

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ РОДЮЧОСТІ ЗЕМЕЛЬ ЗАКАРПАТТЯ

Мета. Застосування математичних моделей для визначення та оцінювання показників родючості ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення Закарпаття на основі опрацювання даних дистанційного зондування Землі та інформації наземних досліджень. **Методика.** Запропонована методика, виходячи з фізичних законів, що описують зв'язок між кількістю вмісту гумусу у ґрунті та спектральною енергетичною яскравістю ґрунту, що інтерпретується на мультиспектральних космічних знімках, включає в себе три підходи дослідження. Перший підхід полягає у дослідженні та встановленні статистичних лінійних регресійних залежностей між фактичним показником вмісту гумусу в ґрунті, який отримано на основі наземних досліджень, та спектральною енергетичною яскравістю ґрунту, яку отримано в результаті опрацювання мультиспектральних космічних знімків. Другий підхід полягає у розробці нових моделей, що побудовані на лінійній залежності вмісту гумусу від яскравостей каналів та спектральних індексів видимого та інфрачервоного діапазону електромагнітного випромінювання. Третій підхід базується на застосуванні степеневих моделей, що найкращим чином описують таку залежність. З математичної точки зору, значущість всіх трьох етапів перевірялася на основі визначення та значущості коефіцієнтів кореляції, довірчих інтервалів, середнього квадратичного відхилення обчисленого показника вмісту гумусу в ґрунті від фактичного та застосування критерію Фішера. **Результати.** У процесі встановлення та дослідження статистичних лінійних регресійних залежностей між спектральними яскравостями каналів та відповідними показниками вмісту гумусу в ґрунті досліджено, що найтісніша обернена лінійна залежність виявлена у червоному (Red) спектральному каналі видимого діапазону. Під час другого підходу дослідження встановлено, що найкраще застосовувати для визначення та оцінювання вмісту гумусу у ґрунті моделі, що використовують червоний та інфрачервоний спектральний канали та спектральний індекс на основі відношення ближнього інфрачервоного каналу до червоного. **Наукова новизна.** На основі застосування даних дистанційного зондування Землі виявлено, що найкраще використовувати, для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті для різних ландшафтних зон Закарпаття, моделі, що побудовані на застосуванні даних спектральної енергетичної яскравості у видимому та інфрачервоному діапазонах спектру, оскільки середнє квадратичне відхилення обчисленого показника вмісту гумусу від фактичного є в цих моделях мінімальним, а ймовірність є максимальною. **Практична значущість.** Такий підхід дає змогу оперативного та достовірно отримувати інформацію про кількісні показники вмісту гумусу в ґрунті для прийняття раціональних управлінських рішень щодо застосування доцільних агротехнічних заходів для запобігання зниження родючості ґрунтів відповідно до ландшафтних зон Закарпаття.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; спектральна енергетична яскравість; спектральні індекси; мультиспектральні космічні знімки; моніторинг ґрунтового покриву; гумус; лінійні математичні моделі

Вступ

У процесі вивчення сучасних проблем проведення моніторингу ґрунтового покриву в Україні [Панас Р. М., 2013] та в окремих її регіонах, у конкретному випадку на Закарпатті [Гебрин Л. В., 2015], виявлено, що застосовування іноземного досвіду для удосконалення вже існуючої системи є одним з методів покращення наявного стану ґрунтів земель сільськогосподарського призначення. Оскільки найважливішою якісною та кількісною

властивістю земель сільськогосподарського призначення є саме родючість ґрунтів, а вміст гумусу в ґрунті є одним із основних показників родючості землі, тому кількісна та якісна оцінка ґрунту є необхідною для проведення ґрунтового моніторингу та агротехнічних заходів щодо збереження і відновлення ґрунтової родючості [Медведев В. В., 2002]. Агрохімічний метод оцінки просторового розміщення гумусу є досить тривалим, затратним і трудомістким процесом. Тому, для вирішення цієї проблеми пропонується використовувати результати

аерокосмічних досліджень у поєднанні з вибіркоким відбором ґрунтових зразків для визначення вмісту гумусу [Шатохін А. В., 2001; Ачасов В. А., 2008; Сахацький О. І., 2008].

Для підтвердження гіпотези про зв'язок відсоткового показника вмісту гумусу із спектральною яскравістю каналів необхідно дослідити ступінь наявності статистичної залежності між спектральною енергетичною яскравістю ґрунту і кількістю вмісту гумусу, а також оцінити значущість цього зв'язку [Сахацький О. І., 2008].

Візуальне дешифрування космічних знімків хоч і дає інформацію про об'єкти, проте основними параметрами, що дають змогу відокремити ґрунти від інших об'єктів та виконати кількісне дешифрування показника вмісту гумусу в ґрунті за космічними знімками,

є їх яскравість в окремих спектральних каналах з відповідною довжиною хвилі. На рис. 1 показано спектральні профілі об'єктів: ґрунтів з різним показником вмісту гумусу, рослинності та води. Прослідковано, що спектральна яскравість ґрунту з показником вмісту гумусу 0,55% та 3,41 % відрізняються інтенсивністю поглинання у видимому з довжиною хвилі 0,45-0,68 мкм (2,3,4) та інфрачервоному 0,84-2,3 мкм діапазоні (5,6,7). Таким чином, ґрунти, що більш концентровані гумусом, який додає їм темнуватого кольору, характеризуються низькою спектральною яскравістю, а ґрунти з меншим вмістом гумусу характеризуються високим показником спектральної яскравості. Це свідчить про обернений зв'язок між вмістом гумусу і спектральною яскравістю ґрунту.

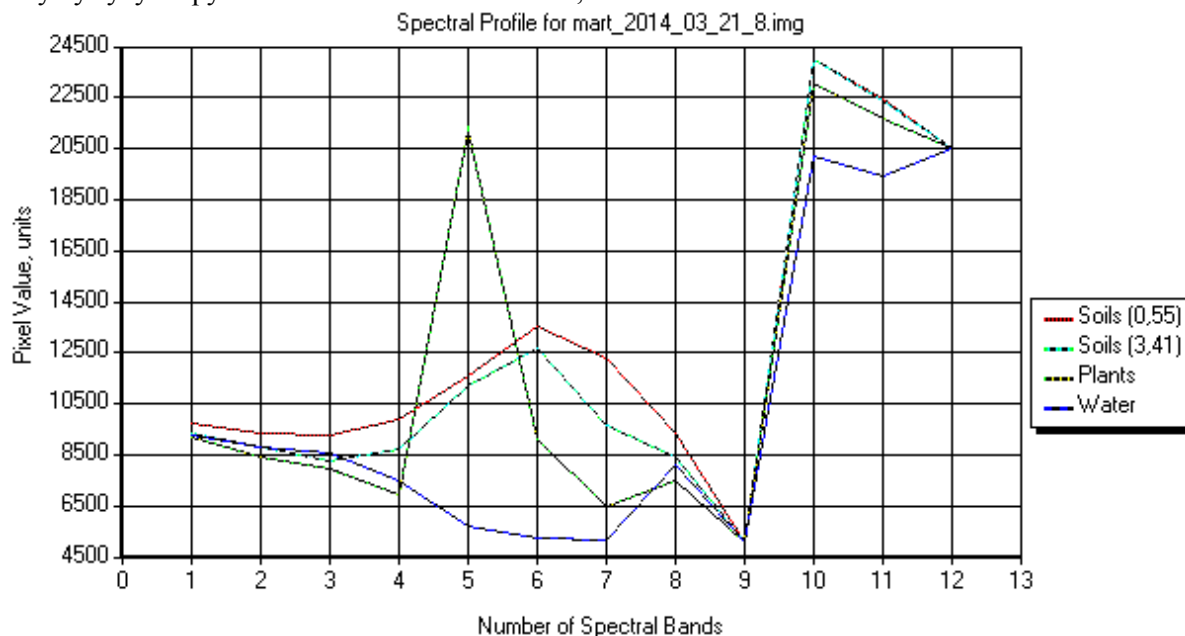


Рис. 1. Спектральні профілі ґрунтів, рослинності та води за Landsat 8 OLI.

На сучасному етапі відома низка методів моделювання вмісту гумусу в ґрунті на основі лінійних, нелінійних, множинних регресій [Малашевський В. А., 2013]. Зокрема, В. Ачасова та Д. Бідолах, які досліджували зв'язок між вмістом гумусу та яскравістю поверхневого шару ґрунту за космічними знімками, визначили стійку антикореляцію, пов'язану зі значеннями яскравості в червоній частині спектра знімка, коефіцієнт кореляції ($R = -0,74$) [Ачасов В. А., 2008]. А. Шатохін та М. Линдін, які досліджували чорноземи типові, встановили тісну залежність ($R = -0,94$) між

показником вмісту гумусу та яскравістю в ближньому інфрачервоному каналі [Шатохін А. В., 2001]. О. Сахацький за даними космічної зйомки Landsat 7 у межах тестових ділянок у Чернігівській та Хмельницькій областях наводить результати досліджень статистичної обробки даних, яка показала лінійну залежність між спектральними даними пікселів у червоному каналі ($R = -0,95$) та ближньому інфрачервоному каналі ($R = -0,85$) та у голубому каналі ($R = -0,81$) з усередненим показником вмісту гумусу [Сахацький О. І., 2008]. С. Трускавецький, який проводив дослідження

грунтового покриття на полях Житомирського Полісся з використанням багатоспектрального космічного сканування супутником SPOT, встановив, що зв'язок між вмістом гумусу у ґрунті та спектральною яскравістю є значним у зеленому каналі ($R = -0,88$), червоному каналі ($R = -0,88$), та у ближньому інфрачервоному каналі ($R = -0,90$) [Трускавецький С. Р., 2006]. Досліджуючи ґрунти Краснодарського краю, з використанням супутникових знімків Spot 5, науковці пропонують множинні лінійні моделі з використанням видимого та ближнього інфрачервоного діапазону ($R = -0,74$) [Малашевський В. А., 2013]. Під час дослідження темно-каштанових ґрунтів Миколаївської області, С. Г. Чорний пропонує використовувати параболічну модель, що ґрунтується на співвідношенні червоного та ближнього інфрачервоного каналів ($R = -0,63$) [Чорний С. Г., 2012], а також внаслідок отримання приблизно однакових значень коефіцієнтів кореляції між вмістом гумусу і значеннями яскравості трьох спектральних каналів (зеленого, червоного та ближнього інфрачервоного) пропонує рівняння множинної регресії ($R = 0,53$) [Чорний С. Г., 2016]. На основі даних космічного супутника Landsat ETM+ Москаленко А. А. пропонує застосовувати спектральні яскравості блакитного та червоного каналів, рівняння множинної регресії ($R = -0,91$) [Москаленко А. А., 2014].

Особливою умовою для визначення та оцінювання вмісту гумусу в ґрунті за даними аерокосмічних та наземних досліджень є те, що досліджувані поля повинні характеризуватися такими основними показниками, як: повітряно-сухий стан ґрунту [Schmugge T., 1980], відсутність кірки, розмір частинок ґрунту (шорсткість) не повинна перевищувати 2 см [South S., 2004], повна або часткова відсутність зеленої або сухої рослинності або її решток, відсутність забарвлених часток в ґрунті (сполук заліза) [Gorbane G., 2008].

Досліджуючи спектральні властивості ґрунтів та аналізуючи наукову літературу, можна зробити такі висновки, що у видимій (RGB) та ближній інфрачервоній (NIR) зоні електромагнітного спектра яскравість ґрунтів пов'язана зі зменшенням та збільшенням концентрації гумусу у ґрунті.

Актуальним та важливим завданням є використання кількох методів дослідження, тобто поєднання наземних та супутникових спостережень з метою їх операційного порівняння та рівня достовірності отриманих результатів.

Мета

Застосування математичних моделей для визначення та оцінювання показників родючості ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення Закарпаття на основі опрацювання даних дистанційного зондування Землі та інформації наземних досліджень.

Методика

Для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті за результатами опрацювання мультиспектральних знімків використовується методика, що базується на дослідженні динаміки вмісту гумусу, складу ґрунтів та інших характеристик ґрунту на основі спектральних характеристик відкритого ґрунту, тому основний об'єкт дослідження – ґрунти [Сахацький О. І., 2008].

Методика дослідження включає три основні підходи:

1. Використання статистичних лінійних регресійних залежностей, що в процесі адаптації набувають вигляду [Сахацький О. І., 2008; Гебрин Л. В., 2015]:

$$B_n = aG_{act} + b, \quad (1)$$

де B – енергетична яскравість ґрунту у відповідному спектральному каналі, n – спектральний канал: червоний, синій, зелений, інфрачервоний; a та b – числові параметри моделі; G_{act} – відсотковий показник гумусу.

2. Застосування лінійних комбінацій яскравостей та спектральних індексів, що базуються на використанні каналів, які визначають вплив рослинності та вологості на спектральні яскравості ґрунтів.

3. Застосування степеневих моделей для визначення та оцінювання показника вмісту гумусу у ґрунті.

Оцінювання вмісту гумусу в ґрунті за даними аерокосмічних та наземних досліджень в умовах різновисотних ландшафтних зон області передбачає такі загальні етапи [Gebrin L. V., 2015]:

– отримання статистичних даних, які характеризують показники родючості ґрунтів області та попередній аналіз кожного поля. У даному випадку використовувалися дані про кількість вмісту гумусу в ґрунтах (G_{act}) у розрізі моніторингових ділянок (МД), агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення, районів та ландшафтних зон за 2013 рік [Бандурович Ю. Ю., 2014];

– скачування наявних космічних знімків за відповідний період дослідження, з мінімальним відсотком хмарності. Для дослідження отримано 5 мультиспектральних космічних знімків супутника 8 OLI (5 сцен), на територію Закарпатської області, з відсотком хмарності від 0 до 5 %, за весняний період (березень, квітень) та осінній період (вересень, жовтень, листопад) 2013 року, що повністю задовольняє процес дослідження. Супутникові знімки скачувались з офіційного сайту glovis.usgs.gov;

– процес попередньої обробки знімків. Було проведено формування синтезованого мультиспектрального зображення. Проведена радіометрична корекція знімків, яка полягає у приведенні сирих даних (digital numbers) у фізичні одиниці, шляхом перетворення їх у реальні значення спектральної енергетичної яскравості з використанням спеціальних формул. Для розрахунку необхідно знати вихідні коефіцієнти масштабування. Загальна формула алгоритму радіометричної калібровки для супутникових знімків Landsat 8 OLI має вигляд (2):

$$L_{\lambda} = M_l Q_{cal} + A_l, \quad (2)$$

де L_{λ} – спектральна енергетична яскравість ($W/m^2sr \mu m$), M_l – мультиплікативний (RADIANCE_MULT_BAND) та A_l – додатковий (RADIANCE_ADD_BAND) коефіцієнти масштабування для яскравості окремого каналу з метаданих, Q_{cal} – сирі дані пікселя (digital numbers) [Zanter K., 2016].

Наступним етапом було проведення атмосферної корекції космічних знімків. Атмосфера може впливати на значення яскравостей, що реєструються знімальною системою двома способами: через розсіювання і поглинання енергії електромагнітних хвиль. Для виконання атмосферної корекції зазвичай використовують характеристики стандартної атмосфери, які дають приблизні результати.

Існують два методи врахування впливу атмосфери: на підставі програмних алгоритмів та на підставі обчислення вегетаційних індексів [Бурштинська Х. В., 2013]. У даному випадку застосовано модуль Atcor 3 програмного забезпечення Erdas Imagine, що реалізує метод програмних алгоритмів, що надає об'єктам дійсні коефіцієнти спектральної яскравості, видаляє з космічних знімків атмосферну димку і проводить топографічну нормалізацію знімків, що є доцільним для ділянок, які знаходяться у передгірській та гірській ландшафтних зонах [Richter R., 2016]. Попередня обробка та подальші розрахунки отриманих супутникових знімків проводились у спеціалізованій програмі Erdas Imagine 2013;

– розрахунок вегетаційного індексу згідно з показниками яскравостей відповідних спектральних каналів. Вегетаційні індекси розраховуються на підставі фізико-хімічних явищ отримання космічних знімків та статистичних даних. На сучасному етапі відомо близько 500 різних видів вегетаційних індексів. У статті [Бурштинська Х. В., Бадиш В., 2014] систематизовано 30 вегетаційних індексів за основними показниками: чутливість до рослинності, вплив ґрунтової лінії та вплив атмосфери. Для вирішення завдання щодо відокремлення відкритого ґрунту від рослинності, застосовано вегетаційний індекс NDVI, що у запропонованій класифікації належить до I класу та має такі інтерпретаційні характеристики, як добре помітний вплив підстильної поверхні (3):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (3)$$

де NIR та RED – значення спектральної енергетичної яскравості відповідних пікселів на зображенні, які отримані у червоній (RED) видимій та ближній інфрачервоній (NIR) ділянках спектра.

Усереднені значення вегетаційного індексу NDVI розраховувалися за даними кількох пікселів, які входили у вибірку в результаті утворення полігону, тому що площа ділянки дорівнює 2500 m^2 .

– отримання усереднених значень спектральних яскравостей у вибраних каналах згідно з ділянками відбору зразків ґрунту. Згідно з координатами ділянок проводився

підбір кількості пікселів таким чином, щоб утворена в результаті формування виділеного полігону площа (S_p) наближалась до площі досліджуваної ділянки, тобто 2500 м², та визначались усереднені значення енергетичної спектральної яскравості вибраних каналів (Blue, Green, Red, NIR, SWIR1, SWIR2) [Richards J., 2006].

Для першого підходу встановлено лінійну статистичну залежність між показниками фактичного вмісту гумусу в ґрунтів G_{act} та усередненими показниками спектральної яскравості за вибраних каналів у визначеній вибірці пікселів; визначено коефіцієнти кореляції R та детермінації R^2 ; обчислено довірчі інтервали, значущість коефіцієнта кореляції за довірчої ймовірності 0,95 та рівні значущості 0,05 [Гмурман В. Е., 2003]; побудовано графіки залежності між усередненими показниками спектральної яскравості вибраних каналів у вибраній вибірці пікселів і показниками фактичного вмісту гумусу в ґрунтів G_{act} ; визначено найбільш тісні лінійні залежності, що характеризуються більш високими коефіцієнтами кореляції R та допустими довірчими інтервалами, а також значимістю коефіцієнта кореляції. Обчислено показник вмісту гумусу G_{pn} на основі оберненого рівняння лінійної регресії (4):

$$G_{pn} = B_n \left(\frac{1}{a} \right) - \left(\frac{b}{a} \right). \quad (4)$$

Проведення оцінки точності отриманих результатів та обчислення середнього квадратичного відхилення σ (5) побудованого показника вмісту гумусу G_{pn} від фактичного G_{act} :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (G_{act} - G_{pn})^2}{n - 2}}. \quad (5)$$

У процесі застосування другого підходу використано результати досліджень, які полягають у тому, що на спектральну яскравість ґрунту впливає як наявність рослинності, що визначається на основі вегетаційного індексу $NDVI$ (3) (проте у даному дослідженні використовувалось просте відношення яскравостей NIR/Red), так і наявність зайвої вологості, яка визначається на основі спектральних індексів із використанням співвідношення ближнього та

короткохвильового інфрачервоного каналу [Gao B., 1996], зеленого та ближнього інфрачервоного каналу, а також зеленого та першого короткохвильового інфрачервоного каналу [Сахацький О. І., 2009]. У результаті застосування першого підходу і встановлення того факту, що найтісніше вміст гумусу корелює з інтенсивністю відбитого та поглинутого випромінювання у червоній та інфрачервоній зоні, враховано ці два канали у загальну початкову модель. Таким чином, загальна модель набуває виду 2.1. (6):

$$2.1. \quad G_{pn} = a Red + b NIR + c \frac{NIR}{Red} + d \frac{Green}{NIR} + u \frac{Green}{SWIR1} + f \frac{NIR}{SWIR1} + g. \quad (6)$$

Для застосування третього підходу до визначення та оцінювання показника вмісту гумусу запропонована степенева модель, яка також побудована на фізичних зв'язках, що включають вплив різних параметрів на спектральну яскравість ґрунту. У початковому загальному вигляді відображається так (7):

$$3.1. \quad G_{pn} = G_0 Blue^a Green^b Red^c NIR^d SWIR1^e SWIR2^f. \quad (7)$$

Основним критерієм оцінки точності виступають середнє квадратичне відхилення обчисленого показника вмісту гумусу (G_{pn}) від фактичного (G_{act}), а також Критерій Фішера (F-критерій). Застосування F-критерію не характеризує конкретну модель, а порівнює дві моделі. Тому, для обчислення довірчої ймовірності за критерієм Фішера необхідна умова – вказати по відношенню до якої моделі проводилось оцінювання. Використовуючи спосіб розрахунку довірчої ймовірності, перевіряється на яких рівнях значущості гіпотеза підходить, а на яких відхиляється. Тобто, маючи не дуже високу довірчу ймовірність того, що моделі відрізняються, можна стверджувати, що моделі однаково описують експериментальні дані, і тому не має сенсу використовувати більш складну модель. Таким чином, йде максимальне спрощення моделі, поки в ній не залишаться тільки значущі параметри. Саме така модель називається оптимальною.

Результати та апробація запропонованої методики

За результатами першого підходу проведеного статистичного лінійного зв'язку між спектральними яскравостями пікселів на ділянках дослідження та відповідними показниками вмісту гумусу в ґрунті встановлено, що найтісніша обернена лінійна залежність (3) спостерігається у червоному (Red) спектральному каналі видимого діапазону

(рис. 2) з такими отриманими у результаті математичної обробки усередненими по вибірці показниками: коефіцієнт кореляції $R = -0,72$, довірчі інтервали $r_1 = -0,81$; $r_2 = -0,58$, значущість коефіцієнта кореляції $t = |4,28| > 2,00_{73;0,05}$, середнє квадратичне відхилення (4) обчисленого показника вмісту гумусу (G_{pn}) від фактичного (G_{act}) $\sigma = 0,821\%$ (рис. 3).

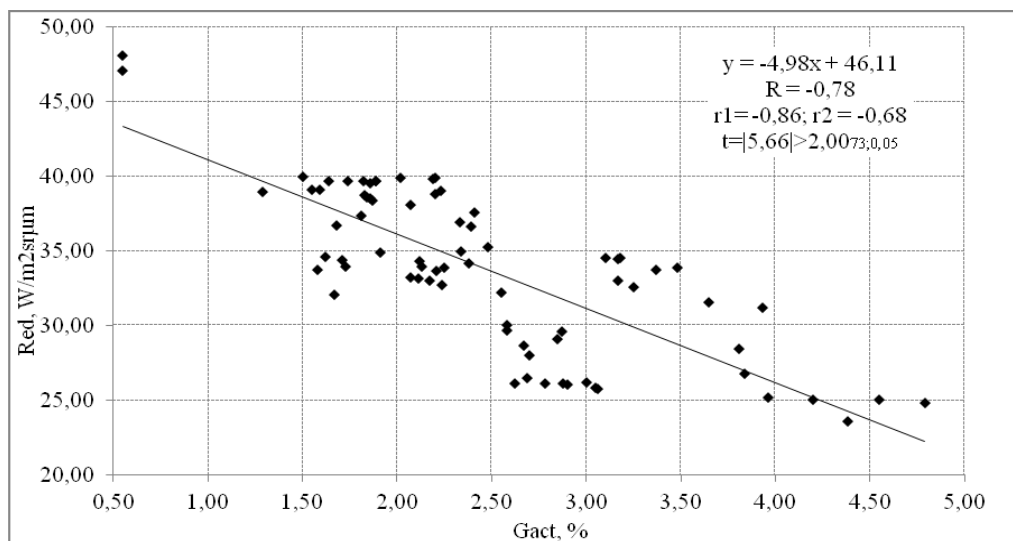


Рис. 2. Лінійні статистичні залежності між G_{act} та спектральними яскравостями в Red каналі (08.03.2013) Landsat 8 OLI

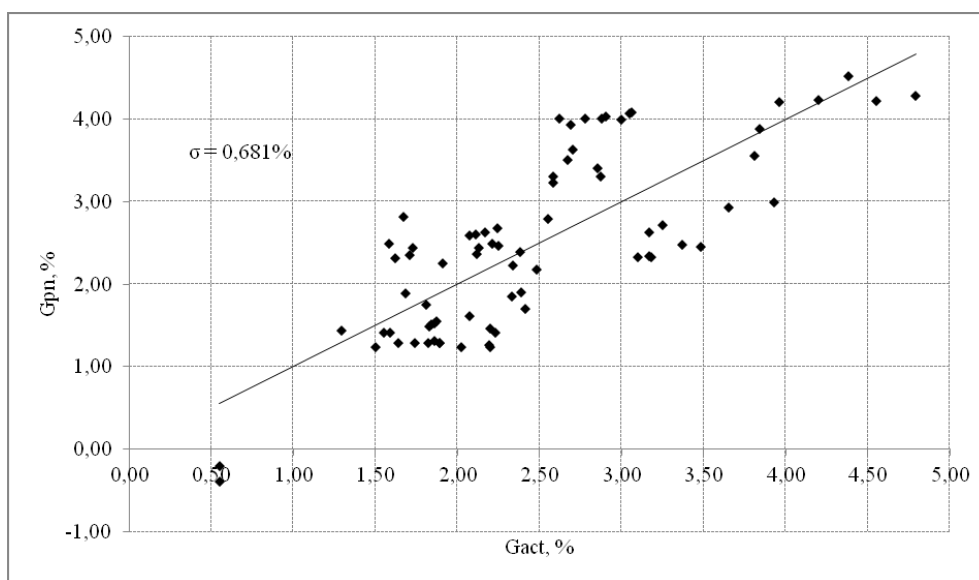


Рис. 3. Графічне зображення середнього квадратичного відхилення σ обчисленого показника вмісту гумусу G_{pn} від фактичного G_{act} за даними червоного каналу (08.03.2013).

Обернена лінійна залежність виявлена між даними у голубому (Blue): $R = -0,57$, $r_1 = -0,78$; $r_2 = -0,38$, $t = |3,04| > 2,00_{73;0,05}$, $\sigma = 1,5\%$ та зеленому (Green): $R = -0,57$, $r_1 = -0,78$; $r_2 = -0,38$, $t = |3,04| > 2,00_{73;0,05}$, $\sigma = 1,26\%$

спектральних каналів. У ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR) лінійна залежність прослідковується на рівні $R = -0,36$, $r_1 = -0,54$; $r_2 = 0,15$, $t = |1,74| < 2,00_{73;0,05}$, $\sigma = 2,48\%$. Що стосується короткохвильових

інфрачервоних каналів (SWIR 1): $R = -0,23$, $r_1 = -0,44$; $r_2 = 0,01$, $t = |1,10| < 2,00_{73;0,05}$, $\sigma = 11,99\%$ та (SWIR 2): $R = -0,27$, $r_1 = -0,47$; $r_2 = 0,05$, $t = |1,28| < 2,00_{73;0,05}$, $\sigma = 10,89\%$ при $p = 0,95$ та $\alpha = 0,05$ то в цих каналах залежність є незначною, це може свідчити про часткову зашумленість цих каналів. Тому, ці канали, у таких умовах, при першому підході не рекомендовані для лінійного визначення вмісту гумусу у ґрунті. Проте, у другому та третьому підходах є можливим застосування цих каналів, оскільки саме вони відповідають за визначення вологості ґрунтового покриття.

Наведені обчислені дані є усередненими по вибірці, яка складається з інформації, що

отримана у процесі обробки п'яти мультиспектральних знімків Landsat 8 OLI за 2013 рік.

У другому підході запропонованої методики розглянуто та застосовано модель 2.1. (6). Оскільки визначальним фактором цієї моделі було врахування рослинності та вологості на ділянках дослідження, що могло впливати на отримані результати, модель перевірено в декількох інтерпретаціях, таким чином, щоб визначити наскільки впливає та значущий той чи інший параметр моделі на отримані результати (табл. 1., рис. 4).

Таблиця 1

Визначення адекватності моделей лінійних комбінацій яскравостей та спектральних індексів

№	Модель	$\sigma, \%$	F-критерій, %
2.1	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + u \frac{\text{Green}}{\text{SWIR1}} + f \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR1}} + g$	0,468 ₆₈	-
2.2	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR}} + u \frac{\text{Green}}{\text{SWIR}} + f$	0,483 ₆₉	97,798
2.3	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + d \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR}} + u \frac{\text{Green}}{\text{SWIR}} + f$	0,503 ₆₉	99,894
2.4	$G_{pn} = a \text{ NIR} + b \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR}} + u \frac{\text{Green}}{\text{SWIR}} + f$	0,470 ₆₉	78,850
2.5	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{Green}}{\text{SWIR1}} + u \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR1}} + f$	0,470 ₆₉	78,850
2.6	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{Green}}{\text{SWIR1}} + u$	0,486 ₇₀	97,133
2.7	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + u \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR1}} + f$	0,468 ₆₉	67,914
2.8	$G_{pn} = a \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + b \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + c \frac{\text{Green}}{\text{SWIR1}} + d \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR1}} + u$	0,566 ₇₀	99,999
2.9	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \frac{\text{Green}}{\text{NIR}} + c \frac{\text{Green}}{\text{SWIR1}} + d \frac{\text{NIR}}{\text{SWIR1}} + u$	0,526 ₇₀	99,986
2.10	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + d$	0,493 ₇₁	91,537
2.11	$G_{pn} = a \text{ NIR} + b \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + c$	0,496 ₇₂	82,522
2.12	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \frac{\text{NIR}}{\text{Red}} + c$	0,512 ₇₂	98,805
2.13	$G_{pn} = a \text{ Red} + b \text{ NIR} + c$	0,524 ₇₂	99,804

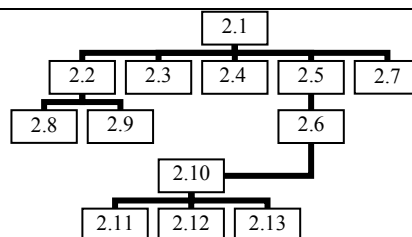


Рис. 4. Схема послідовності спрощення формул, 2.1-2.13 – номер моделі.

У результаті математичної обробки моделей із заданим рівнем значущості 0,003 (3σ) та довірчою ймовірністю 99,7 %, виявлено, що у процесі спрощення моделі 2.2. до моделі 2.8., застосування червоного та ближнього інфрачервоного каналів є значущо з довірчою ймовірністю 99,99 %, а спростивши до моделі 2.9., застосування спектрального індексу з відношенням ближнього інфрачервоного каналу до червоного є значущо з довірчою ймовірністю 99,98 %. Така тенденція прослідковується і в процесі спрощення моделі 2.1 до моделі 2.3., довірна ймовірність цього спектрального індексу становить 99,89 %. У результаті спрощення моделі 2.10. до моделей 2.11., 2.12.,

та 2.13., а також виявлення найбільш значущих параметрів моделі, виявлено, що застосування спектрального індексу *NIR/Red* є значущо з довірчою ймовірністю 99,80 %, а значущість застосування ближнього інфрачервоного каналу визначено з довірчою ймовірністю 98,81 %. Хоча при застосуванні цього каналу у першому підході, середній коефіцієнт кореляції становить всього лише $R = 0,36$, що пояснюється можливою зашумленістю цього каналу за рахунок впливу рослинності. За результатами другого підходу, для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу за спектральними характеристиками запропоновано модель 2.11. (рис. 5):

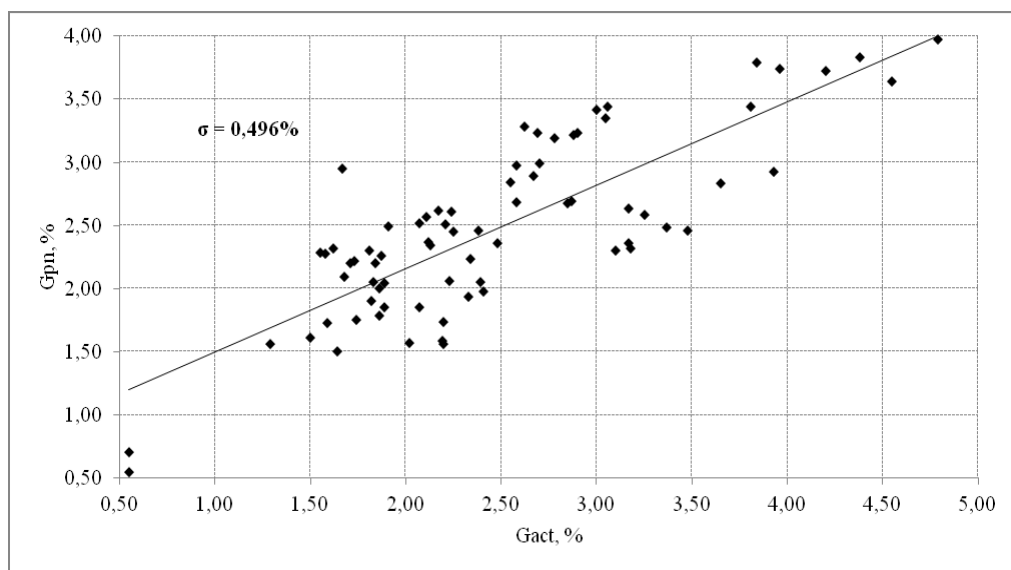


Рис. 5. Середнє квадратичне відхилення (G_{pn}) від (G_{act}). Модель 2.11.

У третьому підході досліджено степеневу модель для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті за даними дистанційного зондування Землі та наземними дослідженнями. На основі застосування цієї моделі отримано такі результати (табл. 2).

У результаті математичної обробки (таб.2.) та спрощення (рис.6.) запропонованих

степеневих моделей із заданим рівнем значимості 0,003 (3σ) та довірчою ймовірністю 99,7 %, виявлено, що найкраще застосовувати для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті, степеневу модель 3.7., яка використовує червоний спектральний канал з довірчою ймовірністю 99,99%.

Визначення адекватності степеневих моделей

№	Модель	$\sigma, \%$	F-критерій, %
3.1	$G_{pn} = G_0 \text{Blue}^a \text{Green}^b \text{Red}^c \text{NIR}^d \text{SWIR1}^u \text{SWIR2}^f$	0,465 ₆₈	-
3.2	$G_{pn} = G_0 \text{Blue}^a \text{Green}^b \text{Red}^c \text{NIR}^d$	0,469 ₇₀	95,464
3.3	$G_{pn} = G_0 \text{Green}^a \text{Red}^b \text{NIR}^c$	0,495 ₇₁	96,226
3.4	$G_{pn} = G_0 \text{Green}^a \text{Red}^b$	0,508 ₇₂	96,226
3.5	$G_{pn} = G_0 \text{Green}^a \text{NIR}^b$	0,710 ₇₂	99,999
3.6	$G_{pn} = G_0 \text{Red}^a \text{NIR}^b$	0,508 ₇₂	98,462
3.7	$G_{pn} = G_0 \text{Red}^a$	0,541 ₇₃	95,464

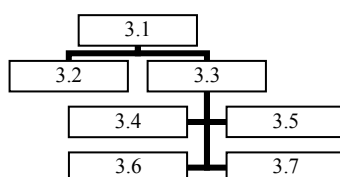
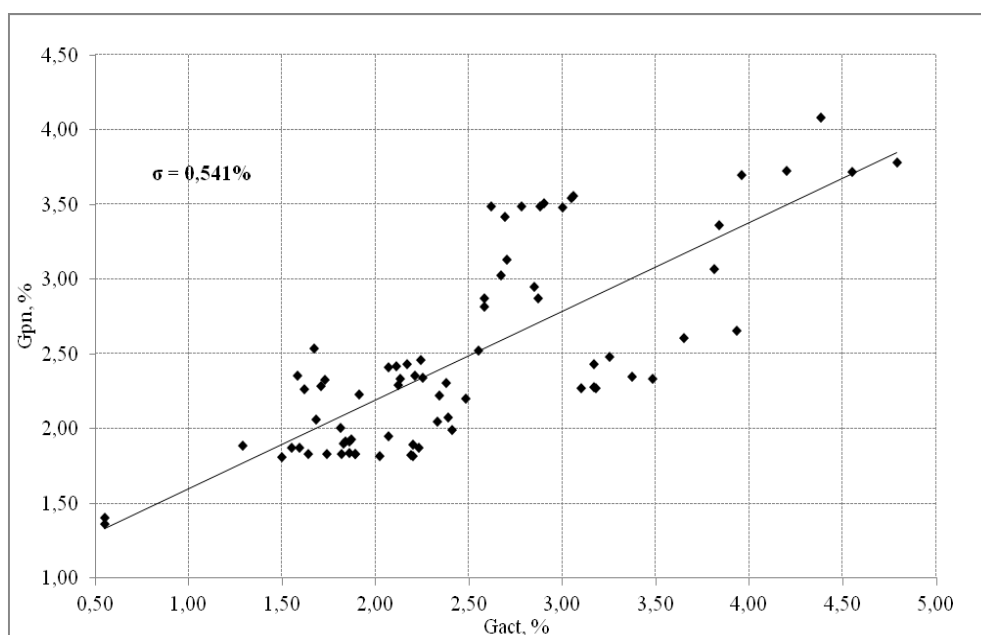


Рис. 6. Схема послідовності спрощення формул, 3.1-3.7 – номер моделі.

Рис. 7. Середнє квадратичне відхилення (G_{pn}) від (G_{act}). Модель 3.7.

Проаналізувавши моделі у всіх трьох підходах, є доцільним знаходження найоптимальнішої згідно із запропонованою методикою. Проте, застосування критерію Фішера у такому випадку є неможливим, адже моделі не є частковими випадками одна з одною. Таким чином, можливим є знаходження найоптимальнішої моделі шляхом порівняння середніх квадратичних відхилень σ

запропонованих моделей. Отже, середнє квадратичне відхилення обчисленого показника вмісту гумусу (G_{pn}) від фактичного (G_{act}) згідно моделі (1) з використанням червоного каналу становить $\sigma = 0,821\%$, з використанням ближнього інфрачервоного каналу $\sigma = 2,482\%$, згідно моделі 2.11 $\sigma = 0,496\%$, згідно степеневій моделі 3.7 $\sigma = 0,541\%$. Це свідчить про ефективність

застосування запропонованих моделей згідно другого та третього підходів запропонованої методики.

Наукова новизна і практична значущість

Вперше, для визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті на землях сільськогосподарського призначення різних ландшафтних зон Закарпаття, застосовано методику, що складається з трьох різних підходів, що базуються на застосуванні даних дистанційного зондування Землі та наземних досліджень. Виявлено, що найкраще використовувати моделі, що побудовані на застосуванні даних спектральної енергетичної яскравості у червоному та інфрачервоному діапазонах спектру, оскільки значущість застосування саме цього діапазону визначається з довірчою ймовірністю 99,99 %, а середнє квадратичне відхилення обчисленого показника вмісту гумусу від фактичного є в цих моделях мінімальним.

Такий підхід дає змогу оперативно та достовірно отримувати інформацію про кількісні показники вмісту гумусу в ґрунті для прийняття раціональних управлінських рішень щодо застосування доцільних агротехнічних заходів для запобігання зниження родючості ґрунтів відповідно до різних ландшафтних зон Закарпаття.

Висновки

У результаті застосування запропонованої методики щодо визначення та оцінювання кількісних показників вмісту гумусу в ґрунті за даними дистанційного зондування Землі та наземних досліджень зроблено такі висновки:

1. Досліджено, що існує обернена лінійна залежність між фактичним показником вмісту гумусу в ґрунті та спектральною яскравістю ґрунту, що відображається на космічних знімках. Застосовуючи запропоновану методику, визначено кількісні показники вмісту гумусу в ґрунті на основі статистичних лінійних регресійних залежностей між фактичними показниками вмісту гумусу та даними яскравостей вибраних спектральних каналів.

2. Запропоновано нові моделі залежності вмісту гумусу від яскравостей каналів та спектральних індексів видимого та

інфрачервоного діапазону електромагнітного випромінювання. Виявлено, що червоний та ближній інфрачервоний канали є значимі з ймовірністю 99,99%. Запропоновано, для визначення та оцінювання показників вмісту гумусу модель, що використовує ближній інфрачервоний канал з довірчою ймовірністю 98,81 % та спектральний індекс *NIR/Red* з довірчою ймовірністю 99,80 %. Для дослідження степеневих моделей встановлено, що найкраще застосовувати модель, яка використовує червоний спектральний канал з довірчою ймовірністю 99,99%.

3. Знайдено найоптимальнішу модель 2.11. шляхом порівняння середніх квадратичних відхилень запропонованих моделей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Ачасов В. А. Использование материалов космической и наземной цифровой фотосъемки для определения содержания гумуса в почвах / В. А. Ачасов, Д. И. Бидолах // Почвоведение. – 2008. – № 3. – С. 280–286.
- Бандурович Ю.Ю. Звіт про виконання проектно-технологічних та науково-дослідних робіт у 2013 році; за ред. Ю. Ю. Бандуровича. – Ужгород.: «Карпати», 2014. – 91с.
- Бурштинська Х.В. Вплив атмосфери на космічне зображення та принципи її врахування / Х.В. Бурштинська, І.В. Долинська // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2013. – Вип.78. – С.89-96.
- Бардиш Б. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні / Б. Бардиш, Х. Бурштинська // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва.- 2014. – Вип. 2. – С. 82-88.
- Гебрин Л. В. Застосування даних дистанційних аерокосмічних методів для узагальненої оцінки стану ґрунтів регіону / Л. В. Гебрин, О. І. Сахацький // Геоінформатика, 2015. – Вип. № 3 (55). – С. 68-76.
- Гмурман В. Е. Теория вероятности и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высш.шк., 2003. – 479 с.
- Мальшевский В. А. Расчет содержания гумуса с использованием данных дистанционного зондирования / В. А. Мальшевский, Ю. П. Федулов, Н. В. Островский и др. // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – № 92(08). – С. 671–681.
- Медведев В. В. Мониторинг почв Украины. Концепция, предварительные результаты,

- задачи. / В. В. Медведев. – Харьков: Антика, 2002. – 428 с.
- Москаленко А. А. Геоінформаційне картографування для оцінювання якісного стану земель сільськогосподарського призначення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія і картографія» / А. А. Москаленко. – К., 2014. – 20 с.
- Панас Р.М. Сучасні проблеми здійснення моніторингу ґрунтового покриву України / Р.М. Панас, М. Маланчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2013. – Вип.78. – С.201-206.
- Сахацький О. І. Досвід використання супутникових даних для оцінки стану ґрунтів з метою розв'язання природоресурсних задач / О. І. Сахацький // Доповіді Національної академії наук України. – 2008. – № 3. – С. 109 – 115.
- Сахацький О. І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. геол. наук: спец. 05.07.12 «Дистанційні аерокосмічні дослідження» / О. І. Сахацький. – К., 2009. – 40 с.
- Трускавецький С. Р. Використання багатоспектрального космічного сканування та геоінформаційних систем у дослідженні ґрунтового покриву Полісся України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с.-г. наук: спец. 03.00.18 «Ґрунтознавство» / С. Р. Трускавецький. – Х., 2006. – 24 с.
- Чорний С. Г. Використання супутникових знімків Landsat 7 для моніторингу гумусного стану темно-каштанових ґрунтів / С. Г. Чорний, Д. А. Абрамов // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2012. – Вип. 3. – С. 113-118.
- Чорний С. Г. Моніторинг вмісту гумусу у чорноземі південному з використанням багато спектральних знімків супутника Landsat: просторові та тимчасові аспекти // С. Г. Чорний, Д. А. Абрамов // Gruntoznavstvo. – 2016. – Vol. 17, no. 1-2. – 22-30.
- Шатохин А. В. Сопряженное изучение черноземов Донбасса наземными и дистанционными методами / А. В. Шатохин, М. А. Лындин // Почвоведение. – 2001. – № 9. – С. 1037 – 1044.
- Gao B. C. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B. C. Gao // Remote Sensing of Environment. – 1996. – № 58. – P. 257 - 266.
- Gebrin L. V. Comprehensive technique for constitution estimation based on satellite observation methods. / L. V. Gebrin, O. O. Zeleznayak, Y. I. Velikodsky, Y. Y. Bandurovich // Proceedings of the National Aviation University. – 2015. – № 3 (64) – P. 91 – 97.
- Gorbane G. Remote sensing of soil surface characteristics from a multiscale classification approach [text] / G. Gorbane, D. Raclbt, F. Jacob, J. Albergel, P. Andrieux // CATENA, 2008. - №.75. - Is.3. – P. 308 - 318.
- Zanter K. Landsat 8 (L8) data users handbook. Version 2.0. / K. Zanter // Eros. Sioux Falls, South Dakota, 2016. – 98 pp.
- Richter R. Atmospheric and topographic correction for satellite imagery (Atcor-2/3 users guide version 9.0.2) / Richter R., Schlapfer D. // Switzerland: DLR IB, 2016. – 263 pp.
- Richards J. A. Remote Sensing Digital Image Analysis / J. A. Richards, X. Jia // Berlin: Springer-Verlag, 2006. - 439 pp.
- Sadeghi M. A linear physically – based model for remote sensing of soil moisture using short wave infrared bands / M. Sadeghi, S. Jons, W. Philpot // Remote Sensing of Environment, 2015. – № 164. – P. 66-76.
- Serbin G. Effects of soil composition and mineralogy on remote sensing of crop residue cover / G. Serbine, S. Craig, E. Raymond, B. James // Remote Sensing of Environment, 2009. – № 113. – P. 224-238.
- South S. Optimal classification methods for mapping agricultural tillage practices / S. South, J. Qi, D. P. Lusch // Remote Sensing of Environment, 2004. – № 91. – P. 90-97.
- Schmugge T. Microwave remote sensing of soil hydraulic properties / T. Schmugge // Soil hydrology, Land use and Agriculture. – 2011. – № 19. – P. 415-421.

Надійшла 19.06.2017 р.