

УДК 528.8:004

В. В. Гнатушенко¹, О. О. Кавац², О. Л. Макаров³, Д. П. Бражнік¹

¹ Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

² Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

³ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЗЛИТТЯ СКАНЕРНИХ ДАНИХ АЕРОКОСМІЧНОЇ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ ЗЙОМКИ

Досліджуються методи злиття, які дозволяють найбільш ефективно підвищити інформативність багатоспектральних аерокосмічних зображень надвисокого просторового розрізнення з мінімальними спотвореннями кольору. Отримані результати свідчать про те, що синергетична обробка сканерних багатоспектральних даних за допомогою запропонованої інформаційної технології на основі ІСА- та вейвлет-перетворень у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. Синтезоване зображення має підвищену інформативність без спотворень кольору.

ВСТУП

Знімки сучасних систем дистанційного зондування Землі дозволяють вирішувати різноманітні задачі, а саме: провадити оперативний моніторинг земельних ресурсів, забудов міст, моніторити стан навколишнього середовища і вплив техногенних факторів, виявляти забруднені території, несанкціоновані забудови, оцінювати стан лісових насаджень тощо. При вирішенні цих задач для підвищення інформативності первинних даних класично використовуються методи злиття (pan-sharpening, fusion) зображень різних спектральних каналів [10, 11]. Для отримання синтезованого зображення з найкращими показниками інформативності необхідно вибрати найбільш ефективний метод злиття, оскільки від цього залежить вирішення поставленої тематичної задачі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На даний час відомо багато різних методів об'єднання фотограмметричних зображень, що дозволяють підвищити інформативність багатоспектральних знімків [3–10, див. також <http://scialert.net/abstract/?doi=rjit.2011.12.23>]. При ви-

користанні процедури злиття зображень просторове розрізнення мультиспектрального зображення підвищується, як правило, в результаті послідовного виконання таких основних етапів.

1. Перетворення мультиспектрального зображення низького просторового розрізнення з базису RGB (червоний — зелений — синій) у будь-який трикоординатний базис, в якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості.

2. Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного знімка і подальша інтерполяція (лінійна, бікубічна, за правилом найближчого сусіда і т. д.).

3. Заміна яскравісної складової перетвореного зображення панхроматичним зображенням високого просторового розрізнення.

4. Зворотне перетворення в базис RGB.

Якість роботи методу злиття визначається за двома компонентами, а саме підвищення просторової розрізненості та наявність (відсутність) кольорних спотворень. У численних дослідженнях, присвячених попередній обробці багатотонових цифрових зображень, основну увагу приділено покращенню їхньої візуальної якості без урахування фізичних механізмів фіксації видової інформації, зокрема міжканальної кореляції, що унеможлиблює визначення інфор-

© В. В. ГНАТУШЕНКО, О. О. КАВАЦ, О. Л. МАКАРОВ,
Д. П. БРАЖНІК, 2014

мативності зображень з позицій аналізу та інтерпретації (метод Брові). Інші дослідження присвячені розв'язанню даної проблеми на основі обчислення статистичних параметрів цифрових зображень (метод головних складових (PCA)), визначення яких утруднено на великих розмірностях первинних даних. Певні дослідження основані на переході до колірно-різницевої метрики комп'ютерної графіки (колірно-метричні методи), в яких вирішується питання про декореляцію первинних видових даних, однак у таких методах вдається врахувати внесок лише спектральних складових первинних багатотональних зображень. Одними з найбільш сучасних методів є різновиди дискретного вейвлет-перетворення (DWT) [8, 9]. Але всі класичні методи, зокрема Грама — Шмідта, Брові, PCA, аналіз незалежних компонент (ICA) та IHS-алгоритм, не враховують особливостей побудови сучасних сканувальних пристроїв, відповідних структур і форматів даних сканувальних систем [3—6]. Окреме застосування зазначених підходів тією чи іншою мірою призводить до спотворення кольорів первинних зображень. Причиною таких спотворень є той факт, що відомі алгоритми головним чином розроблялися для об'єднання зображень супутника SPOT. На відміну від відповідних характеристик зазначеного космічного апарата довжина панхром-хвилі сучасних супутників (IKONOS, «QuickBird», «WorldView-2» та ін.) була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного

діапазону. Крім того, сучасні сканерні системи досконаліші та мають більше, ніж чотири канали (наприклад, «WorldView-2» має вісім каналів).

Тому виникає необхідність у новій технології підвищення просторової розрізненості супутникових зображень з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації та у проведенні подальшого дослідження ефективності злиття з отриманням кількісних оцінок (критеріїв) інформативності (якості) синтезованих зображень.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У роботі [1] запропоновано нову інформаційну технологію підвищення просторового розрізнення цифрових аерокосмічних зображень на основі ICA- та вейвлет-перетворень, яка дозволяє суттєво підвищити інформативність первинних даних та не призводить до колірних спотворень. Послідовність процедури така. Після перетворення ICA перша складова мультиспектрального зображення замінюється панхроматичним зображенням. Наступним етапом є зворотне перетворення ICA та перетворення отриманого зображення у колірну модель HSV (позначимо HSV_{MOD}). Далі вихідне мультиспектральне зображення переводиться у колірний простір HSV (позначимо HSV_{MUL}). Яскравісна складова V зображення HSV_{MUL} замінюється яскравісною складовою зображення HSV_{MOD} , а результат перетворюється з колірної моделі HSV до колірної моделі RGB. Останнім кроком алгоритму є злит-

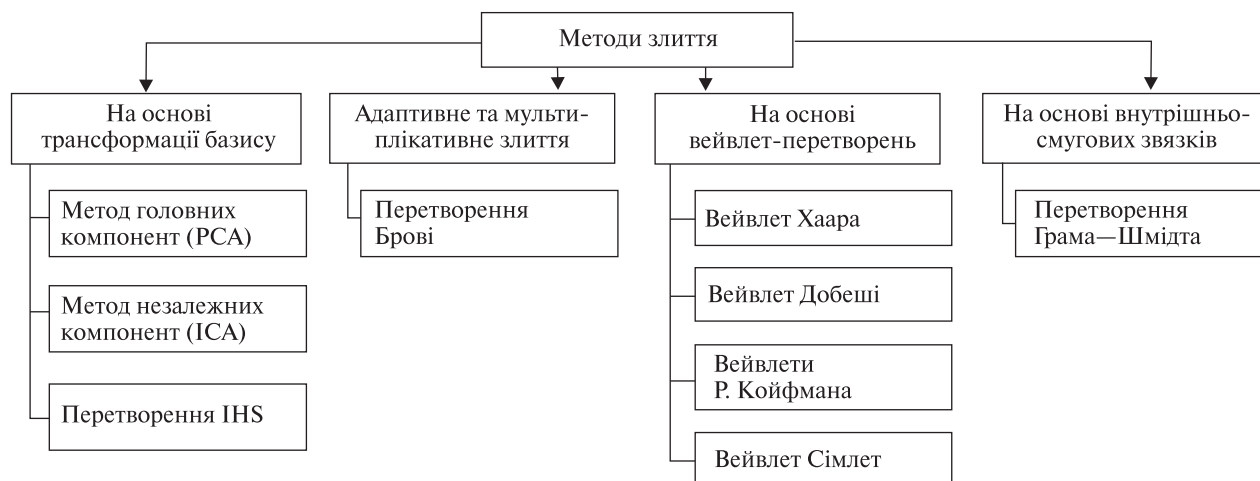


Рис. 1. Класифікація методів злиття багатоканальних зображень

тя отриманого зображення Mul_{ICA} з PAN за допомогою вейвлетів та отримання вихідного зображення. Одним із вагомих результатів авторів є визначення базових вейвлетів та рівня декомпозиції [2]. Визначено, що найкращий результат злиття панхроматичного та мультиспектрального зображення дає вейвлет Добеші 20-го рівня декомпозиції [2]. Для порівняльного аналізу розробленої технології з класичними методами злиття багатоканальних зображень спочатку розглянемо класифікацію відомих підходів (рис. 1). Усі методи можна поділити на:

- методи на основі трансформації базису;
- методи адаптивного та мультиплікативного злиття;
- методи злиття на основі вейвлет-перетворення;
- методи злиття на основі внутрішньосмугових зв'язків.

Дослідження впливу методів злиття відбувалися на первинних сканерних знімках, отриманих супутником надвисокого просторового розрізнення

Таблиця 1. Значення інформаційної та сигнальної ентропії

Зображення	Позначення	E	$E_{сиг}$
Панхроматичне зображення	PAN	7.103	7.541
Первинне мультиспектральне зображення	MUL	7.007	7.195
Тестове мультиспектральне зображення	TEST	7.246	7.526
PCA	PCA	7.077	7.119
ICA	ICA	7.004	7.195
HSV	HSV	6.897	6.909
Брові	CN BROVEY	6.057	6.685
Грама — Шмідта	GRAM-SCHMIDT	7.053	7.067
Лінійна IHS	IHS LINEAR	7.145	7.561
Нелінійна IHS-модель	IHS NONLINEAR	7.249	7.795
Вейвлет Хаара	HAAR	7.151	7.484
Вейвлет Добеші	DAUBECHIES	7.177	7.558
Вейвлет Р. Койфмана	COIFLET	7.171	7.543
Симплет	SYMPLET	7.173	7.547
Запропонована технологія	Proposed	7.314	7.381

«WorldView-2». Фрагменти панхромного та мультиспектрального знімків подано на рис. 2 (фрагменти 1, 2). Після злиття зображень за розглянутими вище методами були отримані зображення, які навіть візуально у порівнянні з первинним мультиспектральним зображенням відрізняються більшою чіткістю, але мають суттєві колірні спотворення (рис. 2, 3—13). Синтезоване зображення за новою інформаційною технологією на основі ICA- та вейвлет-перетворень наведено на рис. 2, 14.

З метою визначення впливу кожного методу на якість мультиспектрального зображення у роботі отримано кількісні оцінки інформативності первинного та синтезованих мультиспектральних зображень за усіма методами злиття та новою розробленою технологією на основі ICA-вейвлет-перетворень, а саме: інформаційна та сигнальна ентропія, $SSIM$, $PSNR$ та інші. Методи декореляції просторових розподілів яскравості основані на обчисленні статистичних параметрів цифрових зображень, які важко визначити при великих обсягах первинних даних. Також у рамках таких методів враховується лише внесок спектральної інформації, що міститься у первинних мультиспектральних зображеннях.

Візуальну якість зображення можна оцінити за критеріями максимуму характеристик інформативності, до яких належить інформаційна ентропія:

$$E(x) = -\sum_{k=0}^{N-1} p_k \cdot \log_2 p_k, \quad (1)$$

Таблиця 2. Значення $PSNR$

Зображення / Канал	R	G	B
MUL	33.276	33.275	33.275
PCA	33.223	33.616	33.692
ICA	33.223	33.616	33.691
HSV	33.275	33.254	33.290
CN BROVEY	33.011	33.375	33.442
GRAM-SCHMIDT	33.186	33.350	33.442
IHS LINEAR	33.177	33.604	33.703
IHS NONLINEAR	32.969	33.017	33.343
HAAR	33.918	34.374	34.425
DAUBECHIES	33.911	34.380	34.452
COIFLET	33.918	34.389	34.459
SYMPLET	33.904	34.371	34.443
Proposed	33.313	32.965	33.280

де N — кількість рівнів яскравості, p_k — частота k -го рівня яскравості вибірки x , $k = 0, 1, \dots, 255$ — рівень яскравості, $\sum p_k = 1$.

Сигнальна ентропія визначається виразом

$$E_{\text{сиг}}(x) = -\sum_{i=0}^{N-1} p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (2)$$

де N — кількість рівнів яскравості, $p_i = ix_i / \sum_{j=0}^{255} J \cdot x_j$ — аналог частоти, частота i -го рівня яскравості вибірки x , $i = 0, 1, \dots, 255$ — рівень яскравості, $\sum p_i = 1$.

У табл. 1 наведено значення інформаційної та сигнальної ентропій E та $E_{\text{сиг}}$, отримані для первинних мультиспектрального та панхроматичного зображень, а також для синтезованих зображень за усіма вказаними методами (розмір зображень 4604×4600 пкл).

Важливими характеристиками оцінки якості зображення є також $PSNR$, кореляція та індекс структурної схожості. У виразах (3)—(9) наведено математичні вирази для їхнього обчислення.

Найчастіше використовується пікове відношення сигнал-шум ($PSNR$), яке означає співвідношення між максимумом можливого значення сигналу і потужністю шуму, що спотворює значення сигналу:

$$PSNR = 20 \lg \left[L^2 / \left(\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_r(x, y) - I_f(x, y))^2 \right) \right], \quad (3)$$

де L — кількість рівнів яскравості зображення.

Таблиця 3. Значення $CORR$

Зображення / Канал	R	G	B
MUL	0.959	0.959	0.959
PCA	0.955	0.961	0.958
ICA	0.955	0.961	0.958
HSV	0.959	0.958	0.955
CN BROVEY	0.946	0.954	0.949
GRAM-SCHMIDT	0.958	0.960	0.958
IHS LINEAR	0.939	0.951	0.948
IHS NONLINEAR	0.932	0.935	0.935
HAAR	0.967	0.972	0.970
DAUBECHIES	0.967	0.972	0.971
COIFLET	0.967	0.972	0.971
SYMPLET	0.967	0.972	0.970
Proposed	0.962	0.955	0.956

У табл. 2 наведено значення $PSNR$ для кожного із методів злиття за трьома каналами.

Найкращим значенням кореляції у нашому випадку є найменше при мінімальному зв'язку між компонентами. Кореляція між двома зображеннями описується виразом

$$CORR = \frac{2P_{xy}}{P_x + P_y}, \quad (4)$$

де

$$P_{xy} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_1(i, j) p_2(i, j), \quad P_x = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_x(i, j)^2,$$

$x, y = 1, 2, 3$; p_x — x -складова кольору.

У табл. 3 наведено значення $CORR$ для кожного із методів злиття за трьома каналами.

Значення міри структурної схожості $SSIM$ обчислюється з виразів [12]:

$$SSIM = \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \right) \left(\frac{2\bar{X}\bar{Y}}{(\bar{X})^2 + (\bar{Y})^2} \right) \left(\frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \right), \quad (5)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij}, \quad \bar{Y} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_{ij}, \quad (6)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})^2, \quad (7)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y_{ij} - \bar{Y})^2, \quad (8)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{X})(y_{ij} - \bar{Y}), \quad (9)$$

Таблиця 4. Значення $SSIM$

Зображення / Канал	R	G	B
MUL	0.555	0.555	0.555
PCA	0.452	0.483	0.463
ICA	0.452	0.483	0.463
HSV	0.555	0.576	0.568
CN BROVEY	0.578	0.607	0.594
GRAM-SCHMIDT	0.562	0.600	0.589
IHS LINEAR	0.559	0.599	0.581
IHS NONLINEAR	0.566	0.542	0.558
HAAR	0.597	0.626	0.604
DAUBECHIES	0.584	0.613	0.595
COIFLET	0.587	0.617	0.598
SYMPLET	0.584	0.613	0.595
Proposed	0.592	0.601	0.593

де $X = \{x_{ij}\}$, $Y = \{y_{ij}\}$ — зображення, що порівнюються; M, N — розміри зображення; σ_{xy} — коваріація між x і y , σ_x^2 і σ_y^2 — відхилення.

У табл. 4 наведено значення *SSIM* для кожного із методів злиття за трьома каналами.

ВИСНОВКИ

Отримані характеристики свідчать про те, що обробка багатоспектральних знімків за допомогою нової інформаційної технології на основі ІСА- та вейвлет-перетворень у порівнянні з класичними методами злиття дає більш якісний результат. Синтезоване зображення має вищу інформативність, ніж первинні знімки без кольорних спотворень. Про це свідчать значення отриманих характеристик *SSIM*, *PSNR*, *CORR* та ін. Дослідження показали, що значення інформаційної ентропії перевищує відповідні значення, отримані для результатів при використанні інших методів злиття.

Наші подальші дослідження будуть присвячені удосконаленню запропонованої технології із залученням інформації, отриманої в інфрачервоному діапазоні.

1. Гнатушенко В. В., Кавац О. О. Інформаційна технологія підвищення просторової розрізненості цифрових супутникових зображень на основі ІСА- та вейвлет-перетворень // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. Комп'ютерні науки та інформаційні технології. — 2013. — № 771. — С. 28—32.
2. Кавац О. О., Гнатушенко В. В., Сафаров О. О. Дослідження впливу характеристик вейвлетів на ефективність об'єднання фотограмметричних зображень // Пр. Таврійського держав. агротехн. ун-ту. Прикладна геометрія та інженерна графіка. — 2013. — Вип. № 4, 56. — С. 33—40.
3. Akula R., Gupta R., Devi M. R. V. An efficient PAN sharpening technique by merging two hybrid approaches // Procedia Eng. — 2012. — 30. — P. 535—541. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.895>.
4. Blum R. S., Liu Z. Multi-sensor image fusion and its applications. — NW: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. — 512 p.
5. Chen F., et al. Fusion of remote sensing images using improved ICA mergers based on wavelet decomposition // Procedia Eng. — 2012. — 29. — P. 2938—2943. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.418>.
6. Heng Chu, Weile Zhu. Fusion of IKONOS satellite imagery using IHS transform and local variation // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.. — 2008. — 5, N 4.
7. Hnatushenko V., Safarov A. Computer technology more informative multispectral images of the earth surface //

Appl. Geometry and Engineering Graphics. — K.: KNU-BA, 2012. — Vol. 89. — P. 140—144.

8. Li S. Multisensor remote sensing image fusion using stationary wavelet transform: effects of basis and decomposition level // Int. J. Wavelets Multiresolut. Inform. Process. — 2008. — 6, N 1. — P. 37—50.
9. Nirmala D. E., Paul B. S., Vaidehi V. A novel multimodal image fusion method using shift invariant discrete wavelet transform and support vector machines // Proceedings of the International Conference on Recent Trends in Information Technology, Jun. 3—5, 2011. — Chennai, Tamil Nadu: IEEE Xplore Press, 2011. — P. 932—937. — DOI: 10.1109/ICRTIT.2011.5972405.
10. Pohl C., Van Genderen J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications // Int. J. Remote Sens. — 1998. — 19, N 5. — P. 823—854.
11. Schowengerdt R. Remote sensing: Models and methods for image processing. — New York: Acad. Press, 2007.
12. Wang Z. J., Ziou D., Armenakis C. A. Comparative analysis of image fusion methods // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. — 2005. — 43, N 6. — P. 1391—1402.

Стаття надійшла до редакції 10.11.14

В. В. Гнатушенко, А. А. Кавац,
А. Л. Макаров, Д. П. Бражнік

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ СЛИЯНИЯ СКАНЕРНЫХ ДАННЫХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ МНОГОСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Исследуются методы слияния, которые позволяют наиболее эффективно повысить информативность многоспектральных аэрокосмических изображений сверхвысокого пространственного разрешения с минимальными цветовыми искажениями. Полученные результаты свидетельствуют о том, что синергетическая обработка многоспектральных данных с помощью предложенной информационной технологии на основе ІСА- и вейвлет-преобразований по сравнению с классическими методами слияния дает более качественный результат. Синтезированное изображение имеет повышенную информативность без спектральных искажений.

V. V. Hnatushenko, O. O. Kavats, O. L. Makarov, D. P. Brazhnik

AN INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF FUSION METHODS OF SCANNER AEROSPACE MULTISPECTRAL IMAGES

We study fusion methods allowing one most effectively to improve information content of multispectral aerospace high spatial resolution images with minimal color distortion. Our results indicate that the synergistic processing of multispectral data with the use of the proposed information technology on the basis of ІСА- and wavelet transforms gives a better outcome as compared to the classical fusion methods. The synthesized image has some improved performance without spectral distortion.

До статті В. В. ГНАТУШЕНКА та ін.

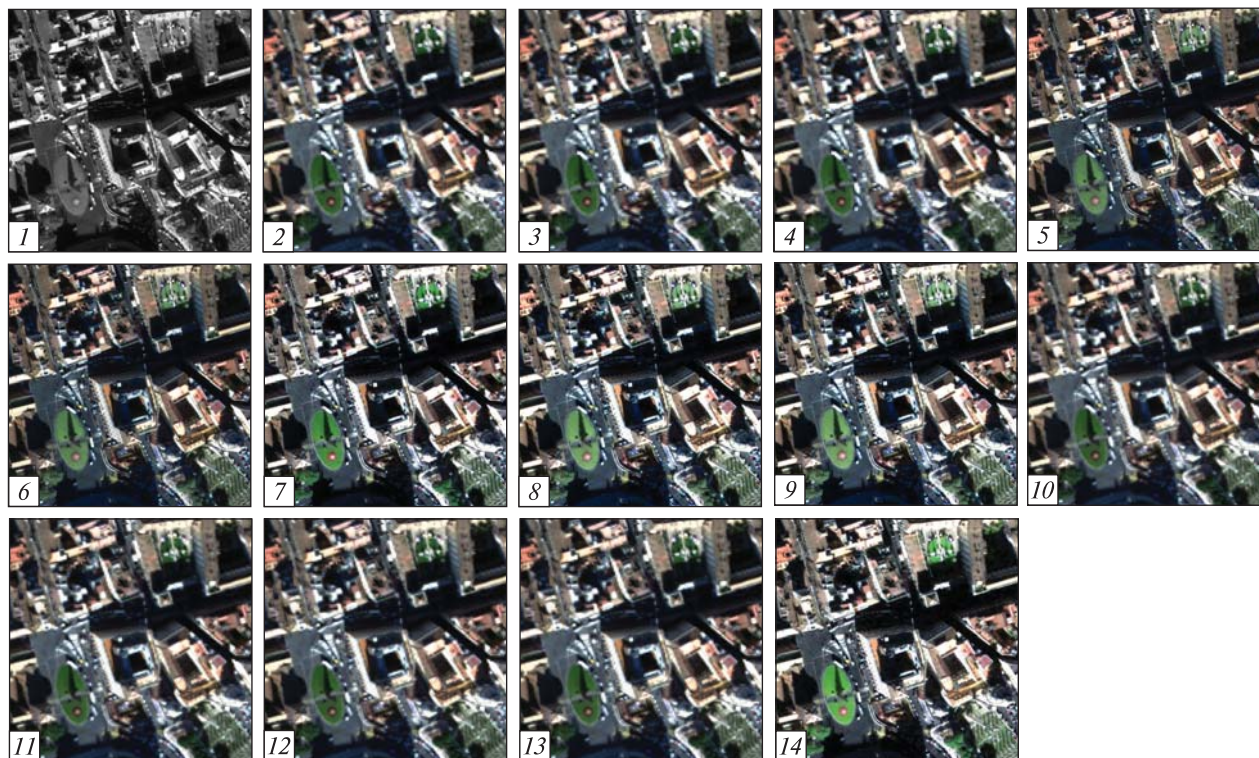


Рис. 2. Фрагменти супутникових зображень: 1 — первинне панхроматичне, 2 — первинне мультиспектральне, 3 — синтезоване за методом головних складових, 4 — за методом незалежних складових, 5 — за лінійною IHS-моделлю, 6 — за нелінійною IHS-моделлю, 7 — за методом HSV, 8 — за методом Брові, 9 — за методом Грама — Шмідта, 10 — з використанням вейвлетів Хаара, 11 — вейвлетів Добеші, 12 — вейвлетів Койфмана, 13 — симлетів, 14 — синтезоване за запропонованою технологією

До статті О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА, Я. Д. ХОРКАВЦІВ

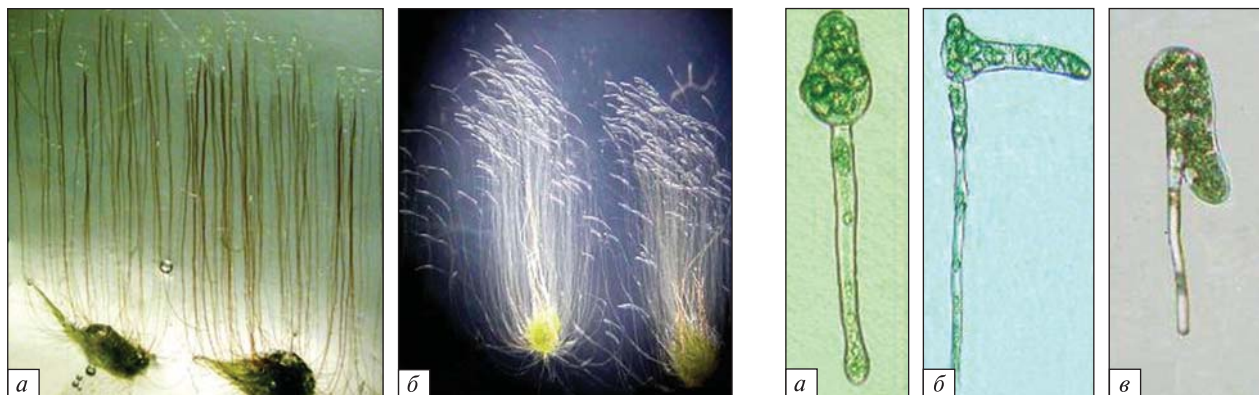


Рис. 1. Негативно гравітропна протонема (а) і гравітропний згин (б) столонів *Leptobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson

Рис. 2. Орієнтація проростків *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. залежно від вектора гравістимулу: а — спора з ризи́дом, який направлений донизу, та хлороне́мою, що росте догори; б, в — після переорієнтації чашки на 90° і 360° утворився другий хлоронемний рости́к, який росте перпендикулярно (б) або паралельно до ризи́да (в)



Рис. 3. Вторинна гравітропна протонема гравістимульованих гаметофорів *Tortula modica* R. H. Zander (стрілка вказує на клітини основи листка, що регенерують найчастіше)

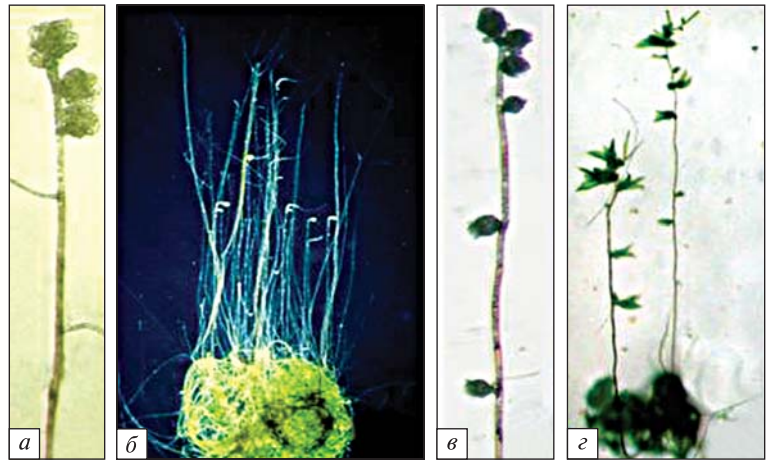


Рис. 4. Утворення бруньок гаметофорів у *Tortula modica* R. H. Zander залежно від дії гравітації: а, б — на верхівкових клітинах протонемі в умовах 1g; в, г — вздовж протонемних столонів після клиностакування



Рис. 6. Негативно гравітропні гаметофори і протонема *Bryum pseudotriquetrum* (Hedw.) P. Gaertn. et al. з Антарктики (а, б) та Львова (в)

◀ **Рис. 5.** Формування спорогонів *Bryum argenteum* Hedw. в умовах 1g: стрілками позначено місця максимального нагромадження крохмалю у ніжках спорогону та шийці коробочки

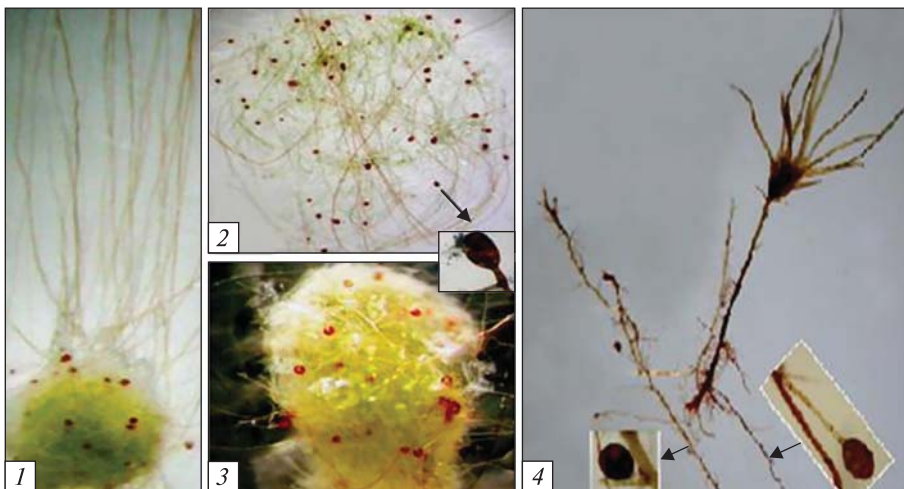


Рис. 7. Виводкові тільця *Loptobryum pyriforme* (Hedw.) Wilson: 1 — гравітропна протонема, 2 — інтенсивніше утворення виводкових тілень на гравітропній протонемі у темряві, ніж на світлі (3), 4 — пагін з ризоїдними виводковими тільцями