

УДК 004.65, 004.67

А.Ю. Шелестов<sup>1</sup>, проф., д.т.н.  
Б.Я. Яйлимов<sup>2</sup>, аспірант  
А.И. Петухова<sup>3</sup>, ученица<sup>1</sup>Национальный Университет биоресурсов и природопользования Украины<sup>2</sup>Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины<sup>3</sup>Средняя общеобразовательная школа № 286, город Киев  
inform@ikd.kiev.ua

## Інформаційна технологія оцінки ушкодження від засухи на основі злиття даних

*В статті пропонується інформаційна технологія визначення пошкоджених в результаті засухи посівів на основі геопросторовного аналізу та злиття даних. Джерелами даних про пошкодження служать супутникові знімки, отримані з різних космічних апаратів, векторні дані про межі полів та наземні заверочні вимірювання. Для ідентифікації пошкоджень запропоновано метод злиття даних різного просторового розрешення, базуючийся на інтелектуальних вирахуваннях та геопросторовному аналізі інформації. Запропонований метод апробований на одному з районів Автономної Республіки Крим.*

**Ключові слова:** злиття даних, геопросторовний аналіз, класифікація, оцінка ушкодження.

### Введення

В останні роки дані дослідження Землі з космосу все ширше застосовуються для розв'язання різних завдань природопольовання, що сприяє розширенню можливостей оперативного спостереження за природними екосистемами та сільськогосподарськими землями [1, 2].

Одною з завдань, що вирішуються за допомогою супутникових даних, є виявлення засух [3]. Як один з найбільш шкідливих стихійних лих, засухи завдають колосальний збиток багатьом сферам економіки, екології та т.д. Традиційно оцінка та моніторинг засух здійснюються на основі даних про опадки, але отримання цих даних та подальша їх обробка проблематична [4–6]. Використання геопросторовних і, зокрема, супутникових, даних дозволяє підвищити оперативність отримання оціночних характеристик сільськогосподарських культур, а також забезпечити максимальний рівень об'єктивності інформації для своєчасного виявлення, моніторингу розвитку, оцінки збитку та зменшення наслідків засухи [7, 8]. Сьогодні існують методи цифрової обробки космічних зображень, що дозволяють виділити території, постраждалі від засух та оцінити збиток, нанесений сільському господарству [9, 10]. Переважна більшість таких методів заснована на порівнянні зображень для різних вегетаційних періодів, але такий підхід не досконалий, т.к. стан рослинності може погіршитися з різних причин, не пов'язаних з засухою.

В цій роботі пропонується підхід до оцінки збитку від засух, заснований на технології злиття супутникових даних різного розрешення, векторних даних про межі полів та наземних вимірювань.

### Використовувані дані та підхід до розв'язання завдання

Для розв'язання завдання оцінки збитку необхідні наступні дані: супутникова інформація про стан посівів, межі полів та наземні дані про ступінь пошкодження, які будуть використовуватися як навчальні вибірки.

Основним джерелом об'єктивної інформації про стан посівів на великій площі є супутникові дані. Оскільки для покриття великих територій потрібно зібрати мозаїку з декількох знімків, а кожен окремий знімок може містити області, закриті хмарами, пропонується для оцінки стану посівів використовувати зображення з різних супутників та формувати карти пошкоджень на основі технології злиття даних (data fusion) [11, 12]. Для оптимізації витрат розв'язати завдання оцінки стану посівів пропонується на основі безкоштовних супутникових даних MODIS, Landsat і EO-1.

Для оцінки площ, постраждалих від засух, необхідні векторні геопросторовні дані про межі полів, які можна отримати з відкритих джерел (кадастра) та шляхом оцифрування супутникових знімків середнього та високого розрешення [13].

Для формирования обучающей выборки при решении задачи классификации посевов и их повреждений необходима наземная информация о состоянии посевов на конкретных полях, для получения которой необходимо привлечь экспертов (агрономов).

Оценку ущерба, причиненного засухой, предлагается решать в два этапа. Сначала по спутниковой информации разного разрешения, с учетом векторных границ полей и наземных заверочных измерений необходимо построить цифровые карты состояния посевов. Затем нужно оценить площади поврежденных посевов и оценить экономический ущерб.

Метод слияния данных, предлагаемый для построения карт повреждений, и метод оценки

ущерба на основе геопространственной информации будут изложены в следующих разделах.

### Метод классификации повреждений на основе слияния данных

Для построения карты повреждений посевов в результате засухи необходимо классифицировать информацию, поступающую из различных источников с различным временным и пространственным разрешением растровых данных [14, 15].

Для классификации повреждений предлагается алгоритм, представленный на рис. 1.

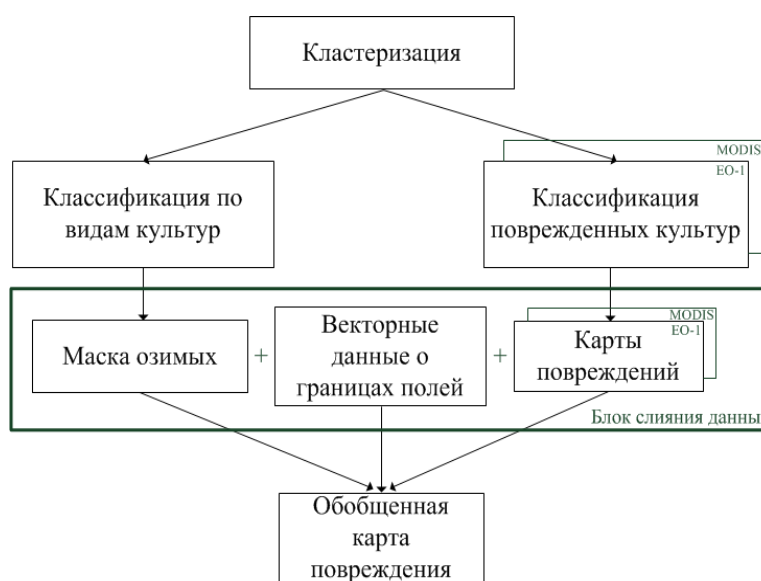


Рисунок 1 - Алгоритм построения карты повреждений

Рассмотрим его подробнее. Первым этапом обработки спутниковых изображений является классификация, которую предлагается реализовать в виде двухшаговой процедуры. Сначала для уменьшения размерности пространства признаков сегментируем изображение одним из алгоритмов кластеризации, например ISODATA [16], а затем выполним классификацию каждого из снимков по видам культур и классам повреждений, присваивая определенным кластерам номер соответствующего класса на основе наземной экспертной информации (обучающей выборки, сформированной в результате полевых обследований).

Следующим этапом является классификация спутниковых данных, которая выполняется отдельно по видам культур и по степени повреждения. С учетом специфики задачи предлагается разделять посевы на четыре класса: озимые, яровые, летние культуры и необработанные поля. Виды повреждений предлагается классифицировать на три класса: неповрежденные посевы (к

этому классу отнесем участки, на которых пострадало менее 30% посевов), пострадавшие (уничтожено 30-70% посевов) и погибшие (потери всходов составляют более 70%).

Для повышения точности классификации повреждений предлагается использовать ансамбль моделей, ориентированных на данные разных спутников. В блоке слияния данных на рис. 1 выполняется геопространственный анализ информации, полученной от каждого конкретного классификатора. Опишем эту процедуру более подробно.

Рассмотрим карту классификации, построенную на основе данных нескольких спутников  $d, d = \overline{1, D}$ . Предположим, на карте выделены  $L$  классов. Для поля  $A$  на карте классификации, построенной для спутника  $d, d = \overline{1, D}$ , каждая точка на снимке характеризуется дискретными

координатами  $(i, j)$  и классом, которому принадлежит пиксель —  $C_{(i,j)}^{(d)}$ .

$$A_{(i,j)}^{(d)} = \{(i, j), C_{(i,j)}^{(d)}\}. \quad (1)$$

Количество пикселей поля  $A$ , отнесенных на карте к каждому из классов  $l, l = \overline{1, L}$ , можно определить следующим образом:

$$K_l^{(d)} = \sum_{(i,j) \in A} 1 (C_{(i,j)}^{(d)} = l). \quad (2)$$

Выполним слияние данных карт классификации, построенных для различных спутников. Общее число пикселей поля  $A$ , отнесенных на каждой карте  $d, d = \overline{1, D}$  к каждому из классов  $l, l = \overline{1, L}$ , можно определить следующим образом:

$$K_l = \sum_{d=1}^D W_d \cdot K_l^{(d)}, \quad l, l = \overline{1, L}, \quad (3)$$

где  $W_d$  — коэффициент нормализации (весовой коэффициент), учитывающий различное пространственное разрешение разных спутников.

Для определенности с учетом специфики изображений предлагается определять  $W_d$  в формуле (3) следующим соотношением:

$$W_d = \frac{S_d}{\min_{\alpha} S_d}, \quad d = \overline{1, D}, \quad (4)$$

где  $S_d$  — площадь пикселя каждого из спутников  $d = \overline{1, D}$ .

Поле  $A$  отнесем к тому классу поврежденных  $c$ , к которому относится максимальное количество пикселей, принадлежащих этому полю, согласно взвешенной сумме (3).

$$c = \arg \max_l K_l. \quad (5)$$

### Методы оценки потерь урожая по картам классификации

Причиняемый ущерб сельскохозяйственному производству выражается в натуральных и денежных показателях. Ущерб может быть прямым и косвенным [17]. Под экономическим ущербом от стихийных бедствий природного характера понимаются финансовые потери урожая в связи с влиянием стихийных гидрометеорологических явлений, в результате которых получена урожайность ниже экономического порога.

Негативные последствия стихийных гидрометеорологических явлений приводят как к гибели посевов сельскохозяйственных культур, так и к снижению урожайности на оставшихся пло-

щадах. Следовательно, при расчете экономического ущерба от стихийных бедствий природного характера необходимо учитывать оба фактора.

Экономический ущерб, причиненный засухой на некоторой территории, можно представить следующим образом:

$$L = Y \cdot P \cdot S_d, \quad (6)$$

где  $L$  — финансовый ущерб;  $Y$  — урожайность сельскохозяйственной культуры на данной территории (получаемая по данным статистики и измеряемая в тонн/га);  $P$  — цена данной сельскохозяйственной культуры (например, оценка снизу за прошлый год, измеряемая в грн./тонну). В (6)  $S_d$  — площадь поврежденных (погибших) посевов сельскохозяйственной культур с учетом степени повреждения.

Для оценки площадей  $S_d$  гибели посевов сельскохозяйственной культур в (6) на основе спутниковых данных предлагается следующая формула:

$$S_d = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i, \quad (7)$$

где  $N$  — число градаций повреждений (выше предложено использовать 3 градации повреждений);  $\alpha_i, i = \overline{1, N}$  — степень повреждения;  $S_d, i = \overline{1, N}$  — сумма площадей поврежденных посевов для каждого  $\alpha_i$ .

### Реализация и экспериментальная проверка предложенного подхода

Экспериментальная проверка предложенного метода определения ущерба выполнялась для Красновардейского района АР Крыма, на долю которого приходится самые высокие показатели по объему сельскохозяйственного производства на полуострове, и который в 2013 году пострадал от засухи больше.

Маршрут наземных исследований, в ходе которых собрана информация для 46 полей, представлен на рис. 2. На основе экспертных оценок определена степень повреждения каждого из полей (гистограмма степени повреждений представлена на рис. 3).

Определение степени повреждения заключается в визуальной оценке количества поврежденных органов растений: единичные (до 10%), некоторые (11-20%), много (21-50%), большинство (51-80%); все (81-100%) [18].

Примеры полей, поврежденных в результате засухи, приведены на рис. 4.

В качестве альтернативного источника данных использовались данные прибора MODIS с разрешением 250 м. Векторные данные о границах полей были получены с использованием открытой информации кадастра и с помощью оцифровки спутниковых данных.

При реализации схемы, представленной на рис. 1, с помощью алгоритма ISODATA [16] была выполнена сегментация всех спутниковых данных на 50 кластеров. Затем изображения были классифицированы по видам культур и степени поврежденности. Каждый отдельный классификатор обеспечивает точность на уровне 60-70%.

Поскольку карты повреждений в данном случае строились по данным 2 спутников (ЕО-1 и прибора MODIS), соотношение (3) имеет вид

$$K_l = W_1 \cdot K_l^{EO} + W_2 \cdot K_l^{MOD}.$$

Применение предложенной авторами технологии слияния данных (1)-(5) позволило повысить точность классификации до 95%. Таким образом, было экспериментально показано, что слияние данных обеспечивает более высокую точность оценивания разнородной информации, чем любой отдельно взятый классификатор. Отдельные классификаторы выступают в такой схеме в качестве «ядер», обеспечивающих переход от анализа отдельных признаков к оценке ситуации в целом [19].

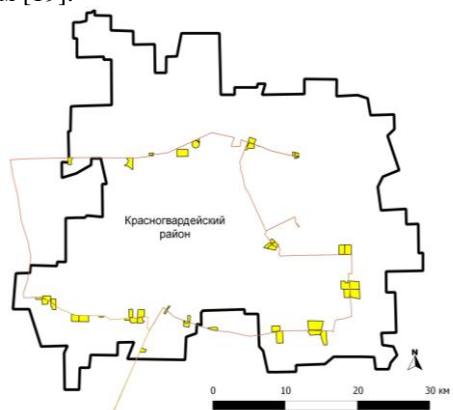


Рисунок 2 - Обучающая выборка, полученная на основе наземных исследований

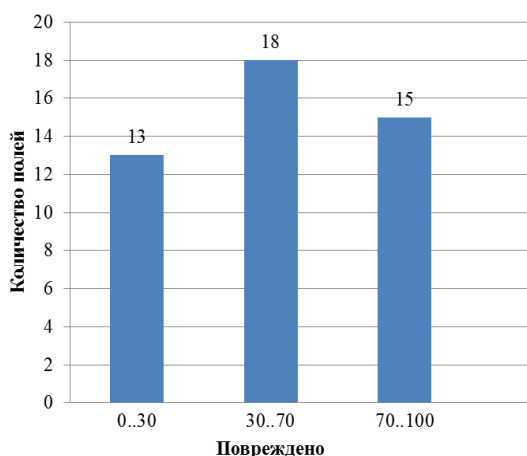


Рисунок 3 - Гистограмма степени повреждения полей, полученной на основе наземных исследований



Рисунок 4 - Пораженные участки посевов озимых и яровых зерновых культур в АР Крым Красногвардейского района

С помощью Регионального центра поддержки программы UN-SPIDER оперативно была организована космическая съемка указанного района и получены спутниковые снимки со спутника ЕО-1 с разрешением 30 м для данной территории рис. 5.

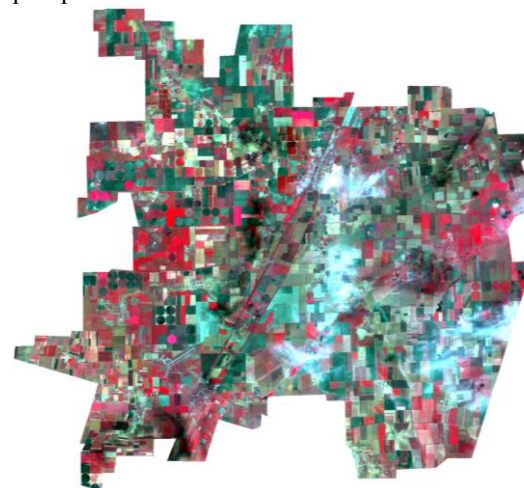


Рисунок 5 - Снимок ЕО-1 для Красногвардейского района

Процесс построения карты повреждений на основе слияния разнородных данных проиллюстрирован на рис. 6.

Итоговая карта повреждений представлена на рис. 7.



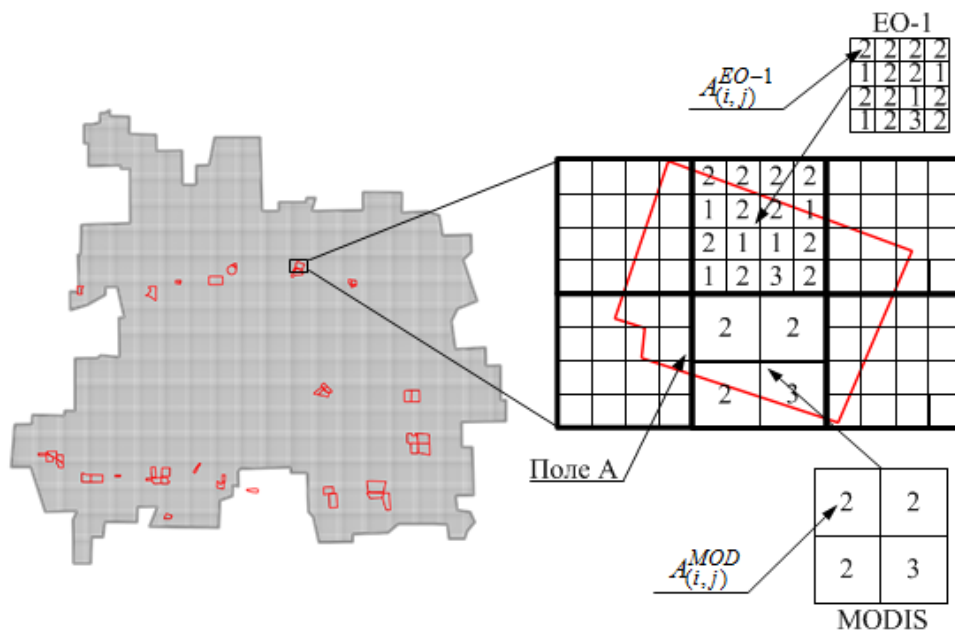


Рисунок 6 - Общая карта классификации с использованием разнородных данных

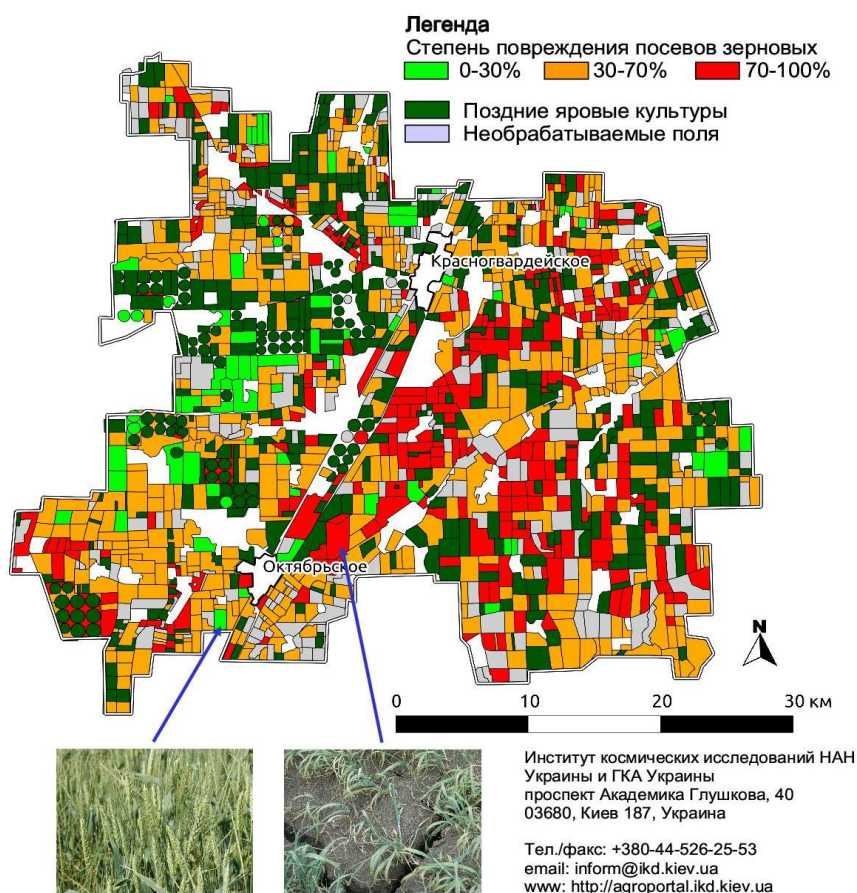


Рисунок 7 - Тематическая карта состояния посевов озимых и яровых зерновых культур в АР Крым Красногвардейского района, 27 мая 2013 г.

На основе геопространственной информации о повреждениях посевов, представленной на рис. 7, по формулам (6)-(7) вычислим оценку экономического ущерба от засухи для Красногвардейского района.

На основе цифровой карты, представленной на рис. 7, вычислим площади посевов, отнесенные к каждому из трех рассматриваемых классов повреждений. Для соотношения (7) получим:

$S_1 = 8695$  га (суммарная площадь посевов, поврежденных на 0-30%);

$S_2 = 57250$  га (площадь посевов, поврежденных на 31-70%);

$S_3 = 25690$  га (площадь посевов, поврежденных на 71-100%). Введем коэффициенты повреждения для каждого из выделенных классов. Будем считать, что в (7)  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_2 = 0.5$  (посевы повреждены наполовину),  $\alpha_3 = 1$  (урожай уничтожен полностью). Тогда, согласно (7), площадь поврежденных посевов с учетом степени повреждений составляет

$$S_d = 8695 \cdot 0 + 57250 \cdot 0.5 + 25690 \cdot 1.0 = 54315.0 \text{ га} \quad (8)$$

Учитывая минимальную цену озимой пшеницы и среднюю урожайность для данного района, по формуле (6) можно вычислить оценку экономического ущерба по Красногвардейскому району.

Поскольку минимальная цена озимой пшеницы в 2012 году составляла 1700 грн./тонну [20], а согласно данным сайта Главного управления статистики в Автономной республике Крым урожайность озимой пшеницы в Красногвардейском районе зафиксирована на уровне 1,5 тонн/га [21], в соответствии с (6) получим

$$L = 1.5 \text{ тонн / га} \cdot 1700 \text{ грн / тонну} \times 54315.0 \text{ га} = 138.5 \text{ млн. грн.}$$

Таким образом, оценка экономического ущерба по Красногвардейскому району от гибели посевов зерновых в результате неблагоприятных погодных условий составляет порядка **138.5 млн. грн.**

## Заключение

Таким образом, применение спутниковой информации и автоматизированных геоинформационных технологий слияния данных позволяет эффективно решать оперативные задачи агромониторинга для больших территорий и получать объективные экономические оценки рисков и ущерба для поддержки принятия управленческих решений [22].

В статье предложена информационная технология вычисления ущерба от засух на основе разнородной, в том числе спутниковой, информации. Определение поврежденных в результате засухи посевов выполняется на основе геопространственного анализа и слияния данных. Источниками данных о повреждениях служат спутниковые снимки, полученные с различных космических аппаратов, векторные данные о границах полей и наземные заверочные измерения. Для идентификации повреждений на спутниковых изображениях предложен метод слияния данных разного пространственного разрешения, базирующийся на интеллектуальных вычислениях и геопространственном анализе информации. Предложенный метод апробирован на одном из районов Автономной Республики Крым, который в 2013 году пострадал в результате длительной засухи.

Анализ тематической карты с помощью разработанной в ИКИ НАНУ-ГКАУ геоинформационной системы показал, что в результате неблагоприятных погодных условий (засухи) в Красногвардейском районе пострадали 91635 га посевов зерновых (озимой пшеницы и ярового ячменя). Оценка экономического ущерба по Красногвардейскому району от гибели посевов зерновых в результате неблагоприятных погодных условий составил в 2013 году порядка 138.5 млн. грн.

Представленные методы и результаты в дальнейшем планируется использовать для создания системы поддержки принятия решений регионального уровня.

## Список литературы

1. Kussul N. High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring / Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O. // Int. J. Information Technologies & Knowledge. — 2009, — 3, P. 135–156.
2. Kravchenko A. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations / Kravchenko A., Kussul N., Lupian E., Savorsky V., Hluchy L., Shelestov A. // Cybernetics and Systems Analysis. — 2008. — 44 (4), P. 616-624.
3. Kussul N. Crop area estimation in Ukraine using satellite data within the MARS project / Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kravchenko O., Gallego J., Kussul O. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 22-27 July. — 2012, P. 3756–3759.
4. Ji L. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices / Ji L., Peters A. J. // Remote Sensing of Environment, 87(1). — 2003, P. 85–98.

5. Kussul N. Grid technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects / Kussul N., Shelestov A., Skakun S. // *Grid and Cloud Database Management*. — 2011. P. 279–305.
6. Kussul N., Flood Monitoring from SAR Data / Kussul N., Shelestov A., Skakun S. F. Kogan, A. Powell, O. Fedorov // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, Springer. — 2011. P. 19–29.
7. Getachew Berhan. Using Satellite Images for Drought Monitoring: A Knowledge Discovery Approach / Getachew Berhan, Shawndra Hill, Tsegaye Tadesse, Solomon Atnafu // *Journal of Strategic Innovation and Sustainability*. — 2011. Vol. 7, P. 135–153.
8. Zhang X. Drought-induced vegetation stress in southwestern North America / Zhang, X., Goldberg M., Tarpley D., Friedl M., Morisette J., Kogan F., Yu Y. // *Environmental Research*, — 2010. Vol - 5(2), P. 511–538.
9. Bayarjargal Y. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis / Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., and Tucker C. // *Remote Sens. Environ.* — 2006. Vol. 105, P. 9–22.
10. Щербенко Е.В. Мониторинг засухи по данным космических съемок / Щербенко Е.В // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. ст. М: ООО «Азбука», 2007.- Т.2, С. 395–407.*
11. Kussul N. Interoperable Infrastructure for Flood Monitoring: SensorWeb, Grid and Cloud / N. Kussul, D. Mandl, K. Moe, J.P. Mund, J. Post, A. Shelestov, S. Skakun, J. Szarzynski, G. Van Langenhove, M. Handy // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2012. Vol. 5. No. 6. P. 1740–1745.
12. H. B. Mitchell. *Multi-sensor Data Fusion – An Introduction* (2007) Springer-Verlag, Berlin, ISBN 9783540714637.
13. Kussul N. Crop state and area estimation in Ukraine based on remote and in-situ observations / N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko, B. Moloshnii // *Int. J. on Information Models and Analyses*, 2012, vol. 1, no. 3, P. 251–259.
14. Галлего Х. Аналіз ефективності різних підходів для класифікації посівів на основі супутникової та наземної інформації / Галлего Х., Кравченко А., Куусуль Н., Скакун С., Шелестов А., Грипич Ю. // *Проблеми управління и информатики*. — 2012. № 3. — С. 123–134.]
15. Gallego J.F. Efficiency Assessment of Different Approaches to Crop Classification Based on Satellite and Ground Observations / J.F. Gallego, O. Kravchenko, N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, Y. Gripich // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2012. Vol. 44. No. 5. P. 67–80.
16. Memarsadeghi. N. Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm / Memarsadeghi. N., Neta nyahu. N., LeMoigne J. // *International Journal of Computational Geometry and Applications*. — 2007. Vol. 17, P. 71–103.
17. Плющиков В.Г. Методы управления сельскохозяйственными рисками: учебно-методическое пособие / В.Г. Плющиков, Э.А. Довлетярова, Н.И. Ильясова // *Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Рос. ун-т дружбы народов"*. — Москва: Изд-во Российского ун-та дружбы народов. — 2006. — С. 70.
18. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. — Вип. 11. Агриметеорологічні спостереження. — К. : Державна гідрометеорологічна служба України, 2007. — 303 с.
19. Tommi Jaakkola, course materials for 6.867 Machine Learning, Fall 2006. MIT OpenCourseWare(<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology.
20. Центр «АГРО ПЕРСПЕКТИВА». Информационно-аналитический центр по вопросам аграрного и химического бизнесов // Средние закупочные цены по Украине на зерновые. 2012. [Электрон. ресурс] Режим доступа: <http://www.agroperspectiva.com/ru/price/?d=20-08-2012>.
21. Головне управління статистики в Автономній Республіці Крим. [Електронний ресурс] Режим доступа: <http://www.sf.ukrstat.gov.ua/2013Zexp45.pdf>.
22. Kussul N. Disaster Risk Assessment Based on Heterogeneous Geospatial Information / Kussul N., Sokolov B., Zyelyk Y., Zelentsov V., Skakun S., Shelestov A. // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2010, Volume 42, Issue 12, P. 32–45.
23. Kussul N. The Wide Area Grid Testbed for Flood Monitoring Using Earth Observation Data / Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Li G., Kussul O. // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2012, vol. 5, no. 6, P. 1746–1751.

Надійшла до редколегії 10.10.2013

А.Ю. Шелестов<sup>1</sup>, Б.Я. Яйлимов<sup>2</sup>, А.І. Петухова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний Університет біоресурсів та природокористування України, <sup>2</sup>Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, <sup>3</sup>середня загальноосвітня школа № 286, Київ

### **ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЗБИТКІВ ВІД ПОСУХИ НА ОСНОВІ ЗЛИТТЯ ДАНИХ**

У статті пропонується інформаційна технологія визначення пошкоджених в результаті посухи посівів на основі геопросторового аналізу та злиття даних. Джерелами даних про пошкодження служать супутникові знімки, отримані з різних космічних апаратів, векторні дані про кордони полів і наземні завірочні вимірювання. Для ідентифікації ушкоджень запропоновано метод злиття даних різного просторового дозволу, що базується на інтелектуальних обчисленнях і геопросторовому аналізу інформації. Запропонований метод апробований на одному з районів Автономної Республіки Крим.

**Ключові слова:** злиття даних, геопросторовий аналіз, класифікація, оцінка збитку.

Shelestov A., Yailimov B.<sup>2</sup>, Petukhova A.

<sup>1</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Space Research Institute NASU-NSAU

<sup>3</sup>School № 286, Kyiv

### **INFORMATION TECHNOLOGY FOR CROP DAMAGE ASSESSMENT USING DATA FUSION TECHNIQUES**

In this paper we present a data fusion approach for assessment of crop damages caused by a drought using geospatial information. The following datasets are being used: remote sensing images acquired by different satellite instruments, field boundaries and ground observations of crop damages. Crop damage assessment is performed by fusing satellite images of various spatial resolution using intelligent computations and geospatial analysis techniques. The presented approach is validated for administrative districts of the Autonomous Republic of Crimea.

**Keywords:** data fusion, geospatial analysis, classification, damage assessment.