

УДК 528.7:681.3

## Оптимізація вибору спектрального діапазону дистанційного спостереження ландшафту

**В. М. Фроленко**

Академія Збройних сил України, Київ

*Надійшла до редакції 12.05.97*

---

Розглянуто методику визначення оптимального щодо забезпечення найбільшої колірної відмінності між об'єктом та фоном спектрального діапазону роботи оптико-електронної апаратури дистанційного спостереження з урахуванням спектральних властивостей об'єктів ландшафту, оптичного приймального тракту тощо.

---

Дистанційні спостереження об'єктів ландшафту усе ширше впроваджуються та відіграють суттєву роль в картографії, геології, сільському господарстві та інших галузях науки і виробництва. Значна частина даних дистанційного спостереження (ДС) одержується в УФ-, видимому та ІЧ-діапазоні електромагнітного спектру, при тому, що переважна більшість сучасної оптико-електронної апаратури ДС аерокосмічного базування є багатозональною [5]. Така необхідність викликана досить складним характером спектральних властивостей об'єктів ДС, наслідком якого є неможливість отримання аерокосмічних знімків задовільної інформативності в будь-якому окремо взятому оптичному діапазоні для різноманітних комбінацій «об'єкт—фон». Емпіричним шляхом встановлено, що для вирішення широкого кола задач оптико-електронна апаратура ДС повинна мати 3—6 спектральних діапазонів реєстрації (див. табл. 1).

Однак у більшості випадків робочі спектральні діапазони в багатозональній апаратурі ДС є довільними і суттєво розрізняються за інформативністю. Виняток складають середній та далекий ІЧ-діапазони, розміщення зон реєстрації в яких детермінується оптичною прозорістю земної атмосфери. Оптимальний вибір спектральних діапазонів реєстрації оптико-електронної апаратури неможливий без урахування спектральних характеристик відбиван-

ня (власного випромінювання) об'єктів ДС, спектрального пропускання середовища, де розміщено апаратуру ДС та спектральних характеристик її приймача (приймачів) оптичного випромінювання.

Нижче викладаються моделі, які дозволяють оптимізувати вибір спектрального діапазону реєстрації одноканальної апаратури ДС. Їхня відмінність від більшості існуючих методів спектральної оптимізації [1, 2] полягає в урахуванні колірних спроможностей зору оператора-інтерпретатора. При виконанні оптимізації зроблені такі основні обмеження і припущення:

- усі спектральні діапазони, що розглядаються, настільки вузькі, що усі спектральні величини в їх межах можна вважати постійними (припущення монохроматичності);
- існує деякий тривимірний афінний рівноконтрастний колірний простір  $\langle U, V, W \rangle$  (припущення колірної ознаки);
- енергетичні обмеження зонального сигналу в апаратурі ДС не розглядаються.

### ФОРМУВАННЯ КОЛІРНО-РІЗНИЦЕВОГО СИГНАЛУ В ОПТИЧНОМУ ПРОГЛЯДОВОМУ ПРИЛАДІ

Нехай зображення об'єкта і фону на зональному аерознімку описуються векторами  $G_o$  і  $G_f$  в рівно-

Таблиця 1. Спектральні діапазони реєстрації

Країна	Вид апаратури	Тип апаратури	Спектральні діапазони
США	Авіаційна скануюча	RS-18C	0.32—0.4 мкм
			2.5—5.0 мкм
			7.6—13.8 мкм
Росія	Авіаційна скануюча	Радуга—ОН	3—5 мкм
			8—12.5 мкм
Росія, Україна	Авіаційна фотографічна	МКФ-6М	0.46—0.5 мкм
			0.52—0.56 мкм
			0.58—0.62 мкм
			0.64—0.68 мкм
			0.70—0.74 мкм
			0.76—0.86 мкм
США, ЄС	Космічна цифрова	Quick Bird	0.5—0.6 мкм
			0.6—0.7 мкм
			0.7—0.8 мкм
			0.8—0.9 мкм
Росія	Космічна скануюча	MOS-M	0.449—0.511 мкм
			0.532—0.576 мкм
			0.645—0.677 мкм
			0.772—0.815 мкм
Росія, Україна	Космічна оптико-електронна	МСУ-Э	0.525—0.60 мкм
			0.60—0.71 мкм
			0.72—0.80 мкм
			0.82—0.995 мкм
Росія, Україна	Космічна скануюча	МСУ-С	0.55—0.70 мкм
			0.85—1.10 мкм

контрастному кольорному просторі, де  $\mathbf{G}^T = (U, V, W)$ . При цьому рівноконтрастний простір пов'язано зі стандартним колориметричним простором  $\mathbf{F}^T = (X, Y, Z)$  CIE XYZ 1931 афінним перетворенням з матрицею  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{G} = \mathbf{A} \times \mathbf{F}. \quad (1)$$

Тоді кольорно-різницевий сигнал  $\Delta \mathbf{G} = \mathbf{G}_o - \mathbf{G}_f$  складає

$$\Delta \mathbf{G} = \mathbf{A} \times \Delta \mathbf{F}. \quad (2)$$

Якщо реєстрація здійснюється на довжині хвилі  $\lambda_p$ , а прогляд зонального аерознімка — на спектральному інтервалі  $\Delta \lambda_n$ , то компоненти вектора  $\Delta \mathbf{F}(\Delta \lambda_n)$  згідно з відомими колориметричними формулами [4] складуть

$$\begin{aligned} \Delta X(\Delta \lambda_n) &= \frac{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \Delta \tau(\lambda_p) \bar{x}(\lambda_n) d\lambda_n}{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{y}(\lambda_n) d\lambda_n}, \\ \Delta Y(\Delta \lambda_n) &= \Delta \tau(\lambda_p), \\ \Delta Z(\Delta \lambda_n) &= \frac{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \Delta \tau(\lambda_p) \bar{z}(\lambda_n) d\lambda_n}{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{y}(\lambda_n) d\lambda_n}, \end{aligned} \quad (3)$$

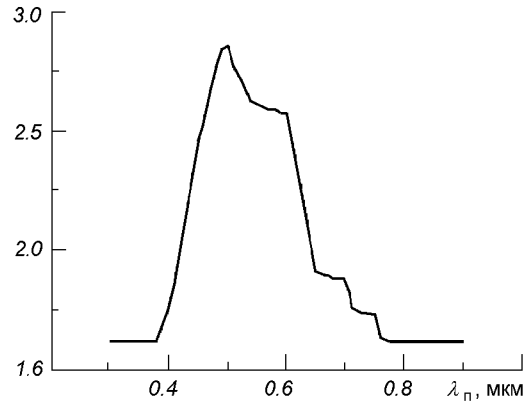


Рис. 1. Функція спектральної кольорної ефективності

де  $\Phi_n(\lambda_n)$  — спектральний розподіл оптичного потоку джерела підсвітки,  $\Delta \tau(\lambda_p) = \tau_f(\lambda_p) - \tau_o(\lambda_p)$  — варіація спектрального оптичного коефіцієнта пропускання сполучення «об'єкт—фон»,  $\bar{x}(\lambda_n)$ ,  $\bar{y}(\lambda_n)$ ,  $\bar{z}(\lambda_n)$  — стандартні спектральні криві додавання колориметричної системи CIE XYZ 1931. Тоді кольорна відмінність  $\Delta E$  об'єкта від фону на зональному аерокосмічному знімку з урахуванням (2), (3) та згідно з властивостями рівноконтрастного кольорового простору становитиме

$$\begin{aligned} \Delta E(\lambda_p, \Delta \lambda_n) &= \sqrt{|\Delta \mathbf{G}(\lambda_p, \Delta \lambda_n)|^2} = \\ &= \Delta \tau(\lambda_p) \sqrt{\mathbf{f}^T(\Delta \lambda_n) \times \mathbf{A} \times \mathbf{f}(\Delta \lambda_n)}, \end{aligned} \quad (4)$$

де

$$\mathbf{f}^T(\Delta \lambda_n) = \left( \frac{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{x}(\lambda_n) d\lambda_n}{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{y}(\lambda_n) d\lambda_n}; 1; \frac{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{z}(\lambda_n) d\lambda_n}{\int_{\Delta \lambda_n} \Phi_n(\lambda_n) \bar{x}(\lambda_n) d\lambda_n} \right)$$

— вектор кольорних ефективностей підсвітки. На рис. 1 показано типовий розподіл функції кольорної ефективності  $\sqrt{\mathbf{f}^T(\Delta \lambda_n) \times \mathbf{A} \times \mathbf{f}(\Delta \lambda_n)}$  при  $|\Delta \lambda_n| = \text{const}$  для найпростішого рівноконтрастного кольорового простору [4] з матрицею

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ -3 & 6 & 3 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Умови визначення оптимального спектрального діапазону реєстрації оптико-електронної апаратури ДС можна знайти шляхом аналітичного дослідження співвідношення (4) на екстремум:

$$\frac{\partial \Delta E(\lambda_p, \Delta \lambda_n)}{\partial \lambda_p} = 0, \quad \frac{\partial \Delta E(\lambda_p, \Delta \lambda_n)}{\partial \lambda_n} = 0. \quad (6)$$

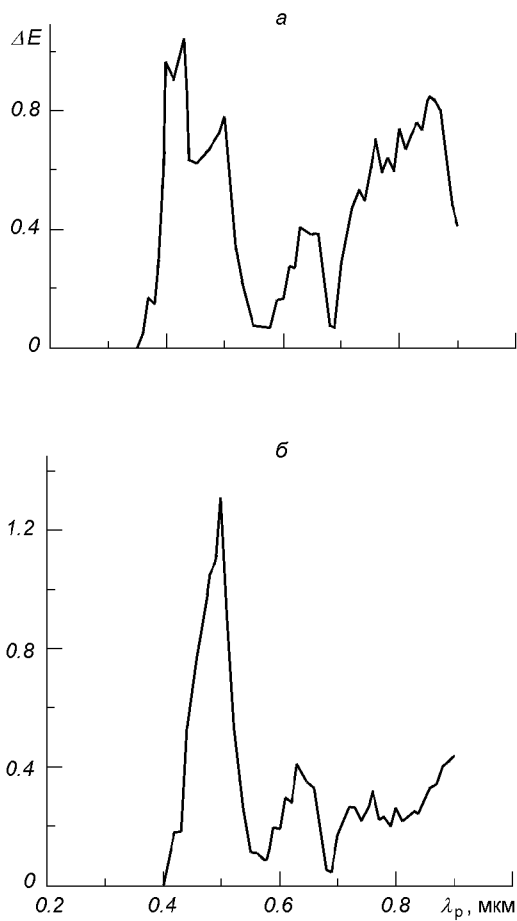


Рис. 2. Максимальна колірні відмінність комбінації «різнотравне співтовариство рослин/такир» на зональному аерознімку оптико-електронної апаратури ДС: *a* — фоторезистор CdS, *б* — фотодіод GaAs

На рис. 2 наведено приклад спектрального розподілу кількості порогів максимальної колірної відмінності об'єкта від фону на зональних аерознімках, одержаних за допомогою різних приймачів випромінювання.

**ФОРМУВАННЯ ЗОНАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ В АПАРАТУРІ ДИСТАНЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Основою оптимізації вибору спектрального діапазону ДС об'єктів аероландшафту є розподіл варіації оптичного коефіцієнта пропускання зонального аерознімка за довжиною хвилі реєстрації. Вона може бути визначена з використанням відомого співвідношення [6]:

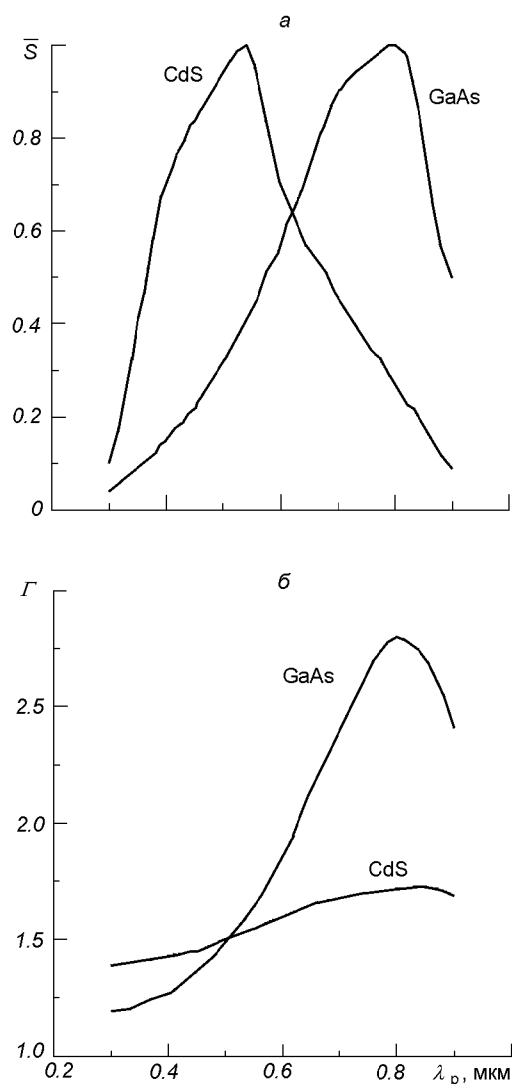


Рис. 3. Спектральні характеристики (*a* — відносна світлочутливість, *б* — показник передавання) напівпровідникових приймачів оптичного випромінювання

$$\frac{\tau_{\phi}(\lambda_p)}{\tau_o(\lambda_p)} = \left[ \frac{\rho_o(\lambda_p)}{\rho_{\phi}(\lambda_p)} \right]^{\Gamma(\lambda_p)}, \tag{7}$$

де  $\rho_o(\lambda_p)$  і  $\rho_{\phi}(\lambda_p)$  — спектральні коефіцієнти відбиття елементів ландшафту,  $\Gamma(\lambda_p)$  — показник передавання оптичного сигналу в оптико-електронній системі ДС. Із (7) випливає, що

$$\Delta\tau(\lambda_p) = \tau_o(\lambda_p) \left\{ \left[ \frac{\rho_o(\lambda_p)}{\rho_{\phi}(\lambda_p)} \right]^{\Gamma(\lambda_p)} - 1 \right\}. \tag{8}$$

Пропускання зонального аерознімка, крім спектрального відбиття об'єкта, залежить від спектру

Таблиця 2. Оптимальні діапазони реєстрації оптико-електронної апаратури з приймачем оптичного випромінювання на базі фоторезистора CdS та фотодіода GaAs

Об'єкт	Фон: колірна відмінність (спектральний діапазон реєстрації, нм)
<b>CdS</b>	
Ґрунти чорноземні (ГЧ)	ГС: 1.07—1.10 (0.72—0.74), ГП: 1.04—1.53 (0.40—0.79)
Ґрунти опідзолени і суглинисті (ГС)	ГП: 0.45 (0.58), ГВ: 0.91 (0.39), Такир: 0.61 (0.85)
Пісок та гірничі породи (ГП)	Такир: 0.75 (0.85)
Вапняк, глина (ГВ)	ГП: 0.68 (0.36), Такир: 1.02—1.13 (0.83—0.87)
Водна поверхня	ГС: 1.01—1.27 (0.67—0.79), ГП: 1.04—1.55 (0.59—0.79), ГВ: 1.02—1.76 (0.51—0.87), Такир: 1.04—1.10 (0.67—0.69), ХР: 1.08—1.22 (0.67—0.79), ЛР: 1.00—1.38 (0.67—0.85), ТР: 1.18—1.40 (0.40—0.43), НК: 1.03—1.26 (0.67—0.79), ВК: 1.09—1.64 (0.63—0.79)
Нафта	ГС: 0.81 (0.82), ГП: 0.93 (0.82), ГВ: 1.06—1.25 (0.80—0.87), Вода: 1.00—1.19 (0.63—0.70), Такир: 0.52 (0.36), ХР: 0.89 (0.82), ЛР: 1.00—1.14 (0.80—0.85), ТР: 1.18—1.33 (0.40—0.43)
Хвойні породи рослин (ХР)	ГС: 0.44 (0.40), ГП: 0.80 (0.48), ЛР: 0.47 (0.90), ТР: 0.61 (0.43)
Листяні породи рослин (ЛР)	ГС: 0.56 (0.90), ГП: 0.63 (0.48), ТР: 0.64 (0.50)
Різотравне співтовариство рослин (ТР)	ГЧ: 1.05—1.22 (0.72—0.81), ГС: 0.97 (0.43), ГП: 1.04—1.27 (0.40—0.43), ГВ: 1.11—1.65 (0.39—0.51), Такир: 1.04 (0.43)
Незрілі польові культури (НК)	ГЧ: 1.05—1.19 (0.47—0.50), ГС: 0.15 (0.58), ХР: 0.45 (0.48), ЛР: 0.56 (0.90), ТР: 0.97 (0.43)
Зрілі польові культури (ДК)	ГЧ: 1.01—1.38 (0.56—0.85), ГС: 0.58 (0.90), ХР: 0.55 (0.61), ЛР: 0.50 (0.65), ТР: 1.02 (0.50), НК: 0.58 (0.90)
Виноградник (ВК)	ГС: 0.43 (0.64), ГП: 0.55 (0.39), ЛР: 0.50 (0.65), ТР: 1.02 (0.50), НК: 0.50 (0.65), ДК: 0.47 (0.89)
<b>GaAs</b>	
Ґрунти чорноземні (ГЧ)	ГС: 1.02—1.24 (0.49—0.62), ГП: 1.10—1.88 (0.45—0.66)
Ґрунти опідзолени і суглинисті (ГС)	ГП: 0.74 (0.48), ГВ: 1.04—1.29 (0.41—0.52), Такир: 0.29 (0.90)
Пісок та гірничі породи (ГП)	Такир: 0.66 (0.49)
Вапняк, глина (ГВ)	ГП: 0.73 (0.43), Такир: 1.02—1.23 (0.42—0.52)
Водна поверхня	ГС: 1.30—1.71 (0.67—0.90), ГП: 1.06—1.77 (0.55—0.90), ГВ: 1.07—1.85 (0.48—0.90), Такир: 1.03—1.55 (0.67—0.90), ХР: 1.16—1.72 (0.67—0.90), ЛР: 1.27—1.78 (0.67—0.90), ТР: 1.12—1.77 (0.68—0.90), НК: 1.24—1.72 (0.67—0.90), ВК: 1.14—1.80 (0.63—0.90)
Нафта	ГС: 0.79 (0.90), ГП: 0.86 (0.90), ГВ: 1.04 (0.90), Вода: 1.06—1.55 (0.67—0.85), Такир: 0.53 (0.43), ХР: 1.01—1.30 (0.47—0.49), ЛР: 1.01—1.02 (0.47—0.48), ТР: 1.17—1.67 (0.45—0.51)
Хвойні породи рослин (ХР)	ГС: 0.65 (0.48), ГП: 1.18—1.38 (0.47—0.50), ЛР: 0.38 (0.50), ТР: 0.69 (0.50)
Листяні породи рослин (ЛР)	ГС: 0.37 (0.48), ГП: 1.05—1.11 (0.47—0.48), ТР: 1.06 (0.50)
Різотравне співтовариство рослин (ТР)	ГЧ: 1.01—1.03 (0.57—0.58), ГС: 1.10—1.20 (0.49—0.50), ГП: 1.17—1.88 (0.45—0.52), ГВ: 1.02—2.40 (0.41—0.63), Такир: 1.04—1.31 (0.48—0.50)
Незрілі польові культури (НК)	ГЧ: 1.02—1.34 (0.48—0.62), ГС: 0.20 (0.57), ХР: 0.78 (0.48), ЛР: 0.50 (0.48), ТР: 1.04—1.31 (0.48—0.50)
Зрілі польові культури (ДК)	ГЧ: 1.04—1.57 (0.49—0.66), ГС: 0.43 (0.58), ХР: 0.65 (0.48), ЛР: 0.37 (0.60), ТР: 1.05—1.32 (0.49—0.51), НК: 0.31 (0.60)
Виноградник (ВК)	ГС: 0.63 (0.52), ГП: 0.58 (0.44), ЛР: 0.78 (0.48), ТР: 1.11—1.72 (0.47—0.52), НК: 0.40 (0.51), ДК: 0.43 (0.49)

Примітка. Колірна відмінність подається в порогах рівноконтрастної системи CIE UVW 1964

прозорості атмосфери  $\tau_a(\lambda_p)$ , спектрального розподілу освітлювання ландшафту  $\Phi_o(\lambda_p)$  та зведеної спектральної світлочутливості приймального пристрою  $S(\lambda_p)$ :

$$\tau_o(\lambda_p) = [\Phi_o(\lambda_p)\rho_o(\lambda_p)\tau_a(\lambda_p)S(\lambda_p)]^{-\Gamma(\lambda_p)}. \quad (9)$$

Підстановка (9) у (8) дозволяє одержати

$$\Delta\tau(\lambda_p) = [\Phi_o(\lambda_p)\tau_a(\lambda_p)S(\lambda_p)]^{-\Gamma(\lambda_p)} \times [\rho_\phi(\lambda_p)^{-\Gamma(\lambda_p)} - \rho_o(\lambda_p)^{-\Gamma(\lambda_p)}]. \quad (10)$$

Таблиця 3. Оптимальні діапазони реєстрації класів об'єктів для оптико-електронної апаратури з приймачем оптичного випромінювання на базі фоторезистора CdS та фотодіода GaAs

Клас об'єктів ДС	Діапазон реєстрації
CdS	
Ґрунти, вода	0.72—0.78 мкм
Гірничі породи, нафта	0.83—0.87 мкм
Рослини	0.41—0.49 мкм
	0.85—0.90 мкм
GaAs	
Ґрунти, гірничі породи	0.48—0.62 мкм
Вода, нафта	0.67—0.85 мкм
Рослини	0.45—0.51 мкм
	0.57—0.62 мкм

**ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ СПЕКТРАЛЬНОГО ДІАПАЗОНУ РЕЄСТРАЦІЇ В АПАРАТУРІ ДИСТАНЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ**

Необхідні спектральні характеристики приймачів оптичного випромінювання, що розглядалися в [3], пояснюються рис. 3. Методика визначення оптимального діапазону реєстрації оптико-електронної апаратури ДС містить такі кроки:

а) розрахунок спектральної варіації коефіцієнта пропускання  $\Delta\tau(\lambda_p)$  реєструючого середовища з використанням співвідношення (10);

б) розрахунок колірної відмінності  $\Delta E(\lambda_p, \Delta\lambda_n)$  між об'єктом та фоном на проглядовому пристрої згідно з (4);

в) визначення максимальної колірної відмінності за (6);

г) пошук допустимого спектрального діапазону реєстрації, в якому поріг колірної відмінності перевищує одиницю.

Вихідними даними методики є спектральні розподіли, які характеризують зовнішнє середовище —  $\Phi_o(\lambda_p)$ ,  $\tau_a(\lambda_p)$ , об'єкти та фони —  $\rho_o(\lambda_p)$ ,  $\rho_f(\lambda_p)$ , реєструючу апаратуру —  $S(\lambda_p)$ ,  $\Gamma(\lambda_p)$  та функція спектральної колірної ефективності рівноконтрастного простору.

Результати розрахунків оптимальних спектральних діапазонів реєстрації для оптико-електронної апаратури ДС зведені у табл. 2. Аналіз цих даних показує, що інформативність різних ділянок оптичного спектру неоднакова і залежить від виду об'єктів.

За таким показником усі об'єкти ДС можуть бути поділені на класи виявлення з різними значеннями оптимальних спектральних діапазонів реєстрації (табл. 3).

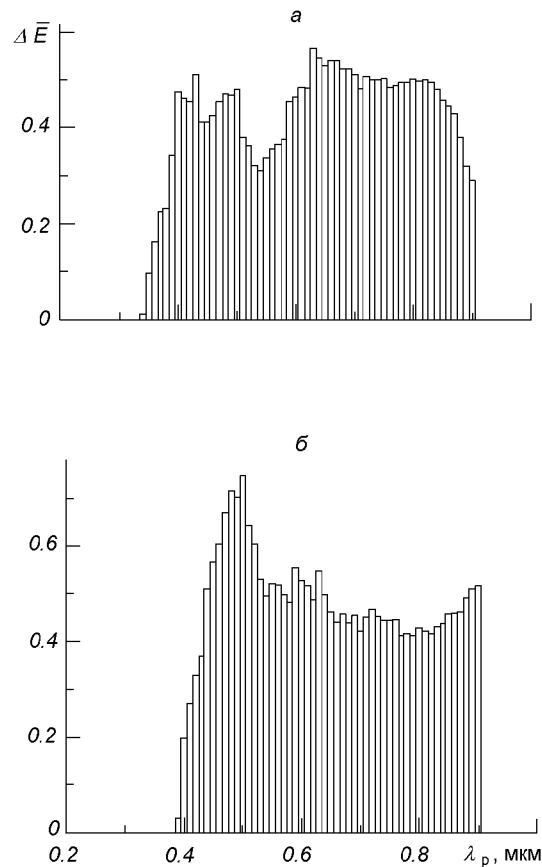


Рис. 4. Середня колірна відмінність комбінації «об'єкт—фон», яку забезпечує оптико-електронна апаратура ДС: а — фоторезистор CdS, б — фотодіод GaAs

Рис. 4 описує середню за усіма розглянутими в табл. 2 комбінаціями «об'єкт—фон» кількість порогів колірної відмінності між ними, яка забезпечується відповідною оптико-електронною апаратурою ДС. Вона може бути показником ефективності спектральних діапазонів реєстрації цієї апаратури.

**ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ**

Проведені дослідження свідчать про те, що перспективна видова оптико-електронна апаратура ДС повинна бути оптимізованою за спектральним діапазоном реєстрації, що досягається шляхом урахування спектральної відбивальної здатності об'єктів аероландшафту. Технічно варто надати перевагу адаптивно-зональній апаратурі ДС, яка, наприклад, може бути сконструйована [7] згідно зі спектрально-метричними принципами. Однак навіть оптимальне визначення спектрального діапазону реє-

страції не дозволяє однозональній апаратурі ДС забезпечити впевнене виявлення близько 40 відсотків сполучень «об'єкт—фон» (див. табл. 2). Вихід полягає у використанні багатозональної апаратури ДС, кількість та розташування спектральних каналів якої детермінується складом класів об'єктів, які планується спостерігати. Повна реалізація можливостей такої апаратури забезпечується засобом одночасного колірною синтезування комплексу отриманих зональних аерокосмічних знімків.

1. Алмазов И. В., Стеценко А. Ф., Севастьянова М. Н. Оценка информативного качества многозональных аэрофотоизображений // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1995.—№ 3.—С. 101—106.
2. Балабанов В. В., Гогохия В. В., Доброзраков А. Д. К выбору оптимальных спектральных интервалов приборов дистанционного зондирования для различения природных объектов по их спектральным характеристикам // Исслед. Земли из космоса.—1981.—№ 2.—С. 57—61.
3. Ишанин Г. Г. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. — Л.: Машиностроение, 1986.—176 с.

4. Кривошеев М. И., Кустарев А. И. Цветовые измерения. — М.: Энергоатомиздат, 1990.—240 с.
5. Мухамедьяров Р. Д. Приборы для дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне длин волн // Оптический журн.—1993.—№ 9.—С. 6—8.
6. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. — Л.: Машиностроение, 1986.—388 с.
7. Смирнов А. Я., Меньшиков Г. Г. Сканирующие приборы. — Л.: Машиностроение, 1986.—145 с.

---

**MONOCHROMATIC SINGLE-CHANNEL COLOUR  
OPTIMIZATION OF CHOOSING A SPECTRAL ZONE  
FOR REMOTE SENSING OF A LANDSCAPE**

**V. M. Frolenko**

We discuss a technique for finding a spectral zone which provides the greatest colour distinction between the object and background when remote sensing is made with imagery optoelectronic equipment. The technique takes into account the spectral properties of landscape features, optical reception channel, etc.