

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА САМОЗАРОСТАННЯ ПОРУШЕНИХ ГІРНИЧИМИ РОБОТАМИ ЗЕМЕЛЬ ЗА КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ

О. С. Тараненко

Інститут проблем природокористування та екології НАН України

вул. Володимира Мономаха, 6, м. Дніпро, 49000, Україна. E-mail: ecosafety@i.ua

Розробка корисних копалин відкритим способом активізує процеси вітрової ерозії на порушених гірничими роботами землях (ПГРЗ). Поява вторинних екосистем на ПГРЗ зменшує запылення території, що призводить до покращення рівня екологічної безпеки гірничодобувного регіону. Застосування аерокосмічних методів досліджень забезпечить оцінку природного заростання порушених земель. Запропонований алгоритм кількісної оцінки самозаростання ПГРЗ спирається на використанні вегетаційних індексів (ВІ), що розраховуються за багатоспектральними космічними знімками, та наземних даних щодо загального проективного покриття рослинності. Встановлено, що між значеннями вегетаційних індексів (*MSAVI2*, *SARVI2*, *MTVI2*, *EVI2* і *NDVI*) та проективним покриттям рослинності на ПГРЗ існує значний кореляційний зв'язок: $r = 0,77 - 0,78$. Виявлено логарифмічну залежність між проективним покриттям рослинності та ВІ *MSAVI2* ($R^2 = 0,64$) і *NDVI* ($R^2 = 0,62$). Зростання значень ВІ відповідає збільшенню проективного покриття рослинності. Визначені регресійні залежності забезпечать періодичну кількісну оцінку самозаростання ПГРЗ за актуальними наборами супутникових даних *Landsat OLI*, для яких виконана атмосферна корекція. Запропонований підхід дозволяє виділити ділянки порушених земель із проективним покриттям рослинності 30% та менше, які потребують відповідного комплексу заходів з протидії вітрової ерозії.

Ключові слова: самозаростання, вегетаційний індекс, проективне покриття рослинності, порушені гірничими роботами землі, дані ДЗЗ.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА САМОЗАРАСТАНИЯ НАРУШЕННЫХ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ЗЕМЕЛЬ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

О. С. Тараненко

Институт проблем природопользования и экологии НАН Украины

ул. Владимира Мономаха, 6, г. Днепр, 49000, Украина. E-mail: ecosafety@i.ua

Разработка полезных ископаемых открытым способом активизирует процессы ветровой эрозии на нарушенных горными работами землях (НГРЗ). Появление вторичных экосистем на НГРЗ уменьшает запыление территории, что приводит к улучшению уровня экологической безопасности горнодобывающего региона. Применение аэрокосмических методов исследований обеспечит оценку естественного зарастания нарушенных земель. Предложенный алгоритм количественной оценки самозарастания НГРЗ основывается на использовании вегетационных индексов (ВИ), которые рассчитываются по многоспектральным космическим снимкам, и наземных данных об общем проективном покрытии растительности. Установлено, что между значениями вегетационных индексов (*MSAVI2*, *SARVI2*, *MTVI2*, *EVI2* и *NDVI*) и проективным покрытием растительности на НГРЗ существует значительная корреляционная связь: $r = 0,77 - 0,78$. Вывявлено логарифмическую зависимость между проективным покрытием растительности и ВІ *MSAVI2* ($R^2 = 0,64$) и *NDVI* ($R^2 = 0,62$). Рост значений ВІ соответствует увеличению проективного покрытия растительности. Вывявленные регрессионные зависимости обеспечат периодическую количественную оценку самозарастания НГРЗ по актуальным наборам спутниковых данных *Landsat OLI*, для которых выполнена атмосферная коррекция. Предложенный подход позволяет выделить участки нарушенных земель с проективным покрытием растительности 30% и меньше, которые нуждаются в соответствующем комплексе мероприятий по противодействию ветровой эрозии.

Ключевые слова: самозарастание, вегетационный индекс, проективное покрытие растительности, нарушенные горными работами землі, данные ДЗЗ.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Гірничодобувна діяльність активізує процеси вітрової ерозії в межах гірничого відводу, що призводить до запылення навколишньої території та відповідного погіршення рівня екологічної безпеки. В умовах Криворізького залізничного басейну інтенсивність пиління відвалів і хвостосховищ (при середньорічній швидкості вітру) складає відповідно 0,62-0,94 мг/с·м² та 0,70-2,50 мг/с·м² [1].

Відомо, що між інтенсивністю вітрової ерозії та рослинним покривом існує певний зв'язок: наявність рослинного покриву на рівні 30% та більше забезпечує низький рівень вітрової ерозії [2].

Самозаростання додатних техногенних форм рельєфу (в т.ч. відвалів), які утворені в результаті

гірничодобувної діяльності, сприяє зменшенню запылення території. Тому визначення ступеня самозаростання порушених гірничими роботами земель (ПГРЗ) є актуальною задачею екологічних досліджень. Збільшення площі відновленого рослинного покриву на порушених землях можна вважати показником покращення рівня екологічної безпеки території.

Визначення кількості рослинності на ПГРЗ в межах усього гірничодобувного регіону наземними методами є витратним підходом. Натомість використання дистанційної інформації, в т.ч. багатоспектральних космічних знімків середньої роздільної здатності (10 м – 30 м), забезпечить періодичний моніторинг ступеня самозаростання ПГРЗ як на

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

об'єктовому, так і регіональному рівнях.

Метою роботи є методичне забезпечення кількісної оцінки самозаростання порушених гірничими роботами земель за багатоспектральними космічними знімками середньої роздільної здатності.

Більшість сучасних досліджень щодо дистанційного отримання кількісних показників рослинності спрямовано на визначення залежностей між вегетаційними індексами, що розраховуються на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), та індексом листової поверхні (LAI) [3, 4]. В попередніх дослідженнях нами було виявлено, що процеси самозаростання на ПГРЗ характеризуються ростом значень вегетаційних індексів в часі [5], проте залишилось відкритим питання вибору підходів до кількісної оцінки природного заростання порушених земель за даними ДЗЗ.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Пасивні оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі орієнтовані на реєстрацію інтенсивності відбитого сонячного випромінювання від денної поверхні у діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектру 0,38 – 3,0 мкм та власного випромінювання об'єктів в діапазоні довжин хвиль 7,0 – 15 мкм. Використання існуючих алгоритмів атмосферної корекції даних ДЗЗ дозволяє перерахувати отримані значення випромінювання, що надійшло на сенсор (*spectral radiance*) від денної поверхні, у значення поверхневого відбиття (*reflectance*). Коефіцієнт поверхневого відбиття (*reflectance factor*) r є безрозмірним показником та може набувати значення від 0 до 1. Даний показник є відношенням відбитого потоку випромінювання певної ділянки земної поверхні до потоку випромінювання, що падає на неї.

Відомо, що для зеленої рослинності притаманні певні особливості у відбитті сонячного випромінювання в діапазоні 0,45 – 1,0 мкм, а саме:

- максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом в синій та червоній областях спектру;
- відносно високе відбиття сонячної радіації в зеленій області спектру (у порівнянні із відбиттям у синій та червоній зонах спектру);
- максимум відбиття сонячної радіації в ближній інфрачервоній області спектру листям рослин.

Кількісна оцінка процесу самозаростання на порушених гірничими роботами землях може бути виконана за багатоспектральними космічними знімками із використанням вегетаційних індексів (VI). Вегетаційний індекс є кількісним показником, що відображує відмінності у відбитті зеленою рослинністю сонячного випромінювання в різних спектральних діапазонах.

Більшість відомих VI враховує відмінності у відбитті рослинністю сонячного випромінювання в червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектру, наприклад *DVI* (*difference vegetation index*) та *SR* (*simple ratio*) [6], *NDVI* (*normalized difference vegetation index*) [7], *MSAVI2* (*modified soil adjusted vegetation index*) [8], *EVI2* (*enhanced vegetation index*) [9]:

$$DVI = r_{nir} - r_{red} , \quad (1)$$

$$SR = r_{nir} / r_{red} , \quad (2)$$

$$NDVI = (r_{nir} - r_{red}) / (r_{nir} + r_{red}) , \quad (3)$$

$$MSAVI2 = 0,5 * (2r_{nir} + 1 - ((2r_{nir} + 1)^2 - 8 * (r_{nir} - r_{red}))^{1/2}) , \quad (4)$$

$$EVI2 = 2,5 * (r_{nir} - r_{red}) / (1 + r_{nir} + 2,4 * r_{red}) , \quad (5)$$

де r_{nir} – коефіцієнт поверхневого відбиття в ближній інфрачервоній області спектру; r_{red} – коефіцієнт поверхневого відбиття в червоній області спектру.

Найбільш відомим вегетаційним індексом є індекс *NDVI*. До більш складних зональних відношень, які базуються на значеннях поверхневого відбиття в трьох спектральних діапазонах, також відносяться *BI SARVI2* (*soil and atmospherically resistant vegetation index*, нині відомий як *EVI*) [10] та *MTVI2* (*modified triangular vegetation index*) [3]:

$$SARVI2 = (r_{nir} - r_{red}) / (r_{nir} + C_1 * r_{red} - C_2 * r_{blue} + L) * G , \quad (6)$$

$$MTVI2 = ((1,2 * (r_{nir} - r_{green}) - 2,5 * (r_{red} - r_{green})) / ((2r_{nir} + 1)^2 - (6 * r_{nir} - 5 * r_{red}^{1/2}) - 0,5)^{1/2}) * 1,5 , \quad (7)$$

де r_{blue} – коефіцієнт поверхневого відбиття в синій області спектру; C_1 , C_2 , L , G – емпіричні коефіцієнти; r_{green} – коефіцієнт поверхневого відбиття в зеленій області спектру.

Вибіркове середнє значення вегетаційного індексу для певної ділянки ПГРЗ може виступати інформаційною основою при ранжуванні в т.ч. усіх техногенних відвалів гірничодобувного регіону за ступенем їх самозаростання.

Для кількісної оцінки ступеня самозаростання ПГРЗ за космічними знімками середньої роздільної здатності був запропонований відповідний алгоритм, що спирається на використанні вегетаційних індексів та наземних даних (рис. 1). Використання тільки вегетаційних індексів спрощує алгоритм, але зводить кількісну оцінку до відносних значень. Проте наявність наземних даних щодо показників кількості рослинності на момент дистанційних спостережень забезпечить кількісну оцінку самозаростання ПГРЗ за космічними знімками в абсолютних значеннях.

В якості наземних даних щодо стану рослинності нами було обране значення загального проективного покриття рослинності. Проективним покриттям рослинності є відношення площі горизонтальної проекції надземних частин рослинних систем до загальної площі горизонтальної проекції території досліджень [11]. Загальне проективне покриття рослинності на ПГРЗ в межах відвалу № 3 ПРАТ «ІНГЗК» та в безпосередній близькості від нього було визначено в результаті польових досліджень стандартними геоботанічними методами. Для вста-

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

новлення взаємозв'язку між вегетаційними індексами та проєктивним покриттям рослинності використані наземні дані за 18 пунктами спостережень.

На відміну від попередніх наших досліджень [12] для розрахунку вегетаційних індексів викорис-

тані дані ДЗЗ, що пройшли атмосферну корекцію. Застосування такого підходу дозволить в подальшому використовувати отримані залежності для інших наборів даних ДЗЗ, для яких виконана атмосферна корекція.

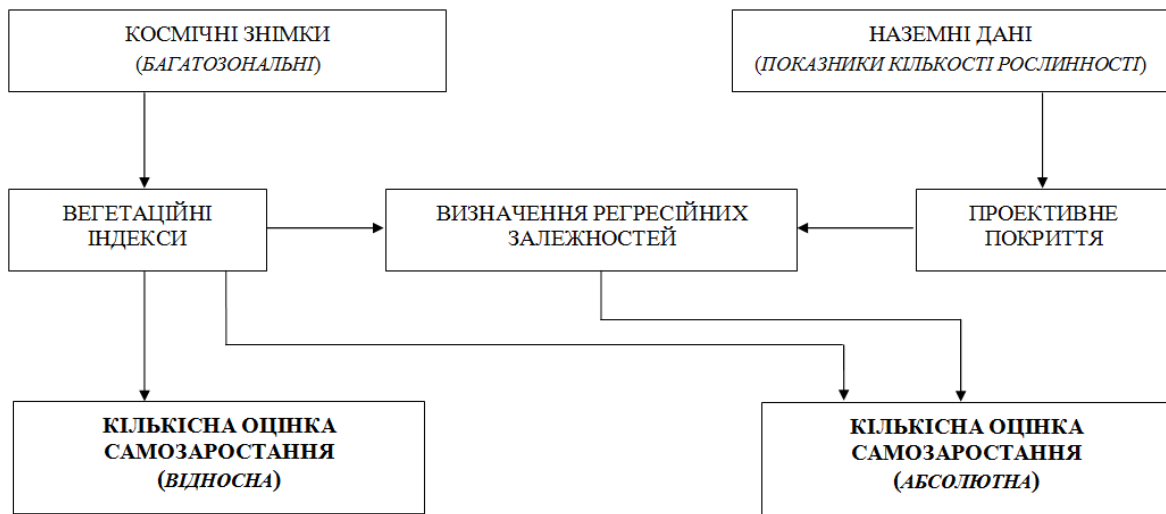


Рисунок 1 – Алгоритм оцінки самозаростання на порушених гірничими роботами землях за багатоспектральними космічними знімками середньої роздільної здатності

Для розрахунку вегетаційних індексів в якості даних ДЗЗ обрані багатоспектральні супутникові дані *Landsat OLI* із роздільною здатністю 30 м, що реєструють відбите сонячне випромінювання в діапазоні довжин хвиль 0,433 – 2,300 мкм.

Сучасний інструментарій з обробки даних ДЗЗ, наприклад *GRASS GIS 7.6.0*, забезпечує атмосферну корекцію в т.ч. багатоспектральних космічних знімків *Landsat OLI* та розрахунок основних вегетаційних індексів.

Аналіз багатоспектральних даних ДЗЗ та наземних завіркових даних свідчить про те, що складні зональні відношення (*MSAVI2*, *SARVI2*, *EVI2*, *NDVI* та *MTVI2*) краще відбивають взаємозв'язок між проєктивним покриттям рослинності та поверхневим відбиттям сонячного випромінювання, а ніж проста зональність (*DVI*) чи просте зональне відношення (*SR*), про що свідчать відповідні коефіцієнти кореляції (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Кореляційний зв'язок між значеннями вегетаційних індексів та проєктивним покриттям рослинності (за наземними даними)

Веgetаційний індекс	Коефіцієнт кореляції
<i>SR</i>	0,72
<i>DVI</i>	0,73
<i>MSAVI2</i>	0,77
<i>SARVI2</i>	0,77
<i>MTVI2</i>	0,77
<i>EVI2</i>	0,78
<i>NDVI</i>	0,78

На основі аналізу дистанційної інформації та наземних даних нами виявлена логарифмічна залежність між вегетаційними індексами (*MSAVI2*, *NDVI*) та проєктивним покриттям рослинністю в

межах гірничого відводу ПРАТ «ІНГЗК» із коефіцієнтом детермінації R^2 відповідно 0,64 (рис. 2) та 0,62.

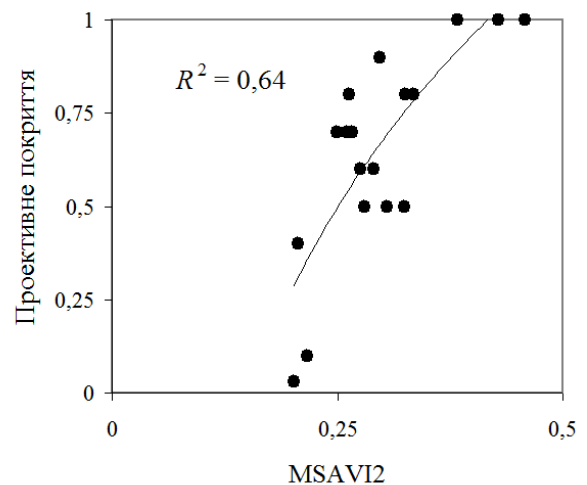


Рисунок 2 – Регресійна залежність між вегетаційним індексом *MSAVI2* та проєктивним покриттям рослинності на ППЗ

Також було встановлено, що логарифмічна залежність краще, ніж лінійна, відображає даний зв'язок, про що свідчать відповідні коефіцієнти детермінації.

Практична реалізація запропонованого нами методичного підходу до кількісної оцінки самозаростання порушених гірничими роботами земель в межах техногенного ландшафтного заказника «Ві-зирка» за багатоспектральними даними *Landsat OLI* (станом на 05.2018 р.) наочно відображена на рис. 3. В якості розрахункової функції була обрана регресійна залежність, що базується на значеннях

Оцінка та прогнозування техногенного впливу на довкілля

BI MSAVI2.

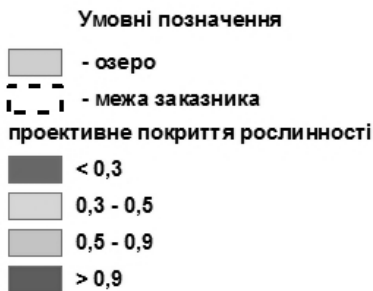
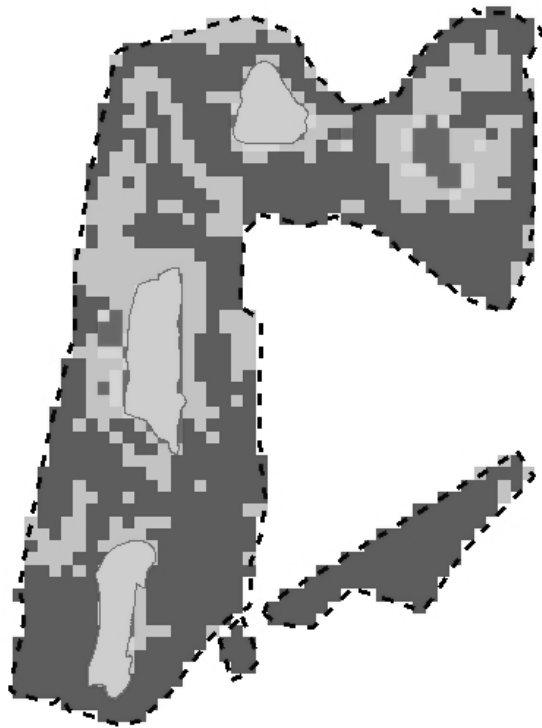


Рисунок 3 – Кількісна оцінка самозаростання техногенного ландшафтного заказника «Візирка» за даними ДЗЗ (станом на 05.2018 р.)

Даний методичний підхід дозволяє за багатоспектральними космічними знімками середньої роздільної здатності виділити ділянки поверхні ППРЗ із проективним покриттям рослинності на рівні 30% та менше для подальшого застосування в їх межах певних технічних рішень з протидії вітровій ерозії.

ВИСНОВКИ.

1. Вегетаційні індекси *NDVI*, *MSAVI2*, *EVI2*, *SARVI2* та *MTVI2*, що розраховуються за багатоспектральними даними ДЗЗ, доцільно використовувати для відносної кількісної оцінки процесу самозаростання на порушених гірничими роботами землях.

2. На основі аналізу супутникових даних *Landsat OLI* та наземних даних нами виявлена логарифмічна залежність між вегетаційними індексами *MSAVI2*, *NDVI* та проективним покриттям рослинності в межах гірничого відводу ПРАТ «ІНГЗК» із коефіцієнтом детермінації R^2 відповідно 0,64 та 0,62: із ростом значень вегетаційних індексів збільшується проективне покриття рослинності.

3. Визначені регресійні залежності для вегета-

ційних індексів *NDVI* та *MSAVI2* можуть бути в подальшому застосовані для кількісної оцінки самозаростання порушених земель за актуальними наборами даних ДЗЗ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бересневич П. В., Деньгуб В. И. Оценка загрязнения атмосферы пылью карьеров и отвалов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Москва, 2000. № 7. С. 78–80.
2. Marshall J. K. Drought, land use and soil erosion. *The Environmental, Economic and Social Consequences of Drought* / Ed. J. V. Lovett. Sydney: Angus and Robertson, 1973. P. 55–77.
3. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture / D. Haboudane et al. *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 90, issue 3. P. 337–352.
4. Станкевич С. А., Пестова І. О. Геоінформаційний сервіс оброблення даних для оцінювання стану рослинності урбанізованих територій. *Вісник геодезії та картографії*. Київ, 2014. № 3. С. 23–26.
5. Шапар А. Г., Тараненко О. С. Визначення техногенних та природних змін на порушених гірничими роботами землях за даними ДЗЗ. *Екологічна безпека*. Кременчук, 2018. Вип. 2 (26). С. 64–69.
6. Jordan C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*. 1969. Vol. 50, № 4. P. 663–666.
7. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation: Type III – Final Report / J. W. Rouse et al. Texas: Remote Sensing Center Texas A&M University College Station, 1974. 390 p.
8. A modified soil adjusted vegetation index / J. Qi et al. *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48, issue 2. P. 119–126.
9. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112, issue 10. P. 3833–3845.
10. Huete A. R., Liu H. Q., Batchily K., van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 59, issue 3. P. 440–451.
11. Балалаев А. К., Скрипник О. А. Предварительные результаты применения метода цифровой обработки изображения для определения проективного покрытия растительности как основного индикатора состояния экосистем. *Екологія і природокористування*. Дніпропетровськ, 2011. Вип. 14. С. 114–123.
12. Шапар А. Г., Скрипник О. О., Тараненко О. С. До питання визначення взаємозв'язку між вегетаційним індексом *NDVI* та проективним покриттям рослинності на порушених гірничими роботами землях. *Відновлення біотичного потенціалу агроєкосистем: матеріали III міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 11 жовт. 2018 р.)*. Дніпро, 2018. С. 21–22.

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF NATURAL OVERGROWING OF THE MINING LANDS BY THE MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

O. Taranenko

Institute for Nature Management Problems and Ecology of National Academy of Sciences of Ukraine
vul. Volodymyr Monomakha, 6, Dnipro, 49000, Ukraine. E-mail: ecosafety@i.ua

Purpose. Quarrying activates processes of wind erosion on mining lands. The appearance of secondary ecosystems on mining lands reduces dusting of the territory that leads to an improvement of the environmental safety of the mining region. The use of remote sensing methods will provide an assessment of the natural overgrowing of mining lands. The purpose of the work is methodological support of the quantitative assessment of natural overgrowing of the mining lands using a multispectral satellite images of middle resolution. **Methodology.** The algorithm of the quantitative assessment of natural overgrowing of the mining lands that has been propose is based on the use of vegetation indices (VI), which are calculate from multispectral satellite images, and ground data on the plant projective cover (PPC). The use of ground data significantly expands the capabilities of the thematic analysis of remote sensing data and provides a transition from relative estimates to absolute. **Results.** It has been established that between the values of vegetation indices (*MSAVI2*, *SARVI2*, *MTVI2*, *EVI2*, *NDVI*) and the plant projective cover on the mining lands there is a significant correlation: $r = 0,77 - 0,78$. **Originality.** A logarithmic relationship was found between the plant projective cover and the vegetation indices *MSAVI2* ($R^2 = 0,64$) and *NDVI* ($R^2 = 0,62$). An increase in the values of VI corresponds to an increase in the plant projective cover. Also found that logarithmic relationship is better than linear relationship, represent relation between VI and PPC. **Practical value.** The proposed approach allows us to identify areas of mining lands with the plant projective cover of 30% or less, which need an appropriate set of measures to control wind erosion. **Conclusions.** The calculated regression relationships between vegetation indices and plant projective cover will provide a periodic quantitative assessment of the natural overgrowing of mining lands using the actual satellite data sets Landsat OLI, for which atmospheric correction has made. **References** 12, tables 1, figures 3.

Key words: natural overgrowing, vegetation index, plant projective cover, mining lands, remote sensing data.

REFERENCES

1. Beresnevich, P. V., Dengub, V. I. (2000), "Otsenka zagryazneniya atmosfery pyl'yu kar'yerov i otvalov [Assessment of air pollution by dust from quarries and dumps]", *Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten' (nauchno-tehnicheskyy zhurnal)* [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)], no. 7, pp. 78–80.
2. Marshall, J. K. (1973), "Drought, land use and soil erosion", In: *The Environmental, Economic and Social Consequences of Drought*, J. V. Lovett (ed), Sydney: Angus and Robertson, pp. 55–77.
3. Haboudane, D., et al. (2004), "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture", *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, issue 3, pp. 337–352.
4. Stankevich, S. A., Piestova, I. A. (2014), "Heoinformatsiynyy servis obroblyennya danykh dlya otsinyuvannya stanu roslynnosti urbanizovanykh terytoriy", *Visnyk heodeziyi ta kartohrafiyi*, Kiev, no. 3, pp. 23–26.
5. Shapar, A., Taranenko, O. (2018), "Determination of technogenic and natural changes in the mining lands by remote sensing data", *Ecological safety*, Kremenchuk, no. 2 (26), pp. 64–69.
6. Jordan C. F. (1969), "Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor", *Ecology*, vol. 50, no. 4, pp. 663–666.
7. Rouse, J. W., et al. (1974), "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation", Type III – Final Report. Remote Sensing Center Texas A&M University College Station, Texas, USA, 390 p.
8. Qi, J., et al. (1994), "A modified soil adjusted vegetation index", *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, issue 2, pp. 119–126.
9. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. (2008), "Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band", *Remote Sensing of Environment*, vol. 112, issue 10, pp. 3833–3845.
10. Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., van Leeuwen, W. (1997), "A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS", *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, issue 3, pp. 440–451.
11. Balalaev, A. K., Skrypnyk, O. A. (2011), "Preliminary results of the application of the method of digital image processing for determining projective cover vegetation as main indicator of condition of ecosystems", *Ekolohiya i pryrodokorystuvannya* [Ecology and nature management], Dnipropetrovsk, issue 14, pp. 114–123.
12. Shapar, A. G., Skrypnyk, O. O., Taranenko, O. S. (2018), "To the question of determining the relationship between the vegetation index *NDVI* and the plant projective cover in mining lands", *Vidnovlennya biotychnoho potentsialu ahroekosystem: materialy III mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Restoring biotic potential of agroecosystems: programme and abstracts of the III international scientific-practical conference], Dnipro, October 11, 2018, pp. 21–22.