

МОНІТОРИНГ СТАНУ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ MONITORING THE CONDITION OF SOIL COVER

УДК 631.471:631.481+528.854:528.855

Сучасні підходи до фонових моніторингу ґрунтового покриття за даними космічного сканування

Т. Ю. Биндич*, І. В. Плisko, О. І. Шерстюк, К. Ю. Романчук

Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЯ	АНОТАЦІЯ
Отримано 24.11.2023 Отримано після доопрацювання 18.12.2023 Затверджено до видання 19.12.2023 Доступно онлайн 28.12.2023	Метою статті є оприлюднення практичної методології тематичної обробки даних супутникових знімків цілини як основи створення сучасної системи інформаційного забезпечення фонових моніторингу ґрунтів. Методичний підхід розроблено та опрацьовано за архівними даними супутника Landsat 8. Апробацію розроблених методичних підходів для фонових моніторингу проведено на прикладі ґрунтових досліджень на території заповідника «Михайлівська цілина», яка є єдиною збереженою ділянкою цілинно-лучного степу в Лісостеповій зоні України. Дослідження включали: статистичний аналіз та обробку різночасових космічних зображень цілинної ділянки, зокрема, розрахунок вегетаційного індексу NDVI та числову таксономію його кількісних значень за кластерним аналізом (метод ISODATA); аналіз архівних даних польового обстеження цієї території; геостатистичний аналіз просторової варіації показників ґрунту. Використання індексів рослинності, які отримані за різночасовими супутниковими знімками, представлено як непрямі показники для інтегрованої оцінки змін якості ґрунту та стану ґрунтового покриття. Порівняльний аналіз результатів дешифрування різночасових космічних зображень Михайлівської цілини проведено за інформаційною моделлю, що засновано на імовірнісній формалізації територіального поділу та описується за розрахунком кількох інформаційних показників складності. Аналіз цих показників свідчить про значне зниження складності просторової структури розподілу рослинності в період з 2014 по 2019 роки. Перевірку розробленого підходу проводили шляхом вибіркового визначення твердості ґрунту. Результати дисперсійного аналізу показали, що так звані контури «рослинності» на знімках, визначені на основі вегетаційного індексу NDVI, суттєво відрізняються за значеннями твердості ґрунту.
Ключові слова: багатоспектральне космічне сканування; ґрунтовий покрив; тематичне дешифрування; фоновий моніторинг; цілина	

* E-mail: tanyabyndych@gmail.com

Форма цитування: Биндич Т. Ю., Плisko І. В., Шерстюк О. І., Романчук К. Ю. Сучасні підходи до фонових моніторингу ґрунтового покриття за даними космічного сканування. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2023. Вип. 95. Харків: ННЦ "ІГА ім. О. Н. Соколовського". С. 36-46. <https://doi.org/10.31073/acss95-04>

1. Вступ

Глобальні зміни клімату та інтенсифікація процесів деградації ґрунтів [1] актуалізують удосконалення методології та системи інформаційного забезпечення фонових (еталонного) моніторингу довкілля [2, 3] та, зокрема, ґрунтів [4]. Слід нагадати, що цей вид моніторингу є невід'ємною складовою глобальної системи моніторингу навколишнього середовища, але, на жаль, є слабо розвинутим у нашій країні, що в цілому, гальмує розвиток єдиної державної системи моніторингу довкілля. Важливо відзначити, що основним завданням фонових моніторингу ґрунтів є отримання даних про вхідну (початкову або нульову) оцінку властивостей ґрунтів, що аналогічно стану ґрунтового покриття (ГП) в природному середовищі, відомості про які використовуються й для встановлення напряму та інтенсивності антропогенної трансформації ґрунтів у межах сільськогосподарських угідь [5].

Аналіз світового досвіду розроблення та налагодження сучасних систем моніторингу довкілля свідчить не тільки про його спрямованість на створення та періодичне оновлення картографічних та аналітичних матеріалів про стан ґрунтів, але й про активне залучення високотехнологічних методів отримання, обробки та зберігання даних, які дозволяють реалізувати функціонування автоматизованих інформаційних систем для прогнозування змін ґрунтів та ГП залежно від виду та інтенсивності антропогенного впливу і використовуються для обґрунтування комплексу ґрунтозахисних заходів, що сприяє постійному вдосконаленню різноманітності використаних методів і підходів [5-8]. На 13-й зустрічі Сторін Конвенції ООН по боротьбі з опустелюванням в Ордосі (Китай), представники різних країн наголосили на

важливості залучення даних космічного сканування, як новітнього джерела об'єктивної інформації про стан земної поверхні, в існуючі системи моніторингу стану навколишнього середовища та екологічного управління земельними та ґрунтовими ресурсами [9]. Це обґрунтовано тим, що використання даних багатоспектрального космічного сканування (БСКС) високої роздільної здатності, які мають географічну відповідність, безперервність і регулярно оновлюються, в цілому, забезпечує дотримання високих вимог до точності та неупередженості здобутої у цифровому вигляді геопросторової інформації про національні ґрунтові ресурси.

Мета статті – висвітлення розробленого методичного підходу до використання даних БСКС як основи створення сучасної системи інформаційного забезпечення фонових моніторингу ґрунтів, що передбачає контурне дешифрування різночасових даних БСКС високого просторового розрізнення для заповідних ділянок та багаторічних перелогів для оцінювання змін у стані ҐП з часом.

2. Об'єкти, матеріали і методи досліджень

Об'єкт досліджень – ҐП у межах природоохоронних територій на прикладі заповідника «Михайлівська цілина» у Лісостепу. Предмет досліджень – оптичні характеристики природної рослинності, які дозволяють визначати стан ґрунтів на землях природоохоронного фонду. Для досягнення поставленої мети вирішувалися завдання, пов'язані з аналізуванням існуючих методичних підходів до проведення фонових моніторингу ґрунтів та ҐП та опрацюванням розробленого методичного підходу.

Розробку методичного підходу для фонових моніторингу ґрунтів та його експериментальну перевірку проведено за даними БСКС земної поверхні, що відзняті в умовах розвитку природної рослинності в межах заповідника «Михайлівська цілина», який є єдиним збереженням в Україні осередком степової цілини з характерною лучно-степовою рослинністю та фауною, що розташований в одній з північно-східних фізико-географічних областей Лівобережно-Придніпровського краю Лісостепової зони України [10]. Цей район має переважно плоский широкохвилястий рельєф, річна кількість опадів на цій території становить від 450 до 550 мм, середньорічна температура повітря — від 6 до 7° С [11]. На ділянці заповідника, площею близько 50 га (Рис.1), зберігся різнотравно-типчаковий лучний степ з північними та південними видами степових рослин, у розвитку яких добре виражені сезонні зміни [12]. У ҐП заповідника домінують чорноземи типові середньосуглинкові на лесі, які приурочені до вододільних плато та слабопологих схилів [13]. За результатами фундаментальних ґрунтознавчих досліджень, що проводились на цій заповідній ділянці упродовж всієї історії її існування, визначено, що для ґрунтів цієї території є характерними достатньо висока природна родючість, добра гумусованість, значні запаси поживних речовин, насиченість ґрунтового колоїдного комплексу обмінними основами і, особливо, кальцієм, що визначає нейтральну (або близьку до неї) реакцію ґрунтового розчину [14-16].

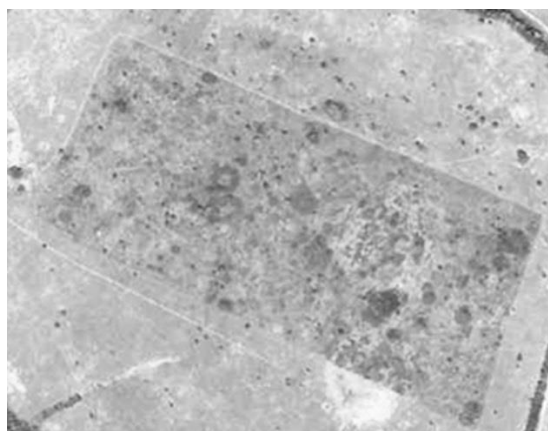


Рис.1. Космічне зображення території Михайлівської цілини

Методичний підхід розроблено та опрацьовано за архівними даними супутника Landsat 8 [17], що знаходяться у вільному доступі на сайті Геологічної Служби США [18]. Оскільки, як основний предмет спостережень, запропоновано розглядати оптичні характеристики природної рослинності, то підібрано зображення, що відзняті на початку вегетаційного періоду, а саме на початку травня у 2014 (дата зйомки 05.05.2014) та 2019 (дата зйомки 07.05.2019) роках.

Дослідження включали:

- статистичний аналіз та обробку різночасових космічних зображень цілинної ділянки, зокрема, розрахунок вегетаційного індексу NDVI [19] та числову таксономію його кількісних значень за кластерним аналізом (метод ISODATA [20]) з метою створення картосхеми розподілу природної рослинності за подібними оптичними характеристиками;
- аналіз архівних даних польового обстеження цієї території, проведеного разом співробітниками сектору дистанційного зондування та лабораторії геоєкофізики ґрунтів ННЦ «ІГА імені О. Н. Соколовського» в 2009 році;
- геостатистичний аналіз просторової варіації показників ґрунту, що здійснено за результатами аналітичних досліджень вибірових проб ґрунту;
- розробка та апробація методичного підходу для кількісного оцінювання та узагальнення співставлення різночасових картографічних матеріалів, що побудовано на основі даних БСКС природної рослинності заповідної ділянки, як сучасного підходу до фоновий моніторингу ґрунтів, заснованого на геоінформаційному принципі.

Під час досліджень використано дані відбору 48 ґрунтових проб, географічні координати точок відбору яких зареєстровані за допомогою GPS, за регулярною мережею (через кожні 100 метрів) та описи 2 ґрунтових розрізів для характеристики морфологічних особливостей ґрунтового профілю [21]. У польових умовах проведено вимірювання твердості ґрунту у трьох шарах (0–10, 10–20 і 20–30 см) — за ДСТУ 5096:2008¹ (з використанням твердоміра Ревякіна) за випадковою мережею, зокрема в межах найбільших за площею класів контурів (3-й і 4-й), що встановлені за класифікацією оптичних характеристик рослинності за даними БСКС, відзнятих у 2014 році.

Під час досліджень використано методи геостатистичної обробки даних БСКС за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) ENVI та TNT, а саме проведено: попередню обробку та трансформацію космічних зображень; розрахунок вегетаційного індексу NDVI [22]; загально статистичний аналіз та класифікування просторового розподілу значень NDVI, що отримано за даними БСКС у 2014 та 2019 роках.

3. Результати досліджень

3.1. Результати аналізу літературних відомостей.

На початковому етапі досліджень проаналізовано декілька існуючих способів фоновий моніторингу ґрунтів, які засновані на порівняльному аналізі параметрів ґрунтових властивостей в межах сільськогосподарських угідь, що визначено останнім часом, з певними характеристиками ґрунтів, які вважаються еталонними, природними або оптимальними та були встановлені для тих же ґрунтових властивостей на початкових етапах обстеження давньої розораної території.

Зокрема, проаналізовано загальновідомий спосіб фоновий моніторингу ґрунтів, який передбачає за вихідну оцінку об'єкту спостережень (еталону) використовувати показники ґрунтів на цілині або на заповідній ділянці, відносно якої проводяться порівняння даних, отриманих у рамках поточних визначень [5]. У разі неможливості отримання зазначеної оцінки через відсутність еталону, пропонується для цього використовувати дані початкового циклу спостережень. Наприклад, усі порівняння в агрохімічному обстеженні пропонується здійснювати з даними першого туру агрохімічної паспортизації земель, що розпочалася в середині 60-х років XX сторіччя або використовувати дані, які визначені за результатами

¹ ДСТУ 5096:2008. Якість ґрунту. Визначання твердості ґрунту твердоміром Ревякіна [Чинний від 2009-03-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2009. - IV, 4 с.: (Національний стандарт України).

обстежень багаторічного перелогу, тобто, давно необроблюваних полів. Цей методичний підхід також передбачає за фонові у ґрунтово-агрохімічних та екологічних дослідженнях використовувати модальні фізичні, хімічні та біологічні характеристики ґрунтів, а також середній вміст елементів у породі (кларки) [22, 23]. В результаті аналізу такого підходу встановлено, що використання як інформаційної основи лише точкових даних аналітичних вимірювань ґрунтових властивостей не дозволяє їх ефективно застосовувати в сучасних системах моніторингу ґрунтів та довкілля, в яких превалює просторово-часовий аналіз інформації.

Також критично проаналізовано існуючий методичний підхід, який пропонує під час фонового моніторингу ґрунтів проводити співставлення реальних значень ґрунтових параметрів з оптимальними параметрами фізичних, фізико-хімічних (pH), агрохімічних (вміст гумусу та елементів живлення) властивостей ґрунтів для вирощування основних сільськогосподарських культур, які розглядаються як еталон [24]. При цьому, основна мета цього співставлення — у визначенні напряму та інтенсивності трансформації ґрунтових процесів та режимів, що спричинено як глобальними змінами клімату, так й негативними наслідками господарчої діяльності людини. В результаті досліджень визначено, що своєрідним недоліком цього методичного підходу можна вважати недосконалість визначення значень еталонних параметрів для різних за генезисом ґрунтів та складність визначення або відсутність актуальної інформації щодо просторового аналізу змін властивостей ґрунтів.

На наш погляд, значний інтерес представляє спосіб фонового моніторингу ґрунтів на основі використання показників їх кислотно-основної буферності як важливих еталонних фізико-хімічних параметрів ґрунту [25]. Цей методичний підхід передбачає визначення у ґрунтових пробах, що наприклад, відібрані з дерново-підзолистого супіщаного ґрунту (шар 0-20 см, рілля та переліг), показників кислотно-основної буферності та їх оцінку. В результаті використання цього способу встановлено, що ступінь буферної ємності орних аналогів дерново-підзолистого ґрунту залежить від його гранулометричного складу та варіює в межах від 7,5 до 14,9 % у кислотному інтервалі та в межах від 39,3 до 51,3 % у лужному інтервалі, індекс кислотно-основної рівноваги змінюється від 0,19 до 0,29 [25]. Розробникам цього підходу вдалось довести, що ступінь буферної ємності аналогів дерново-підзолистого ґрунту на перелозі визначається його гранулометричним складом та варіює в межах від 8,9 до 18,6 % у кислотному інтервалі та в межах від 40,2 до 51,7 % у лужному, при цьому, індекс кислотно-основної рівноваги змінюється від 0,22 до 0,36. Оскільки у природних умовах кислотно-основна буферність залежить не тільки від твердої фази ґрунту, але й від кількісного та якісного складу «живої» фази ґрунту, від інтенсивності висхідних та низхідних потоків вологи, вмісту у ґрунтовому повітрі CO₂, то, згідно з думкою цих авторів, кислотно-основна буферність набуває ознак динамічного показника й, таким чином, характеризує здатність ґрунту не тільки протистояти змінам pH при додаванні кислоти або лугу, але й здатність відновлювати попередню величину pH у часі [25]. На наш погляд, реалізація цього способу на практиці ускладнена через використання багатьох еталонів, значний об'єм кошторисних лабораторних досліджень щодо визначення показників кислотно-основної буферності, а головне, отримання статистичної характеристики ґрунтової проби, яка також не має геоінформаційної складової, тобто, не враховує місцезнаходження її відбору. Це унеможливорює здійснення просторово-часового аналізу інформації, який засновано на детальному урахуванні регіональних особливостей та просторових закономірностей змін стану земної поверхні та, зокрема, ГП за геоінформаційним принципом.

Найближчим, за технічною суттю, аналогом для розробки сучасного методу фонового моніторингу ГП є спосіб визначення ґрунтових комбінацій [26], який включає використання даних БСКС (у видимій та ближній інфрачервоній частині спектру) земної поверхні в умовах розвитку сільськогосподарської рослинності та передбачає обробку та класифікацію одержаних зображень за методом кластерного аналізу в ГІС. Отримані в такий спосіб картосхеми використовують для розробки систем опробування ґрунтів та здійснюють наземні дослідження з використанням приладів GPS для закладання ґрунтових розрізів та відбору ґрунтових проб, які відбирають в центрі виділу, поблизу його меж та з поверхневого шару. Співставлення картосхеми, яка побудована за подібною спектральною яскравістю

сільськогосподарських рослин, з даними аналітичного дослідження проб ґрунту дозволяє встановити розподіл ґрунтових комбінацій в межах сільськогосподарських угідь. Використання цього методичного підходу дозволяє одержати актуальні, а головне геопросторові дані, які й дозволяють визначати складність ГП. Інтерпретація отриманих картосхем, побудованих за подібністю оптичних характеристик сільськогосподарської рослинності, передбачає встановлення особливостей просторового розподілу кластерних ареалів та визначення основних чинників їх створення шляхом співставлення, зокрема з цифровою моделлю рельєфу, що вказує на варіабельність значної кількості ґрунтових параметрів, які характеризують просторове змінювання низки ґрунтових процесів та режимів. Цікаво, що верифікація цього методичного підходу шляхом аналізування статистичних оцінок основних фізико-хімічних показників ґрунту — загального вмісту гумусу та вмісту гранулометричних фракцій фізичної глини ($< 0,01$ мм), дозволило встановити, що стан сільськогосподарської рослинності, який визначав її оптичні характеристики, виявився достатньо показовим для оконтурювання ґрунтових виділів або складових ГП, які значимо відрізнялися за розглянутими показниками ґрунту [27]. У зв'язку з цим, цей методичний підхід запропоновано використовувати як експрес-метод визначення або аналізування складності ГП території ще на підготовчому етапі проведення великомасштабних ґрунтових обстежень, що дозволяє обґрунтовано планувати та оптимізувати роботи на польовому етапі і досягти зниження собівартості їх проведення.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що недоліком цього методичного підходу є аналіз космічних зображень лише в межах сільськогосподарських угідь та в умовах вегетації однієї з видів сільськогосподарських рослин, що не дозволяє проводити різночасовий, просторовий аналіз їх стану періодично та отримувати достовірні дані саме для фонового моніторингу ґрунтів.

Таким чином, за результатами проведеного аналізу поставлено завдання — удосконалення способу використання даних БСКС для фонового моніторингу ГП шляхом збільшення інформативності даних космічної зйомки в видимій та ближній інфрачервоній частинах спектра з використанням даних про оптичні характеристики природної рослинності під час її вегетації. Саме це надає можливість отримати більш достовірні дані для фонового моніторингу ґрунтів та ГП, що необхідно для ухвалення своєчасних управлінських рішень щодо запобігання погіршенню їх якості.

Принципова можливість такого вдосконалення ґрунтується на класичному ландшафтно-індикаційному методі визначення ґрунту, який передбачає за зовнішніми компонентами ландшафту (зокрема, індикаторами природної рослинності) проводити визначення особливостей розташування та характеристики «прихованих» компонентів або об'єктів індикації (зокрема, ґрунту) [28]. У зв'язку з цим, чергування у просторі природних рослинних асоціацій та зміни у їх загальному стані з часом можна розглядати як критерії, які дозволяють опосередковано визначати змінювання цілої низки ґрунтових параметрів або режимів, які зумовлюють інтегровану властивість ґрунту — його родючість та можуть бути оцінені за даними космічного знімання. Таким чином, результати контурного дешифрування космічного зображення природної рослинності в межах перелогів або заповідних територій є важливою цифровою інформацією для визначення тенденцій та/або закономірностей змін просторової структури ГП та розподілу окремих властивостей ґрунтів з часом, що слід використовувати, перш за все, для організації системи фонового моніторингу ґрунтів, а саме — для вирішення питань щодо обґрунтування об'єму та оптимізації польових обстежень, виносу точок відбору проб в натуру тощо.

3.2. Результати розробки методичного підходу.

На початковому етапі розробки вдосконаленого підходу здійснено загально-статистичний аналіз цифрової інформації як щодо прямих оптичних характеристик природної рослинності в межах заповідника «Михайлівська цілина», так і розрахованого на їх основі вегетаційного індексу NDVI. На думку авторів, числова таксономія кількісних значень зображення або групування їх похідних (вегетаційних індексів) у класи за подібними

оптичними характеристиками (контури) дозволяє визначити особливості просторового розподілу різних рослинних асоціацій. Тому на цьому етапі проведено загально-статистичний аналіз зображень для декількох, основних діапазонів сканування — третього, четвертого та п'ятого каналів, які відповідають зеленому, червоному та ближньому червоному діапазонам в інтервалі від 525 до 885 нм. Найбільш контрастними виявилися зображення у 3 та 4 каналах. За результатами статистичного аналізу зроблено висновок, що зображення містить п'ять, якісно різnorідних класів контурів, що в цілому, може відповідати кількості основних рослинних формацій, які визначено в межах лучного степу на території заповідника «Михайлівська цілина» за фундаментальними геоботанічними дослідженнями [29]:

1. *Cytiseta ruthenici* з асоціацією *Cytisus ruthenicus*, *Stipa capillata* + *Poa angustifolia* + різнотрав'я;
2. *Stipeta pennatae* з асоціацією *Stipa pennata* + *Poa angustifolia* + *Salvia pratensis*, *Fillipendula hexapetala*;
3. *Stipeta capillatae* з асоціацією *Stipa capillata* + *Festuca sulcata* + *Carex humilis* + *Salvia nutans*, *Fillipendula hexapetala*, *Carex nutans*;
4. *Helyctotrichoneta pubescentis*.
5. *Zerna riparia* Nevski та *Phlomis pungens* Willd.

На наступному етапі для космічних зображень, відзнятих у 2014 та 2019 роках, розраховано NDVI та здійснено класифікацію цих картограм за методом ISODATA кластерного аналізу за допомогою ГІС. Отримані в такий спосіб картографічні матеріали (Рис. 2), відображають розподіл контурів природної рослинності, що згруповані за подібністю оптичної яскравості рослин та значень NDVI.

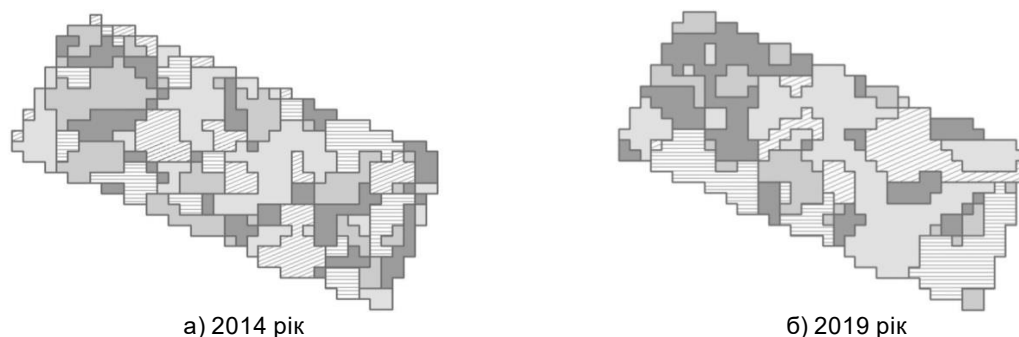


Рис. 2. Результати класифікування значень NDVI природної рослинності на ділянці заповідника «Михайлівська цілина» методом кластерного аналізу (за даними [29]).

З метою порівняльного аналізування результатів контурного дешифрування різночасових даних космічного сканування рослинного покриву Михайлівської цілини запропоновано використати кількісні показники інформаційного моделювання, що ґрунтуються на імовірнісній формалізації територіальної диференціації або поділу території [30]. Слід нагадати, що на початковому етапі такого моделювання, визначаються площі кожного контуру та загальна площа для кожного з класів контурів (Табл. 1), які отримано за класифікацією різночасових картограм NDVI, а також розраховуються відношення площі кожного з класів контурів до загальної площі дослідної території, що становить 498 600 м².

На наступному етапі інформаційного моделювання результати територіального поділу формалізують ймовірностями складових у вигляді відношення площі кожного контуру та їх класів до загальної площі території, що передбачає оцінювання результатів за інформаційним показником різноманітності, який обчислюють за формулою 1, тобто, відомою формулою К. Шенона [31]:

$$H = -\sum p_i \log_2 p_i, \quad (1)$$

де H — показник різноманітності територіального поділу;
 p_i — ймовірність i -го елементу територіального розчленування.

Таблиця 1

Основні характеристики результатів контурного дешифрування космічних зображень ділянки заповідника «Михайлівська цілина»

Номер класу, символ на картосхемах (Рис. 1)	Загальна кількість контурів		Загальна площа контурів (в м ²)	
	2014 рік	2019 рік	2014 рік	2019 рік
1 	12	4	82800	94000
2 	14	13	120600	65050
3 	12	10	99000	114354
4 	13	6	118800	158696
5 	12	5	77400	66490

Таким чином, в результаті інформаційного моделювання визначено решту показників інформаційної моделі, які дозволяють деталізувати зміни територіального поділу досліджуваної ділянки заповідника «Михайлівська цілина» з часом. Зокрема, за площами кожного з побудованих виділів (S_i) встановлено значення ймовірності p_i , за яким знайдено табличне значення функції — $p/\log_2 p_i$, а також визначено дійсний інформаційний показник складності. Також в результаті досліджень визначено показники невірноваженості (ΔH) та відносної невірноваженості (I), які дозволяють оцінити, наскільки складність територіальної диференціації залежить від числа елементів просторової структури та співвідношення їхніх площ [30].

4. Обговорення результатів

Співставлення кількісних показників інформаційної моделі поділу зображення ділянки заповідника «Михайлівська цілина», що отримано за результатами контурного дешифрування різночасових картограм NDVI, надає можливість оцінити зміни у стані рослинного покриву з часом.

Зокрема, аналіз показників інформаційної моделі показав суттєве зниження інформаційного показника складності просторової структури розподілу рослинності в межах заповідної території за роки з 2014 до 2019 відповідно з 5,26 до 3,99 одиниць. Крім того, у цей період також встановлено зростання значень показників невірноваженості (від 0,72 до 1,06) та відносної невірноваженості (від 0,12 до 0,21) територіального поділу «рослинних» контурів. Ці показники інформаційного моделювання дозволяють опосередковано визначити зміни у стані природної рослинності, спричинені зміною природних умов та, зокрема — ґрунтових режимів, що пов'язано з глобальними змінами клімату. Аналіз цих інформаційних показників дозволив встановити певні зміни у просторовому розподілі природної рослинності, що ймовірно може вказувати й на зменшення природного різноманіття цілинних територій, що безумовно обґрунтовує необхідність ретельного контролю стану заповідної ділянки та проведення наземних ґрунтових обстежень в її межах найближчим часом з метою прямого визначення змін ґрунтових властивостей в системі фонових моніторингу ґрунтів.

Показник складності в інформаційній моделі територіального поділу відображує зміни як числа складових частин, так й співвідношення їх площ, що також представляє кількісну експрес-оцінку зміни складу земного покриву у часі внаслідок кліматичних змін або антропогенної деградації у ґрунтах. Таким чином, використання запропонованого методичного підходу представляє доцільність тільки за умов застосування космічних зображень, відзнятих у подібних умовах стану земної поверхні, а також за однакових методів та налаштувань класифікації зображень, що забезпечує коректність їх порівняння.

Для інтерпретації результатів використання запропонованого підходу проаналізовано дані наземних обстежень ділянки заповідника «Михайлівська цілина» в 2009 році, що отримано за регулярною мережею відбору проб з поверхневого шару ґрунту (0-30 см). Шляхом геостатистичної обробки даних лабораторно-аналітичних досліджень відібраних проб ґрунту встановлено, що зміни просторового розподілу оптичних характеристик рослинності за період з 2014 до 2019 років не можуть бути спричинені за рахунок зрушення або значущої

зміни основних, найбільш стабільних ґрунтових властивостей (гранулометричний склад, загальний вміст гумусу та вміст поживних речовин тощо), за якими територія Михайлівської цілини має цілком однорідний ҐП.

Зрозуміло, що в умовах дефіцитного фінансування наукових установ, сучасне геоботанічне та ґрунтове обстеження Михайлівської цілини, що дозволило би встановити причини такої зміни у просторовому розподілі рослинності шляхом прямого визначення як її характеристик, так і ґрунтових параметрів, є мало ймовірнісною подією.

У зв'язку з цим, як експрес метод оцінювання змін ґрунтових умов, які могли спричинити зміни у стані природної рослинності та, як слідство, зміни площі та розподілу «рослинних» контурів, під час досліджень використано дуже емну та достатньо інформативну для ґрунтознавця характеристику — твердість ґрунту, яка знаходиться у функціональній залежності як від стабільних показників ґрунту (гранулометричного складу та структури ґрунту), так і від достатньо динамічних фізичних показників, які зумовлюються атмосферними умовами – щільності будови та вологості ґрунту [32]. Також важливо відзначити, що у випадку польових досліджень на землях заповідного фонду, визначення твердості ґрунту є особливо доречним у зв'язку з простотою проведення польових вимірювань, під час яких не здійснюється руйнування будови ґрунту. Крім того, цей показник є незамінним для оцінювання як умов проростання рослин, так і їх розвитку, в тому числі для оцінювання можливості кореневих волосків освоювати не тільки між-, але й внутрішньоагрегатний простір [32]. Показник твердості також характеризує як міцність грудочок ґрунту, так і якість їх складення, причому таку оцінку практично не можна отримати, використовуючи традиційний показник щільності будови ґрунту [33].

Таким чином, часткову верифікацію результатів використання розробленого методичного підходу та оцінювання його ефективності проведено шляхом вибіркового визначення твердості ґрунту в межах найбільших за площею ареалів — 3 та 4 класів (Рис. 2а), у шарах 0-10, 10-20 та 20-30 см за випадковою мережею точок вимірювання за допомогою твердоміра Ревякіна, у десятикратній повторності. Результати вимірювань, а також проведеного на їх основі дисперсійного аналізу даних представлено у таблиці 2.

Таблиця 2

Верифікація результатів контурного дешифрування зображення заповідної ділянки за результатами вимірювань твердості ґрунту для найбільших за площею класів контурів

Повторності	Твердість ґрунту (в кг/см ²) за окремими шарами ґрунту					
	0-10 см		10-20 см		20-30 см	
	Клас 3	Клас 4	Клас 3	Клас 4	Клас 3	Клас 4
1	5,1	7,2	13,1	15,2	17,4	18,4
2	4,9	7,0	12,6	16,1	16,9	18,9
3	5,3	6,7	13,5	15,5	18,3	17,9
4	5,0	6,6	13,3	16,4	17,0	18,5
5	5,3	7,4	12,8	16,3	17,8	18,7
6	5,0	7,3	13,4	15,8	17,7	19,1
7	5,2	6,9	13,0	16,0	18,0	19,0
8	5,9	7,0	12,5	15,6	17,8	19,2
9	4,7	7,2	13,0	16,0	18,0	20,0
10	5,1	6,8	13,0	15,0	18,0	18,3
<i>Результати дисперсійного аналізу даних</i>						
Середнє	5,15	7,00	13,03	15,74	17,66	18,78
F табличне			5,12			
F фактичне	184,39		213,27		22,11	
Критерій Стюдента			2,26			
t 0,05						
HCP 0,05	0,30		0,40		0,50	
Помилка HCP	0,14		0,19		0,23	

Результати дисперсійного аналізу показали, що визначені на основі вегетаційного індексу NDVI «рослинні» контури третього та четвертого класів є значимо відмінними за значеннями твердості ґрунту у всіх досліджених шарах. Ці результати дозволяють рекомендувати твердість ґрунту як показник для експрес-оцінювання змін у стані ґрунтів та

ґрунтових режимів з часом, що спричиняють зміни й у стані природної рослинності, які можуть спостерігатися за різночасовими даними БСКС.

За результатами контурного дешифрування даних БСКС 2019 року знімання (Рис. 2б) розроблено систему опробування ґП заповідної ділянки Михайлівської цілини для остаточної верифікації розробленого підходу у післявоєнний час.

На наш погляд, запропонований спосіб дозволяє значно розширити сферу практичного застосування даних БСКС для цілей моніторингу ґрунтів як експрес-метод визначення змін у стані рослинних асоціацій та ґП на землях заповідного фонду та перелогах, що дозволяє планувати та оптимізувати польові дослідження в системі фонового моніторингу довкілля, що в цілому, визначає й зниження собівартості їх проведення.

5. Висновки

Відзначено необхідність удосконалення систем інформаційного забезпечення моніторингу довкілля та, зокрема, ґрунтів в нашій країні шляхом використання даних БСКС високого просторового розрізнення, для яких характерними є не тільки географічна відповідність, безперервність та регулярна оновленість, але й які мають перспективу постійного вдосконалення засобів знімання та комп'ютерних методів дешифрування, доступність значного фонду високоякісних космоснімків, що в цілому, забезпечує дотримання високих вимог до точності та неупередженості здобутої у цифровому вигляді геопросторової інформації про національні ґрунтові ресурси.

Шляхом критичного аналізу існуючих підходів до фонового моніторингу ґрунтів встановлено, що ці методи засновані на використанні як інформаційної основи лише точкових даних аналітичних вимірювань ґрунтових властивостей, що не дозволяє їх ефективно використовувати в сучасних системах моніторингу ґрунтів та довкілля, в яких превалює просторово-часовий аналіз інформації, що накопичується та оброблюється за геоінформаційним принципом.

Розроблено новітній методичний підхід до фонового моніторингу ґрунтів, який передбачає використання різночасових даних БСКС високого просторового розрізнення для заповідних територій або перелогів, в якому проводиться контурне дешифрування оптичних характеристик природної рослинності та узагальнення отриманих результатів за методом інформаційного моделювання для визначення змін у стані земної поверхні з часом.

Опрацювання розробленого методичного підходу для окремої ділянки заповідника «Михайлівська цілина» дозволило визначити його ефективність для встановлення змін у просторовому розподілі природної рослинності, що опосередковано вказує на зменшення природного різноманіття цілинних територій або зміну ґрунтових режимів та обґрунтовує доцільність сучасних, ґрунтових обстежень в межах заповідної ділянки з метою прямого визначення змін ґрунтових властивостей в системі фонового моніторингу ґрунтів.

Обґрунтовано визначення твердості ґрунту, в межах заповідних територій, як експрес методу оцінювання змін ґрунтових умов у часі, які обумовлюють і зміни у стані природної рослинності.

Відзначено, що простота у використанні інформаційного моделювання для порівняльного аналізу результатів контурного дешифрування різночасових космічних зображень обґрунтовує доцільність його використання під час розробки автоматизованих картографічних систем аналізу даних для дистанційного моніторингу земельних та ґрунтових ресурсів.

Список використаних джерел

1. The Status of the World's Soil Resources: Main Report / managing editor F. Nachtergaele. Rome: FAO, 2015. 607 p. URL: <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf> (дата звернення: 15.11.2023).
2. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. 2-е издание. Москва: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.
3. Izrael Yu. A. Background monitoring and its role in global estimation and forecast of the state of the biosphere. *Environmental Monitoring and Assessment*. 1982. Vol. 2(4). P. 369–378. <https://doi.org/10.1007/BF00416694>.

4. Medvedev V. V., Laktionova T. N. Analysis of the experience of European countries in soil monitoring. *Eurasian Soil Science*, 2012. Vol. 45(1). P. 90–97. <https://doi.org/10.1134/S1064229312010139>.
5. Медведєв В. В. Мониторинг почв України. Концепція. Итоги. Задачи. (2-ое пересмотр. и дополн. издание). Харьков: КП «Городская типография», 2012. 536 с.
6. Huber S., Syed B., Freudenschuß A., Ernstsen V., Loveland P. Proposal for a European soil monitoring and assessment framework. Technical report 61. Copenhagen: European Environment Agency, 2001. 58 p. URL: https://www.eea.europa.eu/publications/Technical_report_No_61/page001.html (дата звернення: 15.11.2023).
7. European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring / Eds. By D. King, R. J. A. Jones., A. J. Thomasson. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Community, 1995. 286 p. URL: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoiils_docs/esb_rr/n01_EUR16232.pdf (дата звернення: 15.11.2023).
8. Baritz R., Amelung W., Antoni V., Boardman J., Horn R., Prokop G., Römbke J., Romkens P., Steinhoff-Knopf B., Swartjes F., Trombetti M., Vries de Wim. Soil monitoring in Europe. Indicators and thresholds for soil quality assessments. ETC/ULS Report, 2021. 137 p. URL: <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-di/products/etc-uls-report-2021-soil-monitoring-in-europe-indicators-and-thresholds-for-soil-quality-assessments> (дата звернення: 15.11.2023).
9. Ракоїд О. Стан відображення в програмних документах України та статус реалізації положень Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням: Аналітичний звіт, 2017. 100 с. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/Desertification_Rakoyid_Web.pdf. (дата звернення: 15.11.2023).
10. Національний атлас України / за ред. Л. Г. Руденко. Київ: ДНВП «Картографія», 2007. 440 с.
11. Агроклиматический атлас Украинской ССР / под ред. С.А. Сапожниковой. Киев: Урожай, 1964. 36 с.
12. Геоботаничне районування Української РСР / за ред. А. І. Барбарич. Київ: Наукова думка, 1977. 303 с.
13. Бреус Н. М. Опыт агропочвенного районирования левобережной Лесостепи УССР для общих хозяйственных целей и опытного дела на примере Сумской области: дис. ... канд. с.х. наук: 06.01.03. Харьков, 1968. 150 с.
14. Дегтярьов В. В. Гумус чорноземів лівобережного Лісостепу і Степу України: монографія / за ред. д.с.-г.н, проф. Д.Г. Тихоненка. Харків: Майдан, 2011. 360 с.
15. Чекар О. Ю. Роль гумусу в стабілізації ґрунтових процесів у чорноземах типових лівобережного Лісостепу України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с.-г. наук: спец. 06.01.03 «Агроґрунтознавство і агрофізика». Харків, 2001. 20 с.
16. Чесняк О. А., Чесняк Г. Я., Степаненко А. Я. Содержание подвижных органических веществ в черноземах мощных Лесостепи УССР как показатель окультуренности. *Исследование плодородия почв УССР: тр. Харьк. с.-х. ин-та*. 1970. Т. 87 (124). С. 29-36.
17. Landsat 8. Mission details. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-mission-details/> (дата звернення: 16.10.2023).
18. United States Geological Survey (USGS). Earth Resources Observation and Science (EROS) Center URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros>. (дата звернення: 16.10.2023).
19. Кохан С. С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. Київ: Вища школа, 2009. 511 с.
20. Ким Дж.-О., Мьюллер Ч. У., Клекка У. Р., Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Факторный, дискриминантный и кластерный анализы: Пер. с англ. А. М. Хотинского, С. Б. Королева / под ред. И. С. Енюкова. Москва: Финансы и статистика, 1989. 215 с. URL: https://fileskachat.com/view/62695_3208be4106ce3b291a81d9e798c3ef88.html (дата звернення: 24.10.2023).
21. Пліско І. В., Трускавецький С. Р. Дослідження просторової неоднорідності ґрунтів Михайлівської цілини. *Вісник центру наукового забезпечення АПВ Харківської області*. 2010. Вип. 9. С. 217-224.
22. Лактіонова Т. М., Бігун О. М., Шейко С. М., Накісько С. Г. Реєстр еталонних фізичних параметрів орних ґрунтів України і рекомендації щодо оцінювання фізичної якості ґрунту. Харків: ТОВ «Смугаста типографія», 2016. 44 с.
23. Булігін С. Ю., Вітвіцький С. В., Буланій О. В., Тонха О. Л. Моніторинг якості ґрунтів. Підручник. Київ: Видавництво НУБіП України, 2019. 421 с.
24. Бондарев А. Г., Медведєв В. В. Некоторые пути определения оптимальных параметров агрофизических свойств почв. *Теоретические основы и методы определения оптимальных параметров свойств почв. Труды почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 1980. С. 85-98.
25. Надточий П. П., Мыслыва Т. Н. Эталонные величины кислотности-основности дерново-подзолистых почв для фонового мониторинга. *Агрохимия*. 2014. № 3. С. 83–89.
26. Спосіб визначення ґрунтових комбінацій: пат. 37208 Україна: МПК (2006) G01 N33/24 G01 V8/00 G03 B37/00. Авт.: Биндич Т. Ю., Чичоткіна О. А. Заяв. № u2008 05768 від 05.05.2008; опубл. 25.11.2008, Бюл. № 22.
27. Биндич Т. Ю. Використання даних космічної зйомки сільськогосподарської рослинності для картографування ґрунтового покриву. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2008. Вип. 68. С. 50-56.
28. Викторов С. В., Чижишев А. Г. Ландшафтная индикация. Москва: Наука, 1985. 96 с.
29. Геоботаничне районування Української РСР / за ред. А. І. Барбіч. Київ: Наукова думка, 1977. 305 с.
30. Геренчук К. І., Раковська Е. М., Топчієв О. Г. Польові географічні дослідження. Київ: Вища школа, 1975. 248 с.
31. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. 830 с.
32. Медведєв В. В. Твердость почв. Харьков. Изд. «13 типография», 2009. 152 с.
33. Вилде А. А. О закономерностях изменений твердости почв. / Механизация и электрификация сельского хозяйства. Рига, 1978. Вып. 4. С. 167-178.

UDK 631.471:631.481+528.854:528.855

Modern approaches to background monitoring of soil cover by space scanning data

T. Yu. Byndych*, I. V. Plisko, A. I. Sherstyuk, K. Yu. Romanchuk

National Scientific Center "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research named after O. N. Sokolovsky"

Kharkiv, Ukraine

*E-mail: tanyabyndych@gmail.com

The purpose of the article is to describe a practical methodology for thematic processing of satellite imagery data of virgin land as a basis for creating a modern system of information support for background monitoring of soils. The methodical approach developed based on archival data of the Landsat 8 satellite. The testing of methodological developed approaches for background monitoring performed on the example of the soil studies of the Mykhailivska virgin land, which is the only preserved area of virgin meadow steppe in the Forest-Steppe zone of Ukraine. The research included statistical analysis and processing of different time space images of the virgin area, in particular, the calculation of the vegetation index NDVI and the numerical taxonomy of its quantitative values by cluster analysis (ISODATA method); analysis of archival data of the field survey of this territory; geostatistical analysis of spatial variation of soil indicators. The use of vegetation indices obtained by multi temporal satellite images introduced as indirect indicators to the integral change assessment of soil quality and state of soil cover. Comparative analysis of the results of decoding of different-time space images of the Mykhailivska virgin land carried out by the information model, which based on the probabilistic formalization of territorial division and described by calculating several information indicators of complexity. The analysis of these indicators show a decrease in the complexity of the spatial structure of the distribution of vegetation in the period from 2014 to 2019 years. The verification of developed approach carried out by means of selective determination of soil penetration resistant. The results of the dispersion analysis showed that the "vegetation" contours determined based on the vegetation index NDVI are significantly different in terms of soil penetration resistant values.

Key words: soil cover; virgin land; background monitoring; multispectral space scanning; thematic decoding.

Citing: Byndych T. Yu., Plisko I. V., Sherstyuk A. I., Romanchuk K. Yu. (2023). Modern approaches to background monitoring of soil cover by space scanning data. *AgroChemistry and Soil Science*, 95, 36-46... doi:10.31073/acss95-04 [in Ukrainian].