использования земель: пахотопригодные земли в основном распаханы, они контрастируют с лесами, которые еще сохранили листву и дают самый светлый тон на изображении в инфракрасном (ИК) диапазоне.

Исследуемая территория имеет характерный рельеф: для каждого из водоразделов и для междуречья в целом характерна ярко выраженная асимметрия склонов и соответствующая ей закономерность распространения материнских пород и почв. На самых высоких частях водоразделов с отметками абсолютных высот 250—280 м встречаются плоские поверхности плато, перекрытые или маломощной толщей делювиальных суглинков, или элювием коренных пород. Плато водораздела к северу постепенно переходит в пологий склон, покрытый суглинками, и далее в широкие поверхности террасы. Почвенный покров имеет характерную структуру: на поверхностях плато и высоких склонах встречаются черноземы выщелоченные маломощные, легко или среднесуглинистые опесчаненные, часто слабо или среднеэродированные (абс. отм. 220—280 м); на пологих склонах северной экспозиции и террасах рек расположены черноземы обыкновенные среднемощные тяжелосуглинистые, иногда слабо эродированные (абс. отм. 140—180 м); в балках и ложбинах на пологих склонах северной экспозиции распространены лугово-черноземные или черноземно-луговые тяжелосуглинистые среднемощные выщелоченные почвы и почвы болотного ряда в случае наличия водотоков в балке (абс. отм. 100—110 м). Южные склоны водоразделов круты и сильно расчленены системой балок. Здесь часто обнажаются коренные породы и почвенный покров не успевает сформироваться. Южные склоны очень короткие и на космическом снимке среднего разрешения не могут быть дешифрированы. Их изучение можно проводить на снимках высокого разрешения, например на аэрофотоснимках.

Плато и склоны северной экспозиции, а также террасы рек используются в сельском хозяйстве под пашню. Вдоль неглубоких логов, расчленяющих пологий северный склон и террасы, а также крутые склоны водоразделов и плато, встречаются участки с разнотравно-ковыльной степной растительностью, которые используются как выгонно-пастбищные угодья. В вершинах балок и на склонах водоразделов, а иногда на водораздельных плато встречаются дубовые лески с кленом и липой.

Поскольку черноземные почвы, травянистая растительность и леса имеют в ИК диапазоне разные спектральные характеристики [3], то на космическом снимке они дают разный тон и хорошо различимы. Черноземы выщелоченные и черноземы обыкновенные имеют близкие коэффициенты спектральной яркости (КСЯ)

и на космических изображениях не различаются. Но эродированные черноземы имеют более высокие КСЯ, чем неэродированные [1]. Небольшие лога и балки при генерализации не видны на снимке, но придают общий светлый тон изображению пашни. В таком случае можно ожидать, что районы с распространением эродированных почв и небольших балок будут давать более светлый тон на космическом изображении, чем районы с неэродированными почвами плоских невысоких водоразделов. Взаимное расположение распаханых почв, пастбищ и лесов, тяготеющих к разным геоморфологическим единицам, создает на космическом изображении характерный пространственно-частотный рисунок. Естественные пастбища подчеркивают эрозионную сеть и на космическом изображении дают вытянутый в форме прожилок рисунок светлого тона. По пространственно-частотному рисунку можно судить о наличии балок, логов, появляется возможность получить морфометрические характеристики расчлененности территории по космическому изображению, дать оценку количеству пахотных территорий, лесов и почв.

В данной работе исследовалось изображение небольшой части территории лесостепи Высокого Заволжья. Можно утверждать, что вся территория лесостепного Сыртового Заволжья, имеющая аналогичный пространственно-частотный рисунок на космическом изображении, имеет и аналогичные или близкие закономерности строения почвенного покрова, аналогичную структуру территориально-производственного комплекса, аналогичное состояние ландшафта. Было произведено сравнение его изображения с изображением территории лесостепи Заволжской низменности (Татарская АССР), рисунок которого значительно отличается от рисунка Сыртового Заволжья. На Заволжской низменности преобладает другой почвенный покров и рельеф. Здесь нет ярко выраженной закономерности смены почв и растительности, а также четкой привязки использования сельскохозяйственных угодий при переходе с водораздельных территорий на склоны и террасы рек. В почвенном покрове водоразделов преобладают черноземы типичные среднемощные среднесуглинистые на палево-буром карбонатном суглинке и черноземы выщелоченные среднемощные среднесуглинистые, а также оподзоленные черноземы. Эти почвы используются под пашню. Лесная растительность произрастает на темно-серых лесных тяжелосуглинистых почвах. С применением аналогичного метода было обработано изображение степной части Высокого Заволжья. Полученные данные при сравнении с литературными источниками не совпали, так как самыми яркими объектами на этой территории были не леса, как в лесостепи, а сильно эродированные почвы и обнажения пород. Отсюда видно, что на ЭВМ должна вестись обработка только изображений территорий внутри одной природной зоны и с аналогичным рельефом, которые в свою очередь создают особый пространственно-частотный рисунок, по которому можно установить границы зоны.

На ЭВМ было обработано изображение, полученное в осенний период. На части снятой территории были проведены наземные обследования, из которых выбирался контрольный участок, а полученные результаты сравнивались с литературными данными. Обработка изображения заключалась в следующем: по основным модам гистограммы изображение было разбито на четыре класса, которым соответствуют следующие объекты: 1) черноземные почвы плоских низких водоразделов под пашней, 2) черноземы эродированные и неэродированные на склонах под пашней, 3) пастбища, 4) леса. Черноземы отличаются на одну градацию при 4-классовом разделении. Были подсчитаны площади под пашней, пастбищами и лесами, дана оценка почвенному покрову. Полученные результаты сравнивали с результатами литературы [2], из которых видно, что данные, полученные в результате анализа космического изображения и наземных работ, различаются незначительно, в пределах 1—2 %. Площадь распаханной территории, определенная по космическому изображению, составляет 61,4 %, площадь выгонов и пастбищ 21,5 %, территория лесных массивов равна 17,2 % всей территории анализируемой зоны. Площадь черноземов — соответственно 15,9 % для 1-го и 45,6 % для 2-го классов.

Два других изображения территории лесостепного Высокого Заволжья с аналогичным рельефом и подобным пространственно-частотным рисунком использовались для проверки метода. В результате проверки выявилась хорошая корреляция полученных результатов с данными обработки первого изображения и литературными источниками.

В результате проведенного анализа установлено, что территории, имеющие сходный пространственно-частотный рисунок на космическом изображении, имеют аналогичные или близкие пространственные характеристики почв, растительности, рельефа. Эта закономерность позволяет по данным анализа космических изображений и наземным работам на ключевом участке определить и контролировать структуру землепользования и рекомендовать, в случае необходимости, ее улучшение. При этом количественные показатели структуры землепользования, выраженные в площадях, экстраполируются на основе данных ключевого участка только в пределах выделенной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андроников В. Л. Аэрокосмические методы изучения почв.— М.: Колос, 1979.
2. Ерохина А. А. Почвы Оренбургской области.— М.: Изд-во АН СССР, 1959.
3. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.

КОМПЛЕКС ВВОДА—ВЫВОДА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*А. Е. Бельский, А. В. Вишневский, Г. М. Цибульский,
В. Г. Черепанов, А. В. Чернявский*

Институт леса и древесины СО АН СССР

Для решения задач, связанных с изучением лесных ресурсов и комплексной оценки лесов таежной зоны Сибири, используются результаты дистанционного зондирования, причем в зависимости от целей исследования объектами могут быть как отдельные участки леса, так и природные территориальные комплексы (ПТК) различной структуры. Здесь можно выделить два класса задач [3].

Первый класс — задачи относительной статистики лесных экосистем. Это классификация лесных территорий различной сложности и тематическое картирование; изучение почвенного и гидрологического режимов; экологическая оценка лесных территорий; изучение последствий лесных пожаров и др. Перечисленные задачи не требуют высокой частоты получения данных об исследуемых объектах и не имеют жестких ограничений по пространственному разрешению аэрокосмических снимков.

Второй класс задач — изучение динамических процессов в лесных экосистемах. Здесь следует выделить исследование сезонных изменений по спектрально-отражательной способности растительного покрова, определение очагов поражения леса насекомыми-вредителями и исследование динамики их развития, оперативное прогнозирование пожарной опасности лесов, обнаружение, определение динамики развития и методик тушения лесных пожаров. Динамичность процессов в лесных экосистемах предполагает оперативное получение, обработку и интерпретацию данных с выходом на уровень принятия решений от нескольких часов до нескольких суток. Высокие требования предъявляются также к частоте получения экспериментальных данных и их информативности.

Сложность и многоплановость решаемых задач вызывают необходимость использования различных типов датчиков дистанционной информации в видимом, инфракрасном и СВЧ диапазонах электромагнитного спектра. Различная трудоемкость задач, различные требования к экспериментальному материалу по разрешающей способности и другие требования предполагают необходимость создания специализированных комплексов технических и программных средств. Характеристики этих комплексов во многом определяются производительностью процессоров, объемом памяти, характеристиками подсистем ввода—вывода и визуализации изображений.

Устройства ввода—вывода изображений отличаются принципом работы, скоростью ввода—вывода, пространственным разрешением и другими параметрами [4]. По пространственному разре-

шению их можно разделить на устройства высокого разрешения (с апертурой не более 10 мкм), среднего (10—100 мкм) и низкого (более 100 мкм).

Устройства высокого разрешения используются при анализе микроизображений среднего и низкого разрешения, при решении различных задач как научного, так и прикладного характера. Как правило, это универсальные устройства с широким набором апертур (например, 12,5—200 мкм для устройств фирмы «Optronics Int»). Их применение целесообразно при решении задач, связанных с изучением морфологической структуры лесных экосистем, где требуется анализ пространственного расположения составляющих (на уровне крон) отдельных деревьев и групп деревьев, а также ряда задач исследования динамики процессов, протекающих в лесных экосистемах.

Для решения большинства задач относительно статики лесных экосистем, задач оперативного прогнозирования распространения и развития пожаров и других, связанных с обработкой крупномасштабных полутоновых и графических изображений, следует эффективнее использовать устройства ввода—вывода изображений с апертурой 200—500 мкм ввиду их доступности и невысокой стоимости. Для этой цели широко используются фототелеграфные аппараты (ФТА) типа «ПАЛЛАДА», «НЕВА» и др. Комплексы обработки изображений, реализованные на базе мини-микроЭВМ и ФТА, имеют самый низкий показатель производительность—стоимость и могут быть использованы для массовой обработки аэрокосмических снимков низкого разрешения.

Разработанный комплекс ввода—вывода и обработки изображений низкого разрешения реализует функции:

- ввода изображений с фотоносителей;
- вывода изображений на фотоноситель;
- ввода изображений с магнитных носителей, совместимых с ЭВМ;
- визуализации изображений на экране монитора;
- обработки изображений согласно директивам оператора;
- регистрации графической информации;
- организации промежуточного архива на магнитных лентах.

Комплекс включает миниЭВМ СМ-3, штатные внешние устройства, накопители на дисках и лентах. Через расширитель интерфейса к общей шине (ОШ) подключены устройства ввода—вывода, визуализации изображений и графопостроитель.

В качестве устройства ввода—вывода изображений с фотоносителей используется ФТА «ПАЛЛАДА» (разрешающая способность 5 лин/мм, поле изображения 200×300 мм). Связь ФТА с ЭВМ осуществляется посредством устройства сопряжения, выполняющего функции управления режимами работы ФТА, преобразования аналоговых сигналов в цифровой код при вводе и обратного преобразования при выводе.

При выполнении интерактивной обработки изображений возникает необходимость анализа промежуточных результатов. Использо-

зование для этой цели фотоносителя (с выводом на ФТА) не оправдано. Для отображения промежуточных и окончательных результатов с целью принятия решения используется устройство визуализации, выполненное на основе бытового телевизора и сопряженное с общей шиной ЭВМ. Оно позволяет вывести изображение размером 512×512 пиксел. Двухкоординатный графопостроитель типа Н-710 предназначен для вывода графической информации

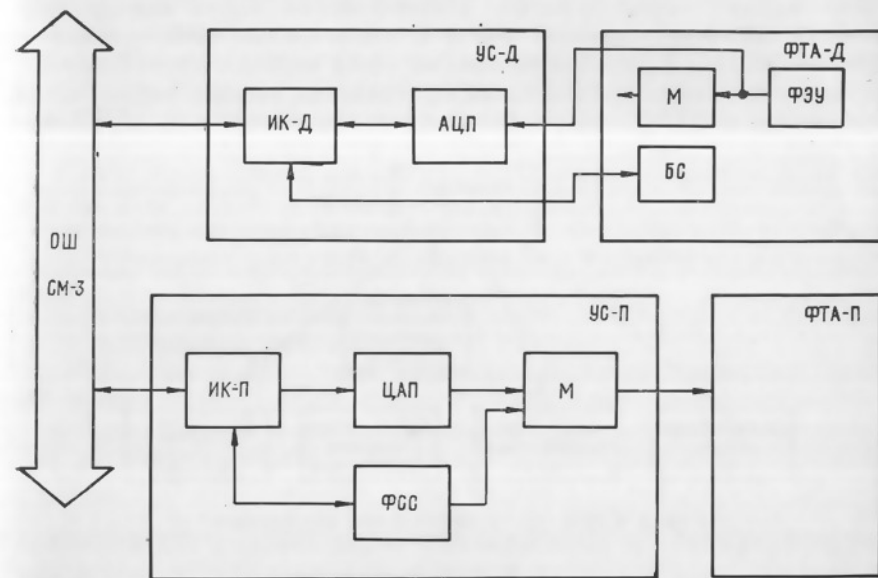


Рис. 1. Узел ввода—вывода изображений.

в виде гистограмм, графиков, масштабных сеток, символов (формат рабочего поля записи 390×273 мм).

Устройство ввода—вывода полутоновых изображений включает передатчик (ФТА-Д), приемник (ФТА-П), схемы управления и преобразования (рис. 1). Передатчик ФТА может работать в режимах амплитудной и частотной модуляции (АМ и ЧМ). Применение режима ЧМ затруднительно ввиду сложности преобразования мгновенной частоты в цифровое значение, поскольку несущая частота сигнала низка. Режим АМ не применяется также ввиду низкого значения несущей частоты, так как увеличение точности преобразования ведет к возрастанию динамической ошибки (наблюдается размытие границ между элементами изображения). Кроме того, при модуляции возникает искажение линейности преобразования оптической плотности в электрический сигнал, которое может достигать 15 % [1]. Более предпочтительным оказалось снятие электрического сигнала непосредственно с фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), минуя модулятор (М), хотя это потребовало незначительной модернизации передающего устройства. Для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код в устройстве

сопряжения с передатчиком (УС-Д) используется восьмиразрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) прогрессивной аппроксимации с устройством выборки — хранения. Число градаций оптической плотности 256, что соответствует погрешности 0,4 % полной шкалы. Точность преобразования удовлетворительная, так как количество градаций оптической плотности изображения не превышает пятидесяти, что в свою очередь определено носителем изображения — фотобумагой. Интерфейсная карта передатчика (ИК-Д) согласует сигналы УС-Д с магистралью ОШ, управляет работой АЦП и блока сканирования (БС) передающего аппарата.

Включение в состав комплекса устройства вывода черно-белого изображения ФТА-П позволяет получить фотокопию изображения



Рис. 2. Структура программного обеспечения.

на любой стадии его обработки. Разрешающая способность и размер выводимой информации согласуются с параметрами вводимого изображения и требованиями к фотокопии. Сопряжение ФТА-П с магистралью ОШ осуществляется с помощью устройства сопряжения с приемником (УС-П).

Информация из магистрали ЭВМ через интерфейсную карту приемника (ИК-П) поступает на формирователь служебных сигналов (ФСС) и цифроаналоговый преобразователь (ЦАП). Формирователь служебных сигналов вырабатывает сигналы, необходимые для автоматического включения ФТА-П, а ЦАП преобразует двоичный код в электрический сигнал, соответствующий оптической плотности выводимого изображения. Сигналы с выхода модулятора (М) поступают на вход ФТА-П в виде амплитудно-модулированного напряжения. Использование УС-П позволило применить ФТА-П без переделки с сохранением его штатных режимов работы [2].

Программное обеспечение комплекса ввода—вывода и обработки изображений низкого разрешения функционирует под управлением операционной системы РАФОС; системные возможности РАФОС расширены программами работы с файлами изображений, драйверами устройств ввода—вывода и визуализации (рис. 2).

Для взаимодействия пользователя с системой разработана про-

грамма-монитор. Информация для монитора набирается на пульте видеотерминала в виде директивы, имеющей форму:

<код директивы>, <список позиционных параметров>, <список ключевых параметров>.

Список позиционных параметров используется при работе функциональных модулей. Список ключевых параметров определяет устройства ввода—вывода, необходимые при выполнении директивы.

Программа-монитор осуществляет проверку директивы на наличие синтаксических и семантических ошибок, и в случае отсутствия ошибок подготавливает информацию для обработки согласно списку параметров и передает управление функциональному модулю.

Пакет прикладных программ обработки изображений выполнен на ФОРТРАНе и реализует алгоритмы:

- нанесение координатной сетки;
- изменение контраста с различными характеристиками передачи;
- видоизменение гистрограмм;
- подавление шумов;
- получение яркостных признаков (среднее, дисперсию, асимметрию и т. д.).

Разработанный комплекс является одним из автоматизированных рабочих мест центра сбора и обработки аэрокосмической информации Института леса и древесины СО АН СССР. Его эксплуатация позволяет автоматизировать массовую обработку изображений для решения задач дистанционных исследований лесных экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппарат Ф2ДБ «ПАЛЛАДА». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. РД 2. 165.067.ТО.
2. Аппарат Ф2ПД «ПАЛЛАДА». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. РД 2.165.080.ТО.
3. Исаев А. С. Задачи изучения лесов с использованием аэрокосмических средств.— В кн.: Исследование таежных ландшафтов дистанционными методами. Новосибирск: Наука, 1979, с. 3—9.
4. Мучник И. Б., Паморозский Е. И., Эльман Р. И. Автоматизированная обработка полутонных изображений.— Автоматика и телемеханика, 1981, вып. 2, с 84—126.

МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ КОНТРАСТОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С. Г. Слуцкая

Лаборатория аэрометодов НПО «Аэрогеология»

При обработке многозональных аэрокосмических снимков фотографическими, оптическими и вычислительными методами используют отношение и произведение (синтезирование) спектральных компонент [1, 3].

Опыт их использования на интерактивной цифровой системе обработки изображений «Периколор» показал, что преобразования приводят как к улучшению различимости преобразованных изображений объектов, так и к ее ухудшению по сравнению с различимостью изображений объектов на непреобразованных снимках.

Экспериментально установлен эффект улучшения различения объектов на преобразованном снимке, полученном делением одной спектральной компоненты на проведение других имеющихся компонент.

Улучшением различимости изображения одного элемента (пиксела) объекта на фоне другого считается определенное увеличение их контраста, например, равного

$$K_i = \frac{a_i - b_i}{a_i + b_i}, \quad (1)$$

где $a_1, \dots, a_i, \dots, a_N$ — ряд спектральных сигналов, созданных изображением объекта «а» в N каналах; $b_1, \dots, b_i, \dots, b_N$ — ряд спектральных сигналов, созданных изображением объекта «б» в N каналах,

$$1 \leq i \leq N.$$

Сигналы a_i, b_i соответствуют пропусканию, яркости, коэффициентам спектральной яркости (КСЯ) и т. п. изображаемых объектов.

Исследование эффекта улучшения различимости преобразованных изображений объектов сводится, таким образом, к исследованию изменения их контраста по отношению к контрастам непреобразованных изображений объектов. Сигналы преобразованных с помощью вычислительной техники изображений двух объектов, полученные делением сигнала изображения объекта в одном спектральном канале на сигнал его изображения в другом канале или на произведение имеющихся его спектральных сигналов, представляют собой последовательности:

$$\{Q_n^{(a)}\} \text{ и } \{Q_n^{(b)}\},$$

где $\{Q_n^{(a)}\}$ — последовательность отношений спектральных сигналов изображения объекта «а»; $\{Q_n^{(b)}\}$ — последовательность отношений спектральных сигналов изображения объекта «б»;

$$\{Q_n^{(a)}\} = \left\{ \frac{a_1}{a_2}, \frac{a_2}{a_1}, \frac{a_1}{a_2 a_3}, \frac{a_2}{a_1 a_3}, \dots, \frac{a_q^2}{\prod_{i=1}^N a_i}, \dots, \frac{a_N}{\prod_{i=1}^{N-1} a_i} \right\}, \quad (2)$$

$$\{Q_n^{(b)}\} = \left\{ \frac{b_1}{b_2}, \frac{b_2}{b_1}, \frac{b_1}{b_2 b_3}, \frac{b_2}{b_1 b_3}, \dots, \frac{b_q^2}{\prod_{i=1}^N b_i}, \dots, \frac{b_N}{\prod_{i=1}^{N-1} b_i} \right\}, \quad (3)$$

$$1 \leq n \leq P = \left[\frac{N(N+1)}{2} - 1 \right],$$

где n — порядковый номер членов последовательности $\{Q_n\}$; P — общее количество членов последовательности; N — общее количество каналов; q — порядковый номер канала, сигнал изображения объекта в котором находится в числителе последовательности $\{Q_n\}$.

$$n(N, q) = \frac{N^2 - N}{2} + q - 1,$$

$$1 \leq q \leq N,$$

$$N \geq 2.$$

Контраст между преобразованными сигналами изображений двух объектов «а» и «б» в величинах $Q_n^{(a)}$ и $Q_n^{(b)}$ определяется следующим образом:

$$K_n = \left| \frac{\frac{a_q^2}{\prod_{i=1}^N a_i} - \frac{b_q^2}{\prod_{i=1}^N b_i}}{\frac{a_q^2}{\prod_{i=1}^N a_i} + \frac{b_q^2}{\prod_{i=1}^N b_i}} \right|. \quad (4)$$

Рассмотрим контраст K_q^+ яркостей a_q и b_q , находящихся в числителе любого из членов $Q_n^{(a)}$ и $Q_n^{(b)}$. При условии $a_q > b_q$

$$K_q^+ = \frac{|a_q - b_q|}{a_q + b_q} = \frac{a_q - b_q}{a_q + b_q} > 0,$$

отсюда

$$a_q = b_q \frac{1 + K_q^+}{1 - K_q^+}, \quad (5)$$

$$b_q = a_q \frac{1 - K_q^+}{1 + K_q^+}. \quad (6)$$

Учитывая (5) и (6), для (4) получим

$$K_n = \left| \frac{K_q^+ + \left(\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} - \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q} \right)}{1 + K_q^+ \left(\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} - \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q} \right)} \right| \left(\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} + \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q} \right) \quad (7)$$

или

$$K_n = \left| \frac{K_q^+ + K^-}{1 + K_q^+ K^-} \right|, \quad (8)$$

где

$$K^- = \frac{\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} - \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q}}{\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} + \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q}};$$

$$K^- |K^-| = \frac{\left| \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q} - \frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} \right|}{\frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} + \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q}} \quad \text{при} \quad \frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} > \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q}; \quad (9)$$

K^- — контраст между изображениями объектов, представляющими собой произведения сигналов изображений во всех N каналах без q -го канала и находящимися в знаменателе любого из членов $\{Q_n^{(a)}\}$ и $\{Q_n^{(b)}\}$.

Следовательно, при условии $a_q > b_q$ и

$$R_{N,i}^{(b)} = \frac{\prod_{i=1}^N b_i}{b_q} > R_{N,i}^{(a)} = \frac{\prod_{i=1}^N a_i}{a_q}$$

или

$$\frac{a_q}{b_q} > 1 \quad \text{и} \quad \frac{R_{N,i}^{(a)}}{R_{N,i}^{(b)}} < 1 \quad (10)$$

получаем

$$K_n = \frac{|K_q^+| + |K^-|}{1 + |K_q^+| |K^-|}, \quad (11)$$

причем $0 \leq |K_q^+| \leq 1$; $0 \leq |K| \leq 1$; $0 \leq K_n \leq 1$.

Из (11) следует, что $K_n \geq |K_q^+|$; $K_n \geq |K^-|$.

График функции $K_n = f(K_q^+, K^-)$ представлен на рис. 1.

Как следует из (11) и рисунка, имеет место увеличение контраста для отношений сигналов изображений двух объектов. Причем, чем меньше величины K_q^+ и K^- , тем больше эффект увеличения контраста приближается к их суммированию; так, $K_n = 0,55$ при $K_q^+ = K^- = 0,3$ и $K_n = 0,88$ при $K_q^+ = K^- = 0,6$.

Формула (11) справедлива только при выполнении условий (10) увеличения контраста преобразованных изображений. В общем виде зависимость контраста K_n преобразованных к виду $Q_n^{(a)}$ и $Q_n^{(b)}$ сигналов изображений двух объектов от контрастов K_q^+

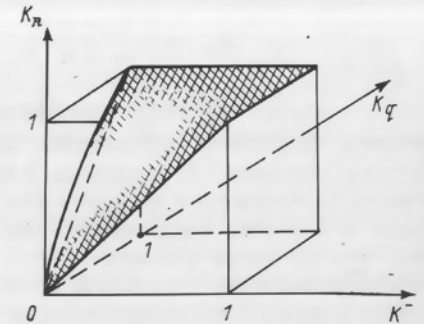


Рис. 1. График функции $K_n = f(K_q^+, K^-)$.

и K^- преобразуемых сигналов их изображений выражается формулой

$$K_n = \left| \frac{K_q^- - \operatorname{sgn}[(a_q - b_q)(R_{N,i}^{(a)} - R_{N,i}^{(b)})] K^-}{1 - \operatorname{sgn}[(a_q - b_q)(R_{N,i}^{(a)} - R_{N,i}^{(b)})] K_q^+ K^-} \right|, \quad (12)$$

или

$$K_n = \begin{cases} \frac{K_q^+ + K^-}{1 + K_q^+ K^-}, & \text{если} \begin{cases} 1. a_q > b_q \text{ и } R_{N,i}^{(a)} < R_{N,i}^{(b)}, \\ 2. b_q > a_q \text{ и } R_{N,i}^{(b)} < R_{N,i}^{(a)}. \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

$$\left| \frac{K_q^+ - K^-}{1 - K_q^+ K^-} \right|, \quad \text{если} \begin{cases} 1. a_q > b_q \text{ и } R_{N,i}^{(a)} > R_{N,i}^{(b)}, \\ 2. b_q > a_q \text{ и } R_{N,i}^{(b)} > R_{N,i}^{(a)}. \end{cases} \quad (14)$$

Формула (13) определяет условия увеличения контраста K_n , формула (14) — условия уменьшения.

Рассмотрим частный случай отношения двух ($N=2$) спектральных сигналов изображений двух объектов из (2) и (3)

$$Q_1^{(a)} = \frac{a_1}{a_2} \quad \text{и} \quad Q_1^{(b)} = \frac{b_1}{b_2}.$$

Согласно (13) и (14) контраст K_1 отношений спектральных

сигналов изображений объектов a_1 и b_1 в первом канале к сигналам изображений a_2 и b_2 во втором канале имеет вид

$$K_1 = \begin{cases} \frac{K_1^+ + K_2^-}{1 + K_1^+ K_2^-}, & \text{если} \begin{cases} 1. a_1 > b_1 \text{ и } a_2 < b_2, \\ \text{или} \\ 2. b_1 > a_1 \text{ и } b_2 < a_2. \end{cases} \\ \left| \frac{K_1^+ - K_2^-}{1 - K_1^+ K_2^-} \right|, & \text{если} \begin{cases} 1. a_1 > b_1 \text{ и } a_2 > b_2, \\ \text{или} \\ 2. b_1 > a_1 \text{ и } b_2 > a_2, \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

где

$$K_1^+ = \left| \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1} \right|, \quad K_2^- = \left| \frac{a_2 - b_2}{a_2 + b_2} \right|. \quad (17)$$

Как следует из (15), увеличение контраста между преобразованными делением сигналами изображений объектов происходит при условии, что сигнал изображения объекта «а» больше сигнала изображения объекта «б» на спектрозональном снимке-делителе и меньше на снимке-делителе или наоборот. Иными словами, эти объекты должны иметь пересекающиеся участки кривых коэффициентов спектральной яркости в пределах данных двух зон.

Рассмотрим частный случай преобразования спектральных сигналов изображений объектов вида $\prod_{i=1}^N a_i$ и $\prod_{i=1}^N b_i$, соответствующего синтезированию спектрозональных снимков, при $N=2$. При этом контраст преобразованных изображений имеет вид

$$C = \frac{a_1 a_2 - b_1 b_2}{a_1 a_2 + b_1 b_2} = \frac{\left| \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1} \right| \pm \left| \frac{a_2 - b_2}{a_2 + b_2} \right|}{1 \pm \left| \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1} \right| \left| \frac{a_2 - b_2}{a_2 + b_2} \right|} = \frac{|K_1^+| \pm |K_2^-|}{1 \pm |K_1^+| |K_2^-|} \quad (18)$$

или

$$C = \begin{cases} \frac{K_1^+ + K_2^-}{1 + K_1^+ K_2^-}, & \text{если} \begin{cases} 1. a_1 > b_1 \text{ и } a_2 > b_2, \\ 2. b_1 > a_1 \text{ и } b_2 > a_2. \end{cases} \\ \left| \frac{K_1^+ - K_2^-}{1 - K_1^+ K_2^-} \right|, & \text{если} \begin{cases} 1. a_1 > b_1 \text{ и } a_2 < b_2, \\ 2. b_1 > a_1 \text{ и } b_2 > a_2, \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

где K_1^+ и K_2^- — контрасты (17) синтезируемых изображений объектов.

Для операции синтеза формула (19) содержит условия увеличения контраста, формула (20) — условия уменьшения.

Как следует из (19), увеличение контраста между преобразованными синтезированием сигналами изображений объектов происходит при условии, что объекты имеют параллельные участки

кривых коэффициентов спектральной яркости в пределах данных двух зон.

Рассмотрим предельный случай, когда спектральные яркости близки между собой в бесконечном множестве каналов N .

Тогда, исходя из (18), имеем:

$$C' = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{a^N - b^N}{a^N + b^N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(1 - 2 \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{a}{b} \right)^N} \right] \right), \quad (21)$$

$$C' = \begin{cases} 1 & \text{при } a > b \\ -1 & \text{при } a < b \\ 0 & \text{при } a = b. \end{cases} \quad (22)$$

В случае (22) контраст синтезированного изображения равен 1 и оно превращается в двухградационное.

Превращение полутонового изображения в двухградационное является нарушением яркостного подобия и приводит к появлению ложных контуров.

В результате анализа изображений, преобразованных с помощью интерактивной цифровой системы «Периколор», установлено, что не всякое увеличение контраста является улучшением различимости изображений, а лишь удовлетворяющее следующим условиям.

1. Максимальное увеличение минимального контраста изображения двух объектов должно выполняться до оптимального значения контраста, равного 0,4 [2].

Наибольшим эффектом улучшения различимости изображений объектов можно считать увеличение значения их контраста от неразличимого глазом, но большего, чем нуль, до контраста, равного 0,15 и считающегося пороговым контрастом восприятия глаза по Релею. Пороговый контраст сигналов изображений, измеряемый системой «Периколор», равен 0,002. Эффектом повышения достоверности различимости изображений объектов можно считать увеличение их контраста от 0,15 до 0,4.

3. Корректность сравнения значений контрастов изображений объектов обеспечивается при условии, что сигналы сравниваемых изображений находятся в одном из интервалов, равных 0,2 всего диапазона сигналов изображений.

На основе выполненных исследований предлагается методика увеличения контрастов спектрозональных изображений объектов, обеспечивающая улучшение их различимости:

а) измеряются (например, на системе «Периколор» или микрофотометре) средние значения спектрозональных сигналов изображений объектов, которые специалист-интерпретатор предполагает различить;

б) для двух (в двух каналах) наибольших разностей сигналов изображений двух объектов проводится анализ значений сигналов на соответствие условиям (15) и (19).

По результатам анализа можно предсказать, какое преобразование (отношение или синтезирование) и для каких каналов целесообразно применять для улучшения различения изображений данных двух объектов. При этом удовлетворению условий (13), (15) и (19) способствует использование позитива одной спектральной компоненты в сочетании с негативом другой.

Рекомендации справедливы для преобразования ряда одинаковых широкозональных обычных аэрофотоснимков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прайт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982, кн. 2.
2. Рыфтин Я. А. Телевизионная система. Теория.— М.: Сов. радио, 1967.
3. «Союз-22» исследует Землю: Совместное издание АН СССР и АН ГДР.— М.: Наука, 1980.

ЛАБОРАТОРНОЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

В. К. Пестряков, А. А. Семенов, А. В. Беленец, Е. Н. Попова

Ленинградский государственный университет

Для современного этапа развития дистанционных методов характерно интенсивное накопление первичной информации и исключительно медленный темп ее переработки (интерпретации). В связи с этим на первый план выступает проблема решения обратных задач, проблема автоматизации обработки данных дистанционного зондирования.

Основная трудность дешифрирования материалов дистанционной съемки — правильное соотношение извлекаемой информации с признаками изображения, основанными на объективных показателях состояния сельскохозяйственных объектов. Избежать субъективности при решении обратных задач можно путем составления и использования дешифровочных характеристик (комплексных интерпретационных программ) — «эталонного» массива данных, отражающих все основные физико-химические и биометрические состояния исследуемых территорий.

Получение такой информации в настоящее время осуществляется на специально выбранных типичных для региона, участках (тестовых полигонах) путем всестороннего их описания (в пространственном и временном аспекте). Значимость этих работ особенно возрастает в связи с решением задач, поставленных Продовольственной программой.

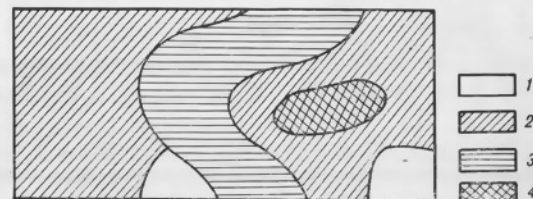
Поверхность природных образований (отражающая поверхность) является «случайно-неоднородной средой» и представляет совокупность элементов с определенной геометрией и определен-

ными оптическими свойствами каждого элемента [1]. Модели оптических свойств и связанные с ними физико-химические и биометрические параметры состояния сельскохозяйственных угодий могут быть получены на основе натурных (полевых) и лабораторных измерений. При натурных измерениях учитываются случайные распределения отдельных элементов изучаемых объектов, при лабораторных — специфические вещественные особенности этих элементов [3].

При изучении почв тестовых полигонов первостепенное значение отводится лабораторному спектрофотометрированию. Применение этого метода позволяет создать эталонный обучающий массив данных спектральной отражательной способности (СОС) почв, пред-

Рис. 1. Фрагмент картограммы мощности гумусового горизонта пахотной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (ОПХ «Сахарово», Калининская область).

1 — от 10 до 20 см, 2 — от 21 до 30 см, 3 — от 31 до 40 см, 4 — от 41 до 50 см.



ставляющий все природное многообразие физико-химического состояния почвенного покрова сельскохозяйственных объектов. Полученная в лабораторных условиях выборочная совокупность спектрофотометрических характеристик почв затем может быть использована при интерпретации данных дистанционного зондирования с достаточной детальностью и достоверностью.

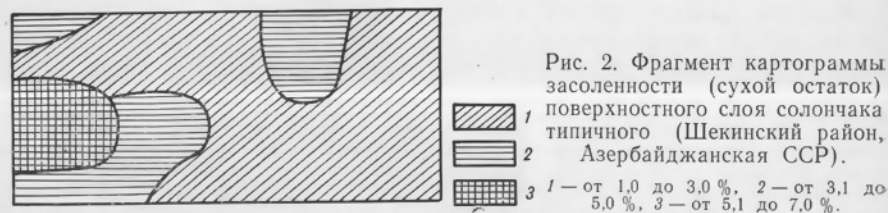
Накопление информации о физико-химическом состоянии почв методом лабораторного спектрофотометрирования может быть осуществлено двумя взаимно дополняющими друг друга путями: а) измерением СОС почв в годовом (сезонном) цикле, б) лабораторным моделированием отражательной способности почв.

Для большинства почв сельскохозяйственных объектов характерна большая пестрота и изменчивость в годовом цикле ряда физико-химических показателей, существенно влияющих на значение спектральной отражательной способности. К таким показателям относятся: содержание органического вещества, степень засоления и увлажнения, структурное состояние поверхностного слоя почв (фактура поверхности). Величина СОС почв является результатом комплексного (суммарного) влияния этих факторов в определенный момент времени [2].

Большая пестрота и динамичность показателей физико-химического состояния почв определяется как природными особенностями залегания почв, так и спецификой и интенсивностью применяемой на сельскохозяйственных объектах агротехники. Например, при вспашке дерново-подзолистых почв, неоднородных по мощности гумусового горизонта (рис. 1), на поверхность попадает почвенная масса нижележащего осветленного горизонта, вследствие чего по-

верхностный слой различается по содержанию органического вещества и соответственно по значению спектральной отражательной способности. Аналогичное явление имеет место при неравномерном внесении и заделке органических удобрений и извести.

На величину СОС южных почв существенное влияние оказывают легкорастворимые соли, содержание которых широко варьирует в поверхностном слое (рис. 2). В течение года при смене гид-

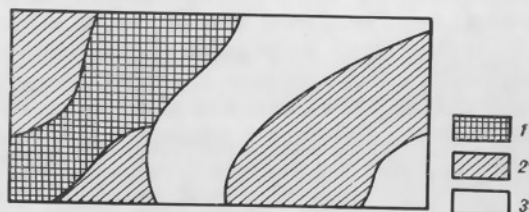


ротермических условий возрастание степени засоленности обуславливает усиление отражательной способности.

Поэтому для отражения всего многообразия показателей физико-химического состояния почв сельскохозяйственных объектов необходимо проводить годовые и сезонные наблюдения СОС почв. Так, весной следует получить данные, характеризующие по-

Рис. 3. Фрагмент картограммы спектральной отражательной способности ($\lambda=740$ нм) поверхностного слоя пахотной дерново-подзолистой супесчаной почвы (Опытное поле ВНИИМЗ, Калининская область).

1 — от 21 до 30 %, 2 — от 31 до 40 %, 3 — от 41 до 50 %.



верхность отражения до вспашки, после вспашки, после выпадения обильных осадков, после внесения органических и минеральных удобрений. Осенью следует отразить состояние поверхности почв после уборки урожая, после вспашки или дискования.

Наиболее объективно пространственная неоднородность почвенного покрова по значению СОС может быть представлена в виде картограмм. Такие картограммы составляются для разных диапазонов спектра (например, для $\lambda=740$ нм) по различным расчетным коэффициентами СОС, по значению интегрального отражения (рис. 3).

Серия полученных картограмм отражательной способности почв в годовом цикле по сути дела представляет сложную динамиче-

скую модель СОС почвенного покрова сельскохозяйственных объектов. Используя функции приведения (поправочные коэффициенты) для разных «мешающих» факторов (влажность приземного слоя воздуха, мутность атмосферы и др.), возможно прогнозирование СОС почв с достаточно высокой точностью интервалов в природных условиях. Адекватность таких моделей может быть проверена путем сравнения их выходных данных с материалами спектрозональной аэро- и космической съемки. Динамические модели спектральной отражательной способности почв тестовых полигонов создаются для всех почвенно-климатических зон страны, они отражают многообразие почвенного покрова по гранулометрическому составу (от песчаных почв до глинистых) и степени гидроморфности (автоморфные, полугидроморфные, гидроморфные почвы).

Нахождение наиболее существенных связей между электромагнитным излучением и физико-химическим состоянием почв может быть осуществлено с помощью лабораторного спектрофотометрического моделирования. В лабораторном эксперименте физико-химические свойства почв создаются искусственно и поддерживаются на определенных фиксированных уровнях. Конечным результатом модельного эксперимента является получение количественных зависимостей значений СОС как от отдельных физико-химических факторов, так и от их совокупности, т. е. получение серии математических моделей спектральной отражательной способности почв.

Современное состояние изученности вопроса дает возможность построить достаточно полную и содержательную структурно-функциональную схему моделирования отражательной способности почв, вскрывающую основные взаимосвязи между параметрами физико-химического состояния почвенной массы и значением СОС.

Структурно-функциональная схема моделирования СОС минеральных почв (рис. 4) состоит из двух блоков: 1) вещественный состав почв (минералогический и гранулометрический состав) и 2) физико-химическое состояние почв. Гранулометрический состав является важнейшей характеристикой почв, от него зависят практически все их свойства и плодородие. При моделировании СОС почвы по гранулометрическому составу должны быть разделены минимум на четыре группы по содержанию в них частиц физической глины ($<0,01$ мм): песчаные (<10 %), супесчаные (10—20 %), суглинистые (20—50 %) и глинистые (>50 %). При проведении модельного эксперимента во всех вариантах опыта гранулометрический состав является постоянным показателем исследуемой конкретной почвы.

Наиболее важными факторами, определяющими значение СОС почв, являются показатели физико-химического состояния: содержание органического вещества, степень засоления и увлажнения, состояние отражающей поверхности (степень распыленности). В представленной схеме не рассматривается такой важный фактор,

влияющий на отражение, как содержание несиликатного гидратированного железа, что связано с трудностью регулирования его содержания в почве в условиях лабораторного эксперимента.

Органическое вещество в почве является основным поглотителем электромагнитного излучения. Его содержание определяет значение спектральной отражательной способности при любом состоянии почвенной массы. Являясь одним из элементов плодородия, органическое вещество (гумус) накапливает питательные вещества (азот, фосфор, калий, кальций). Установление корреляцион-

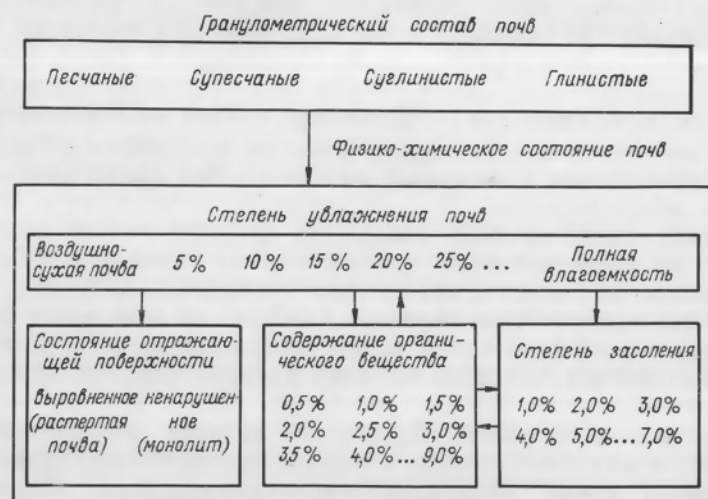


Рис. 4. Структурно-функциональная схема моделирования спектральной отражательной способности минеральных почв (в лабораторном эксперименте).

ных зависимостей между содержанием органического вещества и СОС позволит с помощью дистанционных методов получать информацию о запасах гумуса в пахотном слое почв и их плодородии.

Широкий интервал содержания органического вещества в почвах — от 0—0,1 % в освоенных дерново-подзолистых почвах до 3—4 % в окультуренных вариантах этих почв и до 7—9 % в южных черноземах — обуславливает достаточно дробную градацию этого показателя при моделировании СОС почв (с шагом 0,5 %).

Степень увлажнения почв находится в прямой зависимости от гранулометрического состава и содержания органического вещества. Для выявления закономерностей влияния увлажнения на отражательную способность почв различного гранулометрического состава и с различным содержанием органического вещества может быть принята градация по увлажнению почв (в вариантах

опыта) с шагом 2 или 5 % (в процентах влаги к воздушно-сухому состоянию почвенной массы).

В лабораторном эксперименте возможно изучение комплексного воздействия всех физико-химических факторов на СОС почв только при условии нахождения почвенной массы в растертом (диспергированном) состоянии. В качестве контроля в лабораторных условиях могут быть изучены почвенные образцы ненарушенного строения с определенным содержанием органического вещества (постоянный показатель) при различных уровнях увлажнения.

В южных районах при интенсивном испарении влаги на поверхности почв образуется белый налет солей, вследствие чего спектральное отражение резко возрастает. Поэтому возможность дистанционирования степени засоления дистанционными методами имеет большое практическое значение, особенно в условиях орошаемого земледелия.

В лабораторном модельном эксперименте путем постепенной промывки сильнозасоленной почвы водой (рассоление) могут быть получены почвенные образцы с различной степенью засоления на фоне разной степени увлажнения.

Достоверность данных моделирования СОС почв в лабораторном эксперименте обеспечивается высокой повторностью вариантов опыта. Результаты лабораторного модельного эксперимента выражаются в виде определенных математических зависимостей (например, серии интерполяционных уравнений регрессии). Программа их обработки предусматривает: вычисление (поиск) минимальных и максимальных значений СОС почв, построение изоквант (картин изоквант) СОС почв по каждой паре изученных факторов при постоянных значениях других факторов, что делает возможным выделение ведущего фактора, влияющего на СОС исследуемой почвы.

В конечном итоге в результате лабораторного моделирования можно выделить начальные и граничные параметры изменяющихся физико-химических факторов и с высокой точностью предсказать значения СОС почв в их динамическом развитии.

Таким образом, только путем лабораторных измерений спектральной отражательной способности возможно установить закономерные связи между физико-химическим состоянием почв сельскохозяйственных объектов и их спектральным образом. Научная целесообразность этих работ и практическая значимость служат обоснованием для их продолжения и развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козодеров В. В. Теоретические аспекты взаимосвязей дистанционных измерений и параметров состояния природных образований. — Исследование Земли из космоса, 1983, № 1, с. 69—77.
2. Толчельников Ю. С. Оптические свойства ландшафта. — Л.: Наука, 1974. — 252 с.
3. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. — Л.: Гидрометеиздат, 1981. — 231 с.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СВЯЗИ ЯРКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ СПЕКТРА И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Т. Нильсон, Я. Антон, А. Кууск,
Ю. Кыдар, Ю. Росс, А. Савихин

Институт астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР

Взаимные корреляционные связи яркостных характеристик сельскохозяйственной растительности в различных спектральных областях заслуживают внимания с нескольких точек зрения. Построение матриц корреляции коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) или спектральной яркости (СЯ) при многозональной спектральной съемке позволяет выделить главные компоненты — статистически независимые линейные комбинации спектральных каналов. Ковариация яркости по спектру может быть использована при определении оптимальной ширины спектральных каналов [5]. Также следует обратить внимание на качественное сходство получивших распространение при анализе сельскохозяйственной растительности дистанционными оптическими методами индексов растительности «яркость почвы», «зеленость» и «желтизна» [6] с первыми собственными векторами ковариационной матрицы СЯ, т. е. с главными компонентами.

Анализ корреляционных связей полезно провести и с точки зрения выявления причин временной или пространственной вариации КСЯ или СЯ растительности. Величина и знак взаимной корреляции КСЯ или СЯ в различных участках спектра в пределах одного поля сельскохозяйственной культуры определяются причинами пространственного варьирования СЯ для данного поля. При практическом определении СЯ осредняется по площади, равной мгновенному полю зрения прибора. Одни причины вариации СЯ — яркостного типа — спектрально неселективны или мало селективны и влияют одинаково во всех спектральных областях, т. е. их влияние приводит к положительной взаимной корреляции СЯ в различных спектральных областях. К таким причинам относятся изменчивость соотношения освещенных и затененных элементов растительности (при постоянном проективном покрытии), изменчивость пространственной ориентации фитоэлементов, а также изменчивость влажности почвы. Другие причины вариации СЯ — типа «зеленость» — спектрально селективны, могут иметь противоположное влияние в различных спектральных областях и приводят к отрицательной корреляции. Это в первую очередь — изменчивость проективного покрытия растительности (или индекса листовой поверхности), если один из спектральных каналов — в видимой части спектра (особенно в полосах поглощения хлорофилла), а другой — в близкой инфракрасной области на плато максималь-

ного отражения радиации. К отрицательной корреляции могут привести изменчивость соотношения различных органов (например, цветков или колосьев и листьев), вариации видового состава (пятна зеленых сорняков на созревшем поле зерновой культуры), пространственная вариация степени созревания у зерновых.

Нетрудно показать, что если мы имеем дело с влиянием только одного фактора и если этот фактор влияет на КСЯ и СЯ линейно, то коэффициент корреляции должен равняться +1 или -1. Отсутствие корреляции может означать различные ситуации: влияние двух или нескольких факторов с противоположным действием, влияние факторов с существенно нелинейным эффектом на один из рассматриваемых спектральных каналов.

Поэтому значение и знак коэффициентов корреляции СЯ в характерных спектральных областях приносят некоторую информацию о причинах пространственной или временной вариации КСЯ или СЯ. Одновременно следует иметь в виду, что эти коэффициенты корреляции определяются и чисто техническими причинами (шумы в измерительных каналах, иногда неточное соответствие полей зрения различных спектральных каналов).

Аналогично могут быть интерпретированы корреляционные матрицы, где к каналам коротковолновой радиации добавлены еще и другие области спектра, в нашем случае область 8—13 мкм, т. е. канал радиационной температуры. Поскольку при разном пространственном осреднении определяющими могут быть различные причины вариации яркостных характеристик, то для лучшей интерпретации корреляционных матриц желательно, чтобы поля зрения приборов в различных спектральных областях совпадали.

Приведем и проанализируем теперь корреляционные матрицы яркостных характеристик некоторых посевов сельскохозяйственных культур, полученные как из временных, так и из пространственных реализаций КСЯ.

Временные корреляционные связи по спектру

Исходные реализации временного хода КСЯ и СЯ на контрольных площадках (2 м²) нескольких посевов ячменя и озимой ржи измерялись полевым четырехканальным фотометром конструкции Ахо и Сулева [1]. Методика измерений описана в [2]. Характеристики спектральных каналов были следующие: 1) $\lambda_{\text{макс}}=485$ нм и $\Delta\lambda_{0,5}=14$ нм, 2) 553 нм и 9 нм, 3) 671 нм и 15 нм, 4) 789 нм и 10 нм. Ковариационные (и корреляционные) матрицы были вычислены как для КСЯ, так и для СЯ всего вегетационного периода и по отдельным его частям (табл. 1). Для всех полученных матриц корреляции за исключением периода колошение—цветение наблюдается очень высокая положительная корреляция между КСЯ и СЯ в синей и красной областях, высокая положительная корреляция между КСЯ в синей и зеленой и зеленой и красной областях и высокая отрицательная корреляция между КСЯ в синей

Корреляционный анализ и средние значения временного хода КСЯ или СЯ $\bar{X}_i$ ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$) посевов ячменя и ржи для всего вегетационного периода 1981 г. и его различных частей

Спектральный канал, нм	$\bar{X}_i$	S_i	$\frac{S_i^2}{\sum_i S_i^2}$	Корреляционная матрица				Ψ_1	Ψ_2	Ψ_1	Ψ_2
				485	553	671	789				
Весь вегетационный период (по КСЯ)											
485	0,034	0,020	1,7	1,000	0,802	0,947	-0,561	-0,564	0,070	-0,083	0,371
553	0,071	0,020	11,7		1,000	0,770	-0,135	-0,471	0,585	-0,026	0,453
671	0,064	0,044	8,3			1,000	-0,635	-0,568	-0,026	-0,204	0,784
789	0,332	0,143	88,2				1,000	0,371	0,808	0,975	0,208
	$\sum_i S_i^2 = 0,0232$						$\lambda_K \%$	74,9	21,9	92,4	7,2
Весь вегетационный период (по СЯ)											
485	12,4	6,3	2,5	1,000	0,781	0,844	-0,349	-0,580	0,053	-0,091	0,239
553	27,3	10,2	6,6		1,000	0,719	-0,010	-0,515	0,448	-0,051	0,454
671	22,2	19,3	23,4			1,000	-0,412	-0,574	-0,047	-0,327	0,795
789	73,3	32,8	67,5				1,000	0,263	0,891	0,939	0,324
	$\sum_i S_i^2 = 0,1591$						$\lambda_K \%$	67,2	24,9	73,6	23,8

Спектральный канал, нм	$\bar{X}_i$	S_i	$\frac{S_i^2}{\sum S_i^2}$	Корреляционная матрица				Ψ_1	Ψ_2	Ψ_1	Ψ_2
				485	553	671	789				
Появление всходов—выход в трубку (по КСЯ)											
485	0,036	0,018	1,9	1,000	0,842	0,990	-0,513	-0,578	0,051	-0,082	0,369
553	0,070	0,018	1,9		1,000	0,783	-0,017	-0,478	0,557	-0,012	0,445
671	0,072	0,040	9,7			1,000	-0,587	-0,576	-0,045	-0,210	0,790
789	0,250	0,120	86,4				1,000	0,326	0,828	0,974	0,206
	$\sum_i S_i^2 = 0,0168$						$\lambda_K \%$	74,4	24,7	90,7	9,2
Колосение—цветение (по КСЯ)											
485	0,020	0,003	0,5	1,000	0,508	0,792	-0,333	0,464	-0,675	0,025	0,157
553	0,069	0,011	6,2		1,000	0,784	0,664	0,519	0,235	0,169	0,939
671	0,030	0,004	0,8			1,000	0,601	0,564	-0,192	0,056	0,249
789	0,532	0,043	92,6				1,000	0,445	0,673	0,984	-0,179
	$\sum_i S_i^2 = 0,0020$						$\lambda_K \%$	72,2	17,9	95,5	3,9
Молочная спелость—полная спелость (по КСЯ)											
485	0,039	0,023	5,9	1,000	0,850	0,926	-0,526	-0,541	0,169	-0,204	0,325
553	0,072	0,024	6,6		1,000	0,897	-0,400	-0,520	0,364	-0,184	0,397
671	0,077	0,047	25,6			1,000	-0,569	-0,546	0,105	-0,451	0,680
789	0,267	0,074	62,0				1,000	0,372	0,910	0,849	0,525
	$\sum_i S_i^2 = 0,0088$						$\lambda_K \%$	79,0	16,9	78,2	20,3

Примечание. S_i — среднее квадратическое отклонение; $S_i^2 / \sum S_i^2$ — процентный вклад каждого спектрального канала в дисперсию интегрального КСЯ; Ψ_1, Ψ_2 — два первых собственных вектора корреляционной матрицы; Ψ_1, Ψ_2 — то же, ко-вариационной матрицы; λ_K — их процентные вклады.

и близкой инфракрасной, коэффициента спектральной яркости, а также в красной и близкой инфракрасной областях спектра. Корреляция в зеленой и близкой инфракрасной областях слабая отрицательная. Такие корреляционные матрицы объясняются тем, что в период от появления всходов до выхода в трубку основной причиной временной вариации КСЯ посевов является рост проективного покрытия зеленой растительности. В период созревания из-за пожелтения листьев и колосов повышается КСЯ в видимой части спектра, а в близкой инфракрасной области спектра КСЯ уменьшается за счет некоторого уменьшения проективного покрытия культуры и одновременного увеличения роли колосов. Последние за счет практически нулевого пропускания радиации существенно уменьшают многократное рассеяние внутри растительности и поэтому влияют в первую очередь на КСЯ в близкой инфракрасной области спектра. Поэтому в период созревания под влиянием комплекса факторов получают практически такие же матрицы корреляции, как в начальных фазофазах развития зерновой культуры под влиянием одного преобладающего фактора — проективного покрытия растительности. Немного отличаются лишь коэффициенты корреляции КСЯ зеленой области спектра.

В период колошение—цветение матрица корреляции существенно отличается от остальных — все ее элементы положительные. В этот период временная вариация КСЯ наименьшая во всех спектральных каналах, и тогда основные причины вариации КСЯ — яркостного типа.

Анализируя первые собственные векторы (главные компоненты) ковариационных (и корреляционных) матриц (см. табл. 1), заметим, что практически во всех случаях два первых собственных вектора можно истолковать аналогично векторам, введенным в [6], т. е. определить их как «яркость» (все компоненты положительные) и «зеленость» (компонент в близкой инфракрасной области имеет другой знак, чем компоненты в видимой области спектра). Приведенные в таблице собственные значения (нормированные) характеризуют вклад соответствующего собственного вектора во временную изменчивость интегрального коэффициента яркости (КЯ) или интегральной яркости. При сравнении собственных векторов, полученных на основе временного хода КСЯ и СЯ для всего периода вегетации, бросается в глаза, что у корреляционной матрицы по СЯ вклад вектора «яркость» значительно выше, чем у матрицы по КСЯ. Это вполне естественно, так как часть вариаций у СЯ обусловлена вариацией падающей на растительность радиации, а характер этой вариации в основном тоже яркостного, малоселективного характера. Интересно также, что в период созревания основная часть вариации КСЯ зерновых приходится на факторы типа «зеленость» и «яркость», а не «желтизна».

Таким образом, анализ ковариационных (корреляционных) матриц временного хода КСЯ посевов помогает установить главные влияющие факторы в различных фазофазах развития культуры.

Пространственные корреляционные связи по спектру

Аналогично временным, могут быть проанализированы пространственные матрицы корреляции, т. е. когда исходный статистический материал получается с помощью многоспектрального пространственного исследования объекта. В нашем случае измерения проводились с борта вертолета Ка-26 с помощью несканирующего четырехканального фотометра ТСФМ-4М конструкции Сулева [4] и инфракрасного радиометра (8—13 мкм) конструкции Рееманна [3]. Характеристики спектральных каналов четырехканального фотометра были следующими: 1) $\lambda_{\text{макс}} = 555$ нм и $\Delta\lambda_{0,5} = 13$ нм; 2) 675 нм и 10 нм; 3) 795 нм и 15 нм; 4) 1450—1940 нм. Угол зрения фотометра $20'$, радиометра 1° .

Измерения проводились с высоты 50 м при скорости полета вертолета 50 км/ч. Частота опроса каждого канала примерно 100 Гц, расстояние соседних отсчетов на поверхности земли примерно 0,12 м. Длина реализаций не менее 1000 отсчетов. Корреляционные матрицы и собственные векторы для некоторых посевов сельскохозяйственных культур приводятся в табл. 2. При интерпретации данных взаимной корреляции различных спектральных каналов наших приборов следует иметь в виду, что коэффициенты корреляции искажены в некоторой степени за счет неточного совпадения полей зрения (всех) спектральных каналов на поверхности земли. Изучение функции взаимной когерентности спектральных каналов прибора показало, что при высоких пространственных частотах ($f > 1$ м⁻¹) показания прибора в различных спектральных каналах менее когерентны. Поэтому, если в пространственном спектре изучаемого объекта значительна доля высокочастотных составляющих, то коэффициенты корреляции яркости в различных спектральных каналах (по абсолютному значению) уменьшены за счет приборных эффектов. Тем не менее некоторые выводы можно сделать и на основе анализа пространственных корреляционных матриц. Характерно, что в коротковолновой области спектра все коэффициенты корреляции положительные, т. е. в пространственной изменчивости у рассмотренных объектов преобладают факторы яркостного типа. Практически во всех случаях роль факторов типа «зеленость» довольно существенна.

Более медленная по сравнению с временными реализациями скорость сходимости собственных векторов указывает опять-таки на роль шумовых (некорреляционных) приборных причин. Основная причина малых значений коэффициентов корреляции между КСЯ и радиационной температурой — это большие размеры поля зрения у канала радиационной температуры. Особенно это сказывается в корреляционной матрице для картофеля, где существенна роль высокочастотных колебаний яркости, соответствующих рядковой структуре поля. Нами сделаны попытки отфильтровать высокие частоты в исходных реализациях путем скользящего осреднения. В результате такой фильтрации матрицы корреляции меняются, как правило, в сторону увеличения коэффициентов корреляции.

Таблица 2

Пространственные корреляционные матрицы КСЯ и радиационной температуры для некоторых посевов сельскохозяйственных культур и соответствующие первые собственные векторы (Φ_k) вместе с относительными собственными числами (λ_k)

Корреляционная матрица						Собственные векторы		
канал, мкм	0,555	0,675	0,795	1,45—1,94	8—13	Φ_1	Φ_2	Φ_3
Картофель, 25 мая — всходы								
0,555	1,000	0,692	0,391	0,498	0,076	0,455	0,116	-0,741
0,675		1,000	0,645	0,707	-0,056	0,547	-0,073	-0,156
0,795			1,000	0,655	0,060	0,480	0,053	0,590
1,45—1,94				1,000	-0,044	0,513	-0,087	0,271
8—13					1,000	0,006	0,985	0,068
				$\lambda_k \%$		56,1	20,4	12,9
Культурные травы, 25 мая								
0,555	1,000	0,686	0,227	0,344	0,202	0,560	-0,175	-0,350
0,675		1,000	0,259	0,239	0,263	0,548	-0,227	-0,411
0,795			1,000	0,471	-0,220	0,372	0,629	0,055
1,45—1,94				1,000	0,152	0,452	0,282	0,633
8—13					1,000	0,208	-0,665	0,553
				$\lambda_k \%$		43,5	25,7	16,6
Рожь, 19 июня — колошение								
0,555	1,000	0,733	0,247	0,592		0,476	0,600	0,110
0,675		1,000	0,482	0,706		0,542	0,239	-0,608
0,795			1,000	0,659		0,426	-0,741	-0,286
1,45—1,94				1,000		0,546	-0,182	0,732
				$\lambda_k \%$		68,3	20,2	6,1
Ячмень, 19 июня — выход в трубку								
0,555	1,000	0,591	0,307	0,558		0,452	0,684	0,467
0,675		1,000	0,511	0,604		0,507	0,262	-0,818
0,795			1,000	0,749		0,485	-0,638	0,039
1,45—1,94				1,000		0,551	-0,240	0,334
				$\lambda_k \%$		66,8	18,6	9,8

ляции (по абсолютным значениям). Однако в некоторых случаях наблюдается и изменение знака корреляции. Можно сделать вывод, что каждый фактор изменчивости КСЯ имеет свой пространственный «спектр действия».

В этой связи интересно рассмотреть проблему пространственной корреляции СЯ на более длинных трассах измерений с многими объектами, где к причинам вариации СЯ прибавляется еще и чередование различных объектов. Нами проведены измерения КСЯ и радиационной температуры в типичной сельскохозяйственной местности в Тартуском районе ЭССР, на трассе длиной 4,5 км, проходящей над различными объектами со следующим процент-

ным вкладом: озимая рожь 34,9 %, посевы ячменя 11,3 и 4,1 %, картофель 9,6 %, культурные травы (ежа сборная, люцерна) 9,9 %, культурные травы (люцерна, семенник) 5,5 %, сахарная свекла 2,7 %, ольшаник 8,9 %, сосняк 6,8 %, грунтовые дороги, обочины дорог, области перехода 6,3 %. В табл. 3 приведены корреляционные матрицы КСЯ и радиационной температуры для этой трассы за 25 мая, когда ячмень, картофель и сахарная свекла были в фазе появления всходов, рожь — в фазе выхода в трубку, травы густые с практически стопроцентным проективным покрытием. Первая матрица из них — «натуральная», получена непосредственно по реализации КСЯ и радиационной температуры, вторая — после проведения сглаживания исходной реализации методом скользящего осреднения по 4 соседним отсчетам, третья — сглаживанием по 16 отсчетам. Четвертая матрица получена следующим образом: исходная реализация КСЯ и радиационной температуры заменена для каждого объекта на трассе соответствующим средним значением, исключая этим вариацию яркости в пределах одного объекта. Сравнивая эти четыре матрицы корреляции, заметим, что осреднение (по существу отфильтрация высоких частот) приводит к значительным изменениям в корреляционной матрице. При этом сильное сглаживание приводит к матрице корреляции, полученной заменой исходной реализации средними значениями. Особенно следует обратить внимание на то, что происходит с коэффициентами корреляции между КСЯ при длине волны 795 нм и радиационной температурой. В процессе все большего сглаживания основная роль постепенно переходит от яркостных факторов (следовательно, более высокочастотных) к факторам «зеленость» (более низкочастотным). Основное, чем отличаются различные объекты на трассе в этот период времени — проективное покрытие растительности.

Исходя из различий в проективном покрытии зеленой растительности и учитывая, что зеленая растительность, как правило, холоднее, чем оголенная почва, естественно полагать, что в факторе «зеленость» последняя компонента при радиационной температуре имеет тот же знак, что и компоненты в видимой области спектра.

Корреляционная матрица для той же трассы 19 июня (табл. 4), когда поля на трассе уже не так сильно различаются по проективному покрытию, выглядит несколько иначе. Тогда «высокочастотные» и «низкочастотные» факторы примерно одинаковы.

Оказывается, что основная часть временной и пространственной вариации КСЯ может быть объяснена только двумя факторами — типа «яркость» и «зеленость». Факторы «яркость» и «зеленость» могут быть определены по-разному. В [6] «яркость (почвы)» определяется на основе кривой спектральной яркости типичных почв, а «зеленость» — по вектору, перпендикулярному первому вектору (по методу Грам-Смита) и направленному в сторону кластера типичных зеленых посевов. Мы видели, что факторы «яркость» и «зеленость» могут быть определены и на основе первых собственных векторов корреляционной (ковариационной)

Таблица 3

Корреляционные матрицы и собственные векторы (Φ_k) вместе с относительными собственными числами КСЯ и радиационной температуры трассы сельскохозяйственной местности (4,5 км)
25 мая, погода ясная, поверхность почвы сухая, высота солнца 37°

Корреляционная матрица						Собственные векторы		
канал, мкм	0,555	0,675	0,795	1,45— 1,94	8—13	Φ_1	Φ_2	Φ_3

Трасса по оригинальной реализации

0,555	1,000	0,696	0,377	0,659	0,084	0,532	0,203	-0,275
0,675		1,000	0,227	0,508	0,150	0,467	0,365	-0,447
0,795			1,000	0,713	-0,154	0,435	-0,440	0,533
1,45—1,94				1,000	-0,050	0,556	-0,174	0,208
8—13					1,000	0,012	0,776	0,631

 $\lambda_k \%$ 52,2 23,8 14,2

Скользящее осреднение по 4 отсчетам

0,555	1,000	0,804	-0,245	0,640	0,491	0,572	0,125	-0,426
0,675		1,000	-0,355	0,355	0,644	0,574	-0,069	-0,113
0,795			1,000	0,670	-0,365	-0,191	0,697	0,350
1,45—1,94				1,000	0,110	0,303	0,667	-0,026
8—13					1,000	0,464	-0,219	0,826

 $\lambda_k \%$ 52,5 34,9 10,0

Скользящее осреднение по 16 отсчетам

0,555	1,000	0,935	-0,596	0,457	0,743	0,488	0,104	-0,625
0,675		1,000	-0,743	0,274	0,873	0,514	-0,069	-0,351
0,795			1,000	0,339	-0,863	-0,420	0,564	-0,320
1,45—1,94				1,000	0,615	0,217	0,812	0,209
8—13					1,000	0,523	0,087	0,583

 $\lambda_k \%$ 63,6 24,3 6,8

В реализации яркости каждый объект представлен только средним значением

0,555	1,000	0,950	-0,442	0,797	0,835	0,491	0,259
0,675		1,000	-0,690	0,616	0,961	0,516	-0,012
0,795			1,000	0,062	-0,853	-0,360	0,647
1,45—1,94				1,000	0,443	0,334	0,679
8—13					1,000	0,501	-0,229

 $\lambda_k \%$ 74,4 24,1

Таблица 4

Корреляционные матрицы и собственные векторы КСЯ трассы сельскохозяйственной местности (4,5 км)
19 июня, погода ясная, поверхность почвы мокрая, высота солнца 55°

Корреляционная матрица						Собственные векторы	
канал, мкм	0,555	0,675	0,795	1,45—1,94	8—13	Φ_1	Φ_2

Трасса по оригинальной реализации

0,555	1,000	0,827	0,206	0,676		0,589	-0,228
0,675		1,000	-0,195	0,478		0,487	-0,535
0,795			1,000	0,688		0,292	0,754
1,45—1,94				1,000		0,575	0,305
					$\lambda_k \%$	61,2	33,9

Скользящее осреднение по 4 отсчетам

0,555	1,000	0,795	0,428	0,740		0,557	-0,294
0,675		1,000	0,124	0,455		0,441	-0,633
0,795			1,000	0,786		0,430	0,656
1,45—1,94				1,000		0,558	0,288
					$\lambda_k \%$	67,6	25,8

Скользящее осреднение по 16 отсчетам

0,555	1,000	0,837	-0,236	0,455		-0,430	0,605
0,675		1,000	-0,620	-0,221		-0,632	0,213
0,795			1,000	0,730		0,574	0,335
1,45—1,94				1,000		0,294	0,690
					$\lambda_k \%$	55,9	42,1

В реализации яркости каждый объект представлен только средним значением

0,555	1,000	0,772	0,115	0,606	0,736	0,544	0,276
0,675		1,000	-0,479	0,135	0,844	0,572	-0,148
0,795			1,000	0,712	-0,403	-0,171	0,672
1,45—1,94				1,000	0,093	0,193	0,657
8—13					1,000	0,556	-0,140
					$\lambda_k \%$	54,9	38,7

матрицы. В последнем случае не так четко понятен физический смысл самих факторов и в общем случае каждому ансамблю данных соответствуют свои собственные векторы, но зато гарантируется быстрая сходимость ряда по собственным векторам корреляционной матрицы.

Таким образом, мы указали на возможность использования результатов корреляционного анализа многоканальной спектральной съемки для выявления некоторых причин вариации яркостных характеристик растительности.

1. Ахо А., Сулев М. Полевой фотометр для измерения спектральных коэффициентов яркости подстилающей поверхности.— Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. 2. Приборы и методы наблюдений. Таллин, 1980, с. 150—152.
2. Нильсон Т. А., Антон Я. А., Аппей В. Б. Сезонный ход коэффициентов спектральной яркости ячменя и ржи.— Исследование Земли из космоса, 1983, № 5, с. 72—80.
3. Рееманн Ю. М. Самолетный радиационный термометр.— Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. 2. Приборы и методы наблюдений. Таллин, 1980, с. 160—163.
4. Сулев М. Четырехканальный телеспектрофотометр.— Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Ч. 2. Приборы и методы наблюдений. Таллин, 1980, с. 153—155.
5. Bunnik N. J. J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties.— Mededelingen Landbouwhogeschool Wageningen, 78—1, 1978.
6. Kauth R. J., Thomas G. S. The tasseled cap—a graphic description of the spectral—temporal development of agricultural crops as seen by Landsat—Symp. Mach. Process. Remotely Sensed Data, West Lafayette, Ind., 1976, p. 4 B/41—4 B/51.

К ВОПРОСУ О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ТЕСТОВЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

*Н. Н. Выгодская, И. И. Горшкова, Е. Е. Егоров,
Н. В. Красникова, И. В. Мануковская, В. П. Некрасов*

Московский государственный университет

Тематическая интерпретация данных дистанционных измерений возможна только на основе истинных характеристик яркости или коэффициентов яркости, соответствующих наземным условиям. При измерениях с больших высот, в том числе и с ИСЗ, для учета влияния атмосферы выполняется радиационная коррекция. При этом обычно предполагается, что оптическое состояние атмосферы над заданной (тестовой) территорией является однородным. Это же допущение принимается при оценке репрезентативности ключевых (тестовых) и эталонных участков, на которых проводятся синхронные или квазисинхронные наземные наблюдения с целью определения передаточной функции атмосферы. Принятие условий об однородности атмосферы в большинстве случаев бывает вынужденным, так как густота сети станций, обеспечивающая необходимую информацию о состоянии атмосферы, недостаточна. В то же время корректный учет пространственно-временной изменчивости состояния атмосферы необходим для территорий, по которым обрабатывается методика интерпретации аэрокосмических данных.

В работе рассматривается изменение оптического состояния атмосферы в летний период при ясной малооблачной погоде применительно к югу Украины (Херсонская область).

Методика наблюдений

На территории Херсонской области расположены две сетевые актинометрические станции: Аскания-Нова и Херсон. В период 1977—1983 гг. дополнительно были организованы актинометрические наблюдения в двух точках: на севере области (берег Каховского водохранилища, п. Первомаевка) и на юге области (побережье Азовского моря, Арабатская Стрелка). К измерениям на стационарных точках привязывались данные маршрутных измерений, которые проводились по всей территории области с интервалами между точками 5, 10, 15, 30, 50 и 100 км.

При наблюдении с помощью актинометра Янишевского с насадкой из двух широкополосных стеклянных фильтров OG-1 и RG-2 измерялся интегральный поток солнечной радиации (S) и поток прямой солнечной радиации в спектральном диапазоне 525—630 нм ($S_{\Delta\lambda}$). На основе этих измерений рассчитывались:

— коэффициент прозрачности атмосферы в фиксированный момент времени при конкретной оптической массе атмосферы $m(P_m)$;

— коэффициент прозрачности атмосферы в фиксированный момент времени, приведенный к $m=2(P_2)$;

— оптическая толщина атмосферы $\tau_{\Delta\lambda}$, равная

$$\tau_{\Delta\lambda} = \frac{2,3}{m} \lg \frac{S_{0,\Delta\lambda}}{S_{m,\Delta\lambda}}, \quad (1)$$

где $S_{0,\Delta\lambda}$ — солнечная радиация в диапазоне 525—630 нм на верхней границе атмосферы; $S_{m,\Delta\lambda}$ — солнечная радиация по измерениям с фильтрами OG-1 и RG-2;

— аэрозольная компонента ослабления τ_a , равная

$$\tau_a = \tau_{\Delta\lambda} - (\tau_p + \tau_{oz}), \quad (2)$$

где τ_p и τ_{oz} — соответственно ослабление радиации за счет релеевского рассеяния и поглощения озоном;

— фактор мутности Линке T_m , равный

$$T_m = \lg P_m / \lg P_0, \quad (3)$$

где P_0 — коэффициент прозрачности идеальной атмосферы;

— аэрозольный фактор мутности T_D , равный

$$T_D = T_{L,D} - 1, \quad (4)$$

где $T_{L,D}$ — фактор мутности в сухой атмосфере [1].

При анализе пространственной изменчивости оптического состояния атмосферы результаты измерений, полученные при высотах Солнца ($h_\odot$) больше 50°, приводились к $m=2$ по стандартным методикам [1, 2, 12].

Влагосодержание воздуха (W см) рассчитывалось для отдельных точек по наземным наблюдениям через парциальное давление водяного пара (e) [12]

$$W = 0,157e. \quad (5)$$

Средние для территории оценки $\bar{W}$ в слое воздуха 0—5 км определялись на основе ежедневных карт барической топографии:

$$\bar{W} = 10 (0,08q_{1000} + 0,15q_{850} + 0,175q_{700} + 0,10q_{500}), \quad (6)$$

где q — удельная влажность; 1000... 500 — уровень (гПа) карт барической топографии [11]. Хотя расчет по (6) дает приближенные оценки $\bar{W}$, они являются более репрезентативными характеристиками влагосодержания воздушных масс (ВМ) над территорией по сравнению со значениями W , рассчитанными по (5) для отдельных точек.

По картам барической топографии AT_{850} (соответствующей высоте 1,5 км) и приземным картам (AT_{1000}) были систематизированы данные о господствующем направлении ветра за летние месяцы. Высота 850 гПа была выбрана исходя из того, что, во-первых, этот уровень является высотой эффективного переноса для юга Украины в летний период [6], и, во-вторых, направление ветра на высоте 1,5 км характеризует возможный перенос загрязняющих веществ от крупных промышленных предприятий с высокими трубами [5].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Характеристика влагосодержания воздушной массы и направление ветра

Оптическое состояние атмосферы в значительной степени определяется W и содержанием аэрозоля, которые связаны с генезисом ВМ и ее трансформацией.

Интенсивная трансформация воздуха в летний период приводит к тому, что ВМ практически не различаются между собой по влагосодержанию. Средние значения $\bar{W}$ (при коэффициенте вариации 17—23 %) за летние месяцы отдельных лет близки к средним многолетним.

В зависимости от времени нахождения ВМ над территорией области $\bar{W}$ меняется незначительно, снижаясь на 15 % к 7—10-му дню. В большей степени $\bar{W}$ зависит от увлажнения территории и интенсивности испарения. При поступлении на территорию после периода с осадками ВМ с низким влагосодержанием $\bar{W}$ увеличивается на 2—3-й день в среднем на 5—10 %, но затем снижается до уровня ниже исходного. Однако в отдельные дни могут наблюдаться более резкие колебания W (до 40—50 %), обусловленные как исходным влагосодержанием поступившей ВМ, так и увлажненностью подстилающей поверхности.

Направление ветра мало меняется над территорией области. В летний период господствуют ветры западных румбов и реже — северо-восточных. В приземном слое воздуха направление ветра в большей степени определяется местными условиями. Так, в районе Каховского водохранилища преобладают северо-восточные и северные ветры, на побережье Азовского моря — юго-восточные и юго-западные.

Исходя из розы ветров и особенностей расположения промышленных центров вокруг области, априори можно ожидать различий в содержании аэрозоля над северной и южной частями территории области, и соответственно различий в оптическом состоянии атмосферы.

2. Общая характеристика прозрачности атмосферы

В летний период средние значения P_2 для Херсонской области на 15 % ниже, чем среднеширотные значения P_2 для юга Украины [9]. За период наблюдений абсолютный максимум P_2 достигал 0,805, абсолютный минимум — 0,400 при среднем значении $P_2 = 0,607$ ($T_2 = 5,33$).

Основными причинами, обуславливающими формирование низкой прозрачности атмосферы, могут быть как перенос на территорию области ВМ с большим фоновым влагосодержанием и содержанием аэрозоля, так и перенос ВМ, дополнительно обогащенных аэрозолями промышленного происхождения от очагов загрязнения, находящихся по пути движения ВМ.

По имеющимся литературным данным для Украины [3, 4] морской и континентальный тропический воздух имеет самую высокую фоновую мутность атмосферы. Однако, как показали результаты статистической обработки, эмпирические распределения P_2 и T_2 для ВМ разного происхождения различаются между собой недостоверно.

Таким образом, фоновые оптические свойства ВМ могут меняться под действием разных причин, в том числе при вымывании аэрозолей в случае осадков, при дополнительном выносе загрязняющих веществ и при изменении интенсивности турбулентного обмена [10].

Для оценки тесноты связи между прозрачностью атмосферы и различными циркуляционными факторами использовалась мера сопряженности K' [8]

$$K' = [2^{T(A, B)} - 1] / [2^{H_{\min}} - 1], \quad (7)$$

где $T(A, B) = H(A) + H(B) + H(A, B)$ — сопряженность в двухкомпонентной системе A и B . Здесь $H(A)$ и $H(B)$ — неопределенность (энтропия) состояний a_i и b_j из совокупностей A и B , определяется по формулам:

$$H(A) = - \sum P(a_i) \log_2 P(a_i),$$

$$H(B) = - \sum P(b_j) \log_2 P(b_j),$$

а $H(A, B)$ — совместная неопределенность распределений A и B — по формуле

$$H(A, B) = -\sum \sum P(a_i, b_j) \log_2 P(a_i, b_j),$$

где $P(a_i, b_j)$ — совместная вероятность комбинаций двух состояний из совокупности A и B ; $H_{\min}$ — минимальная неопределенность из $H(A)$ и $H(B)$.

Фоновые свойства ВМ и длительность ее нахождения над территорией области примерно одинаково влияют на прозрачность атмосферы ($K'=0,14$ и $0,17$ соответственно). Более тесная связь отмечается при оценке воздействия направления ветра на высоте 850 гПа ($K'=0,26$).

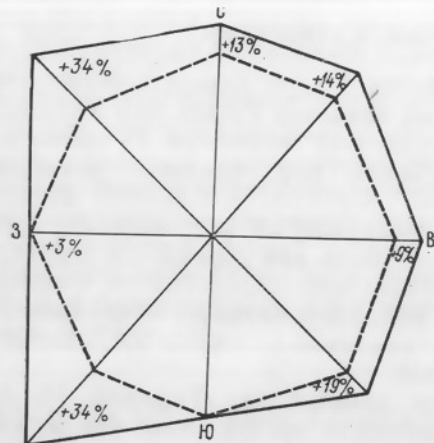


Рис. 1. Относительные изменения T_2 по основным направлениям ветра на уровне 850 гПа. Летний период, $h_0 > 50^\circ$.

Штриховой линией показано значение $T_2 = 4,5$ (100 %), цифры в поле графика — приращение T_2 (%).

Наибольшие значения фактора мутности ($\bar{T}_2 = 6,1$) наблюдаются при юго-западном и северо-западном направлениях ветра (рис. 1). Следует отметить, что относительно низкие значения мутности атмосферы ($\bar{T}_2 = 4,5$) для аграрной Херсонской области на 22 % превышают значения $\bar{T}_2$ для Москвы и на 16—17 % для Карадага и Киева [2]. Единичные минимальные значения $\bar{T}_2 = 2,5 \dots 3,0$ были зафиксированы на территории области во время затока арктического воздуха в ныряющих циклонах.

Наиболее резко прозрачность атмосферы меняется в случае смены ВМ и направления переноса (табл. 1). При этом значения P_2 и T_2 практически не зависят от влагосодержания воздуха.

Оптическая толщина атмосферы ($\tau_{\Delta\lambda}$) над территорией области летом соответствует условиям очень низкой прозрачности атмосферы. Среднее значение $\bar{\tau}_{\Delta\lambda}$, равное 0,56, на 37 % выше среднего сезонного значения $\bar{\tau}_{\Delta\lambda}$ для Москвы и на 52 % выше, чем в Киеве [2].

Между P_2 и $\tau_{\Delta\lambda}$ существует линейная зависимость (при коэффициенте корреляции 0,81)

$$\tau_{\Delta\lambda} = -1,67P_2 + 1,56. \quad (8)$$

Таблица 1

Примеры изменения прозрачности атмосферы на территории Херсонской области в зависимости от ВМ и направления ветра на уровне 850 гПа

До смены ВМ					После смены ВМ					$\Delta \bar{P}_2 \%$
1	2	3	$\bar{W}$ см	$\bar{P}_2$	1	2	3	$\bar{W}$ см	$\bar{P}_2$	
кУВ	В	10	3,0	0,61	мТВ	ЮЗ	0	2,8	0,51	-16,2
мТВ	ЮЗ	13	2,4	0,47	кУВ	С, СЗ	3	1,9	0,59	26,0
кУВ	СВ	2	3,1	0,66	мТВ	ЮЗ	2	2,6	0,52	-20,3

Примечание. 1 — название ВМ по очагу ее формирования, кУВ — континентальный умеренный воздух, мТВ — морской тропический воздух; 2 — направление ветра на уровне 850 гПа; 3 — период нахождения ВМ над территорией области, дни.

Аналогичный характер зависимости был установлен для Москвы [2].

Аэрозольная компонента ослабления радиации в среднем за летний период равна 0,44. Это значение указывает на наличие

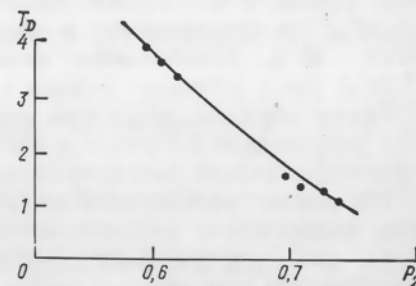


Рис. 2. Зависимость аэрозольной мутности (T_D) от коэффициента прозрачности (P_2) на примере Арабатской Стрелки (Азовское море).

большого количества твердого аэрозоля в атмосфере над территорией области.

Обусловленность оптического состояния атмосферы запыленностью подтверждается также линейной зависимостью между P_2 и T_D (рис. 2).

Выявленные изменения $\bar{\tau}_{\Delta\lambda}$ и $\bar{\tau}_a$ (табл. 2) свидетельствуют о значительной зависимости оптического состояния атмосферы от переноса загрязняющих веществ со стороны промышленных центров.

Таблица 2

Аэрозольная толщина атмосферы на уровне 850 гПа

Направление ветра . . .	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
$\bar{\tau}_a$ %	145	145	122	128	100	180	100	180

Примечание. За 100 % принята $\bar{\tau}_a$ при южном направлении ветра.

3. Изменение прозрачности атмосферы на территории области в летний период

Для выявления закономерности пространственного распределения характеристик прозрачности атмосферы предварительно была проведена оценка изменчивости P_m на основе результатов наблюдений на четырех сетевых актинометрических станциях: Херсон, Аскания-Нова, Велико-Анадоль и Полтава. С этой целью были рассчитаны относительные приращения коэффициентов прозрачности ($\Delta P_m/P_m$) в стандартные сроки актинометрических наблюдений для каждой пары станций (объем выборки составлял 212 величин). Причем оценка $\Delta P_m/P_m$ проводилась без учета расстояний между станциями и полученные значения характеризуют возможный диапазон изменения P_m в фиксированные сроки на расстоянии от 96 до 345 км. Параллельно, также на основе $\Delta P_m/P_m$, оценивалась временная изменчивость коэффициента прозрачности на каждой станции за сутки (объем выборки составлял 119 величин) и за неделю (объем выборки — 131 величина).

Полученные эмпирические распределения $\Delta P_m/P_m$ характеризуются резко выраженной левой асимметрией [7]. Средние значения $\Delta P_m/P_m$ за сутки в одном пункте и за один срок по пространству равны 9 %. Также сопоставимы максимальные значения $\Delta P_m/P_m$: по пространству в один срок — 42 %, в одной точке за сутки — 38 %. Наибольшие изменения прозрачности отмечаются в одной точке в течение недели и достигают 59 %.

Таким образом, даже при интерпретации снимков с ИСЗ мелкого разрешения оптическое состояние атмосферы на конкретной территории нельзя рассматривать как однородное.

На основе результатов маршрутных измерений были рассчитаны аналогичные характеристики изменения прозрачности атмосферы для P_2 в пределах территории области. При этом за опорную станцию принималась точка на берегу Каховского водохранилища (п. Первомаевка). Средние значения $\Delta P_2/P_2$ составляют $\pm (7-10) \%$, максимальные достигают $\pm 30 \%$, т. е. сопоставимы с изменениями прозрачности атмосферы, выявленными при сравнении удаленных друг от друга на значительные расстояния станций, а также с колебаниями P_2 в одной точке. Поселки городского типа, которые являются наиболее распространенным видом крупных населенных пунктов в Херсонской области, не оказывают существенного влияния на пространственное распределение прозрачности атмосферы. Значения $\Delta P_2/P_2$ в пределах этих поселков не превышают 3—6 %, снижаясь в центре поселка и на подветренной его окраине.

Характерной чертой поля прозрачности атмосферы является независимость относительных изменений P_2 от удаленности от опорной станции. В большей степени колебания прозрачности на территории области связаны с направлением ветра на уровне 850 гПа и выраженностью шлейфа загрязнения от крупных промышленных центров.

При юго-западном ветре на территорию области выносятся воздух, обогащенный аэрозолем промышленного происхождения со стороны Херсона, при северо-западном — со стороны Кривого Рога, при северо-восточном — от Донбасса, при северном — со стороны Запорожья и Энергодара.

При северо-западном мощном переносе загрязненного воздуха от Кривого Рога шлейф захватывает северную и северо-восточную части области, шлейф от Херсона простирается в центр области. Вне границ шлейфа P_2 в среднем увеличивается до 10—20 % по

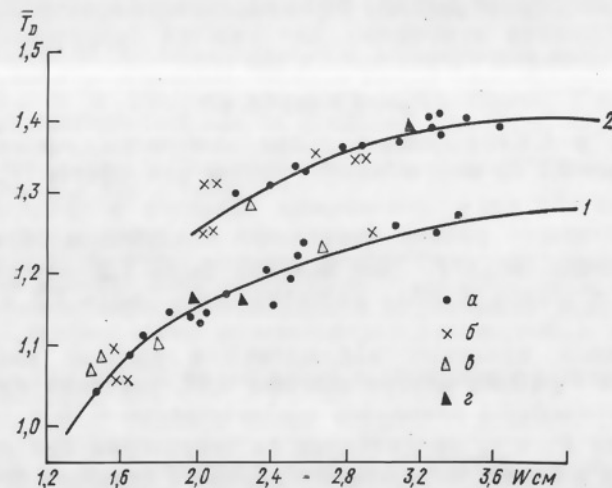


Рис. 3. Соотношение «сухой» мутности (T_D) и влагосодержания (W) при разной прозрачности атмосферы.

1 — Азовское море; 2 — Каховское водохранилище.
а) $P_2 < 0,625$; б) $P_2 = 0,625 \dots 0,674$; в) $P_2 = 0,675 \dots 0,721$; г) $P_2 = 0,722 \dots 0,764$.

сравнению с участками, лежащими в пределах распространения шлейфа, а разница между экстремальными значениями P_2 достигает 30 %.

При юго-западном переносе шлейф от Херсона захватывает часть территории, прилегающей к Каховскому водохранилищу. В этом случае колебания P_2 достигают $\pm 20 \%$.

На юго-восточную часть области обычно загрязнение от крупных промышленных центров не распространяется. В среднем за летний период прозрачность атмосферы на побережье Азовского моря (АМ) примерно на 10 % выше, чем в районе Каховского водохранилища (КВ). Значения P_2 в этих двух районах области связаны следующим соотношением

$$\bar{P}_{2\text{АМ}} = 0,925\bar{P}_{2\text{КВ}} + 0,09. \quad (9)$$

При равном влагосодержании атмосферы и равных значениях P_2 на побережье Азовского моря вклад аэрозольного ослабления радиации («сухой» мутности) на 10—14 % меньше по сравнению с северными и центральными районами (рис. 3).

Увеличение аэрозольной толщины атмосферы в районе Каховского водохранилища способствует увеличению полной оптической толщины атмосферы (τ) при $W=2 \dots 3$ см на 25 % по сравнению с τ на побережье Азовского моря ($\tau=0,32$ и $0,24$ соответственно).

4. Влияние оптического состояния атмосферы на спектральную передаточную функцию атмосферы

На примере конкретного снимка с ИСЗ «Метеор» среднего разрешения¹ в диапазоне 500—600 нм (где особенно проявляется влияние атмосферной дымки) была рассчитана спектральная передаточная функция атмосферы для участка территории, находящейся под шлейфом загрязнения и вне его

$$P'_\lambda = CK(z)/CK(0), \quad (10)$$

где $CK(z)$ и $CK(0)$ —спектральные контрасты, измеренные на высоте менее 0,1 км и на верхней границе атмосферы [7].

Значения P'_λ для сравниваемых объектов в пределах одного административного района изменялись следующим образом: для объектов почва—вода P'_λ вне шлейфа была 1,2, внутри шлейфа 4,7, а для объектов желтая растительность—вода 1,3 и 5,5 соответственно.

По данным наземных наблюдений в полдень вне шлейфа загрязнения $P_2=0,60$; внутри шлейфа 0,42, значения аэрозольной толщины атмосферы равнялись соответственно 0,16 и 0,68.

Различия P'_λ и τ_a проявляются на территории при расстоянии менее 30 км в случае выраженного переноса аэрозоля промышленного происхождения. При этом увеличение в 1,5 раза аэрозольной толщины атмосферы сопровождается 2,5—4-кратным увеличением передаточной функции атмосферы.

Из полученных результатов следует вывод о том, что нельзя использовать некоторое среднее значение передаточной функции или τ при проведении радиационной коррекции.

Таким образом, изучение оптического состояния атмосферы на примере тестовой территории Херсонской области показало, что поле прозрачности атмосферы нельзя рассматривать как однородное. Амплитуды возможных колебаний прозрачности атмосферы во времени и в пространстве сопоставимы между собой. Это накладывает определенные требования к выполнению радиационной коррекции, заключающиеся в том, что необходимо учитывать в каждом конкретном случае направление ветра на высоте 850 гПа и связанный с ним возможный вынос на территорию аэрозолей промышленного происхождения. Региональным является вывод о преобладании изменений аэрозольной компоненты ослабления радиации по сравнению с изменением атмосферы.

Учитывая региональные особенности отдельных тестовых территорий, необходимо обеспечить на них проведение исследований

¹ Снимок был обработан на комплексе «Оптроникс—Периколор» сотрудником ЛАМ О. М. Щербенко.

пространственно-временной изменчивости оптического состояния атмосферы с целью систематизации данных об оптическом состоянии атмосферы в зависимости от общециркуляционных факторов и местных условий. В принципе такая информация должна храниться в региональных банках данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумова Г. М., Евневич Т. В., Никольская Н. П. Влияние города на прозрачность атмосферы.— М.: Изд-во МГУ, 1983.— 96 с.
2. Аверкиев М. С., Евневич Т. В. Определение аэрозольной и влажной мутности реальной атмосферы.— Метеорология и гидрология, 1973, № 12, с. 53—58.
3. Белецкий Ф. А. Актинометрические характеристики воздушных масс.— Метеорология и гидрология, 1973, № 12.
4. Гришко В. И. Прозрачность атмосферы на Украине и в Молдавии.— Труды УкрНИГМИ, 1967, вып. 65, с. 40—58.
5. Дмоховский В. И., Иванов В. А., Ивлев Л. С. Вертикальная структура аэрозоля в районе промышленного центра Запорожья.— Труды ГГО, 1974, вып. 332, с. 73—81.
6. Дроздов О. А., Григорьев А. С. Влагооборот в атмосфере.— Л.: Гидрометеиздат, 1963.
7. Иванян Г. А. Учет влияния атмосферы на спектральные контрасты в задачах дистанционного зондирования поверхности Земли.— В кн.: Дистанционное зондирование атмосферы и подстилающей поверхности. Тез. докл. XI Всесоюз. совещ. по актинометрии. Таллин, 1980, с. 32—35.
8. Кульбах С. Теория информации и статистика.— М.: Наука, 1967.
9. Пивоварова З. И. Радиационные характеристики климата СССР.— Л.: Гидрометеиздат, 1977.
10. Сакали Л. И. Тепловой баланс Украины и Молдавии.— Л.: Гидрометеиздат, 1970.— 334 с.
11. Сакали Л. И., Семенова А. П. и др. Некоторые особенности влагооборота на территории Украины и Молдавии.— Труды УкрНИГМИ, 1982, вып. 188.
12. Сивков С. И. Методы расчета характеристик солнечной радиации.— Л.: Гидрометеиздат, 1968.— 299 с.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ПРОЕКТ ПРОГРАММЫ КОМПЛЕКСНОГО ПОДСПУТНИКОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИНТЕРЕСАХ АГРОМЕТЕОРОЛОГИИ

И. Ф. Берестовский, В. И. Никифоров

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды

Ю. Г. Симонов

Московский государственный университет

А. Д. Клеценко

Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии

Проведение широкомасштабных экспериментальных работ является основой современных научных исследований. Отличительными чертами экспериментальных работ при изучении природных

ресурсов Земли (ИПРЗ) дистанционными средствами является высокая техническая оснащенность, коллективный характер исследовательской работы, быстрый переход от чисто исследовательской деятельности к производственной, широкое применение физических и математических методов исследования. Характер экспериментальных задач при ИПРЗ отличается некоторой спецификой, заключающейся в том, что исследователи не могут ставить объект или исследуемое явление в заданные известные условия или изолировать объект от нежелательных воздействий. Поэтому экспериментальные исследования природных объектов при помощи дистанционной аппаратуры искусственных спутников Земли (ИСЗ) необходимо проводить в условиях тщательного комплексного планирования, поскольку физический контроль над объектом установить невозможно. Именно здесь планирование эксперимента, проведение обследований, сама схема выборки данных приобретает решающее значение. При этом должно быть ясно, что сам масштаб экспериментального исследования связан с необходимостью решения задач по минимизации применения большого количества технических средств, тщательной методической проработки порядка космических, авиационных подспутниковых и контактных наземных измерений на основе технологической схемы решаемой научно-исследовательской задачи.

Исходными данными к программе комплексного подспутникового эксперимента являются:

- формулирование цели экспериментальной работы, планируемых результатов работ и видов выходной продукции;
- составление блок-схемы эксперимента с описанием привлекаемых технических средств, указанием сроков и района проведения работ;
- составление информационной схемы экспериментальных работ в виде диаграммы информационных потоков и их объемов;
- разработка перечня методик для производства измерений и наблюдений в ходе эксперимента;
- расчет финансовых затрат на аренду транспортных средств, фонд зарплаты, приобретение расходных материалов, оплату привлечения сторонних организаций и др.;
- разработка плана-графика проведения экспериментальных работ с указанием участников эксперимента и объемов их работы.

Предлагаемая общая методическая схема планирования экспериментальных работ в области ИПРЗ сложилась в ходе подготовки и проведения в 1981 г. комплексного космического эксперимента в Херсонской области, в котором обрабатывалась технологическая схема взаимодействия спутниковых, самолетных и наземных комплексов в рамках системы ИПРЗ для решения народнохозяйственных задач, получения оперативной информации и принятия хозяйственных решений (на примере сельского хозяйства).

Такая задача была поставлена в связи с тем, что по проблеме использования космической информации в агрометеорологии с целью оценки состояния сельскохозяйственных культур в веге-

тационный период и прогноза урожайности работает более десяти организаций различной ведомственной подчиненности. Этими ведомствами решаются однотипные задачи без должной координации действий, что приводит к распылению сил, средств и затрудняет решение проблемы в целом.

Такое положение дел не позволяло получить данные по единым методикам в наземных исследованиях, не удавалось получить единовременной информации со спутников, самолетов и наземных комплексов. Это затрудняло сопоставление данных измерений и не позволяло оценить оперативные и информационные возможности системы ИПРЗ в целом.

Экспериментальные работы 1981 г. позволили решить в научно-методическом плане поставленные вопросы, получить и обработать данные ИСЗ, авиационного комплекса и наземных измерений, выдвинуть ряд новых задач и сформулировать цель очередного этапа экспериментальных работ.

Новый эксперимент намечено проводить в соответствии со сроками сельхозработ по территории южных районов Украины, Ставропольского и Краснодарского краев.

Основной целью эксперимента является оценка возможности использования данных контрольно-измерительных полигонов (КИП) и многозональной съемки ИСЗ высокого (50 м) и среднего (250 м) разрешения на местности для расчета и передачи потребителю характеристик состояния озимой пшеницы (для последующего составления прогноза урожайности).

Основными задачами эксперимента являются.

1. Отработка методик проведения подспутниковых экспериментов.
2. Оценка информативности космической и самолетной сканирующей аппаратуры применительно к решению задач распознавания и оценки состояния сельскохозяйственных культур в районе проведения эксперимента.
3. Оценка метрологических характеристик космической и самолетной сканирующей аппаратуры в период проведения эксперимента.
4. Разработка технологий нормализации спутниковой информации за счет введения радиометрической и геометрической коррекций и географической привязки.
5. Отработка методов и технологий сбора наземных опорных данных на контрольно-измерительных полигонах и тестовых участках района эксперимента.
6. Разработка технологий совмещенной тематической обработки наземных опорных и спутниковых данных.
7. Получение характеристик оценки состояния озимой пшеницы и подготовка рекомендаций для пользователя.
8. Разработка исходных данных на перспективную аппаратуру ИСЗ, наземного комплекса автоматизированной обработки и разработка прикладного математического обеспечения комплекса технических средств.

В ходе эксперимента предполагается использовать технику и аппаратуру:

1) экспериментальные ИСЗ — многозональная сканирующая аппаратура среднего и высокого разрешения (ГосНИЦИПР);

2) самолет Ан-30 — многозональная фотокамера МКФ-6, самолетный сканер (ГосНИЦИПР);

3) вертолет Ка-26 — на борту фотометрическая аппаратура, аппаратура для определения проективного покрытия (ВНИИСХМ);

4) вертолет Ка-26 — на борту спектрометрическая аппаратура (ГосНИЦИПР);

5) автоматизированный информационно-измерительный комплекс (АИИК) (ГосНИЦИПР);

6) комплекс технических средств (КТС) «Диск» (ГосНИЦИПР).

В эксперименте предполагается участие организаций следующих ведомств: Госкомгидромет (ВНИИСХМ, ГосНИЦИПР); Госагропром СССР (ВНИИК); Минвуз СССР (МГУ). Полигонометрические работы намечено провести на территории Херсонской области.

Исследования проводятся в несколько этапов: подготовительный, основной, заключительный. Во время подготовительного этапа выполняются следующие работы:

— создание центрального штаба проведения комплексных подспутниковых экспериментов из представителей участников работ;

— согласование и утверждение программы работ между всеми участниками эксперимента;

— согласование конкретных сроков съемок;

— рассмотрение и утверждение методик сбора, систематизации и использования априорной информации;

— проведение метрологических работ со спектрометрической аппаратурой;

— расчет подспутникового следа экспериментального ИСЗ в районе работ и определение сроков съема информации с борта ИСЗ;

— определение сроков и маршрутов работы самолетов и вертолетов-лабораторий;

— обеспечение участников эксперимента необходимым картографическим материалом (карты нарезки полей и структуры землепользования всех районов Херсонской области. Масштаб 1 : 100 000);

— получение выкопировки планов землепользования всех хозяйств области с указанием на них или в таблицах структуры посевных площадей, расположения поливных площадей, схем полей севооборотов, площадей полей. Для полей озимой пшеницы указываются: даты сева, нормы высева, предшественник, способ сева, количество продуктивной влаги в почве во время сева, внесение удобрений, сорт, способ вспашки и состояние озимых на момент подачи информации по четырехбалльной системе: «плохое», «удовлетворительное», «хорошее», «отличное»;

— выбор тестовых полей для наземного обследования во время эксперимента, нанесение их на карту, предварительное фотографирование и дешифрирование полученных снимков;

— составление и отладка математических программ для обработки данных наземного обследования и фотометрических данных. Подготовка вычислительного центра области и обработка данных дистанционных и наземных измерений. Отработка методик обработки данных эксперимента.

Основной этап работы выполняется в следующие периоды:

— конец апреля—начало мая, выход в трубку озимых (общая программа эксперимента, частные программы ГосНИЦИПР, ВНИИСХМ, ВНИИК, МГУ);

— конец мая—начало июня, цветение и начало колошения озимой пшеницы (общая программа эксперимента, частные программы ГосНИЦИПР, ВНИИСХМ, ВНИИК, МГУ).

В период основного этапа подспутникового эксперимента производится:

— космическая съемка с экспериментальных ИСЗ;

— фотосъемка с самолетов-лабораторий Ан-30, спектрометрическая съемка вдоль утвержденных трасс с самолетов Ил-14, Ан-2, вертолетов Ка-26;

— аэровизуальные работы для выявления структур землепользования и состояния сельскохозяйственных культур на момент съема информации с ИСЗ;

— наземные и фотометрические работы;

— наземные фотометрические работы на эталонных полях по утвержденным общим и частным программам.

На заключительном этапе полученная информация обрабатывается на ЭВМ и картгруппой. Составляются карты состояния полей и передаются потребителям космической информации.

На основе собранных эталонов и дешифрованных космических снимков составляется карта состояния полей области, карты сравнительной характеристики хозяйств и районов. Областным штабом проводится оценка эффективности использования полученной информации.

Результаты эксперимента будут использованы:

— при разработке технического задания эскизного проекта «модуля» технических средств тематической обработки и интерпретации космической информации;

— для формулирования предложений по созданию постоянно действующего бортового комплекса аппаратуры ИСЗ;

— для разработки структуры банка данных подсистемы автоматизированной обработки данных ИСЗ в части опорной информации банка данных;

— для отработки отдельных позиций методики проведения подспутниковых экспериментов.

На основе результатов, полученных в ходе эксперимента, предполагается оценить экономическую эффективность использования системы ИПРЗ в агрометеорологии.

И. Ф. Берестовский

Государственный комитет СССР по гидрометеорологии
и контролю природной среды

При решении задач агрометеорологии спутниковую информацию можно эффективно использовать вместе с наземными данными для уточнения площадных запасов снега при оценке условий перезимовки и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур на весну. Наряду с этим в районах интенсивного сельскохозяйственного производства она окажет существенную помощь в оценке сезонного развития сельскохозяйственных культур и влияния засушливых условий на их состояние, а в полупустынных районах — в определении запасов пастбищной растительности на больших площадях. В отдельных случаях можно оценить также ход сельскохозяйственных работ. В связи с генерализацией мелких деталей отдельные сельскохозяйственные поля плохо различаются на снимках малого разрешения (>1000 м), но при достаточной насыщенности территории растительностью они придают ее изображению определенный рисунок, зависящий от состояния и распределения растительности в момент съемки. Снимки среднего разрешения при благоприятных условиях съемки позволяют выделять отдельные крупные поля. Большие возможности возникают при работе с информацией высокого разрешения.

Разработке методов использования спутниковой информации в агрометеорологии был посвящен ряд научно-исследовательских работ [2, 3, 7], основное информационное обеспечение которых велось по данным, полученным в процессе специально проведенных подспутниковых экспериментов (ПЭ).

В интересах агрометеорологии с 1975 г. в системе Госкомгидромета был проведен ряд ПЭ, которые решали следующие задачи:

- определение спектральных характеристик посевов с целью дистанционного дешифрирования их разновидностей [6];
- исследование радиоизлучения различных почв и покровов с целью определения запасов продуктивной влаги [5];
- оценка возможности распознавания некоторых сельскохозяйственных культур по материалам регулярных съемок [1];
- измерение коэффициентов спектральной яркости эталонных участков пустынных пастбищ [4, 8];
- распознавание естественных кормовых угодий, определение их состояния по многоспектральным изображениям [8].

Агрометеорологические эксперименты выполнялись по временным методикам и наряду с вопросами разработки методов интер-

претации космической информации отрабатывалась методика проведения комплексного агрометеорологического подспутникового эксперимента.

Наиболее показательным агрометеорологическим ПЭ является Комплексный космический эксперимент 1981 г. в Херсонской обл. Подобные эксперименты ранее в СССР не проводились.

Цель эксперимента

Основная цель эксперимента состояла в отработке технологической схемы взаимодействия спутниковых, авиационных и наземных комплексов с целью решения следующих задач:

- оценка условий перезимовки озимых культур;
- определение запасов влаги в метровом слое и поверхностной увлажненности почвы;
- оценка состояния (запасы биомассы, засоренность, изреженность, полегание) и продуктивности посевов озимой пшеницы;
- оценка посевов сельскохозяйственных культур, пораженных болезнями и вредителями.

Кроме того, в процессе эксперимента планировалось выполнение следующих работ:

- сверка методик измерений и аппаратуры;
- оценка технических возможностей получения оперативной информации и сроков доведения ее до потребителей;
- оценка эффективности использования аэрокосмических данных;
- уточнение технических заданий на бортовую и наземную измерительную аппаратуру.

Анализ и оценка качества спутниковой информации

В период эксперимента получена спутниковая информация среднего и высокого разрешения.

Для выяснения возможностей распознавания озимых культур по спутниковым данным среднего разрешения отбирались снимки за 21 мая, в которые вошла вся территория Херсонской области. На снимках была дешифрована часть центральной тестовой зоны. На основании данных аэровизуального обследования на снимках в пределах выделенной территории дешифрован ряд отдельных полей, занятых различными сельскохозяйственными культурами. Минимальный размер полей, различимых на космическом снимке среднего разрешения, составляет примерно 600×600 м. Наземные обследования, подтверждающие аэровизуальные наблюдения, выполнялись случайной-диагональной выборкой с определением основных параметров состояния озимой пшеницы: густоты, проективного покрытия, высоты посевов, относительной площади поверхности листьев. Поскольку на изображениях среднего разрешения многие сельскохозяйственные поля визуально не опознаются, то

уточнение пороговых уровней, полученных по гистограммам, можно провести путем сопоставления со статистическими данными о структуре угодий на тестовом участке. Для получения по тестовому участку опорных данных о структуре угодий использовались результаты оперативных аэровизуальных обследований и данные районных управлений сельского хозяйства. Определение по изображениям площадей с различным состоянием сельскохозяйственных культур проводилось по такому же принципу, как и выделение площадей с различными видами угодий. Дисперсия оптических плотностей в пределах изображения опознанных сельскохозяйственных культур зависит от их состояния. Оптическая плотность угодий с хорошим состоянием стеблестоя отличается от оптической плотности угодий с плохим состоянием тем, что позволяет различать их на изображениях.

Сопоставление результатов экспериментальной обработки изображений среднего разрешения с наземными данными показало хорошую сходимость. Полученные материалы свидетельствуют о возможности использования изображений среднего разрешения для определения структуры угодий и оценки состояния сельскохозяйственных культур на сравнительно больших площадях. Однако для решения данного вопроса требуется провести еще ряд научно-методических работ. В частности:

- определить оптимальные сроки для распознавания видов сельхозугодий;
- отработать методику выделения сельхозугодий по пороговым уровням оптической плотности;
- разработать методику использования двух или нескольких спектральных диапазонов для распознавания и оценки состояния сельскохозяйственных культур.

Спутниковые данные высокого разрешения вначале проходили предварительную обработку, которая заключалась в коррекции изображений. Целью коррекции было снятие строчности, резко выраженной на исходной информации. Коррекция проводилась на экспериментальном комплексе обработки изображений с использованием специальных программ. В результате коррекции к дальнейшей обработке принимались изображения, полученные за 9 и 16 июня. Из четырех съемочных зон отобраны две 0,7—0,8 и 0,8—1,1 мкм, из которых сформулированы двухзональные файлы.

Распознавание проводилось по специальной методике, разработанной в ГосНИЦИПР.

Для этого:

1. Посевы озимой пшеницы разделялись на два класса:
 - с высокой степенью проективного покрытия (80—100 %);
 - с умеренным проективным покрытием (60—80 %).
2. Выбирались тестовые участки, сравнимые с размерами сельскохозяйственных полей.
3. Число тестовых участков составляло:
 - по изображению за 9 июня — по одному на каждый класс;
 - за 16 июня — озимая пшеница умеренного проективного по-

крытия и черный пар — по три участка; озимая пшеница высокого проективного покрытия — два участка.

После проведенного распознавания и сравнения результатов с авиационными и наземными данными был сделан вывод, что за 9 июня поля озимой пшеницы были правильно классифицированы в 88 % случаев, а по данным за 16 июня — в 85 % случаев. Средний процент верно распознанных элементов для правильно классифицированных полей составляет за 9 июня около 75 %, а за 16 июня около 85 %.

Проведенный анализ показал, что качество распознавания посевов озимой пшеницы можно считать удовлетворительным, и использованный метод рассматривать как возможную основу для дальнейших разработок.

Авиационные подспутниковые съемки

Аэрофотосъемочные работы на территории Херсонской области выполнялись в три срока:

- 9—10 апреля в фазу выхода в трубку озимых посевов;
- 15—17 мая в фазу колошения;
- 6—9 июня в фазы цветения и молочно-восковой спелости;

Получен достаточно большой материал многозонального и спектрального фотографирования. Значительный интерес представляют материалы съемки тестовых участков, обеспеченных данными синхронных наземных исследований.

Основная аэросъемка велась камерой МКФ-6, которая была впервые установлена на самолете в ГосНИЦИПР в 1980 г., поэтому значительное внимание уделялось разработке методических вопросов проведения многоспектральной съемки. Аэрофотосъемка проходила при различных условиях (масштаб съемки, высота и азимут солнца, состояние атмосферы) в различные сезоны. Съемка тестовых участков производилась с высот от 2000 до 7000 м и в обязательном порядке сопровождалась топографической аэрофотосъемкой. Полученные материалы использовались для фотометрических измерений и для машинной обработки.

Авиационные и наземные спектрометрические измерения

Измерение коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в участках спектра 0,4—1,1 мкм проводилось для решения следующих задач:

1. Расширение массива данных о спектральной отражательной способности сельскохозяйственных объектов, на основе которого может быть создан региональный каталог КСЯ с целью формирования обучающего массива при реализации различных алгоритмов распознавания спектральных образов.
2. Экспериментальная проверка возможностей решения обратной задачи — определение по отраженной радиации видовых фено-

логических и фитометрических характеристик сельскохозяйственных посевов, т. е. ключевой проблемы дистанционной индикации в интересах агрометеорологии.

Доказательство возможности решения обратной задачи и определение точности восстановления по КСЯ различных характеристик посевов является необходимой предпосылкой для разработки оперативных методов сбора данных о состоянии посевов с помощью дистанционной аппаратуры, работающей с малых высот. В свою очередь эти данные необходимы для дальнейшей интерпретации информации, полученной с помощью аппаратуры, установленной на летательных средствах, работающих на больших высотах (в том числе и со спутников).

Во время эксперимента вертолетный комплекс выполнял измерения с высоты 80—100 м. Диаметр площадки на земле, попадающей в поле зрения прибора, составлял 5 м. Из-за движения вертолета измерения одной серии распространялись на полосу длиной 30 м.

Самолетный комплекс выполнял измерения с высоты 150—200 м. Диаметр площадки на земле, попадающей в поле зрения прибора, равнялся 30 м.

С помощью наземной аппаратуры проводились измерения с высоты одного метра над верхней границей растительного покрова. Диаметр площадки, попадающей в поле зрения прибора, равнялся 0,15 м.

Это первый опыт сопряжения вертолетно-самолетной и наземной индикации состояния одних и тех же объектов, выполненной в течение одной фазы. Основной акцент при интерпретации вертолетно-самолетных и наземных измерений сделан на информативность значений КСЯ для классификации посевов по проективному покрытию. Такая постановка обратной задачи весьма актуальна в связи с тем, что, с одной стороны, в определенные периоды вегетации проективное покрытие (или относительная площадь фитоэлементов) тесно коррелирует с запасами фитомассы и биологической урожайностью, с другой — проективное покрытие, характеризуя соотношение площадей участков с оголенной почвой и занятых растительностью, является фитометрическим параметром, прямо влияющим на значения КСЯ сельскохозяйственных объектов. По результатам измерений подтверждено, что диапазон 0,8—1,1 мкм является наиболее информативным с точки зрения решения задач классификации сельскохозяйственной растительности и оценки проективного покрытия. На основе этого результата делается вывод о перспективности канала 0,8—1,1 мкм аппаратуры, устанавливаемой на ИСЗ для решения выше указанных задач.

Из анализа сезонной динамики состояния посевов в период летних фаз и сопоставления амплитуд пространственно-временной изменчивости (в околополуденные часы) КСЯ и комплексных параметров вытекает требование к строгой сопряженности всех измерений при работе на различных уровнях.

В перспективе использование самолетно-вертолетного комплекса, работающего на малых высотах, может способствовать повышению оперативности сбора информации о состоянии посевов, дополняющей прямые наземные измерения при отказе от аэровизуальных наблюдений. С этих позиций наземное спектрометрирование с помощью приборов с небольшим углом зрения малоперспективно. Однако наземные измерения необходимы для улучшения качества интерпретации результатов дистанционного обследования, так как при работе с наземной аппаратурой возможно решение следующих задач:

- постановка и проведение имитационных опытов;
- более детальный учет комплекса фитометрических параметров, определяющих в итоге изменение КСЯ;
- выделение спектральных диапазонов, в которых КСЯ инвариантны к изменению какого-либо фитометрического параметра и яркости почвы.

На настоящий момент нерешенными являются два ключевых вопроса:

- приведение данных измерений КСЯ, выполненных для одного объекта, к стандартным условиям;
- сопоставление данных дистанционных измерений, полученных на различных уровнях.

Для их решения необходимо:

1. Провести специальные эксперименты с целью получения статистически надежных данных для систематизации эмпирических зависимостей КСЯ от условий освещенности и яркости почвы для разных объектов и их состояний; эти зависимости должны быть получены для различных высотных уровней по измерениям, выполненным приборами с разным углом зрения.
2. Обеспечить метрологическую увязку аппаратуры и строгое соответствие спектральных каналов, используемых для измерения КСЯ в разных комплексах, а также временную сопряженность измерений на различных высотных уровнях.
3. Провести измерения с различных высотных уровней при обеспечении равного размера площадки на земле, попадающей в поле зрения прибора.
4. Провести измерения с одного высотного уровня при разном разрешении аппаратуры.

Радиометрические измерения влагозапасов почв

С целью определения запасов продуктивной влаги в метровом слое почвы в период с 15 апреля по 25 мая на самолете-лаборатории Ил-18 проводилась радиотепловая съемка Херсонского полигона. Выполнены две съемки: первая 21—22 апреля, вторая 19—22 мая. Радиотепловое излучение измерялось с помощью бортового радиометра дециметрового диапазона, работающего на длине волны $\lambda = 18$ см. Запись результатов измерений производилась на технический носитель с последующей обработкой на ЭВМ ЕС-1022.

Обработка завершалась непосредственно после полета. Полеты выполнялись на высоте 5700 м равноудельными галсами запад—восток (апрель) и север—юг (май) так, чтобы покрыть равномерной сеткой территорию Херсонской области. Осреднение результатов измерений производилось по минутным интервалам, что с учетом высоты полета, скорости и параметров антенны соответствовало пространственному разрешению $1,5 \times 8$ —10 км. Для определения влагозапаса использовалась специальная методика, разработанная в ГГО.

В данных работах проведено недостаточно корректное сравнение результатов дистанционных и наземных измерений (выполненных на стационарных агрометстанциях). Первые получены с осреднением $1,5 \times 8$ —10 км и с использованием средних для данных почв агрогидрологических характеристик. Вторые — локальные, для отдельных полей, при их вычислении проводилось осреднение продуктивного влагозапаса под различными культурами, а вариации продуктивного влагозапаса при этом достигают 50 мм. Кроме того, дистанционные измерения проводились в апреле и мае несколько позже наземных. Однако, несмотря на некоторую несопоставимость данных, сделаны определенные выводы относительно полученных результатов. Порядок величин правильно отражает агрометеорологическую ситуацию весны 1981 г. Характер вариаций влагозапаса по территории Херсонской области идентичен при обоих (дистанционных и наземных) измерениях. Таким образом, полученные карты влагозапасов содержат достоверную информацию о запасах влаги в почве.

Аэровизуальные обследования

Аэровизуальные обследования в период эксперимента обеспечивали решение следующих задач:

1. Получение реальной картины распределения сельскохозяйственных культур.
2. Оценка состояния сельскохозяйственных культур по тестовым районам для дешифрирования изображений высокого разрешения, полученных с ИСЗ «Метеор» и аэроснимков МКФ-6.
3. Получение средних характеристик состояния посевов озимой пшеницы, а также определение степени пораженности посевов хлебной жучелицей и обыкновенной полевкой.

Аэровизуальные обследования проводились двумя методами — методом сплошного обследования тестовых зон и методом случайной выборки по области. Оба эти метода применялись в два периода — апреле и мае—июне.

Целью метода сплошного обследования является получение картины распределения сельскохозяйственных культур и оценка их состояния. Метод заключается в облете и оценке состояния всей генеральной совокупности полей тестовой зоны либо в облете и оценке состояния всех полей определенной культуры. В результате получают карты состояний полей тестовой зоны. По мате-

риалам облета тестовых участков за апрельский, майский, июньский сроки составлены схемы размещения посевов.

Целью метода случайной выборки является получение средних характеристик состояния озимой пшеницы и структуры землепользования по области, а также оценка степени пораженности посевов вредителями (мыши и т. д.). Метод заключается в облете и оценке состояния полей с какой-либо культурой (в данном случае с озимой пшеницей) либо в фиксировании всех культур, над которыми проходит маршрут облета. Маршрут случайной выборки прокладывается таким образом, чтобы в пределах административного района обследовалось около 100 полей. По полученным материалам составлялись карты:

- изреженности посевов;
- густоты посевов;
- общего состояния посевов;
- заселенности посевов обыкновенной полевкой;
- поражения полей жучелицей.

Материалы наблюдений использовались для привязки космических данных, а также как опорная информация при распознавании снимков среднего и высокого разрешения. Это позволяет сделать вывод, что в будущей системе сбора опорных данных аэровизуальные наблюдения займут соответствующее место. В дальнейшем должны быть разработаны методики аэровизуальных наблюдений по их использованию в специализированном автоматизированном измерительном комплексе, предназначенном для сбора опорных данных, так как в состав этого комплекса входит вертолет.

Особенности наземных наблюдений в период проведения эксперимента

Основной задачей наземных работ на тестовых полях является получение средних и вероятностных характеристик различных фитометрических параметров, определяющих в совокупности состояние объекта с заданной точностью. Характер и размер объекта могут различаться в зависимости от разрешающей способности бортовой аппаратуры. При работе под информацию среднего (150—250 м) и высокого (80 м) разрешения основной объект наземных исследований при сборе опорных данных о состоянии сельскохозяйственных объектов — поле, занятое определенной культурой, т. е. агрофитоценоз в целом. В этом случае целью наземных работ будет получение количественных характеристик состояния поля в целом, т. е. средних по полю значений всех фитометрических параметров, определенных с заданной точностью. Для получения их могут быть применены либо прямые методы (метод учетных площадок), либо расчетные (метод модельных растений).

При наземном обследовании, которое, помимо стандартной агрометеорологической сети, проводилось специальными экспедиционными группами, были получены количественные значения основных фитометрических параметров, характеризующих состоя-

ние посевов озимой пшеницы, для последующего их сравнения с данными аэровизуального обследования, самолетного спектрометрирования, аэрокосмической съемки и нахождения связей между ними.

В течение первого цикла наземных работ (13—23 апреля) обследовано 26 полей. Поля, на которых проводились работы (тестовые поля), выбирались заранее по данным агроотделов районов Херсонской области. Они представили карты запланированной структуры посевных площадей на 1981 г. с указанием полей озимой пшеницы и их состояния на период возобновления вегетации, согласно которому и выбирались поля.

Второй цикл (период колошение—начало созревания, 5—20 июня) отличался от первого разнообразием методических подходов к получению значений фитометрических параметров. Частично работы продолжались в том же плане—получение средних характеристик по полю, частично фитометрические характеристики на поле получались на отдельных цветковых контурах, однородных по проективному покрытию, где выбирались строго привязанные на местности большие учетные площадки 2×2 м (пиксели). Всего обработано 14 пиксел.

Полученный материал имеет хорошее качество, сопоставим с космической информацией высокого разрешения, полученной 9 июня 1981 г., с аэроснимками (МКФ-6) с четырех высот, со спектрометрическими данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подробное рассмотрение результатов Херсонского эксперимента показывает всю сложность технологии проведения подспутниковых экспериментов в интересах агрометеорологии. Несмотря на то что при его организации планировалось максимальное решение задач, все-таки осталось еще много вопросов, которые предстоит отработать в будущих экспериментах. Следует отметить, что с помощью агрометеорологических подспутниковых экспериментов совершенствуются не только методы интерпретации космической информации, но и отрабатываются методы сбора опорной информации. Наличие опорных данных является неотъемлемой деталью системы, ведущей дистанционное зондирование Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисоглебский Г. И. Некоторые результаты визуального дешифрирования телевизионных многозональных изображений растительного покрова, полученных с ИСЗ «Метеор».—Труды ГосНИЦИПР, 1976, вып. 2.
2. Борисоглебский Г. И., Козодеров В. В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур по спутниковым изображениям.—Метеорология и гидрология, 1982, № 3.
3. Виноградов Б. В. Дистанционное измерение фитомассы.—Исследование Земли из космоса, 1982, № 5.
4. Выгодская Н. Н. Зависимость проективного покрытия от зенитного угла.—Труды ГосНИЦИПР, 1983, вып. 13.

5. Кондратьев К. Я., Рабинович Ю. И., Шульгина Е. М. Определение влажности и запасов продуктивной влаги в почве по микроволновому излучению.—Труды ГГО, 1976, вып. 371.
6. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности.—Л.: Гидрометеониздат, 1982.
7. Клещенко А. Д. Оценка состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур по аэрокосмическим измерениям.—Метеорология и гидрология, 1983, № 1.
8. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.—Л., Гидрометеониздат, 1981.

КАРТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОПУСТЫНИВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Н. Г. Харин, Т. А. Бабаева

Институт пустынь АН Туркменской ССР

В решениях Майского (1982 г.) Пленума ЦК КПСС [3] уделяется большое внимание всемерному укреплению сельского хозяйства и повышению продуктивности сельскохозяйственных угодий. Выполнение этой задачи невозможно без рационального использования, охраны и воспроизводства природных ресурсов. В связи с этим совершенствование методов изучения процессов опустынивания приобретает большую актуальность. Процессы опустынивания сводятся в конечном итоге к деградации растительного покрова, что снижает продуктивность пастбищ. Ветровая эрозия, водная эрозия и засоление почв приводят к невозможности использования в сельском хозяйстве больших площадей.

Несколько слов о самом термине «опустынивание». Согласно последнему определению, «под опустыниванием понимается совокупность физико-географических и антропогенных процессов, приводящих к разрушению экосистем аридных и полуаридных областей и деградации всех форм органической жизни, что в свою очередь ведет к снижению природно-экономического потенциала этих территорий» [4].

Основные типы опустынивания—деградация растительного покрова, ветровая эрозия, водная эрозия, засоление почв и техногенное опустынивание. Причинами опустынивания можно считать недовыпас, перевыпас, вырубку деревьев и кустарников, сельскохозяйственное освоение земель, изыскательские, строительные и другие работы и природные процессы.

В качестве критериев оценки деградации растительного покрова могут быть приняты данные о растительности (снижение годичной продукции и урожайности пастбищ). Обязательным критерием деградации растительного покрова является изучение видового состава растительности. Изменение видового состава растительных ассоциаций определяет во многом опасность опустынивания [6]. Критериями оценки ветровой эрозии могут служить данные по

задернованности, проективному покрытию растительности и наличию язв дефляции. В качестве критериев оценки водной эрозии взяты состояния подстилающей поверхности, данные о смыве почвенного покрова и наличии оврагов. И наконец, для оценки засоления почв могут быть использованы данные по увеличению запасов солей в почве, минерализации грунтовых вод и снижению урожайности сельскохозяйственных культур.

Нами составлены две тематические карты: современного состояния опустынивания и опасности опустынивания территории Туркменистана. На первой из них дано современное состояние, степень (классы) опустынивания и его причины. Вторая карта показывает тенденцию в развитии опустынивания.

Материалы космических съемок служат необходимым источником для составления карт опустынивания. Так, карта опустынивания Туркменистана составлялась нами на основе космических снимков, полученных с ИСЗ «Метеор», ОС «Салют-4», ПКК «Союз-22», аэроснимков, тематических карт и литературных источников.

На первом этапе составления карт изучались литературные источники о состоянии опустынивания на территории Туркменистана, разрабатывалась легенда карты и количественные критерии для оценки процессов опустынивания.

На втором этапе в камеральных условиях дешифрировались космические снимки. При этом использовались эталонные аэроснимки районов, где ранее проводились исследования. Во время этих работ намечались участки, которые необходимо посетить в поле для проверки результатов камерального дешифрирования.

На третьем этапе в полевых условиях производилась проверка данных камерального дешифрирования аэрокосмических снимков и уточнялись предложенные ранее критерии опустынивания.

И наконец, четвертый этап охватывал работы по проверке карты опустынивания, внесению дополнений и изменений, которые были сделаны в процессе полевых работ. Составлялась окончательная легенда и производилось графическое оформление карты.

В литературе имелись данные о возможности изучения локальных пятен опустынивания вокруг колодцев по космическим снимкам «Салюта-4» [5]. По космическим снимкам «Метеора» среднего разрешения также удалось идентифицировать и замерить пятна опустынивания. На снимках они изображаются в виде светлых округлых пятен, благодаря чему относительно серый тон, которым изображаются песчаные пустыни, приобретает своеобразный пятнистый рисунок. В результате исследований в Центральных Каракумах было выявлено 200 колодцев, вокруг которых образовались пятна опустынивания [1]. Результаты статистической обработки выполненных измерений даются в табл. 1. Из таблицы видно, что наибольшее количество пятен входит в градацию 1,0—2,0 км. В Центральных Каракумах приколодезные пятна меньше по среднему значению диаметра, чем в междуречье Мургаб—Теджен и Юго-Восточных Каракумах.

Для изучения динамики процессов опустынивания на территории одного из районов Туркменистана использовались космические

Таблица 1

Некоторые характеристики показателей опустынивания (пятна вокруг колодцев) для отдельных районов

Район	Общее число пятен	Средний диаметр пятен, км	Среднее квадратическое отклонение, км	Распределение пятен по диаметру, км						
				<1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6	>6
Междуречье Мургаб—Теджен	66	2,21	$\pm 0,33$	6	32	18	5	1	3	1
Юго-Восточные Каракумы	94	2,16	$\pm 1,26$	1	55	28	6	2	—	2
Центральные Каракумы	200	1,32	$\pm 0,35$	33	163	4	—	—	—	—

снимки «Союза-22» и космические снимки «Лэндсата» в цветном синтезированном изображении. По этим снимкам оказалось возможным идентифицировать 14 колодцев, вокруг которых образовались пятна опустынивания [2]. Хотя средний размер пятен за период 1972—1976 гг. изменился мало, все же наблюдается тенденция к увеличению их размера (табл. 2).

Таблица 2

Характеристики показателей опустынивания (пятна вокруг колодцев) в Юго-Восточном Туркменистане, полученные по космическим снимкам «Лэндсат» и «Союз-22»

Снимки	Средний диаметр пятна, км	Среднее квадратическое отклонение, км	Общее число пятен	Распределение пятен по диаметру, км		
				1,1—1,5	1,6—2,0	>2,0
«Лэндсат» (1972)	1,58	$\pm 0,32$	14	7	4	3
«Союз-22» (1976)	1,72	$\pm 0,33$	14	2	11	1

По космическим снимкам возможно изучение техногенного опустынивания. Разбитые транспортом грунты подвергаются активной эрозии. В результате наших исследований в районе Заунгузских и Юго-Восточных Каракумов была выявлена и замерена территория, занятая техногенными дорогами.

Карта современного состояния опустынивания Туркменистана дает представление о подверженности территории республики процессам опустынивания.

Легенда карты составлялась следующим образом: классы опустынивания показывались фоновой окраской. Типы опустынивания и улучшение природной среды пустынь — внемасштабными условными знаками. Причины опустынивания показаны на карте буквенными индексами.

По нашему мнению, на карте необходимо выделить процессы, характеризующие улучшение современного состояния природной среды. Это имеет большое значение для пустынь СССР, где в боль-

шом объеме ведутся работы по освоению новых земель под орошаемое земледелие, создаются посадки леса на песках, проводятся работы по улучшению пустынных пастбищ и т. д.

Особо следует выделить на карте опустынивания территории с орошаемым земледелием. Именно на этих территориях происходят наиболее значительные изменения природной среды под влиянием хозяйственной деятельности. В том случае, когда в силу ряда объективных и субъективных причин на орошаемых землях развиваются процессы опустынивания, на картах они должны быть показаны с помощью особой системы условных знаков, отличающейся от показа процессов опустынивания на неорошаемых территориях.

По данным карты на территории Туркменистана наблюдаются следующие типы опустынивания: деградация растительного покрова, ветровая эрозия, водная эрозия, засоление почв и техногенное опустынивание. Площадь с фоновым уровнем (опустынивание отсутствует) составляет 35 % территории (табл. 3). Большая часть территории подвержена умеренному опустыниванию (16 %). Наиболее распространенным типом опустынивания является деградация растительного покрова (38 % территории республики).

Карта опасности опустынивания была составлена в том же масштабе, что и карта современного состояния. По сравнению с картой современного состояния критерий класса опустынивания заменен критерием опасности опустынивания и добавлен новый критерий — направленность процессов опустынивания по сравнению с современным состоянием. Причины опустынивания сводятся здесь к естественным (природным) и антропогенным. Карта составлялась на основе анализа карты современного состояния опустынивания, изучения космических снимков и литературных источников.

На карте опасность опустынивания показывается фоновой окраской. Внемасштабными условными знаками обозначаются типы опустынивания и улучшение природной среды пустынь. Причины изменений и направленность процесса опустынивания изображаются буквенными символами.

Большинство контуров этой карты совпадает с контурами на карте современного состояния. Можно сказать, что в некоторых районах не произойдет ухудшения по сравнению с современным состоянием. К ним, например, относятся крупные массивы подвижных песков и солончаки, где не ожидается изменения природных условий.

В ближайшие годы на значительной территории республики ожидается снижение темпов опустынивания. Расширится объем фитомелиоративных работ, улучшатся условия обводнения на пастбищах. Процесс опустынивания замедлится или будет остановлен. На орошаемых землях ожидается снижение темпов опустынивания.

Больше всего изменений показывает карта юго-западной части республики. Связано это с освоением новых земель в зоне Каракумского канала им. В. И. Ленина.

Таблица 3

Территории Туркменистана (км²), подверженные процессам опустынивания (%)

Классы опустынивания	Территории, охваченные опустыниванием						Другие категории земель					Итого
	деградация растительного покрова	ветровая эрозия	водная эрозия	засоление почв	техногенное опустынивание	лесные культуры на песках	защитные полосы в оазисах	улучшение природных условий в зоне пустынь	каналы влияния ирригации	заповедники	опустынивание отсутствует	
Площади, занятые водными поверхностями, населенными пунктами и пр.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10 131, 2,07	10 131, 2,07
Опустынивание отсутствует	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Слабое	19 588	16 093	16 262	2 023	—	4633	6624	23 355	13 548	—	123 865	172 026
Умеренное	4,01	3,30	3,33	0,41	—	0,95	1,36	4,78	2,78	—	25,38	35,25
Сильное	32 048	3 182	7 857	30 302	2981	—	—	—	—	—	—	53 966
Очень сильное	6,57	0,65	1,61	6,21	0,61	—	—	—	—	—	—	11,05
Сильное вокруг колодцев (0—5 % территории)	3 073	11 256	859	9 496	966	—	—	—	—	—	—	76 370
Очень сильное вокруг колодцев (5—10 % территории)	0,63	2,31	0,18	1,94	0,20	—	—	—	—	—	—	15,65
Сильное вокруг колодцев (0—5 % территории)	635	6 531	—	11 733	—	—	—	—	—	—	—	25 650
Очень сильное вокруг колодцев (5—10 % территории)	0,13	1,34	—	2,40	—	—	—	—	—	—	—	5,26
Сильное вокруг колодцев (0—5 % территории)	121 927	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18 899
Очень сильное вокруг колодцев (5—10 % территории)	24,98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3,87
Сильное вокруг колодцев (0—5 % территории)	9 131	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	121 927
Очень сильное вокруг колодцев (5—10 % территории)	1,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	24,98
Итого	186 402	37 062	24 978	53 554	3947	4633	6624	23 355	13 548	—	133 966	488 100
	38,19	7,59	5,12	10,97	0,81	0,95	1,36	4,78	2,78	—	27,45	100

Проведенные исследования показывают, что процессы опустынивания в нашей стране не носят катастрофический характер. Выявленные на территории республики очаги антропогенного опустынивания занимают сравнительно небольшую площадь.

В условиях плановой социалистической экономики тенденция в развитии процессов опустынивания на территории Туркменистана определена нами как убывающая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаева Т. А. Использование космических снимков «Метеор» для изучения процессов опустынивания в Туркменистане.— Проблемы освоения пустынь, 1982, № 6.
2. Бабаева Т. А. Изучение динамики процессов опустынивания по космическим снимкам.— Проблемы освоения пустынь, 1983, № 5.
3. Материалы Майского пленума ЦК КПСС 1982 года.— М.: Политиздат, 1982.
4. Освоение пустынь в СССР и борьба с процессами опустынивания.— В кн.: Материалы конференции ООН по опустыниванию, 29 августа—9 сентября, 1977, Найроби, Кения. М., 1977.
5. Харин Н. Г., Каленов Г. С. Изучение антропогенного опустынивания по космическим снимкам.— Проблемы освоения пустынь, 1978, № 4.
6. Харин Н. Г., Нечаева Н. Т., Николаев В. Н. и др. Методические основы изучения и картографирования процессов опустынивания (на примере аридных территорий Туркменистана).— Ашхабад: Ылым, 1983.

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОЦЕНКА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

Г. И. Борисоглебский

Государственный научно-исследовательский центр изучения природных ресурсов

А. Д. Клещенко, М. В. Бабий

Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии

Т. И. Сулейманов

Научно-производственное объединение космических исследований АН АзССР

1. Определение покрытости почвы зеленой растительностью

У большинства природных образований (почва, вода, снежный покров, облака) наблюдается постепенное увеличение или уменьшение отражательной способности при последовательном переходе от одного спектрального диапазона к другому. У зеленого растительного покрова наблюдается волнообразное изменение

спектральной отражательной способности: уменьшение в диапазонах 0,4—0,5 и 0,65—0,70 мкм и увеличение в диапазонах 0,55—0,60 и 0,80—1,00 мкм [6].

На космических изображениях подстилающей поверхности среднего разрешения (≈ 300 м) нами визуально проанализирована яркость ряда природных образований в спектральных диапазонах 0,5—0,7 и 0,7—1,1 мкм. Яркость опознанных образований учитывалась по тону их изображения по пятибалльной системе (табл. 1). В табл. 2 приводится средний балл яркости (тон) природных образований, в скобках указаны возможные пределы их изменений, в зависимости от состояния образований. Например, тон изображения растительного покрова на фоне черноземной почвы в диапазоне 0,7—1,1 мкм может меняться в зависимости от степени покрытости почвы от 2 до 5 баллов. Тон изображения воды в диапазоне 0,5—0,7 мкм может меняться в зависимости от степени замутненности взвешенными частицами от 2 до 5 баллов и т. д.

В табл. 2 приводятся также некоторые алгоритмы преобразования яркостей по совмещенным спектральным изображениям,

Таблица 1

Шкала визуальной оценки оптической плотности изображения природных образований

Визуальный признак (тон изображения)	Оптическая плотность, баллы
Белый	5
Светло-серый	4
Серый	3
Темно-серый	2
Черный	1

Таблица 2

Спектральная яркость природных образований (в относительных единицах — баллах)

Природное образование	Спектральный диапазон		Операционные действия		
	0,5—0,7	0,7—1,1	деление (0,7—1,1) (0,5—0,7)	сложение (0,5—0,7) + (0,7—1,1)	вычитание (0,7—1,1) — (0,5—0,7)
Облака, песок	5	5	1	10	0
Черноземная почва	2	2	1	4	0
Зеленая растительность (на фоне черноземной почвы)	2	5	2,5	7	3
		(2—5)	(1,0—2,5)	(4—7)	(0—3)
Пожелтевшая растительность (на фоне черноземной почвы)	5	5	1	10	0
	(2—5)	(2—5)	(1,0—2,5)	(4—10)	(0—3)
Вода	2	1	0,5	3	—1
	(2—5)		(0,2—0,5)	(3—6)	(от —1 до 4)

которые могут быть выполнены на электронно-измерительной системе «Периколор»: деление, сложение и вычитание яркостей по спектральным диапазонам. При желании можно ввести и ряд других алгоритмов преобразования яркостей.

Данные, приведенные в табл. 2, позволяют выбрать алгоритмы обработки для распознавания тех или иных природных образований. Например, в диапазоне 0,7—1,1 мкм облачный покров слабо

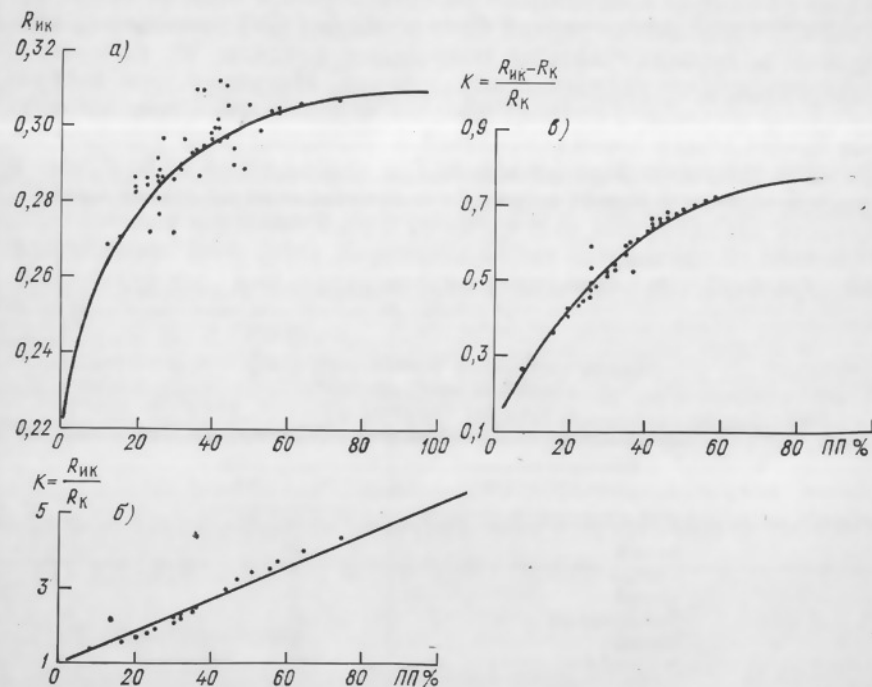


Рис. 1. Зависимость коэффициента яркости (а), отношений коэффициентов яркости (б) и контраста коэффициентов яркости (в) от проективного покрытия почвы (ПП) озимой пшеницей (по материалам наблюдений экспедиции МГУ на 6 апреля 1981 г. Генический и Новотроицкий тестовые участки).

отличается по тону от хорошо развитого растительного покрова. При делении значений яркостей (тона изображения) одного спектрального диапазона на другой облака и все типы почв будут четко отличаться от хорошо развитого травостоя. В то же время различные типы почв, облака и сухой снег при данном алгоритме обработки между собой не будут различаться (имеют один и тот же балл, равный единице). При сложении значений яркостей облака будут четко отличаться от зерновых культур, находящихся в фазе созревания, выгоревших (пожелтевших) трав и песчаных почв.

Наиболее целесообразно, как мы считаем, использовать отношения яркостей в двух спектральных диапазонах или контраст яркостей (рис. 1). Наиболее тесная связь покрытости почвы раститель-

ностью, как видно из рис. 1, наблюдается с отношениями коэффициентов яркостей. Близкая к ней, но несколько хуже, наблюдается связь с контрастом коэффициентов яркостей. Менее тесная связь покрытости почвы растительностью наблюдается с коэффициентом яркости в одном спектральном диапазоне, что, по-видимому, связано с неоднородностью отражательных свойств почвы. При использовании метода отношений яркостей все почвы, независимо от их типа, имеют величину, близкую к единице [5, 7, 8], в то время как в одном спектральном диапазоне их яркость меняется в широких пределах [8]. Тем не менее при наличии однородных почвенных условий могут быть использованы односпектральные изображения для выделения и оценки состояния сельскохозяйственных культур [1, 3, 5].

При оценке степени покрытости почвы зеленой растительностью по методу отношений яркостей в двух спектральных диапазонах суть задачи сводится к решению следующего уравнения:

$$K = aK_p + (1 - a)K_n, \quad (1)$$

где K — отношения яркостей при заданном значении покрытости почвы зеленой растительностью; K_p — отношения яркости максимально плотного растительного покрова; K_n — отношения яркости обнаженной почвы; a — доля яркости растительного покрова от общей исследуемой площадки.

Преобразовав уравнение (1), можно вычислить долю яркости растительности в интегральной яркости исследуемой поверхности

$$a = \frac{K - K_n}{K_p - K_n}. \quad (2)$$

Проверка зависимости (2) производилась на материалах наземных спектрометрических измерений, проводившихся с помощью 6-канального фотометра «Спектр» разработки ВНИИСХМ. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Фактические и рассчитанные по формуле (2) значения проективного покрытия озимой пшеницы. Период выход в трубку—колошение

Фактическое проективное покрытие, %	Рассчитанное проективное покрытие, %	
	R_{778}/R_{668}	R_{970}/R_{668}
10	12	10
40	34	33
90	81	82

Из табл. 3 следует, что наблюдается довольно неплохое соответствие между фактическими и рассчитанными значениями проективного покрытия. Это позволяет сделать предварительное заключение о возможности использования уравнения (2) для определения проективного покрытия.

При решении уравнения (2) величина K вычисляется путем измерений оптических плотностей изображения одной и той же площади подстилающей поверхности в двух спектральных диапазонах.

За значение величины K_p принимается максимальное значение отношений яркостей, отмеченное при обработке данных изображений.

Значение отношений яркостей обнаженной почвы (K_n), как указывалось выше, есть величина постоянная, равная единице.

Практически процесс обработки изображений для распознавания растительного покрова и определения степени покрытости почвы заключается в следующем.

1. Два спектральных изображения, синхронных по времени съемки, совмещаются друг с другом на системе «Периколор». Поскольку сельскохозяйственные угодья на изображениях среднего разрешения мелкоконтурны, то совмещение должно быть максимально точным (элемент с элементом).

2. На системе «Периколор» по каждому элементу совмещенных изображений вычисляются отношения яркостей подстилающей поверхности в двух спектральных диапазонах. Результаты вычислений отношений яркостей распечатываются в цифровом виде или изображаются в виде гистограмм или регистрограмм по отдельным профилям.

3. На распечатанном массиве цифр по гистограмме или регистрограмме отмечается максимальное значение отношений яркости, которое принимается за точку изображения с максимально плотным растительным покровом. Поскольку максимальное значение отношений яркостей может оказаться случайным, связанным с дефектом изображения, то целесообразно за максимально плотный растительный покров принимать среднее значение примерно 10 % точек с максимальными значениями отношений яркостей.

Для обнаженной почвы (0 % покрытость растительностью) принимается значение отношений яркостей, равное единице.

4. По каждому элементу изображения вычисляется по формуле (2) степень покрытости почвы зеленой растительностью. Результаты вычислений выводятся на печать в цифровом виде, в виде гистограмм или регистрограмм по любому участку изображения.

Зачастую требуется по результатам обработки изображений выделить зоны с различной степенью покрытости почвы растительностью. В этом случае находятся пороговые уровни значений отношений для различной степени покрытости почвы растительностью (например, при 10, 20, 30 % и т. д.). По заданным пороговым уровням на системе «Периколор» автоматически выделяются площади с различной покрытостью почвы растительностью.

2. Моделирование сезонных отражательных свойств сельскохозяйственных угодий

Для распознавания и оценки состояния сельскохозяйственных культур по космическим изображениям целесообразно вначале установить по наземным наблюдениям степень различия их в проективном покрытии почвы и фазах развития в течение вегетационного периода и соотнести их со спектральными отражательными свойствами. В различных агроклиматических зонах изменения спектральных отражательных свойств сельскохозяйственных угодий происходят по-разному. Прямые экспериментальные наблюдения за отражательными свойствами сельскохозяйственных угодий по различным физико-географическим районам — весьма трудоемкий и длительный процесс. Поэтому ниже нами рассматривается возможность использования сетевых наблюдений метеостанций для расчета сезонной динамики спектральных отражательных свойств сельскохозяйственных угодий.

Спектральные отражательные свойства сельскохозяйственных угодий в вегетационный период обуславливаются в основном двумя факторами: свойствами поверхностного слоя почвы и растительного покрова. Наиболее динамичным является растительный покров, который в основном и обуславливает сезонные изменения отражательных свойств сельскохозяйственных угодий [4, 7].

Степень различий сельскохозяйственных культур по растительной массе проективного покрытия, а следовательно, и спектральным отражательным свойствам в течение сезона не остается постоянной, а меняется в зависимости от биологических особенностей их развития [4].

В первой половине вегетации сельскохозяйственных культур (от всходов до цветения) сезонная динамика отражательных свойств угодий связана в основном с нарастанием растительной массы [7] и, следовательно, с увеличением степени покрытости почвы травостоем.

К сожалению, на метеостанциях не ведется прямых наблюдений за приростом растительной массы и проективным покрытием почвы травостоем сельскохозяйственных культур (кроме пастбищной растительности). На станциях ведутся регулярные наблюдения за высотой (см) и густотой (число растений на единицу площади) травостоя, по которым можно рассчитать динамику растительной массы. Высота травостоя до фазы цветения непрерывно увеличивается и является наиболее чутким показателем, реагирующим на складывающиеся в конкретном году агрометеорологические условия [4].

Поэтому при моделировании сезонной динамики отражательных свойств сельскохозяйственных угодий нами в качестве критерия состояния сельскохозяйственных культур принималась высота травостоя. По наблюдениям метеостанций Херсонской области за 1982 г. учитывалась сезонная динамика высоты травостоя основных сельскохозяйственных культур (озимой пшеницы, ярового ячменя,

кукурузы и подсолнечника). Допускалось, что степень покрытости почвы в период роста сельскохозяйственных культур (от всходов до цветения) меняется пропорционально динамике высоты травостоя. При этом принималось также, что на фазу цветения степень покрытости почвы травостоем составляла 85 %. Расчет коэффициентов спектральной яркости угодий на период роста травостоя проводился по формуле

$$R = \frac{(1 - a) R_n + aR_p}{100},$$

где R — интегральный коэффициент спектральной яркости угодий (почва плюс растительность); R_n — коэффициент яркости почвы (без растительности); R_p — коэффициент яркости растительности (максимально плотного растительного покрова); a — доля растительности в формировании спектральной интегральной яркости угодий.

Коэффициенты спектральной яркости почв (без растительного покрова) и максимально плотного растительного покрова были взяты из банка данных, опубликованных в работе [7]. Расчет коэффициентов яркости угодий при различной степени покрытости почвы травостоем был произведен для длин волн 0,670 и 0,800 мкм. Эти длины волн были выбраны как наиболее контрастные по отражательным свойствам для растительного покрова.

В представленных расчетах (табл. 4) видно, что с увеличением степени покрытости почвы травостоем яркость угодий в длинноволновом диапазоне (0,80 мкм) возрастает, а в коротковолновом (0,67 мкм) убывает, т. е. контрастность отражательных свойств угодий с растительным покровом в этих длинах волн увеличивается. Эти особенности отражения электромагнитных волн положены в основу методики оценки травостоя по измерениям коэффициентов яркости в двух спектральных диапазонах [7] и могут быть также использованы при оценке состояния травостоя по космическим изображениям подстилающей поверхности.

Формирование травостоя сельскохозяйственных культур в фазу цветения завершается. В период от цветения до созревания изменение отражательных свойств угодий происходит в основном в результате изменения цвета (пожелтения) травостоя. Растительная масса остается в этот период сравнительно постоянной. Поэтому со времени наступления фазы цветения моделирование сезонного хода яркости сельскохозяйственных угодий велось по формуле

$$R = \frac{aR_n + bR_p + cR_{жр}}{100},$$

где R_p — коэффициент яркости зеленого растительного покрова; $R_{жр}$ — коэффициент яркости пожелтевшего растительного покрова; a, b, c — соответствующая доля (процент) отражения солнечного излучения почвенным, зеленым и пожелтевшим растительным

Таблица 4

Спектральные отражательные свойства (коэффициенты яркости и отношения коэффициентов яркости) черноземной почвы при различной покрытости зеленым стеблестоем

Культура	Спектральные отража- тельные свойства	Спек- тральный диапазон, мкм	Проективное покрытие почвы стеблестоем, %										
			0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Озимая пшеница	Коэффициент яркости	0,67	0,092	0,086	0,080	0,073	0,067	0,061	0,055	0,049	0,042	0,036	0,030
	То же	0,80	0,111	0,132	0,153	0,174	0,195	0,217	0,238	0,259	0,280	0,301	0,322
	Отношение коэффициен- тов яркости	$\frac{0,80}{0,67}$	1,20	1,53	1,92	2,37	2,91	3,55	4,33	5,32	6,60	8,31	10,73
	Коэффициент яркости	0,67	0,092	0,087	0,081	0,076	0,069	0,066	0,060	0,055	0,050	0,044	0,039
Кукуруза	То же	0,80	0,111	0,136	0,162	0,187	0,212	0,238	0,263	0,288	0,313	0,339	0,364
	Отношение коэффициен- тов яркости	$\frac{0,80}{0,67}$	1,20	1,59	2,00	2,46	3,07	3,60	4,38	5,24	6,20	7,70	9,08

покровом в формировании спектральной интегральной яркости посевов.

В первой половине вегетации значение отношений яркостей в двух спектральных диапазонах отражает состояние травостоя (запас растительной массы), во второй половине — степень созревания сельскохозяйственных культур. По переломной точке хода кривой отношений яркостей в двух диапазонах можно судить о начавшемся процессе изменения цвета травостоя (пожелтения в результате естественного хода созревания или повреждения травостоя неблагоприятными факторами — засухой, сельскохозяйственными вредителями, болезнями и т. д.).

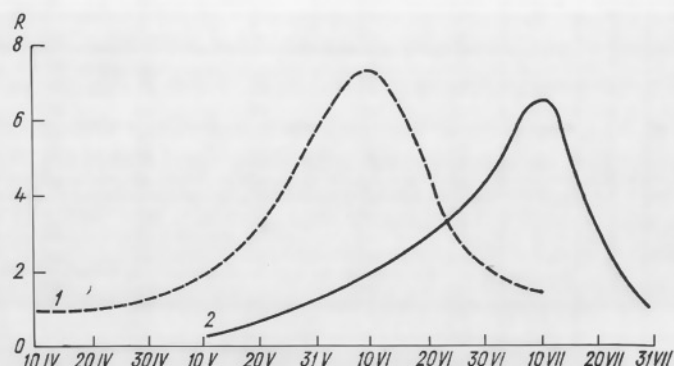


Рис. 2. Сезонный ход отношений коэффициентов яркостей сельскохозяйственных культур.
1 — озимая пшеница, 2 — кукуруза.

В зависимости от биологических особенностей культур длительность этих двух периодов для каждой из них разная, и календарно они приходятся на разные периоды сезона. Следовательно, каждая культура имеет свой сезонный ход изменений спектральных отражательных свойств по отношению к другим культурам.

В первой половине вегетации озимая пшеница заметно отличается от других культур — как яркостью в спектральном диапазоне 0,80 мкм, так и отношениями яркостей в спектральных диапазонах 0,80 и 0,67 мкм (рис. 2). После фазы цветения значение отношений яркостей в указанных диапазонах на угодьях с озимой пшеницей уменьшается, в то время как на угодьях с другими культурами оно продолжает возрастать. В результате наблюдается сложный ход сезонных изменений контрастности отношений яркостей сельскохозяйственных культур: в начале он увеличивается, затем уменьшается и затем снова увеличивается (рис. 3). Следовательно, в репродуктивный период развития отличить сельскохозяйственные культуры друг от друга только по одному параметру, а именно по значению отношений яркостей в двух спектральных диапазонах (или по яркости в одном диапазоне), будет затруднительно. Не-

обходимо в расчеты вводить по крайней мере одновременно два параметра: отношение яркостей и яркость в одном из спектральных диапазонов.

Полученные нами модельные расчеты сезонной динамики спектральных отражательных свойств сельскохозяйственных угодий подтверждаются экспериментальными данными. В нашем распоряжении имелись за 1979 г. материалы самолетных спектрометрических измерений сельскохозяйственных угодий Херсонской области за три срока вегетационного сезона: в начале вегетации (23 апреля), на фазу колошения озимой пшеницы (17 мая) и в период созревания (3 июля).

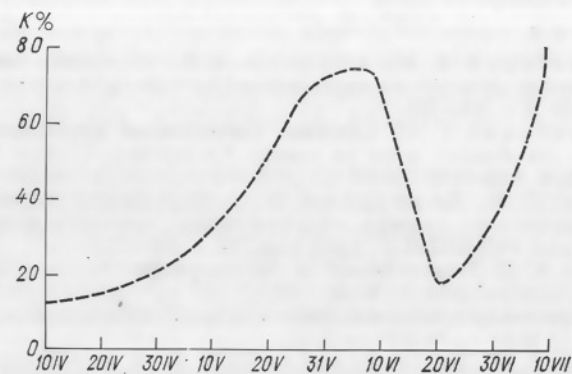


Рис. 3. Сезонный ход контрастности отношений яркостей посевов озимой пшеницы и кукурузы.

В период с 23 апреля по 17 мая, когда шло нарастание зеленой растительной массы у всех сельскохозяйственных культур, как и при модельных расчетах, наблюдалось увеличение коэффициентов яркостей в диапазоне 0,76 мкм и отношений коэффициентов яркостей диапазонов 0,76 и 0,67 мкм, а в диапазоне 0,67 мкм — уменьшение коэффициентов яркости. В период с 17 мая по 3 июля по мере созревания сельскохозяйственных культур наблюдался противоположный ход коэффициентов яркостей и отношений коэффициентов яркостей.

Полученные результаты модельных расчетов согласуются также с ранее выполненной работой по сезонным спектральным изменениям космических изображений подстилающей поверхности пастбищной зоны [2].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В течение вегетационного сезона сельскохозяйственные культуры вследствие неравномерности их развития имеют различную степень контрастности по спектральным отражательным свойствам, что позволяет составить календарь различимости сельскохозяйственных культур по спектральным признакам.

2. В первой половине вегетации использование для обработки результатов дистанционных измерений метода отношений яркости угоний в двух спектральных диапазонах отражает состояние травостоя сельскохозяйственных культур.

3. В репродуктивный период методом отношений яркостей отображается динамика созревания сельскохозяйственных культур.

4. Для распознавания сельскохозяйственных культур в репродуктивный период недостаточно использование одного метода отношений яркостей в двух спектральных диапазонах. Необходимо использование по крайней мере двух показателей: отношения яркостей и яркость в одном из спектральных диапазонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисоглебский Г. И., Козодеров В. В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур по спутниковым данным.—Метеорология и гидрология, 1982, № 3, с. 94—101.
2. Борисоглебский Г. И. Сезонные спектральные изменения космических изображений пастбищной зоны на западе Казахстана.—Труды ГосНИЦИПР, 1983, вып. 13, с. 116—119.
3. Васюхина Т. М., Винниченко Н. К. Определение видов и состояния сельскохозяйственных культур по материалам многозональной аэрофотосъемки.—Труды ГосНИЦИПР, 1980, вып. 10, с. 64—72.
4. Клещенко А. Д. Теоретические и методические вопросы оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур по их спектральным отражательным характеристикам.—Обнинск, 1983.—38 с. (Рукопись деп. в ИЦ ВНИИГМИ—МЦД, 13.10.83 г., № 249 гм-Д83).
5. Клещенко А. Д., Борисоглебский Г. И. К распознаванию и оценке состояния природных образований по космическим изображениям в двух спектральных диапазонах.—Метеорология и гидрология, 1984, № 1, с. 92—97.
6. Кринов Е. Л. Спектральная отражательная способность природных образований.—М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947.—271 с.
7. Рачулик В. И., Ситникова М. В. Отражательные свойства и состояние растительного покрова.—Л.: Гидрометеиздат, 1981.—287 с.
8. Федченко П. П., Кондратьев К. Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв.—Л.: Гидрометеиздат, 1981.—831 с.

МОНИТОРИНГ ГУМУСОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВ (ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Ю. Е. Самсонов

Всесоюзный научно-исследовательский институт
сельскохозяйственной метеорологии

А. Ф. Гуров, В. В. Кузнецов

Ленинградский государственный университет

В результате смыва почвы теряют в первую очередь наиболее плодородный гумусный слой, и эрозия почв в сельскохозяйственном производстве характеризуется прежде всего степенью потери

гумуса. Поэтому задача определения и контроля гумусового состояния почв является весьма актуальной.

Отсутствие оперативных методов контроля за содержанием гумуса в пахотном слое почв не позволяет своевременно выявить эрозийный процесс, установить характер его развития, принять предупреждающие меры и соответственно эффективно управлять почвенным плодородием. В связи с этим возникла необходимость привлечения более прогрессивных методов для контроля за содержанием гумуса в почвах.

В конце прошлого века В. В. Докучаев обратил внимание на связь цвета почв с содержанием в них гумуса. В конце 20-х годов Г. И. Покровский для оценки цвета почв применил спектрофотометрический метод. Применение аэрофотосъемки, а в последующем и аэрокосмических методов исследований для нужд сельскохозяйственного производства, стимулировало дальнейшее развитие спектрофотометрических исследований растительности, почв, горных пород.

В настоящее время доказана принципиальная возможность определения содержания гумуса в почвах по их спектрам отражения. В 1980 г. издан Атлас спектральной отражательной способности основных почв США, в котором отмечается, что на спектральную отражательную способность почв главным образом оказывает влияние содержание в них гумуса и окислов железа.

В настоящей работе представлены результаты изучения гумусового состояния почв дистанционными средствами. Решаемая при этом в конечном счете задача заключается в определении степени смыва почв по данным дистанционных измерений.

В выполненных нами исследованиях было применено лабораторное моделирование гумусового состояния почв путем искусственного варьирования содержания гумуса в почвенных образцах. При этом изучалась спектральная отражательная способность этих образцов. Для опытов были взяты чернозем и темно-серая лесная как представители почв, наиболее широко используемых в Центрально-Черноземных областях и на Украине. Другими компонентами для составления смесей были выбраны лёсс и кварцевый песок, поскольку, с одной стороны, в этих районах подстилающим горизонтом зачастую выступает лёсс, а с другой — в процессе смыва вместе с органическими веществами вымываются и илустые фракции, в результате чего в верхнем горизонте увеличивается содержание кварца (в стандартном образце, например, чернозема СП-1 кварца содержится от 30 до 40 %).

Компоненты, высушенные и пропущенные через сита 1,0 и 0,5 мм, смешивались таким образом, чтобы иметь весь ряд значений содержания гумуса от 0 до 100 % (т. е. до максимально возможного содержания гумуса в данной почве). Были составлены три группы смесей: чернозем — кварцевый песок, чернозем — лёсс, темно-серая лесная — лёсс. Содержание чернозема и темно-серой лесной почв в смесях задавалось с шагом в 10 % весовых.

Таблица 1

Результаты химического анализа (%) образцов почвенных смесей

Состав смеси			
Чернозем	Кварцевый песок	Гумус	Железо
—	100	—	0,02
20	80	1,0	0,09
30	70	2,2	0,12
40	60	2,5	0,18
80	20	4,9	0,33
Чернозем	Лёсс		
—	100	0,4	0,4
20	80	1,7	0,4
40	60	2,6	0,4
60	40	4,1	0,4
80	20	4,9	0,4
Темно-серая лесная	Лёсс		
—	100	0,4	0,4
10	90	0,9	0,4
20	80	1,2	0,3
60	40	2,8	0,4
100	—	4,9	0,4

Почвенные образцы фотометрировались в диапазоне от 400 до 750 нм на спектрофотометре СФ-18. Те же образцы были подвержены химическому анализу на содержание гумуса и аморфного железа.

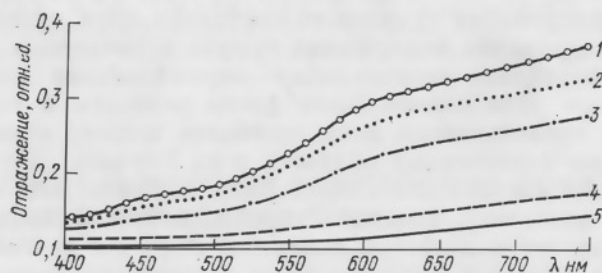


Рис. 1. Спектральные кривые отражения почвенных смесей темно-серая лесная—лёсс.

1 — содержание лёсса 100 %, гумуса 0,4 %; 2 — лёсса 90 %, темно-серой лесной почвы 10 %, гумуса 0,9 %; 3 — лёсса 80 %, темно-серой лесной почвы 20 %, гумуса 1,2 %; 4 — лёсса 40 %, темно-серой лесной почвы 60 %, гумуса 2,8 %; 5 — темно-серой лесной почвы 100 %, гумуса 4,9 %. Валовое содержание железа для всех образцов почвенных смесей составляло 0,4 %.

Как отмечалось выше, именно эти вещества оказывают наиболее сильное влияние на характер спектральных кривых. Гумус определялся по методу Тюрина, аморфное железо — по методу

Тамма. В табл. 1 приведены результаты химического анализа образцов почвенных смесей. В качестве примера на рис. 1 приведены спектральные кривые отражения смесей темно-серая лесная — лёсс, а также чистых образцов темно-серой лесной почвы (нижняя кривая) и лёсса (верхняя кривая). Таково же взаимное расположение спектральных кривых других смесей: чернозем — лёсс и чернозем — кварцевый песок, с той лишь разницей, что для последней из упомянутых смесей наблюдается больший размах варьирования. Гумус оказывает сильное влияние на форму кривых, нивелируя в значительной степени действие других красителей. Во всех случаях наблюдается постепенное изменение их формы в зависи-

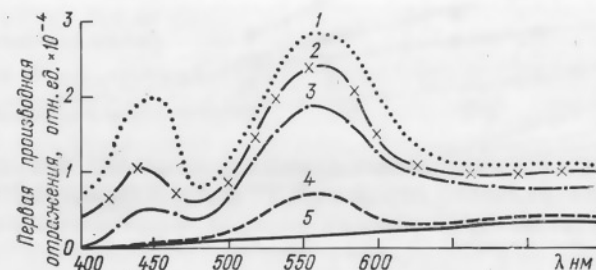


Рис. 2. График зависимости первых производных спектральных кривых отражения смесей темно-серая лесная—лёсс от длины волны.

Усл. обозначения см. рис. 1.

мости от содержания гумуса. Динамика изменения формы кривых отчетливо прослеживается по графикам их первых производных, которые представлены на рис. 2. Данные получены путем численного дифференцирования спектральных кривых.

Для всех образцов с низким содержанием гумуса первые производные имеют по два максимума: один в коротковолновой области спектра, другой — в более длинноволновой. Максимумы производных соответствуют точкам перегиба спектральных кривых. По мере увеличения содержания гумуса амплитуды максимумов уменьшаются, далее при некотором значении содержания гумуса в смесях исчезает первый максимум (в коротковолновой области спектра), а затем при дальнейшем увеличении содержания гумуса исчезает и второй максимум, и график первой производной превращается в кривую, аналогичную спектральной кривой чистого чернозема или темно-серой лесной почвы. Таким вот образом вогнуто-выпуклая кривая, характерная для чистого лёсса или кварцевого песка, постепенно превращается в вогнутую кривую, характерную для чернозема или темно-серой лесной почвы.

Обращает на себя внимание тот факт, что точки перегиба всех кривых попадают в спектральные полосы шириной ± 10 нм, центрированные около длин волн 440 и 560 нм. Это позволяет сделать

вывод о том, что эти длины волн являются информативными и должны включаться в перечень длин волн, используемых при почвенных исследованиях.

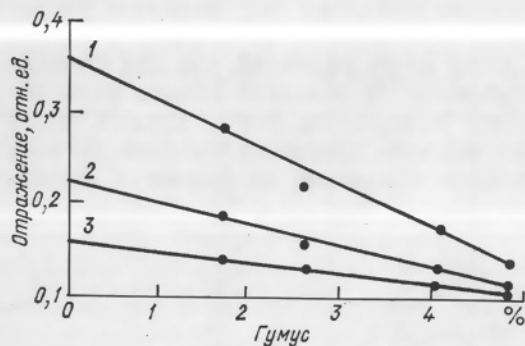


Рис. 3. Зависимость значений спектрального отражения от содержания гумуса в образцах смесей чернозем—лесс.
1 — 750 нм, 2 — 550 нм, 3 — 450 нм.

Анализ экспериментальных данных показывает, что зависимость значений спектрального отражения от содержания гумуса в образцах смесей темно-серая лесная—лесс и чернозем—лесс линейна

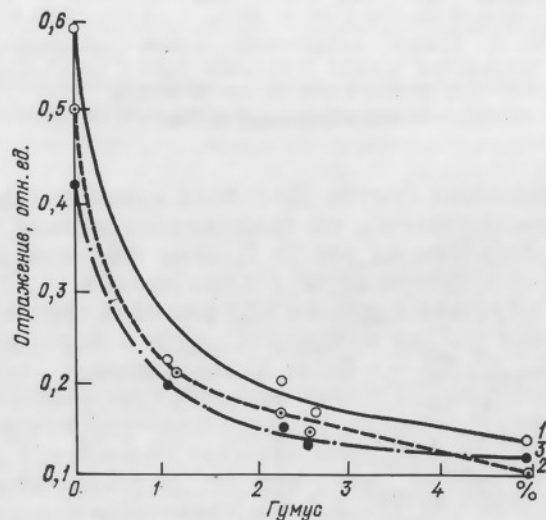


Рис. 4. Зависимость значений спектрального отражения от содержания гумуса в образцах смесей чернозем—кварцевый песок.

1 — 750 нм, 2 — 550 нм, 3 — 450 нм.

(рис. 3). Для образцов смесей чернозем—кварцевый песок эта зависимость нелинейна (рис. 4). Причем нелинейность наблюдается при низких содержаниях гумуса — до 1 %, при более высоких содержаниях гумуса зависимость близка к линейной.

Поскольку для лабораторного моделирования были применены реально существующие почвы верхнего и подстилающего горизонтов, считаем, что полученные смеси могут служить аналогами почв в естественном залегании, имеющих различную степень эродированности. Таким образом, для некоторой части таких почв полученные данные могут составить обучающий массив и использоваться при решении задачи идентификации почв по содержанию гумуса, при слежении и контроле за гумусовым состоянием почв. В подтверждение этого были проведены дополнительные исследования. В Белгородской области в августе 1983 г. были проведены съемки

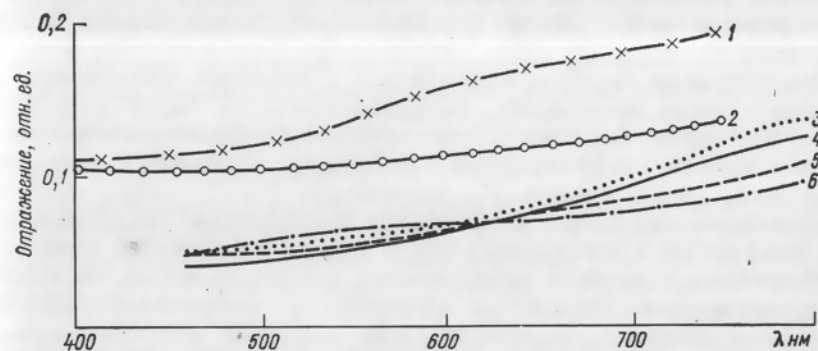


Рис. 5. Спектральные кривые отражения несмытых и сильносмытых темно-серых лесных почв по данным лабораторных, наземных полевых и самолетных измерений.

1 — (лабораторные) сильносмытые, 2 — (лабораторные) несмытые, 3 — (наземные) сильносмытые, 4 — (наземные) несмытые, 5 — (самолетные) сильносмытые, 6 — (самолетные) несмытые.

несмытых и сильносмытых темно-серых лесных почв на лёссовидном суглинке. Измерения проводились в наземных полевых условиях и с борта самолета Ан-2 экспериментальным образцом самолетного комплекса фотометрической аппаратуры. Отобранные с полей образцы почв фотометрировались в лабораторных условиях на спектрофотометре СФ-18. Результаты представлены на рис. 5. Полученные данные позволяют отметить очень важную, на наш взгляд, особенность: спектральные кривые отражения, полученные в лабораторных условиях по наземным и самолетным измерениям, имеют идентичную форму. Вместе с тем имеющиеся различия в содержании гумуса в почвах находят отражение в форме спектральных кривых отражения. Это дает основание считать, что форма спектральной кривой отражения почв может служить диагностическим признаком гумусового состояния почв и быть использована при слежении и контроле за состоянием почв.

Таким образом, результаты исследований показывают реальную возможность изучения гумусового состояния почв дистанционными средствами и намечают один из этапов решения задачи мониторинга гумусового состояния почв.

ТЕПЛОВАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ПАСТИЩ

*А. В. Миролюбов, Я. И. Мовчан, А. П. Генев,
В. Б. Небесный, В. А. Каневский, Ю. Р. Шеляг-Сосонко*

Институт ботаники АН УССР

Для рациональной эксплуатации пастбищ и разработки рекомендаций по их оптимизации необходим оперативный контроль состояния растительного покрова. Перспективным в этом отношении представляется метод дистанционного зондирования в ИК диапазоне.

Исследование пастбищ проводилось с помощью измерительно-вычислительного комплекса, установленного на борту самолета Ан-2. В состав бортового измерительно-вычислительного комплекса входят инфракрасный радиометр (рабочий диапазон 8—13 мкм, угол зрения 7°, разрешение 0,2°C, инерционность 0,3 с) и комплекс сбора и обработки информации, созданный на базе микроЭВМ «Электроника-60» и крейта «Камак». В качестве периферийных устройств используются фотосчитыватель ФС-1501, цифropечатающее устройство «Консул» и перфоратор ПЛ-150. В качестве опытных полигонов были выбраны участки степной растительности в Новоазовском районе Донецкой области, характеризующиеся различной степенью нарушенности: от абсолютно заповедных, которые рассматривались как I стадия депрессии, до участков, характеризующихся значительной разрушенностью. Исследованные участки могут рассматриваться как однородные в геоморфологическом отношении, поскольку крутизна склонов, на которых они расположены, не превышает 2—3°. Поэтому температура поверхности участков лишь в незначительной степени определяется экспозицией и крутизной склонов. Полеты проводились на высоте 100 м в условиях сплошной облачности. Проведение съемки в условиях сплошной облачности практически устранило влияние факторов крутизны и экспозиции склонов.

Растительность первого исследованного участка образована сообществами с преобладанием корневищных злаков (пырея ползучего, костреца безостого, мятлика узколистного), реже встречались дерновинные злаки (типчаки, ковыль-тырса, ковылок). Общее число видов этих сообществ около 30, высота травостоя 90—100 см, а проективное покрытие 95—100%. Травостой сомкнутый, аспект зеленый. Это I или нулевая стадия пастбищной депрессии.

На втором участке — скашиваемой степи — преобладают сообщества дерновинных злаков с участием, иногда довольно значительным, корневищных злаков. Общее число видов травостоя 50—60, высота 70—90 см, проективное покрытие 90—95%, аспект зеленый. Это I—II стадии пастбищной депрессии.

Остальные три участка используются как пастбища для выпаса овец (2 тыс. голов молодняка на 100 га пастбища). Растительность третьего участка представлена типчаком валлийским (70%), пыреем ползучим (5%), вьюнком полевым (5—8%) и др. На участке 30 видов, высота травостоя 30—40 см, проективное покрытие 85—90%, аспектирует типчак. Растительность четвертого участка мало отличается от предыдущего: типчак валлийский (50—60%), пырей ползучий (5%), полынь австрийская (5%), всего до 20 видов. Высота травостоя 25—30 см, проективное покрытие 80—85%. Эти участки представляют собой III стадию пастбищной депрессии.

На пятом участке в травостое преобладают ковыль-тырса (8%), чабрец двувидный (6%), молочай Сегниеров (5%) и степной (2%) типчак. Высота травостоя, за исключением экземпляров тырсы, 10—20 см, проективное покрытие 25—30%, число видов 35, аспект желто-зеленый, много просветов земли. Это IV стадия пастбищной депрессии.

Статистический анализ, проведенный на бортовом вычислительном комплексе по критерию Стьюдента, показал достоверные различия средних значений радиационных температур участков, характеризующихся различной степенью нарушенности. Увеличение степени деградации пастбищ сопровождается закономерным повышением средней радиационной температуры подстилающей поверхности (табл. 1).

Таблица 1
Результаты ИК зондирования пастбищ с различной степенью депрессии

Участок	Количество измерений	Средняя радиационная температура, °C	Дисперсия	Проективное покрытие, %	Стадия депрессии
1	329	16,53	0,090	95—100	I
2	249	17,50	0,195	90—94	II
3	445	20,39	0,198	85—89	III
4	145	20,80	0,233	80—84	III
5	123	22,21	0,206	25—30	IV

Результаты дистанционного изучения участков пастбищной растительности и их сопоставление с данными геоботанического описания показали тесную связь параметров радиационной температуры и состояния растительности. Увеличение радиационной температуры подстилающей поверхности соответствует уменьшению показателя проективного покрытия. Использование теплового зондирования дает возможность дистанционно, и значит, оперативно получать информацию о состоянии пастбищ на больших территориях. На основе этой информации с учетом погодных условий и видового состава пастбищных сообществ вполне реальной становится задача оперативного прогноза состояния пастбищ и оценки их устойчивости к предполагаемым нагрузкам. Предлагаемый метод целесообразно использовать в дополнение

к ранее разработанным методам оценки степени деградации пастбищ с помощью спектрометрирования растительного покрова в видимом и ближнем ИК диапазонах [1,2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Определение растительной массы посевов сельскохозяйственных культур и пастбищ с самолетов и спутников.— Тез. докл. XII Междунар. ботан. конгресса, 3—10 июля 1975 г. Т. 1.—Л.: Наука, 1975.—198 с.
2. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Некоторые вопросы определения с самолетов и спутников биомассы пустынных пастбищ и посевов сельскохозяйственных культур.— Метеорология и гидрология, 1976, № 6, с. 82—91.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОТНОШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ ПРЕДЕЛЬНО ПЛОТНОГО РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПРИ ПОСТРОЕНИИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ КРИВЫХ ФОТОМЕТРА

Л. Э. Бенедичук, В. В. Судак

Украинский региональный научно-исследовательский институт

Значительное место среди инструментальных авиационных методов обследования посевов сельскохозяйственных культур занимает аэрофотометрический метод определения параметров растительного покрова. Этот метод основан на зависимости отношения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) системы почва—растительность ($K_{пр}$) для излучения с длинами волн, находящимися вблизи 750 (числитель) и 670 нм (знаменатель), от надземной массы растительного покрова (M), густоты стояния растений (N), площади листовой поверхности ($S_{л}$). Эти зависимости, согласно [1], выражаются формулой

$$K_{пр} = K_p + (K_n - K_p) e^{-\alpha z}, \quad (1)$$

где K_p —отношение коэффициентов спектральной яркости предельно плотного растительного покрова (покрова, полностью экранирующего отражение от почвы); K_n —отношение коэффициентов спектральной яркости почвы; α —постоянная величина, характерная для данного растительного параметра; z —параметр растительного покрова.

Для перехода от отношения коэффициентов спектральной яркости к параметрам растительного покрова на поле строится градуировочная (переводная) характеристика фотометра, расчет которой ведется по [1]. При построении градуировочной характеристики наименее изученным является вопрос выбора K_p . Сегодня назрела острая необходимость его решения, так как достоверность получаемой аэрофотометрической информации в большой степени зависит от выбора отношения коэффициентов спектральной яркости предельно плотного растительного покрова.

Для решения этой задачи нами использованы материалы экспедиции аэрометодов УкрНИИ Госкомгидромета по построению градуировочных характеристик для перехода от отношения КСЯ к массе растительного покрова озимой пшеницы и ярового ячменя в фазы выхода в трубку и колошения и кукурузы в фазу выметывания метелки на территории УССР, МССР и Северного Кавказа за 1980—1983 гг. Кроме того, использованы материалы аэрофотометрических обследований посевов зерновых культур этого же региона за тот же период.

Измерения проводились по методике [1, 2] комплексом аппаратуры, регистрирующая часть которого разработана в экспедиции аэрометодов УкрНИИ. В качестве датчика использован двухканальный фотометр с дистанционным управлением конструкции А. В. Бондаря (ВНИИСХМ).

Проведенный анализ изменчивости K_p показал, что во всех почвенно-климатических зонах обследуемого региона в разные фазы развития зерновых культур значения отношения КСЯ предельно плотного растительного покрова отличаются друг от друга, но при этом имеют общую тенденцию изменчивости. В фазы кушения и выхода в трубку значения K_p для озимой пшеницы колеблются от 5 до 11, достигая максимума (14—17) в период трубкавания и колошения, что несколько отличается от значений, приведенных в [1, 3]. Такой же характер изменчивости K_p наблюдается и у ярового ячменя. У кукурузы максимальные значения K_p достигаются в межфазный период 13—15-й лист—выметывание метелки и колеблются от 5 до 9.

Как показал опыт, не всегда на поле можно найти предельно плотный растительный покров. В начальные фазы развития зерновых культур это практически невозможно, а искусственное создание покрова, полностью экранирующего отражение от почвы, дает искаженную картину отражения, отличную от естественной. Кроме того, при обследовании больших регионов мы неоднократно получали в полете $K_{пр}$ выше, чем K_p , полученный на поле в наземных условиях.

По нашим данным, ошибка в определении массы в зависимости от выбранного значения K_p в отдельных случаях достигает 30—40 %.

Чтобы при построении переводных кривых исключить погрешности, зависящие от выбора K_p , нами для ЭВМ «Наири-3-1» по имеющимся наземным данным (отношения КСЯ на делянках поля и соответствующие им значения массы растительного покрова) была составлена программа расчета отношения КСЯ предельно плотного растительного покрова. Но это не сняло полностью вопрос о выборе K_p , так как градуировочную характеристику приходится строить в экспедиционных условиях при отсутствии ЭВМ.

Весь материал аэрофотометрической экспедиции УкрНИИ по построению переводных кривых для озимой пшеницы, ярового ячменя и кукурузы за 1980—1983 гг. на территории Украины и Северного Кавказа был просчитан на ЭВМ и для каждого случая

проведен расчет с отношением КСЯ предельно плотного растительного покрова. Затем на графиках были построены серии кривых с рассчитанными значениями K_p и значениями, полученными на поле. Анализ этих материалов показал, что в указанных регионах отношение коэффициентов спектральной яркости предельно плотного растительного покрова будет определяться следующим выражением:

для кукурузы и ярового ячменя

$$K_{p\text{расч}} = K_{p\text{изм}} + 5, \quad (2)$$

для озимой пшеницы

$$K_{p\text{расч}} = K_{p\text{изм}} + 6. \quad (3)$$

Относительная средняя ошибка определения массы по градуировочным характеристикам K_p , рассчитанным по формулам (2), (3), по сравнению с рассчитанным на ЭВМ значением K_p , не превышает $\pm 10\%$.

Таким образом, в экспедиционных условиях расчет значения отношения КСЯ предельно плотного растительного покрова можно производить по формулам (2) и (3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляева И. П., Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Методические указания по определению параметров растительного покрова фотометрическим методом (по наземным, самолетным и вертолетным измерениям).— Ташкент, 1972.— 47 с.
2. Клещенко А. Д., Никитин В. Ф. О характере зависимости отношения коэффициентов яркости от растительной массы зерновых культур.— Труды ВНИИСХМ, 1981, вып. 5, с. 3—8.
3. Рачкулик В. И., Ситникова М. В. Методические указания по определению параметров растительного покрова методом отношения коэффициентов яркости в двух участках спектра (по наземным, самолетным и вертолетным измерениям).— Ташкент, 1972.— 39 с.

АЭРОДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗАМОРОЗКОВ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СПОСОБ БОРЬБЫ С НИМИ

В. В. Вольвач, А. А. Ген, Е. В. Мамаев, В. Н. Матухно

Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии

Р. С. Мкртчян

Закавказский региональный научно-исследовательский институт

С. Ф. Кочегаров, Б. Л. Шиндеров

Агрофизический научно-исследовательский институт

При разработке способов борьбы с заморозками существенными являются вопросы измерения метеорологических величин в пределах защищаемой площади, в первую очередь температуры.

Обусловлено это значительной их изменчивостью в зависимости от условий микрорельефа, состояния почвы и растительности. В то же время для расчета в каждом конкретном случае норм расхода средств защиты, времени начала и окончания защиты, обеспечивающих отсутствие потерь урожая при минимуме дополнительных затрат, требуются достаточно точные измерения этих характеристик.

При кажущейся простоте решения данной задачи даже применительно к измерениям температуры воздуха возникает ряд проблем, основной из которых является отсутствие приборов, позволяющих одновременно получать информацию о ее распределении на площади в несколько гектар.

Что же касается такого явления, как «скрытый заморозок», то для его регистрации не только сеть станций, но и большинство исследовательских подразделений Госкомгидромета соответствующими радиационными термометрами не располагают.

Скрытый заморозок является следствием радиационного выхолаживания растительного покрова, начинающегося перед заходом солнца и продолжающегося в течение ночи. Наиболее низкая температура при радиационном выхолаживании наступает перед восходом солнца. Как показывают измерения, температура растительного покрова в таких условиях оказывается на несколько градусов ниже температуры воздуха [3].

Основным условием возникновения скрытого заморозка является безоблачная или малооблачная ночь, незначительная скорость ветра и низкая температура окружающего воздуха ($0-10^\circ\text{C}$). При таких условиях развивается довольно устойчивая картина распределения температуры в приземном слое воздуха. Разность температур у поверхности почвы и на границе приземного слоя воздуха ($h=100\text{ м}$) может достигать 10°C и более.

Проведенные в АФИ измерения температуры растительных поверхностей различными типами термометров показали, что наиболее совершенным способом обнаружения и количественной оценки скрытого заморозка является радиационный метод [3]. Для его реализации и был разработан радиационный термометр РТ-2, результаты испытаний которого описаны в [4]. Достоинствами этого термометра является то, что его датчик, находясь на некотором расстоянии от исследуемой поверхности, не вносит искажения в естественное распределение метеорологических и физических факторов на поверхности, а также не нарушает микрорельеф. Радиационный термометр реагирует на излучение от некоторой площади (размер площади определяется углом зрения датчика и высотой его расположения над поверхностью), поэтому прибор фиксирует среднюю температуру всех элементарных площадок обычно термически неоднородной поверхности в пределах угла зрения, а не отдельных точек этой поверхности, выбор которых при контактных измерениях носит случайный характер. В связи с тем что перед началом измерений нет необходимости в специальной установке датчика, как, например, у термо-

паука, радиационный термометр в применении характеризуется высокой оперативностью и надежностью.

Наиболее полно преимущества радиационного термометра применительно к работам по борьбе с заморозками раскрываются при его установке на борту вертолета. В этом случае достигается возможность оперативного контроля за динамикой падения температуры деятельной поверхности в пределах всей защищаемой площади и на этой основе установления очередности в применении на ней защитных мероприятий. Если же учесть использование при динамическом способе борьбы с заморозками в качестве технического средства борьбы вертолета, то применение на его борту радиационного термометра может поставить этот способ на качественно новый уровень в отношении оперативности и надежности.

Возможность аэродистанционного зондирования температуры деятельной поверхности с помощью радиационного термометра АФИ РТ-2, установленного на борту вертолета Ми-8, исследовалась нами в 1983 г. в условиях Армянской ССР.

На борту вертолета Ми-8 был смонтирован измерительный комплекс, включающий низкотемпературный радиометр ИЭМ [1], радиационный термометр АФИ РТ-2 и термометр ТЭТ-2. Датчики приборов устанавливались в люке для крепления внешней подвески, пульты управления и регистрации размещались на амортизированной платформе, закрепленной на штатном ограждении люка.

В результате эксплуатации комплекса был сделан вывод о том, что применительно к задаче зондирования заморозка радиационный термометр РТ-2 является удобным и перспективным прибором. Он позволяет получать профиль температуры деятельной поверхности по линии полета вертолета, при этом обеспечивается возможность визуального контроля результатов воздействий, выявления термических неоднородностей и колебаний температуры без дополнительных вычислений.

Идея динамического способа борьбы с заморозками с использованием вертолетов основана на следующих предпосылках. Как уже отмечалось, при формировании радиационного типа заморозков в приземном слое воздуха имеет место инверсионное распределение температуры. Это приводит к тому, что температура деятельной поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха за счет более интенсивного их радиационного выхолаживания оказываются на 7—10°C (иногда и более) ниже, чем на высоте в несколько десятков метров.

Исследованиями распространения спутной струи от винтов вертолета при различных горизонтальных скоростях полета установлено, что при скоростях полета менее 40—50 км/ч она распространяется вертикально или под небольшим углом по отношению к нормали, в результате чего происходит турбулентное перемешивание всего воздушного столба с высоты полета до поверхности почвы. Следствием такого перемешивания является замена охлаж-

денного в результате соприкосновения с поверхностью почвы и растительным слоем приповерхностного слоя воздуха толщиной 3—5 м более теплым воздухом из вышележащих слоев. От контакта с теплым воздухом в результате турбулентного обмена происходит нагревание поверхностей почвы и растительного покрова. Так как перемешивание воздуха при полете вертолета происходит не постоянно, а в виде кратковременного импульса, температура почвы и растительности постепенно будет понижаться за счет излучения до своего первоначального уровня. В связи с этим для поддержания температуры выше какого-то заданного уровня над данной площадью перемешивание воздуха должно осуществляться с определенной периодичностью.

Следуя описанной логической схеме, а также принимая во внимание наличие в зарубежной литературе ряда публикаций относительно защиты цитрусовых насаждений от заморозков с использованием вертолетов, во Всесоюзном научно-исследовательском институте сельскохозяйственной метеорологии в 1978 г. впервые в стране были проведены натурные эксперименты по воздействию на приземный слой воздуха вертолетом Ка-26.

Некоторые результаты этих экспериментов опубликованы в [2].

Целью экспериментов в 1983 г. являлось выяснение возможности выполнения воздействий на приземный слой воздуха вертолетом Ми-8, определение температурных эффектов воздействий, а также проверка применимости радиационного термометра РТ-2 для зондирования температуры поверхности почвы и растительного покрова с борта вертолета.

Воздействия выполнялись главным образом в режиме зависания над контрольной площадью абрикосового сада на высотах от 200 до 50 м. Были также выполнены отдельные воздействия в режиме челночных полетов на высоте 25 м над всем садом (площадь около 17 га).

Исследования динамики нагрева и охлаждения проводились при многократном перемешивании воздуха с различными временами воздействий, которые изменялись от 40 с до 3 мин. Интервалы между воздействиями составляли 7—10 мин.

Результаты измерений показывают, что уже через 30—40 с после начала воздействия в режиме зависания температура кроны абрикосового дерева повышается на 2—3°C, в дальнейшем же наблюдается уменьшение скорости нагрева листовой массы ($dT/dt = 0,4^\circ\text{C}/\text{мин}$), связанной с нагревом и повышением температуры окружающего воздуха и нижнего яруса листьев. В результате трехкратного воздействия в течение 40 с, 1,5 мин и 3 мин долговременная температура повышалась на 3—4°C, что составляло 0,5—0,6 величины разности температур на высоте полета и на уровне 0,25 м.

После воздействия температура листовой поверхности снижается по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau \approx 60$ с. Падение температуры связано с радиационным выхолаживанием

листовой поверхности при более медленно меняющейся температуре воздуха и почвы.

Временной ход охлаждения листовой поверхности после воздействия можно описать уравнением

$$T_i = T_0 + \Delta T_{\max} a e^{-\frac{\tau}{\tau_1}},$$

где T_0 — температура листа до воздействия; a — эффективный коэффициент теплообмена лист—воздух; τ — время сохранения термического эффекта воздействия; τ_1 — постоянная времени охлаждения листа.

В качестве примера результатов воздействий на рис. 1 приведены фрагменты регистрограмм с радиационного термометра РТ-2.

Как видно из этого рисунка, в результате трехкратного воздействия в режиме зависания общей продолжительностью 5 мин

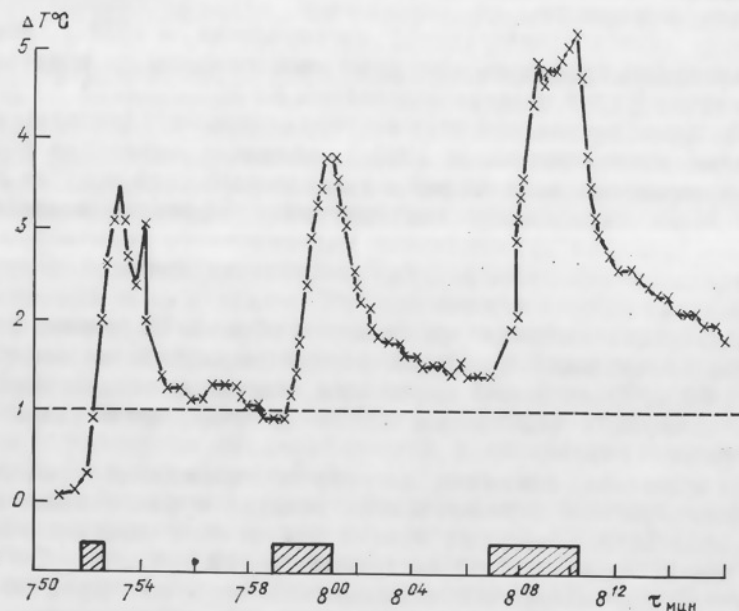


Рис. 1. Динамика приращения радиационной температуры поверхности почвы при воздействии вертолетом Ми-8 в режиме зависания (экспериментальная база ЕрОЗакНИИ, 13 апреля 1984 г., высота 100 м).

Штриховкой показано время воздействия.

40 с температура поверхности почвы удерживалась выше начального уровня в течение 32—35 мин и в течение 25—27 мин выше этого уровня не менее чем на 1 °C.

Отношение продолжительности сохранения температурного эффекта воздействия ко времени воздействия, являющегося одним из показателей эффективности, составляет 5,5—5,8 и 4,2—4,5 соответственно. Из этого же рисунка видно, что продолжительность

релаксации температуры несколько больше принимавшихся интервалов между воздействиями, очевидно, она составляла от 10 до 15 мин.

Следует отметить два важных вывода, которые можно сделать на основании анализа полученных результатов. Во-первых, максимальное приращение температуры незначительно зависит от продолжительности воздействия, в связи с чем длительные воздействия лишь незначительно эффективнее кратковременных. Во-вторых, скорость релаксации температуры также незначительно зависит от продолжительности воздействия, что и определяет целесообразность одноразовых воздействий в режиме зависания продолжительностью более 1 мин.

Предварительный анализ полученных материалов позволяет сделать вывод о качественном соответствии результатов воздействия вертолетами Ми-8 и Ка-26.

Таким образом, можно считать, что способ динамического воздействия вертолетами для борьбы с заморозками является перспективным и заслуживает дальнейшей разработки и исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алленов М. И. и др. Низкотемпературный радиометр на область спектра 8—13 мкм.— Труды ИЭМ, 1983, вып. 6 (107), с. 43—47.
2. Вольвач В. В. Динамическое воздействие на приземный слой воздуха как способ борьбы с заморозками.— Труды ВНИИСХМ, 1984, вып. 15, с. 36—47.
3. Шиндеров Б. Л., Доронина И. В. Радиационный термометр агрометеорологического назначения как инструмент для обнаружения скрытого заморозка.— Труды АФИ, 1977, вып. 37, с. 114—121.
4. Шиндеров Б. Л. О результатах испытания полевого радиационного термометра РТ-2 с борта самолета и вертолета.— Научно-технический бюллетень по агрономической физике, 1979, № 37, с. 39—42.

СОДЕРЖАНИЕ

Т. Нильсон, Ю. Росс. Обзор математических моделей спектральной яркости растительности	3 V
И. М. Вагина, Н. Н. Выгодская, И. И. Горшкова. Проверка адекватности теоретической модели отражения Гоудриана применительно к посевам озимой пшеницы	6
Ю. В. Тимофеев. Математическая модель спектральной яркости посева злаковых культур с учетом роста и развития растений	14
К. Е. Мелешко. Некоторые положения методики спектрофотометрических исследований во внелабораторных условиях, требования к аппаратуре	20
К. Е. Мелешко, Ю. К. Росс. Обобщение анкетных данных об аппаратуре для внелабораторных измерений оптических характеристик элементов подстилающей поверхности	26
А. В. Вишневский, А. Я. Грош, Ю. М. Пляшник, В. Г. Черепанов, В. И. Харук. Полевой спектрофотометр для систем автоматизации дистанционных исследований	29
В. А. Каневский, В. Ф. Рязанцев, В. Б. Небесный, Ю. Р. Шеляг-Сосонко, В. А. Миролюбов, Я. И. Мовчан, Ю. К. Росс, С. М. Кочубей. Дистанционные исследования растительности с помощью лазерного зондирования	37
В. П. Головин, В. В. Исаев, К. Е. Мелешко, С. Г. Слуцкая. Опыт обработки многоспектральных аэро- и космических снимков на интерактивной цифровой системе анализа изображений «Периколор»	43
В. И. Никифоров, Е. В. Щербенко. Устойчивость пространственно-частотных признаков структуры землепользования на космических изображениях	45
А. Е. Бельский, А. В. Вишневский, Г. М. Цибульский, В. Г. Черепанов, А. В. Чернявский. Комплекс ввода—вывода и предварительной обработки изображений	49
С. Г. Слуцкая. Метод накопления контрастов изображений	53
В. К. Пестряков, А. А. Семенов, А. В. Беленец, Е. Н. Попова. Лабораторное спектрофотометрирование в системе методов дистанционного зондирования сельскохозяйственных объектов	60
Т. Нильсон, Я. Антон, А. Кууск, Ю. Кыдыр, К. Росс, А. Савихин. Корреляционные связи яркостных характеристик некоторых сельскохозяйственных угодий в различных областях спектра и их интерпретация	66
Н. Н. Выгодская, И. И. Горшкова, Е. Е. Егоров, Н. В. Красникова, И. В. Мануковская, В. П. Некрасов. К вопросу о пространственно-временной изменчивости оптического состояния атмосферы на тестовых территориях	76
И. Ф. Берестовский, В. И. Никифоров, Ю. Г. Симонов, А. Д. Клещенко. Методика проведения и проект программы комплексного подспутникового эксперимента в интересах агрометеорологии	85
И. Ф. Берестовский. Агрометеорологические подспутниковые эксперименты	90
Н. Г. Харин, Т. А. Бабаева. Картирование процесса опустынивания с помощью материалов космических съемок	99
Г. И. Борисоглебский, А. Д. Клещенко, М. В. Бабий, Т. И. Сулейманов. Распознавание и оценка растительного покрова по космическим изображениям	104

Ю. Е. Самсонов, А. Ф. Гуров, В. В. Кузнецов. Мониторинг гумусового состояния почв (лабораторное моделирование)	114
А. В. Миролюбов, Я. И. Мовчан, А. П. Генов, В. Б. Небесный, В. А. Каневский, Ю. Р. Шеляг-Сосонко. Тепловая дистанционная диагностика степени деградации пастбищ	120
Л. Э. Бенедичук, В. В. Судак. К вопросу выбора отношения коэффициентов спектральной яркости предельно плотного растительного покрова зерновых культур при построении градуировочных кривых фотометра	123
В. В. Вольвач, А. А. Ген, Е. В. Мамаев, В. Н. Матухно, Р. С. Мкртчян, С. Ф. Кочегаров, Б. Л. Шиндеров. Аэродистанционное зондирование заморозков и динамический способ борьбы с ними	125

УДК 535.62.001.57

Обзор математических моделей спектральной яркости растительности. Нильсон Т., Росс Ю. Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий. Сб. докл. Всесоюз. совещания-семинара. Л.: Гидрометеониздат, 1986, с. 3—6.

Описываются достоинства и недостатки математических моделей спектральной яркости растительности, которые разделены на три группы по принципиальному подходу к проблеме.

Библ. 27.

УДК 581.55 : 535.39

Проверка адекватности теоретической модели отражения Гудриана применительно к посевам озимой пшеницы. Вагина И. М., Выгодская Н. Н., Горшкова И. И. Аэрокосмические методы исследования сельскохозяйственных угодий. Сб. докл. Всесоюз. совещания-семинара. Л.: Гидрометеониздат, 1986, с. 6—14.

Адекватность теоретической модели отражения Гудриана проверялась на основе расчетных и измеренных значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) для вариантов посевов озимой пшеницы с изменением относительной поверхности фитоэлементов от 0,7 до 5,5 для листьев разной окраски в интервале высот солнца от 37,5 до 67,5°. При расчетах принималось условие равенства коэффициентов спектрального отражения и пропускания отдельных листьев, в первом приближении справедливое для полупрозрачных листьев узколистных злаков. Из 53 сравниваемых вариантов в 62 % случаев расхождения между расчетными и измеренными значениями КСЯ не превышают $\pm 20\%$. Расхождения возрастают в красной и ближней инфракрасной областях спектра. Достигнуть лучшего совпадения расчетных и измеренных значений можно, учитывая вклад отражения от стеблей и колосов, а также используя истинные соотношения между коэффициентами отражения и пропускания для отдельных фитоэлементов.

Табл. 2. Ил. 3. Библ. 9.

Материалы научной конференции

**Аэрокосмические методы исследования
сельскохозяйственных угодий**

**ДОКЛАДЫ ВСЕСОЮЗНОГО СОВЕЩАНИЯ-СЕМИНАРА
ОБНИНСК, НОЯБРЬ 1983 г.**

Редактор Л. В. Ковель. Техн. редактор Г. В. Ивкова. Корректор И. Б. Михайлова. Н/К. Сдано в набор 29.11.85. Подписано в печать 20.05.86. М-15146. Формат 60×90^{1/16}. Бум. тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 9,0. Кр.-отт. 9,13. Уч.-изд. л. 10,01. Тираж 570 экз. Индекс ПРЛ-195. Заказ № 419. Цена 80 коп. Гидрометеониздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгения Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.