

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА**

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
« _____ » _____ 2025 р.

**АНАЛІЗ СТАНУ ҐРУНТІВ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ ДОНЕЦЬКОЇ
ОБЛАСТІ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

Виконав: студент 4-го курсу д.ф.н,
групи ГК- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Картографія, геоінформатика
і кадастр
Максим Васильович СТУКАЛО
Науковий керівник:
ст.викл. Попов В.С.

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

Голова ЕК Валентина РЕДІНА

Секретар ЕК Тетяна БУЛГАКОВА
« _____ » _____ 2025 р.

Харків – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	6
1.1. Фізико-географічна характеристика території.....	6
1.2. Характеристика ґрунтового покриву Бахмутського району	8
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ҐРУНТУ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ.....	13
2.1. Загальні поняття про методи дослідження стану ґрунту	13
2.2. Метод аналізу рослинності за індексом SAVI.....	15
2.3. Метод аналізу вологості за індексом NDMI	18
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА СТАНУ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ ЗА СПЕКТРАЛЬНИМИ ІНДЕКСАМИ.....	20
3.1. Використані методики оцінки стану ґрунтового покриву території.....	20
3.2. Аналіз стану ґрунтового покриву за індексами SAVI та NDMI	42
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59
ДОДАТОК А ІНДЕКСНІ ЗОБРАЖЕННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ ЗА SAVI У ПЕРІОД З 2020 ПО 2024 РОКИ	66
ДОДАТОК Б ІНДЕКСНІ ЗОБРАЖЕННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ БАХМУТСЬКОГО РАЙОНУ ЗА NDMI У ПЕРІОД З 2020 ПО 2024 РОКИ.....	84

ВСТУП

Ґрунтовий покрив є однією з найважливіших складових природного середовища, від якого залежить якість і кількість сільськогосподарської продукції та стан екосистем, а також сталий розвиток регіону. Останніми роками стан ґрунтів в Україні, зокрема в Донецькій області, суттєво погіршився через інтенсивне використання земель, техногенне навантаження, воєнні дії та зміну клімату. Ці процеси негативно впливають на родючість ґрунтів та сприяють ерозійним процесам і деградації земель.

Бахмутський район, розташований у північно-східній частині Донецької області, є прикладом території, де ґрунтовий покрив потребує ретельного моніторингу. Інтенсивне сільськогосподарське використання, видобуток корисних копалин, техногенне забруднення та наслідки війни зумовлюють актуальність застосування сучасних методів аналізу для виявлення змін у стані ґрунтів.

Сучасні дистанційні методи дослідження, зокрема використання супутникових знімків та спектральних індексів, дозволяють оперативно оцінювати стан ґрунтового покриву на великих територіях. Аналіз спектральних індексів, таких як SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) для оцінки стану рослинності та NDMI (Normalized Difference Moisture Index) для визначення вмісту вологи у листку, є одним із ефективних інструментів, який забезпечує точність і швидкість обробки даних, навіть у складних умовах доступу до об'єкта дослідження.

Актуальність дослідження полягає в необхідності відновлення пошкоджених і деградованих агроекосистем у повоєнний період. Аналіз стану ґрунтів, що зазнали значного антропогенного навантаження в умовах відсутності належної сівозміни та меліоративних заходів, а також порівняння цих показників із рівнем деградації, спричиненої воєнними діями, дозволить оперативно розробити та впровадити ефективні заходи з їх відновлення. Особливо важливим

є можливість виконання такого аналізу без проведення попередніх польових вимірювань, які у багатьох випадках є неможливими через масштаби пошкоджених територій України. Застосування дистанційних методів дає змогу отримувати актуальні дані про стан ґрунтового покриву, що, у свою чергу, дозволяє раціонально розподіляти пріоритети відновлення та забезпечити ефективне використання наявних ресурсів.

Об'єктом дослідження є ґрунтовий покрив Бахмутського району, а **предметом** – оцінка його стану за даними дистанційного зондування Землі.

Мета дослідження – оцінити стан ґрунтового покриву Бахмутського району Донецької області з використанням спектральних індексів, зокрема SAVI та NDMI, для виявлення змін у його родючості та зволоженні.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

1. Вивчити фізико-географічні особливості Бахмутського району та його ґрунтового покриву.
2. Ознайомитися з основними методами оцінки стану ґрунтів за даними дистанційного зондування.
3. Розробити метод оцінки стану ґрунтового покриву з використанням індексів SAVI та NDMI.
4. Виконати оцінку стану рослинності за індексом SAVI та проаналізувати рівень вологості ґрунтів за індексом NDMI.

Новизна цієї роботи полягає у поєднанні аналізу індексів SAVI та NDMI для комплексної оцінки стану рослинного покриву та рівня ґрунтової вологи на досліджуваній території, що зазнала масштабного воєнного впливу. На відміну від традиційних агроекологічних досліджень, у роботі враховано просторово-часову динаміку процесів деградації у розрізі класів вегетації та рівнів водного стресу, що дозволяє точно фіксувати зміни агроландшафтів. Додатковою новизною є створення повністю автоматизованого інструментарію на базі ArcPy, що забезпечує відтворювану, структуровану та масштабовану обробку супутникових знімків Sentinel-2, включаючи мозаїкування, маскування хмар,

розрахунок індексів та їх класифікацію з просторовим аналізом результатів. Також була розроблена власна схема інтерпретації значень SAVI, яка враховувала специфіку регіону.

Попередньо було два рази проведено апробацію результатів у формі тез, представлених на науковій конференції студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи», присвяченій пам'яті професора Г.П. Дубинського [11; 12].

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновку та додатків. В собі вона містить три таблиці, дев'ять блоків скриптів автоматизації та 58 зображень. Список використаної літератури має 52 джерела.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Фізико-географічна характеристика території

Бахмутський район розташований у північно-східній частині Донецької області України та межує з Луганською областю. Загальна площа району становить 1747,6 км² і складається з 7 територіальних громад. Станом на 2020 рік чисельність населення району становила приблизно 223,8 тисячі осіб, при середній щільності заселення – 115 осіб на квадратний кілометр [2; 5].

Територія Бахмутського району охоплює частину Донецького плато, зокрема Бахмут-Торецьку височину, та входить до складу Донецького кряжу. Рельєф платоподібний, із середніми висотами близько 200 м, місцями досягає 250 м над рівнем моря. Найвища точка розташована на північно-західній околиці Бахмута, тоді як центральна частина міста знаходиться на висоті близько 84 м. Поверхня району інтенсивно розчленована ярами, балками й долинами малих річок, що формують розвинений мікрорельєф та гідрологічну структуру (рис. 1.1).

Подібні морфоструктурні особливості сприяють розвитку ерозійно-аккумулятивних процесів і формуванню різних типів ґрунтів. Рівнинність території у поєднанні з родючими чорноземами створює сприятливі умови для ведення сільського господарства, особливо механізованого землеробства. Це зумовлює високий агропотенціал району й значною мірою визначає характер його природокористування.

Тут панує континентальний тип клімату, що характеризується теплим літом і помірно холодною зимою. Середньорічна температура повітря району коливається в межах +8°C. Літо зазвичай тривале і тепле, із середньою температурою липня близько +22°C. Це створює сприятливі умови для вирощування таких сільськогосподарських культур, як пшениця, кукурудза, соняшник та інші технічні культури. Зима м'яка, середня температура січня становить близько -5°C, хоча можливі короткочасні періоди сильних морозів.

Для кліматичних умов регіону характерні сильні південно-західні вітри, які можуть спричиняти ерозійні процеси на відкритих ділянках ґрунту. Щорічна кількість опадів становить близько 500 мм, що є достатнім для розвитку сільського господарства, проте періоди посухи останнім часом стають усе частішими через зміни клімату.



Рис. 1.1. Космознімок території Бахмутського району станом на червень 2021 року [20]

Районом протікає річка Бахмутка, яка є правою притокою Сіверського Дінця. Перетинаючи місто Бахмут, вона забезпечує водою населення, промислові об'єкти та сільське господарство. На її берегах були побудовані зрошувальні системи, які дозволяли підтримувати продуктивність сільськогосподарських угідь навіть у періоди посух. Але наразі стан водних об'єктів району є незадовільним через значне техногенне навантаження, спричинене діяльністю промислових підприємств та наслідками військових дій.

Забруднення важкими металами, нафтовими продуктами та іншими промисловими відходами значно погіршило якість води. Крім того, річки зазнають антропогенних змін русла, що негативно впливає на їх екологічну функцію [1; 10].

Територія багата на поклади солі, гіпсу, доломітів, пісковика та крейди, які активно використовувалися для розвитку промисловості. Видобуток солі, зокрема, є історично важливою галуззю, що визначила економічний розвиток регіону. На території району експлуатувалися два великих родовища солі: Артемівське та Ново-Карфагенне. Окрім того, поклади піску та глини забезпечували сировину для будівельної галузі. Проте через бойові дії більшість родовищ зазнали руйнувань, що ускладнює їх подальшу експлуатацію. Відновлення видобувної галузі потребує значних інвестицій і стабілізації ситуації в регіоні.

Бахмутський район вирізняється унікальним географічним положенням, різноманітністю природних умов і значним ресурсним потенціалом, що створює передумови для сталого розвитку території. Водночас район зіштовхується з низкою серйозних викликів, серед яких – наслідки воєнних дій, деградація природних ландшафтів, виснаження ґрунтів та зниження біорізноманіття. У таких умовах надзвичайно важливим є застосування комплексного та виваженого підходу до просторового планування, реалізації програм екологічного відновлення та впровадження технологій для збереження біорізноманіття. Водночас ефективне втілення цих заходів можливе лише за умови забезпечення стабільної безпеки на території, що дозволить проводити відновлювальні роботи та гарантувати довгострокову екологічну рівновагу.

1.2. Характеристика ґрунтового покриву Бахмутського району

Одним із ключових елементів фізико-географічної характеристики території є ґрунтовий покрив, який суттєво впливає на природокористування та

аграрний потенціал регіону [3; 4; 7]. У межах Бахмутського району переважають чорноземи, які займають близько 90% його площі [6; 8]. Ці ґрунти відзначаються високою родючістю та є основою для ефективного ведення сільського господарства (рис. 1.2).

Чорноземи звичайні середньогумусні є найпоширенішими ґрунтами району. Вони характеризуються високою родючістю завдяки середньому вмісту гумусу (4–6%), який забезпечує оптимальні умови для вирощування сільськогосподарських культур, зокрема зернових, технічних та кормових. Ці ґрунти добре структуровані, з гарною водопроникністю та зволоженістю, що робить їх ідеальними для інтенсивного землеробства. Просторово вони зосереджені в центральній частині району.

Чорноземи на щільних глинах займають другу за поширеністю площу в районі та розташовані переважно в східній та південній частинах району. Вони мають ущільнене підґрунття, що ускладнює проникнення вологи та повітря, але забезпечують достатній рівень родючості за умови правильного агротехнічного догляду. Ці ґрунти переважно підходять для вирощування зернових культур, проте потребують розпушення та покращення структури для підвищення ефективності.

Чорноземи звичайні малогумусні характеризуються зниженим вмістом гумусу (2–4%) порівняно із середньогумусними чорноземами. Це зумовлює їхню нижчу родючість, однак ці ґрунти залишаються придатними для вирощування культур. Вони розташовані здебільшого на півдні та півночі району.

Чорноземи глибокі середньогумусні є одними з найродючіших ґрунтів району. Розташовані в західній частині району. Вони мають глибокий гумусовий горизонт і добре структуруються, що сприяє збереженню вологи та забезпеченню поживними речовинами. Ці ґрунти придатні для всіх видів сільськогосподарських культур і особливо ефективні для вирощування технічних культур та багаторічних трав.

Серед ґрунтів Бахмутського району також трапляються лучні та чорноземно-лучні солонцюваті різновиди, які мають обмежене агровикористання через підвищений вміст солей. Глибоко-солонцюваті ґрунти мають засолення у нижніх шарах профілю, що знижує водопроникність, однак завдяки вмісту гумусу у верхніх горизонтах можуть використовуватись під сінокоси або сільськогосподарські культури за умови проведення меліоративних заходів. Вони переважно розташовані в центральній частині району та витягнуті лінійно з півночі на південь. Натомість лучні та чорноземно-лучні ґрунти з поверхневим засоленням характеризуються значно нижчою родючістю, оскільки солі зосереджені у верхніх шарах. Їх використання можливе лише після меліорації, зокрема гіпсування та зрошення, і поширені вони виключно на півночі району.

Чорноземи солонцюваті на щільних глинах розташовані в східній та західній частинах району. Вони утворилися на важких глинистих породах із частковим засоленням нижніх шарів. Це ускладнює водообіг у ґрунті та знижує його родючість. Наступні ґрунти розташовані переважно в центральній частині, це чорноземи звичайні залишково-солонцюваті. Вони мають високу родючість у верхніх шарах, але засолені у нижніх горизонтах. А чорноземні глинисто-піщані та супіщані ґрунти мають легку текстуру, що сприяє швидкому проникненню води, але також знижує їхню здатність утримувати вологу. Вони потребують додаткового зрошення для ефективного вирощування культур, таких як зернові, кукурудза або овочеві культури. Ці ґрунти зосереджені в північній частині району.

Також трапляються чорноземи щебенюваті, які є скелетними ґрунтами з високим вмістом щебеню, що ускладнює їх обробіток і обмежує сільськогосподарське використання. Окрему групу становлять опідзолені чорноземи, які мають ознаки вилуговування карбонатів і глинозему з верхніх горизонтів. Це знижує їх агрономічну цінність, однак вони можуть

використовуватися під пасовища або для лісових насаджень. Найчастіше такі ґрунти зустрічаються локально в південно-східній частині району.

На жаль, у сучасних умовах ґрунтовий покрив Бахмутського району зазнає значного впливу воєнних дій. Використання важкої техніки призводить до фізичного ущільнення ґрунтів, руйнування їхньої структури, порушення профілю та змішування генетичних горизонтів. Крім того, у зонах розміщення техніки часто фіксується забруднення нафтопродуктами, важкими металами та залишками вибухових речовин [9; 10; 33]. Це знижує родючість, погіршує водно-повітряний режим ґрунтів і сприяє процесам деградації, таким як ерозія, вторинне засолення або підкислення.

Отже, ґрунтовий покрив Бахмутського району є різноманітним і переважно складається з чорноземів, які забезпечують високу продуктивність для сільського господарства. Однак частина ґрунтів має певні обмеження, такі як засолення, низький вміст гумусу або щербенистість, що потребує впровадження відповідних заходів та агротехнічних прийомів. Водночас сучасні воєнні дії завдають додаткової шкоди ґрунтам, спричиняючи їх деградацію, фізичне ущільнення та хімічне забруднення, що суттєво ускладнює їх подальше використання у сільському господарстві.

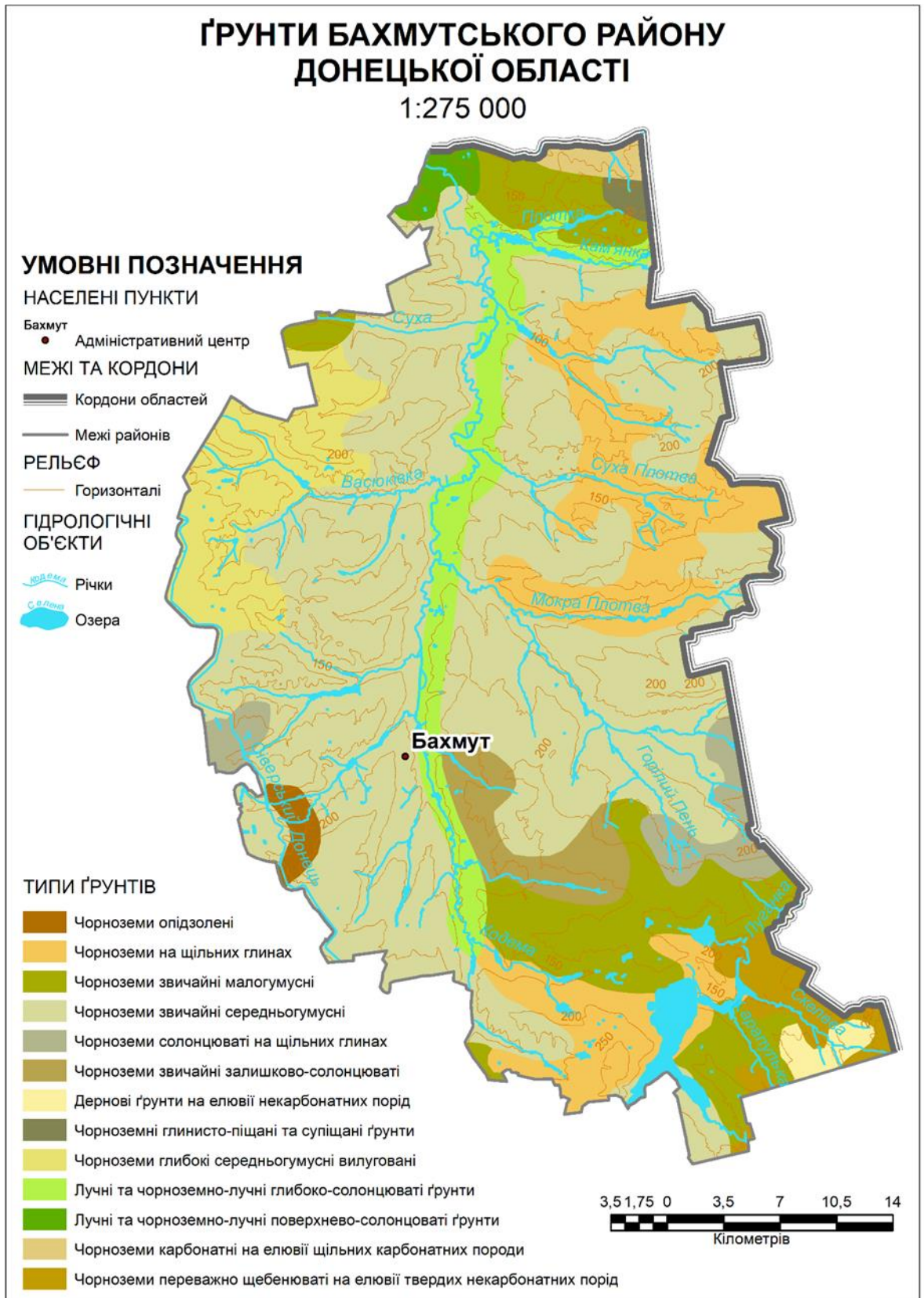


Рис. 1.2. Карта ґрунтів Бахмутського району

РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ҐРУНТУ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

2.1. Загальні поняття про методи дослідження стану ґрунту

Кожен об'єкт має свої електромагнітні властивості, такі як коефіцієнт відбиття, випромінювання, поглинання та пропускання на цій основі дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) надає адекватну просторово-часову інформацію для використання в ґрунтознавчих дослідженнях (рис. 2.1). Ґрунт є типовим складним багатофазним матеріалом. Таким чином, спектральний відгук ґрунту є комплексним відображенням компонентів і умов ґрунту [25; 29; 42].

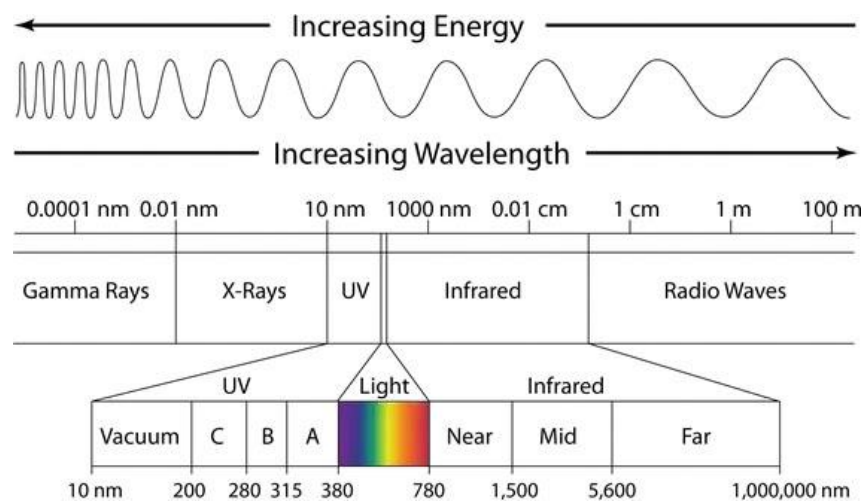


Рис. 2.1. Ілюстрація електромагнітного спектру [13]

У контексті вимірювань ґрунту ДЗЗ надає цінну інформацію про просторові та часові варіації властивостей і умов ґрунту, що передбачає використання супутникових, наземних або бортових датчиків для отримання зображень і даних, пов'язаних із властивостями ґрунту [23; 30; 35]. Ці датчики можуть виявляти електромагнітне випромінювання, відбите або розсіяне ґрунтом, яке потім можна проаналізувати для отримання цінної інформації про його властивості та інтерпретувати інформацію, щоб отримати уявлення про стан ґрунту, оцінити його деградацію, керувати сільськогосподарськими методами та приймати необхідні рішення для сталого розвитку землекористування [13]. Дані

ДЗЗ надходять із різних джерел, включаючи супутники, аерофотознімки, систему глобального позиціонування (GPS), визначення дальності та виявлення світла (LiDAR), стаціонарні наземні датчики, радарні системи та історичні записи (рис. 2.2). Кожне джерело надає унікальну та цінну інформацію, яка сприяє розумінню навколишнього середовища Землі.

Дистанційне зондування Землі зводить до мінімуму порушення екосистеми ґрунту, водночас надаючи інформацію про властивості ґрунту та пов'язану з ним динаміку рослинності, а завдяки інтеграції з іншими геопросторовими технологіями (ґрунтовий покрив, рельєф, клімат і гідрологія) рішення щодо практик і політики землеустрою отримують належну інформацію [17; 23; 52]. Дані ДЗЗ можуть покращити сільське господарство, надаючи цінну інформацію про якість врожаю, стан ґрунту, доступність води та інші важливі фактори, а також сприяє ухваленню обґрунтованих управлінських рішень фермерами, що дозволяє підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва та раціонально використовувати природні ресурси. Ефективний моніторинг великих територій і раннє виявлення потенційних проблем має вирішальне значення для забезпечення продовольчої безпеки, що, сприяє зменшенню екологічного тиску на довкілля та формуванню умов для сталого ведення сільського господарства.

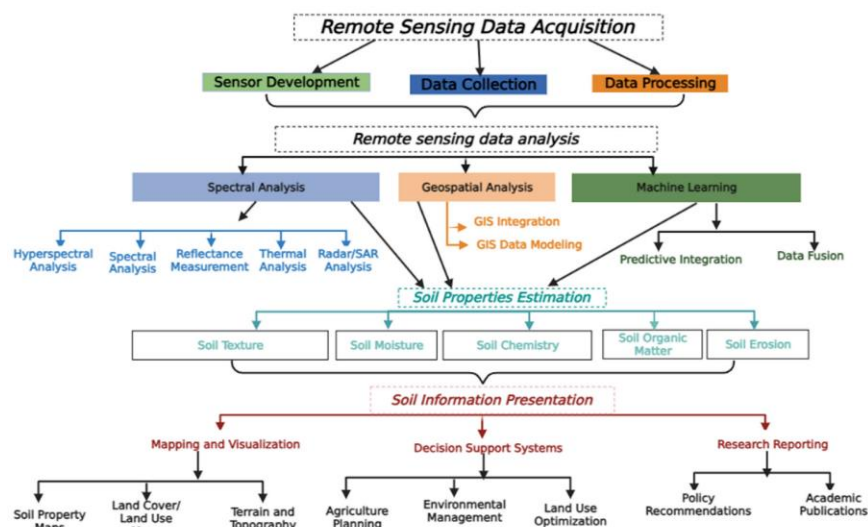


Рис. 2.2. Схема основних методів дистанційного зондування для аналізу ґрунтового покриття [13]

2.2. Метод аналізу рослинності за індексом SAVI

Індекс SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) – це спектральний вегетаційний індекс, створений з метою підвищення точності оцінювання рослинного покриву на територіях із помітним впливом оголеного ґрунту [19; 44; 47]. Основним завдання цього індексу є мінімізувати вплив ґрунтового фону на результати аналізу, особливо в умовах розрідженої або слабо розвиненої рослинності, де традиційні вегетаційні індекси можуть давати занижені або спотворені значення.

Індекс розраховується за такою формулою:

$$SAVI = (NIR - RED) / (NIR + RED + L) (1 + L) \quad [47]$$

(1)

де: NIR – відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні, RED – відбиття в червоному діапазоні, L – коефіцієнт корекції впливу ґрунту.

Головною причиною створення цього індексу було те, що відмінності у перенесенні червоного та ближнього інфрачервоного (NIR) випромінювання крізь крону створюють складну взаємодію між ґрунтом і рослинністю, що ускладнює відокремлення або коригування впливу ґрунту [18; 51]. Рослинний покрив розсіює і пропускає значну кількість ближнього інфрачервоного випромінювання до поверхні ґрунту, освітлюючи як ділянки під самими рослинами, так і проміжки між ними. Ґрунт, у свою чергу, відбиває частину цього розсіяного та переданого випромінювання назад до сенсора, і характер цього відбиття залежить від оптичних властивостей ґрунтової поверхні. На відміну від цього, червоне світло сильно поглинається верхніми шарами листя, і рівень опромінення ґрунту зводиться лише до прямого світла від Сонця та неба, що проникає крізь прогалини у кроні (рис. 2.3).

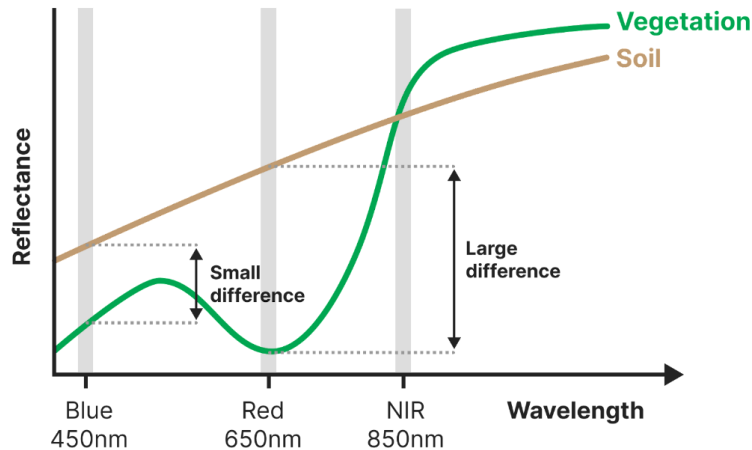


Рис. 2.3. Графік відбивної здатності в залежності від довжини хвилі [45]

Чутливість індексів рослинності до ґрунтового фону є найбільшою при середньому рівні рослинного покриття (приблизно 50% зеленого покриття) [41; 50]. При низькому рівні рослинності недостатньо рослин для створення помітного сигналу, розсіяного короною і відбитого ґрунтом, а при дуже високій щільності покриття – сигнал від ґрунту взагалі майже не виходить з-під рослин. Натомість при середньому рівні покриття значне розсіювання і передача NIR-випромінювання крізь крону генерують спектральний сигнал, відбитий від ґрунту, який дуже схожий на спектральні характеристики рослинності.

SAVI вирішує цю проблему за допомогою коригувального коефіцієнта L , який додається в знаменник і множиться на чисельник у формулі. Цей коефіцієнт зменшує амплітуду коливань індексу, які спричинені варіаціями ґрунтового альбедо, особливо в тих ділянках, де оголений ґрунт займає значну частину сцени. Таким чином, SAVI забезпечує більш стабільні та достовірні значення індексу, ніж NDVI для територій із неповним або мозаїчним рослинним покритвом (рис. 2.4).

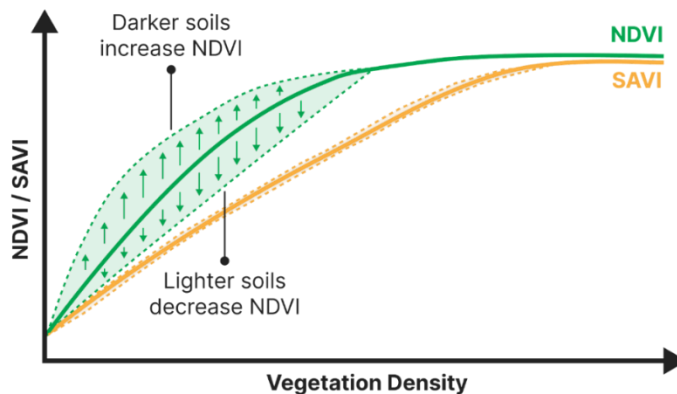


Рис. 2.4. Графік різниці значень NDVI та SAVI за різної щільності рослинного покриву [45]

Існує ще одна математична властивість, яку SAVI отримує завдяки додатковому члену L : поріг насичення SAVI вищий, ніж у NDVI. Щоб інтуїтивно це зрозуміти, треба врахувати, що NDVI насичується, оскільки відбиття в червоному діапазоні (RED) наближається до нуля ще до того, як щільність рослинності досягає максимуму [45].

Коли значення RED прямує до нуля, NDVI продовжує зростати разом із NIR, але все повільніше, поступово наближаючись до межі. Тобто щораз більші збільшення NIR мають усе менший вплив на NDVI – це і є насичення. SAVI також досягатиме насичення, але це відбудеться при вищих значеннях NIR (рис. 2.5).

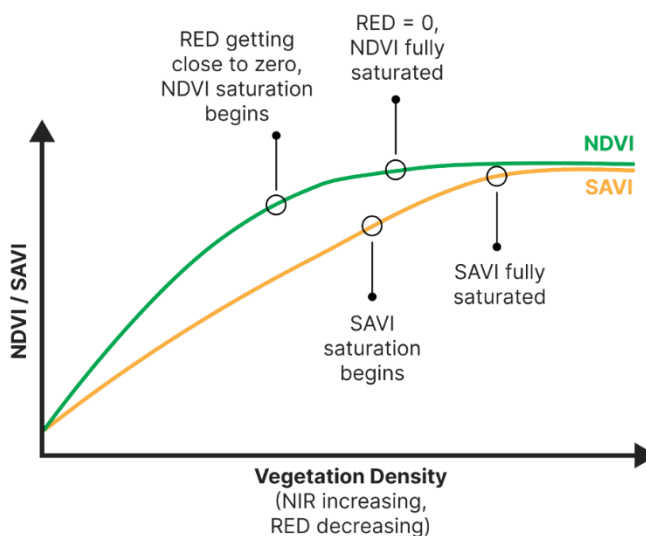


Рис. 2.5. Графік порівняння значень насичення NDVI та SAVI [45]

Таким чином, додатковий член у чисельнику дозволяє SAVI фіксувати збільшення щільності рослинності навіть після того, як NDVI вже наситився. У будь-якій ситуації, де ґрунт є відкритим, і особливо коли його вологість може змінюватися, SAVI буде кращим за NDVI. А покращені властивості насичення SAVI є надзвичайно корисними при аналізі густої рослинності.

2.3. Метод аналізу вологості за індексом NDMI

NDMI (Normalized Difference Moisture Index) є нормалізованим різницеvim індексом, призначеним для оцінки рівня вологості рослинного покриву, що базується на поєднанні ближнього інфрачервоного (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів спектру [16; 26; 39]. SWIR-діапазон є чутливим як до змін у вмісті води в рослинності, так і до мікроструктурних змін у мезофілі листя, тоді як відбивна здатність у NIR залежить переважно від анатомічної будови листка та вмісту сухої речовини, а не вологості [24; 27; 46]. Використання обох діапазонів дає змогу нівелювати вплив внутрішньої структури листя та сухої маси, що дозволяє точніше визначити вміст води в рослинному покриві. Оскільки спектральна відбивна здатність у SWIR суттєво змінюється залежно від кількості води, накопиченої у внутрішній частині листка, між цим показником і вмістом води спостерігається обернена залежність [37; 49].

Індекс обчислюється за допомогою коефіцієнтів відбиття ближнього інфрачервоного (NIR) та короткохвильового інфрачервоного (SWIR):

$$NDMI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad [39] \quad (2)$$

де NIR – значення відбитого випромінювання у ближньому інфрачервоному діапазоні; SWIR – значення відбитого випромінювання у короткохвильовому інфрачервоному діапазоні.

Попри часте змішування понять, NDMI та NDWI є концептуально різними індексами, які виконують відмінні функції та базуються на різних спектральних комбінаціях. Індекс NDMI розраховується на основі поєднання NIR та SWIR діапазонів і слугує для оцінки вмісту вологи в рослинному листі [28]. Натомість NDWI використовує поєднання зеленого (GREEN) та ближнього інфрачервоного (NIR) каналів, що дозволяє ефективно виявляти водні об'єкти та здійснювати моніторинг їх прозорості або каламутності (рис. 2.6).

Цей індекс є ефективним не тільки для оцінки вмісту вологи в рослинному покриві, а ще й слугує інформативним інструментом для виявлення стресових станів рослин, зокрема ознак посухи або пошкоджень біотичного чи абіотичного характеру. Завдяки своїй чутливості до змін водного балансу, NDMI широко застосовується в агрономії для моніторингу стану сільськогосподарських культур, а також у природоохоронних дослідженнях, наприклад, для оцінки здоров'я болотних або мангрових екосистем. Порівняно з NDVI, котрий насичується при високій щільності рослинності, NDMI забезпечує більш точне виявлення водного стресу навіть у густих зелених масивах [31; 34; 36].

Отже, NDMI є ефективним інструментом для оцінки вологозабезпечення рослинності, оскільки враховує її фізіологічні особливості. Завдяки цьому він перевершує інші індекси в умовах водного стресу та широко використовується для моніторингу стану рослинного покриву.

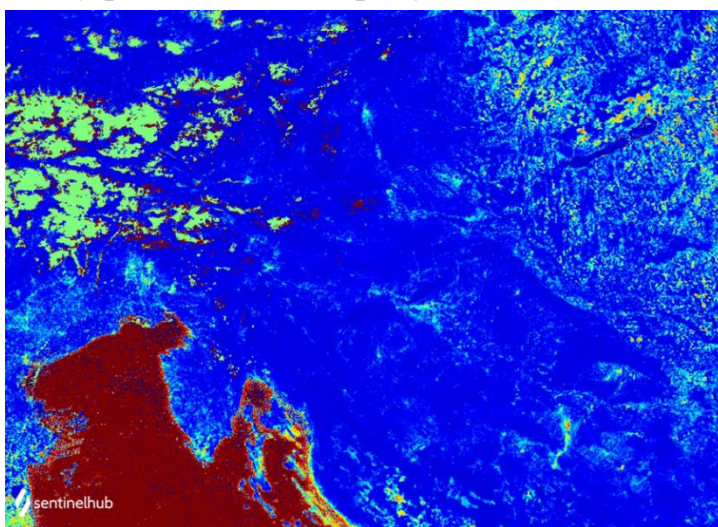


Рис. 2.6. Індексне зображення Європи за індексом NDMI [37]

MosaicToNewRaster_management та CompositeBands_management. Зображення були зібрані з архівів .SAFE, де для кожного спектрального каналу (B02–B12) здійснювався пошук усіх доступних файлів з відповідною просторовою роздільною здатністю (10 або 20 м). Мозаїки створювалися окремо для кожного каналу, після чого об'єднувалися в мультиспектральне зображення. Координатною системою було обрано WGS 1984 UTM Zone 37N (EPSG:32637) для забезпечення просторової відповідності та коректності подальших розрахунків (блок 1).

Блок 1

Автоматичне мозаїкування та об'єднання мультиспектральних каналів Sentinel-2

```
import arcpy
import os
import glob
import re
import sys
import traceback

# 1) Глобальні налаштування
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Налаштування паралельної обробки
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"

input_root = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data"
merged_root = os.path.join(input_root, "Merged")
os.makedirs(merged_root, exist_ok=True)

# Встановлюємо CRS: WGS 1984 UTM Zone 37N
sr = arcpy.SpatialReference(32637)
arcpy.env.outputCoordinateSystem = sr

# Словник бендів і їхніх папок IMG_DATA (R10m/ R20m)
bands = {
    "B02": {"res": "R10m"}, "B03": {"res": "R10m"},
    "B04": {"res": "R10m"}, "B08": {"res": "R10m"},
    "B05": {"res": "R20m"}, "B06": {"res": "R20m"},
    "B07": {"res": "R20m"}, "B8A": {"res": "R20m"},
    "B11": {"res": "R20m"}, "B12": {"res": "R20m"}
}

# Збираємо лише папки виду YYYY-MM-DD
date_folders = [
    d for d in sorted(os.listdir(input_root))
```

```

if os.path.isdir(os.path.join(input_root, d))
    and re.match(r"^\d{4}-\d{2}-\d{2}$", d)
]

def process_date(date_folder):
    try:
        print(f"\n=== Обробка дати: {date_folder} ===")
        date_path = os.path.join(input_root, date_folder)

        # Створюємо підпапку для результатів цієї дати
        date_out = os.path.join(merged_root, date_folder)
        os.makedirs(date_out, exist_ok=True)

        # Збираємо .SAFE папки
        safe_dirs = [
            os.path.join(date_path, d) for d in os.listdir(date_path)
            if d.upper().endswith(".SAFE")
        ]
        print(f"SAFE-папок: {len(safe_dirs)} → {[os.path.basename(s) for s in safe_dirs]}")
        if len(safe_dirs) < 2:
            print(f" !! Менше двох .SAFE — пропускаю.")
            return

        mosaics = {}
        for band_code, props in bands.items():
            res_label = props["res"][1:] # "10m" або "20m"
            rasters = []
            print(f" • {band_code}: ", end="")
            for safe in safe_dirs:
                pattern = os.path.join(
                    safe, "**", "IMG_DATA", props["res"],
                    f"*_{band_code}_{res_label}.jp2"
                )
                rasters += glob.glob(pattern, recursive=True)
            print(f"{len(rasters)} файлів", end="")

            if not rasters:
                print(" — пропускаю.")
                continue

            out_name = f"Mosaic_{band_code}_{date_folder}.tif"
            out_path = os.path.join(date_out, out_name)
            arcpy.MosaicToNewRaster_management(
                input_rasters          = rasters,
                output_location         = date_out,
                raster_dataset_name_with_extension = out_name,
                coordinate_system_for_the_raster = sr,
                pixel_type               = "16_BIT_UNSIGNED",
                number_of_bands          = 1,
                mosaic_method            = "BLEND",
                mosaic_colormap_mode    = "MATCH"
            )

```

```

)
mosaics[band_code] = out_path
print(" → OK")

# Composite Bands
comp_list = [mosaics[b] for b in bands if b in mosaics]
if comp_list:
    ms_name = f"MSMosaic_{date_folder}.tif"
    ms_path = os.path.join(date_out, ms_name)
    arcpy.CompositeBands_management(comp_list, ms_path)
    print(f" Збережено мультиспектральну мозаїку: {ms_name}")
else:
    print(f" !! Нема чого композитити для {date_folder}")

except Exception:
    print(f"!!! Помилка в обробці дати {date_folder} !!!")
    traceback.print_exc()

if __name__ == "__main__":
    print(f"Запуск обробки {len(date_folders)} дат послідовно...")
    for date in date_folders:
        process_date(date)
    print("\n=== Всі дати опрацьовано, результати лежать у Merged\\<YYYY-MM-DD> ===")

```

Після створення мультиспектральних мозаїк вони були обрізані згідно з межами досліджуваної території за допомогою інструменту Clip_management. Як шар-обмежувач використовувався векторний шар Research_Area. Для обрізки було використано параметр ClippingGeometry, щоб зберегти лише ті частини зображення, які повністю або частково накладалися на контур дослідження (блок 2).

Блок 2

Обрізка мультиспектральних мозаїк за контуром досліджуваної території

```

import arcpy
import os
import glob

# 1) Вхідні шляхи
merged_root = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged"
clipped_root = os.path.join(merged_root, "Clipped")
os.makedirs(clipped_root, exist_ok=True)

# Полігон для обрізки
clip_feature =
r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\AktuelKurseArbeit.gdb\Research_Area"

```

```

# 2) Обробка всіх MSMosaic_*.tif
for root, dirs, files in os.walk(merged_root):
    for file in files:
        if file.startswith("MSMosaic_") and file.endswith(".tif"):
            in_raster = os.path.join(root, file)

            out_name = f"Clipped_{file}"
            out_raster = os.path.join(clipped_root, out_name)

            print(f" Обрізка {file} → {out_name}")
            arcpy.Clip_management(
                in_raster,          # Вхідне зображення
                in_template_dataset=clip_feature, # Полігон обрізки
                out_raster=out_raster,
                nodata_value="0",
                clipping_geometry="ClippingGeometry",
                maintain_clipping_extent="NO_MAINTAIN_EXTENT"
            )
            print(" Готово")

print("\n=== Усі мультиспектральні зображення обрізано та збережено в папку Clipped ===")

```

Для частини дат, де наявні хмарні покриви, було сформовано маски хмар на основі шарів класифікації сцени (SCL). Спочатку за допомогою `MosaicToNewRaster_management` всі наявні SCL-файли зшивались у єдину мозаїку, після чого виконувався її ресемплінг до 10-метрової роздільної здатності за допомогою `Resample_management`. Отримане зображення обрізалось відповідно до меж досліджуваної території. Далі, із використанням умовного оператора `Con`, було виділено класи хмар (3 – хмари з тінню, 8 – тонкі хмари, 9 – щільні хмари) та створено бінарну маску, де значення 1 відповідало зонам з хмарами. Маска була мультиплікована до кількості каналів мультиспектрального зображення за допомогою `CompositeBands_management`, після чого застосована до зображення інструментом `SetNull`, що дозволяло виключити з подальшого аналізу ті ділянки, які були затінені або закриті хмарами (блок 3).

Блок 3

Створення та застосування хмарної маски до мультиспектральних зображень Sentinel-2

```
import arcpy
```

```

import os
import glob
import traceback
import sys
from arcpy.sa import *
# 1) Налаштування середовища
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)
# Шлях до тимчасової геодати
scratch_gdb = r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\TempScratch.gdb"
arcpy.env.workspace = scratch_gdb
arcpy.env.scratchWorkspace = scratch_gdb
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
# 2) Шляхи до даних
input_root = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data"
merged_root = os.path.join(input_root, "Merged")
clipped_msm_root = os.path.join(merged_root, "Clipped")
clip_feature =
r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\AktuelKurseArbeit.gdb\Research_Area"
# 3) Список дат (знімки з хмарами)
msm_files = [
    "Clipped_MSMosaic_2021-06-22.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2021-07-12.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2021-08-26.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2022-05-08.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2022-06-27.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2022-08-01.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2024-05-07.tif",
    "Clipped_MSMosaic_2024-06-11.tif"
]

def process_date(date_str):
    short = date_str[2:4] + date_str[5:7] + date_str[8:10] # YYMMDD
    try:
        print(f"\n=== Обробка {date_str} ===")

        # 1) Збір SCL
        safe_dirs = [
            os.path.join(input_root, date_str, d)
            for d in os.listdir(os.path.join(input_root, date_str))
            if d.upper().endswith(".SAFE")
        ]
        scl_list = []
        for safe in safe_dirs:
            pattern = os.path.join(safe, "**", "IMG_DATA", "R20m", "*_SCL_20m.jp2")
            scl_list += glob.glob(pattern, recursive=True)
        if not scl_list:
            print(" • SCL не знайдено — пропуск")
        return

```

```

# 2) Зшивання SCL
scl_mosaic = f"scl_{short}"
arcpy.MosaicToNewRaster_management(
    scl_list,
    scratch_gdb,
    scl_mosaic,
    coordinate_system_for_the_raster=arcpy.SpatialReference(32637),
    pixel_type="8_BIT_UNSIGNED",
    number_of_bands=1,
    mosaic_method="FIRST",
    mosaic_colormap_mode="MATCH"
)
print(" • SCL зшито")

# 3) Ресемплінг
scl_resampled = f"scl10_{short}"
arcpy.Resample_management(
    os.path.join(scratch_gdb, scl_mosaic),
    os.path.join(scratch_gdb, scl_resampled),
    "10 10", "NEAREST"
)
print(" • SCL ресемплінг")

# 4) Обрізання (Clip)
scl_clipped = f"sclclip_{short}"
arcpy.Clip_management(
    os.path.join(scratch_gdb, scl_resampled),
    "#",
    os.path.join(scratch_gdb, scl_clipped),
    clip_feature,
    "#", "ClippingGeometry"
)
print(" • SCL обрізано (Clip_management)")

# 5) Маска хмар (SCL 3, 8, 9)
scl_r = Raster(os.path.join(scratch_gdb, scl_clipped))
cloud_mask = Con((scl_r == 3) | (scl_r == 8) | (scl_r == 9), 1, 0)
mask_path = os.path.join(scratch_gdb, f"mask_{short}")
cloud_mask.save(mask_path)
print(" • Маска хмар створена")

# 6) Розмноження маски
msm_in = os.path.join(clipped_msm_root, f"Clipped_MSMosaic_{date_str}.tif")
msm_r = Raster(msm_in)
nb = msm_r.bandCount
mask_stack = os.path.join(scratch_gdb, f"maskstack_{short}")
arcpy.CompositeBands_management([mask_path] * nb, mask_stack)
print(" • Multi-band маска")

# 7) Застосування маски до зображення
masked = SetNull(Raster(mask_stack), msm_r, "Value = 1")

```

```

out_path = os.path.join(clipped_msm_root, f"MSMosaic_masked_{date_str}.tif")
masked.save(out_path)
print(f" Збережено: {out_path}")

```

excerpt Exception:

```

print(f"!!! Критична помилка обробки {date_str} — завершую виконання.")
traceback.print_exc()
sys.exit(1)

```

Запуск

```

if __name__ == "__main__":
    for fn in msm_files:
        date = fn.replace("Clipped_MSMosaic_", "").replace(".tif", "")
        process_date(date)
    arcpy.CheckInExtension("Spatial")
    print("\n==== Усі дати оброблено успішно ====")

```

Далі було здійснено розрахунок індексу SAVI, що дозволяє врахувати вплив ґрунтового фону при оцінці рослинності, перед яким значення растрів масштабувались до діапазону 0–1, діленням на 10 000. Обчислення проводилося за формулою (1). За наявності хмарної маски, для відповідної дати, вона додатково застосовувалась для виключення хмарних ділянок із фінального шару (блок 4).

Блок 4

Розрахунок індексу SAVI з урахуванням хмарної маски для мультиспектральних зображень

```

import arcpy
import os
import traceback
import sys
from arcpy.sa import *

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# Scratch GDB, де лежать згенеровані хмарні маски
scratch_gdb = r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\TempScratch.gdb"
arcpy.env.workspace = scratch_gdb
arcpy.env.scratchWorkspace = scratch_gdb

# 2) Шляхи до даних

```

```

# Де лежать мультиспектральні TIFF-файли
input_folder = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped"

# Директорія збереження результатів SAVI
output_folder = os.path.join(input_folder, "SAVI_Results")
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

# Точний перелік растрових файлів, для розрахунку SAVI
rasters = [
    "Clipped_MSMMosaic_2020-06-27.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2020-07-12.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2020-08-06.tif",
    "MSMMosaic_masked_2021-06-22.tif",
    "MSMMosaic_masked_2021-07-12.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2021-08-26.tif",
    "MSMMosaic_masked_2022-05-08.tif",
    "MSMMosaic_masked_2022-06-27.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2022-07-07.tif",
    "MSMMosaic_masked_2022-08-01.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2023-05-03.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2023-06-22.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2023-07-27.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2023-08-06.tif",
    "MSMMosaic_masked_2024-05-07.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2024-07-06.tif",
    "Clipped_MSMMosaic_2024-08-25.tif",
    "MSMMosaic_masked_2024-06-11.tif"
]

def date_to_short(date_str):
    """Перетворює 'YYYY-MM-DD' → 'YYMMDD'"""
    return date_str[2:4] + date_str[5:7] + date_str[8:10]

def compute_savi(in_raster_path, L=0.5, scale=10000.0):
    """
    Розрахунок SAVI з нормалізацією:
    1) ділимо весь мультиспектр на scale (10000)
    2) ExtractBand 3 = Red (B04), 4 = NIR (B08)
    3) SAVI = ((NIR - Red) / (NIR + Red + L)) * (1 + L)
    """
    base = Raster(in_raster_path) * (1.0 / scale)
    red = ExtractBand(base, 3)
    nir = ExtractBand(base, 4)
    savi = ((nir - red) / (nir + red + L)) * (1 + L)
    return savi

def apply_cloud_mask(index_raster, mask_path):
    """
    Якщо задана хмарна маска (1=хмара, 0=фон),
    повернути SetNull(mask==1, index_raster)
    """

```

```

return SetNull(Raster(mask_path) == 1, index_raster)

# 3) Основний цикл: для кожного файлу розрахувати SAVI
if __name__ == "__main__":
    for fname in rasters:
        in_path = os.path.join(input_folder, fname)
        if not arcpy.Exists(in_path):
            print(f" Не знайдено вхідного файлу: {fname}")
            continue

        # Витягнути дату з імені
        date = os.path.splitext(fname)[0].split("_")[-1]
        short = date_to_short(date)

        try:
            print(f"Обробка {fname} ...", end=" ")
            # 1) Розрахувати SAVI
            savi_r = compute_savi(in_path, L=0.5)

            # 2) Якщо є маска хмар для цієї дати - застосувати її
            mask_path = os.path.join(scratch_gdb, f"mask_{short}")
            if arcpy.Exists(mask_path):
                savi_r = apply_cloud_mask(savi_r, mask_path)

            # 3) Зберегти результат
            out_name = f"SAVI_{date}.tif"
            out_path = os.path.join(output_folder, out_name)
            savi_r.save(out_path)
            print("готово")

        except Exception:
            print(" Помилка!")
            traceback.print_exc()

    arcpy.CheckInExtension("Spatial")
    print(f"\n Усі SAVI-растри збережені в:\n{output_folder}")

```

Аналогічно був проведений розрахунок індексу NDMI (Normalized Difference Moisture Index), що відображає вологість рослинного покриву. Він обчислювався за формулою (2). Як і у випадку з SAVI, перед розрахунком дані масштабувалися, а у разі наявності – застосовувалась хмарна маска (блок 5).

Блок 5

Розрахунок індексу NDMI з урахуванням хмарної маски та нормалізацією

```

import arcpy
import os
import traceback

```

```

import sys
from arcpy.sa import *

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# Scratch GDB, де лежать хмарні маски
scratch_gdb = r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\TempScratch.gdb"
arcpy.env.workspace = scratch_gdb
arcpy.env.scratchWorkspace = scratch_gdb

# 2) Шляхи до даних
# Папка з мультиспектральними TIFF-файлами
input_folder = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped"

# Папка, куди зберігатимуться результати NDMI
output_folder = os.path.join(input_folder, "NDMI_Results")
os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

# Точний перелік растрових файлів, для яких рахуємо NDMI
rasters = [
    "Clipped_MSMAosaic_2020-06-27.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2020-07-12.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2020-08-06.tif",
    "MSMAosaic_masked_2021-06-22.tif",
    "MSMAosaic_masked_2021-07-12.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2021-08-26.tif",
    "MSMAosaic_masked_2022-05-08.tif",
    "MSMAosaic_masked_2022-06-27.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2022-07-07.tif",
    "MSMAosaic_masked_2022-08-01.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2023-05-03.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2023-06-22.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2023-07-27.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2023-08-06.tif",
    "MSMAosaic_masked_2024-05-07.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2024-07-06.tif",
    "Clipped_MSMAosaic_2024-08-25.tif",
    "MSMAosaic_masked_2024-06-11.tif"
]

def date_to_short(date_str):
    """Перетворює 'YYYY-MM-DD' → 'YYMMDD'"""
    return date_str[2:4] + date_str[5:7] + date_str[8:10]

def compute_ndmi(in_raster_path, scale=10000.0):
    """
    Розрахунок NDMI з нормалізацією:
  
```

```

1) масштабування растра на (1/scale)
2) ExtractBand 4 = NIR (B08), 9 = SWIR1 (B11)
3) NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)
"""
ras = Raster(in_raster_path) * (1.0 / scale)
nir = ExtractBand(ras, 4) # бєнд #4 → B08 (NIR)
swir = ExtractBand(ras, 9) # бєнд #9 → B11 (SWIR1)
ndmi = (nir - swir) / (nir + swir)
return ndmi

def apply_cloud_mask(index_raster, mask_path):
    """
    Якщо маска існує, то SetNull(mask==1, index_raster)
    """
    return SetNull(Raster(mask_path) == 1, index_raster)

# 3) Основний цикл: розрахунок NDMI для кожного файлу
if __name__ == "__main__":
    for fname in rasters:
        in_path = os.path.join(input_folder, fname)
        if not arcpy.Exists(in_path):
            print(f" Не знайдено вхідного файлу: {fname}")
            continue

        # Отримуємо дату з імені файлу
        date = os.path.splitext(fname)[0].split("_")[-1]
        short = date_to_short(date)

        try:
            print(f"Обробка {fname} ...", end=" ")
            # 1) Розрахувати NDMI
            ndmi_r = compute_ndmi(in_path)

            # 2) Застосувати хмарну маску, якщо є
            mask_path = os.path.join(scratch_gdb, f"mask_{short}")
            if arcpy.Exists(mask_path):
                ndmi_r = apply_cloud_mask(ndmi_r, mask_path)

            # 3) Зберегти результат
            out_name = f"NDMI_{date}.tif"
            out_path = os.path.join(output_folder, out_name)
            ndmi_r.save(out_path)
            print("ГОТОВО")

        except Exception:
            print(" Помилка!")
            traceback.print_exc()

    arcpy.CheckInExtension("Spatial")
    print(f"\n Усі NDMI-растри збережені в:\n {output_folder}")

```

Отримані результати SAVI та NDMI були додатково обрізані до меж адміністративного району за допомогою інструменту ExtractByMask. Це дозволило виділити лише ту частину території, яка входить до зони дослідження (блок 6-7).

Блок 6

Обрізка індексів SAVI за межами адміністративного району

```
import arcpy
import os
import sys
from arcpy.sa import ExtractByMask

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# 2) Шляхи до даних
# Папка з готовими SAVI_*.tif
savi_folder = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped\SAVI_Results"
# Полігон району для обрізки
district_fc =
r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\AktuelKurseArbeit.gdb\District_UTM"

# Папка для збереження обрізаних SAVI
clipped_folder = os.path.join(savi_folder, "Clipped_SAVI")
os.makedirs(clipped_folder, exist_ok=True)

# 3) Основний цикл: обрізка кожного SAVI-растру
for fname in sorted(os.listdir(savi_folder)):
    if not (fname.lower().startswith("savi_") and fname.lower().endswith(".tif")):
        continue

    in_raster = os.path.join(savi_folder, fname)
    out_name = fname.replace("SAVI_", "SAVI_clipped_")
    out_raster = os.path.join(clipped_folder, out_name)

    try:
        print(f"Обрізка {fname}...", end=" ")
        # Використовуємо ExtractByMask, щоб обрізати за полігоном
        clipped = ExtractByMask(in_raster, district_fc)
        clipped.save(out_raster)
        print("готово")
    except Exception:
        print(" помилка!")
        arcpy.AddError(arcpy.GetMessages(2))
        sys.exit(1)
```

```

# Завершення
arcpy.CheckInExtension("Spatial")
print(f"\n Усі SAVI-растри обрізано. Результати в:\n {clipped_folder}")

```

Блок 7

Обрізка індексів NDMI за межами адміністративного району

```

import arcpy
import os
import sys
from arcpy.sa import ExtractByMask

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# 2) Шляхи до даних
# Папка з порашованими NDMI_*.tif
ndmi_folder = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped\NDMI_Results"
# Полігон району для обрізки
district_fc = r"Y:\Kursach\ArcGis\AktuelKurseArbeit\AktuelKurseArbeit.gdb\District_UTM"

# Папка для збереження обрізаних NDMI
clipped_folder = os.path.join(ndmi_folder, "Clipped_NDMI")
os.makedirs(clipped_folder, exist_ok=True)

# 3) Основний цикл: обрізка кожного NDMI-растру
for fname in sorted(os.listdir(ndmi_folder)):
    if not (fname.lower().startswith("ndmi_") and fname.lower().endswith(".tif")):
        continue

    in_raster = os.path.join(ndmi_folder, fname)
    # Залишити дату після "NDMI_"
    date_part = os.path.splitext(fname)[0].split("_")[1]
    out_name = f"NDMI_clipped_{date_part}.tif"
    out_raster = os.path.join(clipped_folder, out_name)

    try:
        print(f"Обрізка {fname} ...", end=" ")
        clipped = ExtractByMask(in_raster, district_fc)
        clipped.save(out_raster)
        print("готово")
    except Exception:
        print(" помилка!")
        traceback = arcpy.GetMessages(2)
        print(traceback)
        sys.exit(1)

```

```
# 4) Завершення
arcpy.CheckInExtension("Spatial")
print(f"\n Усі NDMI-растри обрізано. Результати в:\n {clipped_folder}")
```

Єдиним етапом, який неможливо було реалізувати в автоматизованому режимі, стала інтерпретація шкали SAVI. Жодна з наявних у відкритому доступі шкал не містила підтверджених даних про їхню верифікацію на основі польових вимірювань спектрометрії. З огляду на це було прийнято рішення розробити власну шкалу інтерпретації значень індексу, адаптовану спеціально до умов досліджуваної території.

Для виділення класів було використано інструмент Image Classification Wizard. Метод класифікації – керована, тип – піксельно орієнтована (рис. 3.2). Схему класифікації на рис. 3.3 сформовано на основі попереднього огляду зони дослідження та аналізу наукових публікацій щодо інтерпретації індексу [14; 21; 22; 38; 40].

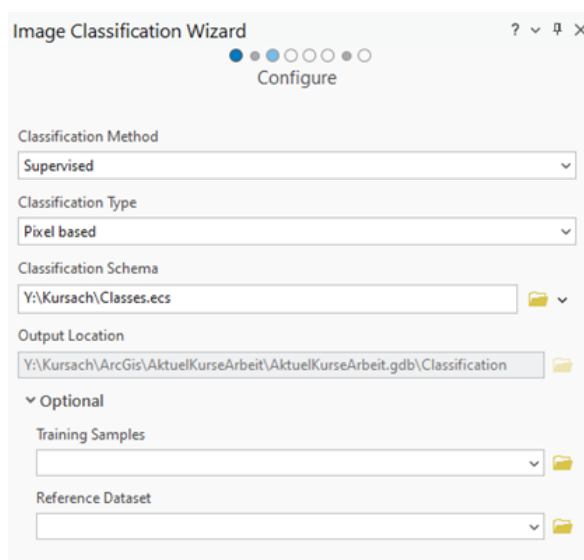


Рис. 3.2. Первинне налаштування параметрів Image Classification Wizard

Подальший етап передбачав кропіткий процес виділення навчальних ділянок (рис. 3.4). Після формування достатньої кількості зразків було застосовано класифікатор Support Vector Machine, який забезпечує високу ефективність для одноканальних зображень (у нашому випадку – індексне зображення) та дозволяє працювати з порівняно невеликим обсягом навчальних

даних. Максимальна кількість зразків на один клас була встановлена на рівні 500 (рис. 3.5). У результаті було отримано класифіковане індексне зображення, де кожен клас охоплював лише ті пікселі, що відповідали визначеному діапазону значень індексу (рис. 3.6).

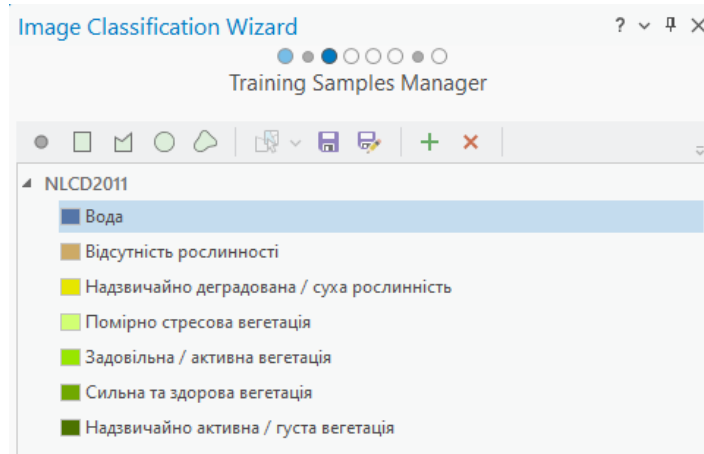


Рис. 3.3. Схема класифікації

Class	# Samples	Pixels (%)
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	1,07
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,13
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,45
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,10
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	1,57
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,34
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,26
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,02
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,07
Надзвичайно активна / густа вегетація	1	0,39
Сильна та здорова вегетація	1	1,27
Сильна та здорова вегетація	1	1,71
Сильна та здорова вегетація	1	0,06
Сильна та здорова вегетація	1	0,57
Сильна та здорова вегетація	1	0,14
Сильна та здорова вегетація	1	0,01
Сильна та здорова вегетація	1	0,43
Сильна та здорова вегетація	1	0,13
Задовільна / активна вегетація	1	1,57
Сильна та здорова вегетація	1	0,10
Задовільна / активна вегетація	1	0,23
Сильна та здорова вегетація	1	0,84
Сильна та здорова вегетація	1	0,98

Рис. 3.4. Виділені навчальні ділянки



Рис. 3.5. Налаштування параметрів класифікатора



Рис. 3.6. Класифіковане зображення

Завершальним етапом став поділ шкали індексу на окремі класи. Для цього було використано інструмент Zonal Statistics as Table, за допомогою якого сформовано таблицю з середніми, мінімальними та максимальними значеннями індексу для кожного з отриманих класів (табл. 3.1). Після аналізу отриманих статистичних показників стало можливим виділити діапазони значень для кожного класу (табл. 3.2).

Таблиця 3.1

Статистичні показники класифікованого зображення

Value	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
0	580102	58010200	-0.67	0.03	0.70	0.00	0.02	2580
1	9998024	999802400	0.03	0.18	0.15	0.13	0.03	1320985
2	15572445	1557244500	0.18	0.30	0.13	0.24	0.04	3802628
3	17183041	1718304100	0.30	0.41	0.11	0.36	0.03	6201079
5	13609305	1360930500	0.41	0.51	0.10	0.46	0.03	6206650
4	3469610	346961000	0.51	0.59	0.08	0.54	0.02	1882851
6	277753	27775300	0.59	0.81	0.22	0.61	0.01	168588

Таблиця 3.2

Інтерпретація шкали значень SAVI

№	Вегетація	Діапазони значення SAVI
1	Надзвичайно активна / густа	від максимуму до 0.61
2	Інтенсивна та здорова	від 0.6 до 0.51
3	Задовільна / активна	від 0.5 до 0.41
4	Помірно стресова	від 0.4 до 0.31
5	Деградована / суха рослинність	від 0.3 до 0.21
6	Відсутність рослинності / голий ґрунт	від 0.2 до 0.031
7	Водна поверхня / тіні від хмар	від 0.03 до мінімуму

На наступному етапі було виконано класифікацію індексу SAVI за розробленою шкалою, яка охоплює діапазон від водної поверхні та ґрунту до надзвичайно густої вегетації, та має сім класів. Інструмент Reclassify з RemapRange використовувався для переведення значень SAVI у відповідні класи. Після цього за допомогою BuildRasterAttributeTable створювалася атрибутивна таблиця класифікованого растру, де Value відповідав класу, а Count – кількості пікселів, які у кожному класі переводилась у площу (в км²), враховуючи площу одного пікселя (10×10 м = 0.0001 км²). Дані зберігались у підсумковому .csv файлі з повною статистикою по кожному зображенню (блок 8).

Блок 8

Класифікація SAVI-індексу та підрахунок площ за класами в межах району

```
import arcpy
import os
import csv
import traceback
import sys
from arcpy.sa import *

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
```

```

arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# 2) Шляхи
# Папка з обрізаними SAVI-растрами
clipped_folder = r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped\SAVI_Results\Clipped_SAVI"

# Папка для збереження класифікованих растрів
class_folder = os.path.join(os.path.dirname(clipped_folder), "Classification")
os.makedirs(class_folder, exist_ok=True)

# Файл для зведення площ у CSV
summary_csv = os.path.join(class_folder, "SAVI_class_areas.csv")

# 3) Порогові діапазони (SAVI - клас)
# Формат: [min_value, max_value, new_class]
remap_ranges = [
    [-9999, 0.03, 1], # Водна поверхня / тіні
    [0.031, 0.2, 2], # Відсутність рослинності / ґрунт
    [0.21, 0.3, 3], # Деградована / суха рослинність
    [0.31, 0.4, 4], # Помірно стресова
    [0.41, 0.5, 5], # Задовільна / активна
    [0.51, 0.6, 6], # Інтенсивна та здорова
    [0.61, 9999, 7], # Надзвичайно активна / густа
]
remap = RemapRange(remap_ranges)

# Розмір пікселя та конверсія в км²
pixel_size = 10.0 # метрів
pixel_area_km2 = (pixel_size * pixel_size) / 1e6

# 4) Основний цикл: класифікація та підрахунок площ
# Отримуємо список обрізаних SAVI-растрів
savi_rasters = [
    f for f in os.listdir(clipped_folder)
    if f.lower().startswith("savi_clipped_") and f.lower().endswith(".tif")
]

# Готуємо CSV
with open(summary_csv, "w", newline="", encoding="utf-8") as csvfile:
    writer = csv.writer(csvfile)
    writer.writerow(["Filename", "Class", "CountPixels", "Area_km2", "Percent"])

for fname in sorted(savi_rasters):
    in_path = os.path.join(clipped_folder, fname)
    try:
        print(f"Обробка: {fname}")

        # 1) Класифікуємо SAVI за заданими діапазонами
        cls_raster = Reclassify(in_path, "Value", remap, "NODATA")
        cls_name = os.path.splitext(fname)[0] + "_class.tif"
        cls_path = os.path.join(class_folder, cls_name)

```

```

cls_raster.save(cls_path)
print("Класифіковано")

# 2) Зчитуємо атрибутивну таблицю класифікованого растру
# де поле Value — номер класу, Count — кількість пікселів
arcpy.management.BuildRasterAttributeTable(cls_path, "Overwrite")
total_pixels = 0
counts = []
with arcpy.da.SearchCursor(cls_path, ["Value", "Count"]) as cursor:
    for val, cnt in cursor:
        if val is None:
            continue
        counts.append((val, cnt))
        total_pixels += cnt

# 3) Запис результатів у CSV
for val, cnt in counts:
    area_km2 = cnt * pixel_area_km2
    percent = (cnt / total_pixels) * 100 if total_pixels > 0 else 0
    writer.writerow([fname, val, cnt, f'{area_km2:.4f}', f'{percent:.2f}'])

print("Площі підраховано та збережено")

ехсепт Exception:
print(f" Помилка обробки {fname}")
traceback.print_exc()
# Завершуємо скрипт після першої помилки
sys.exit(1)

print(f"\n Класифікація завершена.")
print(f"Класифіковані растри: {class_folder}")
print(f"CSV зі зведенням площ: {summary_csv}")

arcpy.CheckInExtension("Spatial")

```

Аналогічна процедура була проведена для NDMI, однак з використанням готової шкали, що описує рівень водного стресу (табл. 3.3) [38; 39]. Кінцеві результати класифікації також експортувались до .csv файлу для подальшого аналізу (блок 9).

Блок 9

Класифікація NDMI та розрахунок площ водного стресу рослинного покриву

```

import arcpy
import os
import csv

```

```

import traceback
import sys
from arcpy.sa import *

# 1) Налаштування середовища
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.parallelProcessingFactor = "90%"
# Встановлюємо ту саму систему координат, що і району
arcpy.env.outputCoordinateSystem = arcpy.SpatialReference(32637)

# 2) Шляхи до даних
# Папка з обрізаними NDMI-растрами
clipped_folder
r"Y:\Kursach\ArcGis\Data\Merged\Clipped\NDMI_Results\Clipped_NDMI"

# Папка для збереження класифікованих шарів
class_folder = os.path.join(os.path.dirname(clipped_folder), "Classification")
os.makedirs(class_folder, exist_ok=True)

# CSV для підсумку площ
summary_csv = os.path.join(class_folder, "NDMI_class_areas.csv")

# 3) Шкала класифікації NDMI
# формат: [min_value, max_value, class_id, class_name]
ranges = [
    [-1.0, -0.8, 1, "Рослинний покрив відсутній"],
    [-0.8, -0.6, 2, "Рослинний покрив майже відсутній"],
    [-0.6, -0.4, 3, "Низька щільність рослинного покриву"],
    [-0.4, 0.0, 4, "Високий рівень водного стресу"],
    [0.0, 0.2, 5, "Середній рівень водного стресу"],
    [0.2, 0.4, 6, "Низький рівень водного стресу"],
    [0.4, 0.8, 7, "Нормальна зволоженість"],
    [0.8, 1.0, 8, "Надмірна зволоженість"]
]

remap = RemapRange([[r[0], r[1], r[2]] for r in ranges])

# Розмір пікселя та площа одного пікселя км²
pixel_size = 10.0 # метрів
pixel_area_km2 = (pixel_size ** 2) / 1e6

# 4) Основний цикл: класифікація та підрахунок площ
ndmi_files = sorted([
    f for f in os.listdir(clipped_folder)
    if f.lower().startswith("ndmi_clipped_") and f.lower().endswith(".tif")
])

with open(summary_csv, "w", newline="", encoding="utf-8") as csvfile:
    writer = csv.writer(csvfile)
    writer.writerow([

```

```
"Filename", "Class_ID", "Class_Name",
"Pixel_Count", "Area_km2", "Percent_Cover"
])
```

```
for fname in ndmi_files:
    in_raster = os.path.join(clipped_folder, fname)
    try:
        print(f"Обробка: {fname}")
        # 1) Перекласифікація NDMI
        cls = Reclassify(in_raster, "Value", remap, "NODATA")
        cls_name = os.path.splitext(fname)[0] + "_class.tif"
        cls_path = os.path.join(class_folder, cls_name)
        cls.save(cls_path)
        print("Класифікація виконана")

        # 2) Створення атрибутивної таблиці
        arcpy.management.BuildRasterAttributeTable(cls_path, "Overwrite")

        # 3) Читання полів Value та Count
        total_pixels = 0
        counts = []
        with arcpy.da.SearchCursor(cls_path, ["Value", "Count"]) as cur:
            for val, cnt in cur:
                if val is None:
                    continue
                counts.append((val, cnt))
                total_pixels += cnt

        # 4) Запис результатів у CSV
        id_to_name = {r[2]: r[3] for r in ranges}
        for val, cnt in counts:
            area_km2 = cnt * pixel_area_km2
            percent = (cnt / total_pixels) * 100 if total_pixels > 0 else 0
            writer.writerow([
                fname,
                val,
                id_to_name.get(val, ""),
                cnt,
                f"{area_km2:.4f}",
                f"{percent:.2f}"
            ])
        print("Площі підраховано та збережено")
```

ехсепт Ехсептион:

```
print(f" Помилка при обробці {fname}")
traceback.print_exc()
sys.exit(1)

print("\n Класифікація NDMI та підсумок площ завершено.")
print(f"Класифіковані растри в:\n {class_folder}")
print(f"CSV зі зведенням площ:\n {summary_csv}")
arcpy.CheckInExtension("Spatial")
```

Таблиця 3.3

Інтерпретація шкали значень NDMI

№	Вологість	Діапазони значення NDMI
1	Надмірна зволоженість	від 1.0 до 0.81
2	Нормальна зволоженість	від 0.8 до 0.41
3	Низький рівень водного стресу	від 0.4 до 0.21
4	Середній рівень водного стресу	від 0.2 до 0.01
5	Високий рівень водного стресу	від 0 до -0.41
6	Низька щільність рослинного покриву	від -0.4 до -0.61
7	Рослинний покрив майже відсутній	від -0.6 до -0.81
8	Рослинний покрив відсутній	від -0.8 до -1

3.2. Аналіз стану ґрунтового покриву за індексами SAVI та NDMI

Найдоречніше буде почати аналіз з індексу SAVI, бо саме він безпосередньо вказує на кількість та якість вегетації. Додатково, до війни більшість територій Бахмутського району охоплювались полями, тому зміни значень SAVI чітко вкажуть на можливу деградацію агроєкосистем у часі та просторі.

Площі, відсутньої рослинності або голого ґрунту мають хвилеподібну динаміку (рис. 3.7). У 2020 вони мають типовий для орного степу тренд: 32,54% у червні, 48,89% у липні, 55,72% у серпні, площа таких ділянок змінюється рівномірно у межах району, виключенням є невеликий залишок незібраних полів на крайньому заході території (рис. А.1-3. Додаток А). Поступове зростання свідчить про активну обробку полів і збір урожаю, що залишає ґрунт відкритим. У 2021 році навпаки, фіксується лише 13,75% у червні, що вказує на раннє формування вегетації, або ж на спотворення загальної картини, через вирізану хмарну маску на зображенні, яка займає чверть району, однак уже в серпні площа без рослинності сягнула 61,70%, можливо через масштабний збір урожаю або відсутність повторного засіву (рис. А.4-6. Додаток А). У 2022 році показники

тримаються на стабільно високому рівні, з локальною концентрацією на сході району: 36,45% у травні, 37,65% у червні, 45,99% у липні, 56,16% у серпні (рис. А.7-10. Додаток А). Це збігається з першими місяцями повномасштабного вторгнення, що спричинило припинення агровиробництва. У 2023 році ситуація короткочасно покращується: 48,54% у травні, проте вже у червні площа різко падає до 3,82%, що можна пояснити відновленням самосійної або дико пророслої рослинності (рис. А.11-14. Додаток А). У 2024 році клас знову займає все більшу частку: 22,93% у травні, 15,01% у червні, 46,34% у липні, а у серпні досягає максимуму – 79,19% (рис. А.15-18. Додаток А). Це вже є ознакою масштабної деградації, коли ґрунти втрачають продуктивність, а рослинність переважно перебуває у фазі стресу або відмирання.



Рис. 3.7. Графік динаміки класу відсутність рослинності / голий ґрунт Бахмутського району за індексом SAVI

Деградована та суха рослинність у 2020 році демонструє поступове зниження: 26,86% у червні, 20,18% у липні, 19,57% у серпні (рис. 3.8). Це може

бути наслідком того, що весною сформувалась нестійка рослинність, яка деградувала в умовах літньої спеки. У 2021 році фіксується зворотня тенденція: 14,39% у червні, 14,67% у липні, 21,98% у серпні, що може бути пов'язано зі зміною погодних умов або агротехнічного контролю. У 2022 році можна спостерігати такі значення: 25,17% у травні, 26,68% у червні, 23,23% у липні, 20,86% у серпні. Така динаміка свідчить про переважання пригніченої рослинності внаслідок стресових умов, як-от недостатня вологість, пошкодження технікою чи обстрілами. У 2023 році площа зростає – 26,95% у травні, 12,02% у червні, 40,07% у липні, 44,14% у серпні. Це демонструє сплеск деградованої вегетації, яка не переходить у фазу активного розвитку. У 2024 році відзначається критичний пік у червні – 49,29%. Показники становлять 44,67% у травні, 33,96% у липні та лише 12,67% у серпні, що вказує на нестабільність вегетаційного процесу та швидке виснаження ресурсів ґрунтів.



Рис. 3.8. Графік динаміки класу надзвичайно деградованої / сухої рослинності Бахмутського району за індексом SAVI

Помітну роль у зміні структури покриву відіграє помірно стресова вегетація (рис. 3.9). У 2020 році її частка поступово знижувалась: 22,01% у червні, 17,35% у липні, 15,29% у серпні. Це вказує на погіршення умов для вегетації в міру виснаження вологи й температурного тиску, та зростання частки класів більшого водного стресу. У 2021 році фіксується короткочасне покращення: 28,79% у червні, 22,99% у липні, 12,20% у серпні. Імовірно, це результат сприятливої весняної вологи, яка не втрималась у ґрунті до кінця літа.

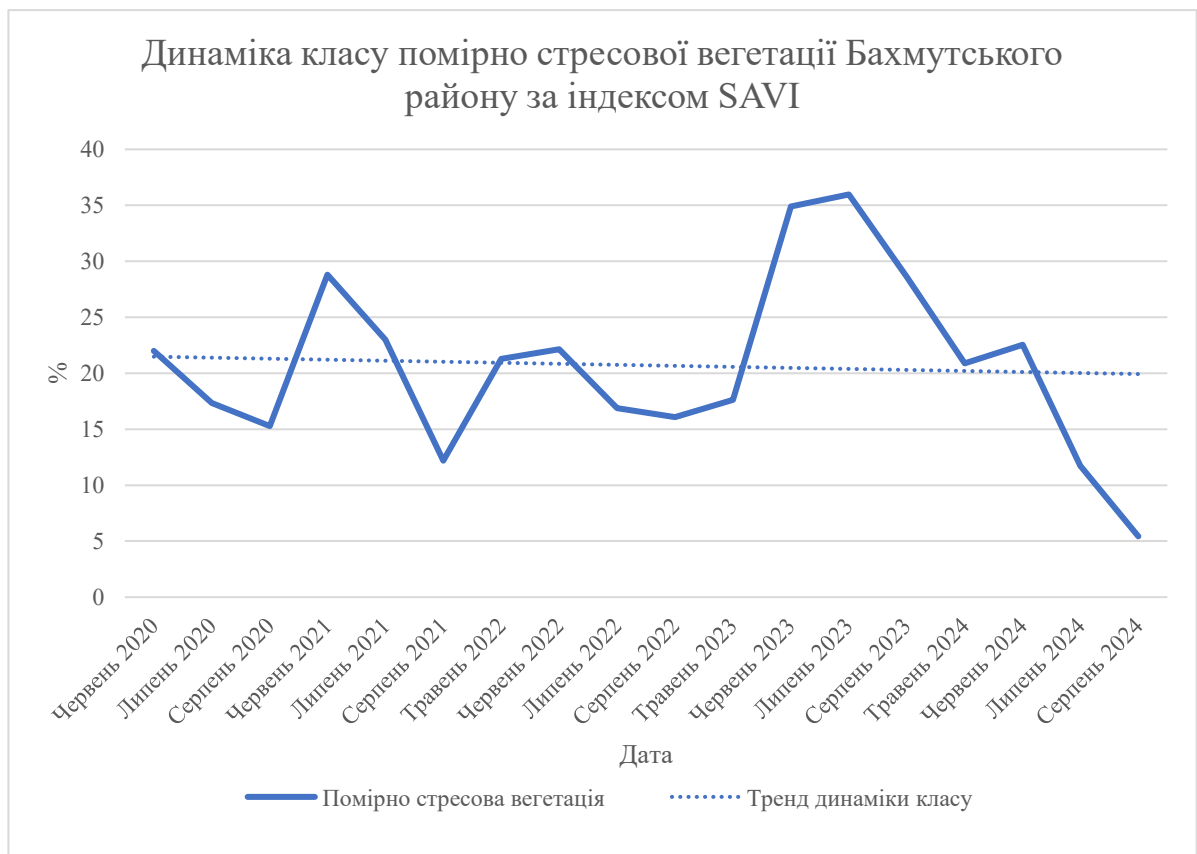


Рис. 3.9. Графік динаміки класу помірно стресової вегетації Бахмутського району за індексом SAVI

У 2022 році показники залишались помірними: 21,28% у травні, 22,15% у червні, 16,89% у липні, 16,09% у серпні. Це свідчить про напівстійкий, але неефективний розвиток культур в умовах нестабільного зволоження та пошкодженого ґрунтового покриву. У 2023 році площа цього класу значно зростає: 17,63% у травні, 34,89% у червні, 35,97% у липні, 28,60% у серпні. Це може бути ознакою переходу частини деградованої вегетації у більш

життєздатний стан за умов достатньої вологи або зменшення антропогенного тиску. Водночас це свідчить і про відсутність умов для розвитку повноцінної рослинності – системи залишаються нестійкими. У 2024 році динаміка йде в протилежному напрямку: 20,87% у травні, 22,55% у червні, 11,72% у липні, 5,43% у серпні. Це підтверджує загальну деградацію екосистем та вичерпання здатності навіть помірно життєздатної рослинності підтримувати стресостійкий стан у літній період.

Задовільна та активна вегетація у 2020 році показує зниження протягом літа: 13,73% у червні, 9,79% у липні, 6,31% у серпні, що узгоджується з типовою динамікою після піку розвитку культур, а також тим, що 2020 рік загалом має гірші показники вегетації, ніж 2021 (рис. 3.10). У 2021 році фіксується різкий приріст: 36,70% у червні та 23,90% у липні, але вже у серпні – лише 2,36%. Імовірно, це свідчить про високий урожай і раннє збирання культур. У 2022 році динаміка є стабільною, але на низькому рівні: 13,56% у травні, 10,69% у червні, 9,67% у липні, 4,85% у серпні. Це вказує на відсутність повноцінного агровиробництва, усі поля на східній частині району були покинуті, що простежується на індексних зображеннях. У 2023 році спостерігається покращення в червні – 38,36%, після чого площі швидко зменшуються: 4,68% у травні, 12,59% у липні, 7,77% у серпні. Лише невелика частина полів на крайній західній частині має задовільну вегетацію, що може пояснюватися характером обстрілів та розташуванням військових у регіоні. У 2024 році ситуація знову ускладнюється: 9,24% у травні, 10,42% у червні, 5,58% у липні, 1,23% у серпні, що підтверджує низьку інтенсивність і стійкість негативних вегетаційних процесів.



**Рис. 3.10. Графік динаміки класу інтенсивної та здорової вегетації
Бахмутського району за індексом SAVI**

Інтенсивна та здорова вегетація з 2020 року займає мінімальні площі (рис. 3.11). У червні цього року значення становило 2,96%, у липні – 2,21%, у серпні – 0,87%. У 2021 році площа зросла до 5,95% у червні, 9,55% у липні, але впала до 0,05% у серпні. Цей клас майже зникає після 2022 року: 1,97% у травні, 1,31% у червні, 1,12% у липні, 0,37% у серпні. У 2023 році знову спостерігається короткочасний ріст – 0,60% у травні, 9,30% у червні, 1,53% у липні, 0,37% у серпні. У 2024 році площа становила 0,80% у травні, 1,27% у червні, 0,88% у липні, 0,06% у серпні. Така тенденція вказує на майже повну втрату ділянок із максимально життєздатною рослинністю.



**Рис. 3.11. Графік динаміки класу інтенсивної та здорової вегетації
Бахмутського району за індексом SAVI**

Нарешті, клас надзвичайно активної / густої вегетації не перевищував 0,31% з червня 2020 року, а в наступні роки його значення були близькими до нуля (рис. 3.12). У 2023–2024 роках цей клас зникає повністю. Це підтверджує критичну втрату ґрунтів із надвисокою продуктивністю, які до війни могли бути осередками стабільного урожаю.



**Рис. 3.12. Графік динаміки класу надзвичайно активної / густої вегетації
Бахмутського району за індексом SAVI**

Загалом, динаміка індексу SAVI свідчить про глибоку трансформацію структури рослинного покриву у Бахмутському районі. Після 2021 року площі продуктивної вегетації скорочуються, а частка деградованих і ділянок без рослинності стрімко зростає. Війна, деградація агросфери, кліматичні коливання та неможливість обробітку землі виступають головними факторами цієї зміни. Збереження таких тенденцій загрожує втратою потенціалу сільськогосподарського відновлення після закінчення війни.

Що до індексу NDMI, то надмірна зволоженість за весь період майже не проявлялась. У 2020 та 2021 роках її площа залишалась в межах 0,01–0,02%, а починаючи з 2022 року такі ділянки фактично зникли. Це вказує на те, що клас загалом є нерозповсюдженим на цій території через її кліматичні особливості.

Нормальна зволоженість у 2020–2021 роках коливалась на рівні 0,16–0,19% у червні, з аналогічними дрібними значеннями в інші місяці (рис. 3.13), на

знімках, вже типово, такі значення знаходяться на заході території (рис. Б.1-6. Додаток Б). У 2022 році найбільший рівень фіксується у травні – 0,36%, ймовірно через більшу кількість атмосферних опадів, після чого спадає до 0,02% у червні (рис. Б.7-10. Додаток Б). У 2023 році значення становили 0,21% у червні, 0,02% у травні, а влітку – не перевищували 0,01% (рис. Б.11-14. Додаток Б). Розподіл по території району проходив не рівномірно, що може бути наслідком відсутності штучного поливу в наслідок воєнних дій. У 2024 році клас практично зник (рис. Б.15-18. Додаток Б). Це вказує на повну втрату ділянок, де зволоженість була б стабільною і достатньою для забезпечення активної вегетації. Умови стали переважно екстремальними – занадто сухими, або деградованими для вологи.



Рис. 3.13. Графік динаміки класу нормальної зволоженості Бахмутського району за індексом NDMI

Низький рівень водного стресу у 2020 році охоплював 17,87% у червні, 10,64% у липні, 8,64% у серпні (рис. 3.14). Це свідчить про помірну наявність

вологи, достатню для базового функціонування агроєкосистем. У 2021 році показники зростають: 60,70% у червні, 29,37% у липні, але різко падають до 4,39% у серпні. У 2022 році відзначається зменшення з 16,94% у травні до 12,16% у червні, 11,01% у липні та 8,64% у серпні. Така динаміка, порівняно з попереднім роком, вказує на зниження ефективної вологості. У 2023 році фіксується короткочасний пік – 51,45% у червні, який різко знижується до 13,47% у липні та 7,66% у серпні. Це може вказувати на несподіване підвищення вологості через дощі або низьку температуру, але нездатність ґрунтів утримувати її довгостроково. У 2024 році ситуація загострюється: лише 8,70% у травні, 9,14% у червні, 5,50% у липні та 1,40% у серпні. Це вказує на катастрофічну втрату водоутримуючої здатності ґрунтів та системну дегідратацію території.



Рис. 3.14. Графік динаміки класу низького рівня водного стресу Бахмутського району за індексом NDMI

Середній рівень водного стресу мав найвищі показники в 2020 році: 61,27% у червні (рис. 3.15). У наступні роки його частка суттєво зменшується: 26,33% у червні 2021 року, 41,08% у червні 2022 року, 45,39% у червні 2023 року та 30,71%

у червні 2024 року. Ця динаміка вказує на поступове розмивання класу середнього забезпечення вологою на користь або дуже посушливих, або локально зволжених ділянок, що є типовим при дестабілізації водного режиму.



Рис. 3.15. Графік динаміки класу середнього рівня водного стресу Бахмутського району за індексом NDMI

Найбільш поширеним у структурі покриття виявився високий рівень водного стресу (рис. 3.16). У 2020 році його частка становила 20,70% у червні, 45,15% у липні та 58,08% у серпні. Це свідчить про поступове виснаження вологи в ґрунтах протягом літа, що характерно для регіонів із посушливим континентальним кліматом. У 2021 році спостерігається значне зменшення рівня стресу: 9,47% у червні, 16,88% у липні, 62,16% у серпні. Це вказує на сприятливі умови в першій половині літа, однак різке підвищення водного стресу в серпні, ймовірно, пов'язане з нестачею опадів і високими температурами. У 2022 році рівень стресу знову високий: 35,98% у травні, 25,42% у червні, 41,11% у липні, 54,69% у серпні. Така динаміка є типовою для посушливих сезонів, однак у

цьому випадку вона також могла бути посилена впливом бойових дій, які порушили систему агротехнічного зволоження полів. У 2023 році помітне нетипове зменшення показників: 52,88% у травні, лише 2,87% у червні та 10,75% у липні, після чого значення досягає 23,55% у серпні. Це може бути наслідком аномальної сезонної вологості. У 2024 році знову фіксується критичний стрес: 36,85% у травні, 29,70% у червні, 56,93% у липні, 79,71% у серпні. Такі показники, особливо в серпні, свідчать про серйозне порушення водного балансу, що, найімовірніше, пов'язано як із кліматичними умовами, так і з наслідками воєнної діяльності – зокрема ущільненням ґрунту технікою, знищенням природного рослинного покриву й замінуванням територій.



Рис. 3.16. Графік динаміки класу високого рівня водного стресу Бахмутського району за індексом NDMI

Класи майже відсутнього рослинного покриву, низької щільності рослинного покриву та відсутнього покриву мали майже нульові значення протягом усіх років, ймовірно через їх перекриття із зонами високого та середнього водного стресу.

Доцільно зазначити, що обидва індекси демонструють виразну деградаційну динаміку, з локальними покращеннями у 2021 році, яка найбільш інтенсивно проявилася після початку повномасштабної війни.

До повномасштабного вторгнення (2020 та 2021 роки) спостерігалася чітка логіка сезонної динаміки: із наближенням серпня площі з інтенсивною чи задовільною вегетацією за SAVI зменшувалися, натомість зростав відсоток ділянок із високим водним стресом за NDMI. Наприклад, у серпні 2020 року частка класу “Високий рівень водного стресу” становила 58,08%, тоді як “Задовільна / активна вегетація” – лише 6,31%. Це свідчить про прямий зв’язок між водним дефіцитом та зниженням життєздатності рослинного покриву.

У 2021 році ситуація частково змінилася. Попри те, що в червні SAVI демонстрував високі значення класів з активною вегетацією (36,70%), NDMI одночасно фіксував зниження водного стресу – лише 9,47%. Це вказує на достатній рівень вологи в першій половині літа, який позитивно вплинув на стан рослин. Проте до серпня NDMI показав різке підвищення стресу до 62,16%, що супроводжувалось стрімким зменшенням площі активної вегетації до 2,36%. Таким чином, кореляція між індексами підтверджує сезонну вразливість сільськогосподарських ландшафтів до зневоднення.

З початком повномасштабного вторгнення взаємозв’язок між індексами став більш хаотичним, проте зберіг логіку деградації. SAVI фіксує зростання площ із деградованою рослинністю – 26,68% у червні та 20,86% у серпні, тоді як NDMI відображає стабільно високий водний стрес – 25,42% у червні та 54,69% у серпні. Одночасне посилення обох індикаторів підтверджує вплив деструктивних чинників на ґрунт: як фізичне порушення поверхні (вибухи, техніка), так і зневоднення через руйнування гідрологічної структури місцевості. Навіть на тлі травневої вологості (35,98% класу стресу за NDMI), вегетація майже не активізувалася, що видно з низької частки класу “Інтенсивна та здорова вегетація” за SAVI (1,97%).

2023 рік виявився аномальним. NDMI у червні зафіксував лише 2,87% площі з високим водним стресом, натомість SAVI показав 38,36% активної вегетації. Це може свідчити про короткочасне відновлення ґрунтової вологи внаслідок дощів або відсутністю господарського тиску. Проте ситуація була нестійкою: вже в липні водний стрес зріс до 10,75%, а задовільна вегетація за SAVI зменшилася до 12,59%. Така різка дестабілізація демонструє втрату буферної здатності ґрунтів та залежність стану покриву від короткочасних погодних факторів.

У 2024 році обидва індекси синхронізувалися в катастрофічному сценарії. SAVI зафіксував рекордні 79,19% площі без вегетації у серпні, а NDMI – такий самий максимум стресу: 79,71%. Це свідчить про колапс агросистем на значній частині району. Усі класи, що вказують на активну або навіть деградовану рослинність, майже зникають. Навіть у травні, коли зазвичай відбувається початок вегетаційного періоду, SAVI фіксує лише 9,24% площ із задовільною вегетацією, а NDMI вже тоді показує 36,85% водного стресу. Цей рік можна вважати точкою неповернення в деградації ґрунтів і рослинного покриву, де виснаження водних ресурсів і воєнне спустошення наклались одночасно.

Загалом, між індексами SAVI та NDMI простежується тісний взаємозв'язок. Зменшення площ із активною вегетацією супроводжується зростанням водного стресу, що підтверджує прямий вплив водного режиму на стан ґрунтів. Найвища кореляція спостерігається в періоди екстремальних умов – серпень кожного року, особливо у 2022–2024 роках. Ці дані не лише підтверджують загальну деградацію агроландшафтів у регіоні, а й вказують на зниження регенераційної здатності ґрунтів, що створює виклик для майбутнього відновлення сільськогосподарського виробництва.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було реалізовано всі завдання дослідження, що дозволяє зробити наступні висновки:

1. Бахмутський район розташований у північно-східній частині Донецької області та відрізняється сприятливими умовами для формування чорноземів, які є основою сільськогосподарського виробництва та ґрунтової складової району. Проте інтенсивне використання земель, техногенне навантаження, кліматичні зміни та військові дії спричиняють значну деградацію ґрунтового покриву. Розвиток ерозійних процесів, зниження рівня родючості та втрата вологи є ключовими проблемами, які загрожують екологічній стабільності району.

2. Серед сучасних методів моніторингу стану ґрунтів особливо ефективними є методи дистанційного зондування на основі супутникових даних. Зокрема, вегетаційні спектральні індекси та індекси вологості, які дозволяють оперативно отримувати дані про рослинний покрив та рівень вологості на великі площі. Використання цих індексів забезпечує достатню точність аналізу та можливість виявлення просторово-часових змін навіть у складних умовах доступу до території дослідження.

3. Автоматизована обробка супутникових зображень Sentinel-2 дала змогу обробити великий об'єм даних, а саме 36 розділених знімків, які потім були об'єднані у 18 сцен території, на які у подальшому були застосовані створені маски хмар, для покращення статистичних даних та розрахунків. Після цього було створено по 18 індексних зображень SAVI та NDMI. Розроблення власної шкали інтерпретації значень SAVI дало змогу отримати відкалібровані дані про стан рослинного покриву території, що позитивно вплинуло на подальший аналіз. Також вибір індексу SAVI, з коефіцієнтом поправки на ґрунт, над NDVI, ще більше підвищило загальну точність отриманих результатів. Додатково обраний індекс вологості NDMI дав змогу побачити недоступне людському оку, а саме, вміст вологи в листку, і хоч інтерпретація його шкали була недосконалою,

він дозволив простежити загальні тенденції коли підвищення водного стресу передувало зниженню характеристик вегетації. Загалом, хоч розробка скрипту автоматизації ArcPy зайняла немало часу, але збільшила загальну швидкість обробки пакету даних. У перспективі, з невеликими допрацюваннями, код можна використовувати для автоматизованого аналізу стану ґрунтів усєї східної частини України. А з переробкою інтерпретації значень індексів і для будь якої території світу.

4. Комплексна оцінка стану ґрунтового покриву Бахмутського району, показала, що у 2020-2021 роках структура рослинного покриву відповідала типово аграрному ландшафту: переважали класи з задовільною та активною вегетацією, водночас частка відкритого ґрунту не перевищувала 50% у літній період. Але вже з 2022 року спостерігається різке погіршення – площі без рослинності зростають, натомість частка продуктивних класів стрімко знижується. У 2024 році понад 79% території району в серпні належали до класу “Голий ґрунт”, що свідчить про деградацію агроландшафтів.

Паралельно індекс NDMI вказує на прогресуючу втрату ґрунтової вологи. Якщо у 2020-2021 роках площі з високим водним стресом становили 20-40%, то у 2022 році цей показник сягнув понад 54% у серпні, а в 2024 році – майже 80%. Ділянки з нормальною зволоженістю зникли майже повністю. Така динаміка свідчить про порушення водного балансу, втрату водоутримуючої здатності ґрунтів та вплив деструктивних факторів – зокрема воєнних дій, ерозії й руйнування природного покриву.

Порівняльний аналіз індексів підтвердив сильну кореляцію: зменшення площ з активною вегетацією супроводжується збільшенням ділянок з водним стресом. У роки активних бойових дій SAVI та NDMI синхронно демонструють ознаки екосистемної деградації. У 2023 році спостерігалось короткочасне покращення, однак у 2024 році ситуація набула критичного характеру.

Отримані результати свідчать про серйозне порушення екологічного стану сільськогосподарських угідь Бахмутського району. Індекс SAVI вказує на втрату

життєздатної рослинності, а NDMI – на виснаження ґрунтового водного балансу. Обидва індикатори підтверджують системну деградацію агроєкосистем, яка потребує подальшого моніторингу й планування заходів із відновлення після завершення бойових дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агропромисловий комплекс. *Бахмутська міська рада*: офіційний вебсайт. URL : <https://artemrada.gov.ua/> (дата звернення : 12.04.2025).
2. Бахмутський район. *Децентралізація*: вебсайт. URL : <https://decentralization.gov.ua/newrayons/1314> (дата звернення : 30.03.2025).
3. Биндич Т. Ю. Використання ГІС-технологій для аналізу неоднорідності локальних структур ґрунтового покриву у степовій зоні. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2013. №. 80. С. 17–26.
4. Ґрунти України: навчально-методичний посібник / З. П. Паньків. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2017. – 112 с.
5. Енциклопедія Сучасної України. *Інститут енциклопедичних досліджень НАН України*: вебсайт. URL : <https://doi.org/10.37068/b/966022074x> (дата звернення : 12.02.2025).
6. Інтерактивна карта ґрунтів України. *Головний сайт для агрономів*: вебсайт. URL : <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy#x> (дата звернення : 12.12.2024).
7. Казаченко Л. М. Моніторинг деградації ґрунтового покриву. *Комунальне господарство міст: технічні науки та архітектура*. 2017. № 139. С. 63–67.
8. Купчик В. І., Іваніна В. В. Ґрунти України: властивості, генезис, менеджмент родючості. : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2010. 414 с.
9. На відновлення землі підуть сотні років: як війна вплинула на ґрунти Бахмута. *Останні новини України*: вебсайт. URL : <https://bahmut.in.ua/59-heroi/> (дата звернення : 03.01.2025).
10. Новини Бахмутського району. *Бахмутська районна державна адміністрація*: вебсайт. URL : <https://bahmutska-rda.gov.ua/> (дата звернення : 15.03.2025).
11. Стукало М. В. Огляд можливостей спектральних показників для виявлення змін пошкоджених ґрунтів / Стукало М. В. // Географічні

дослідження: історія, сьогодення, перспективи: *Збірник наукових праць (за матеріалами щорічної міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої пам'яті професора Г. П. Дубинського)* – Х: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, кафедра фізичної географії та картографії., 2025. – С. 106-107.

12. Стукало М. В. Огляд методів визначення деградації ґрунтів, спричиненими бойовими діями, за даними ДЗЗ/ Стукало М. В. // *Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: Збірник наукових праць (за матеріалами щорічної міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої пам'яті професора Г. П. Дубинського)* – Х: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, кафедра фізичної географії та картографії., 2023. – С. 74-76.

13. Abdulraheem M. I. Advancement of Remote Sensing for Soil Measurements and Applications: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. №21. P. 15444.

14. Al J. NDVI Differencing and Post-classification to Detect Vegetation Changes in Halabja City, Iraq. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*. 2013. Vol. 1. №2. P. 01–10.

15. ArcGIS Pro. URL : <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm> (дата звернення : 26.12.2024).

16. Barman P. K. Monitoring the Vegetation Condition of Gorumara National Park Using NDVI and NDMI Indices. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*. 2024. Vol. 15. №2. P. 01–07.

17. Brevik Cerdà E. C., Mataix-Solera A., Pereg J., Quinton L., Six J. N. The Interdisciplinary Nature of SOIL. *SOIL Discussions*. 2014. Vol. 1. №1. P. 429–462.

18. Cahyono B. E. Analysis of soil moisture as an indicator of land quality using vegetation index (SAVI and NDMI) retrieved from remote sensing data in Jember Indonesia. URL : <https://doi.org/10.1063/5.0078761> (дата звернення : 16.04.2025).

19. Colwell J. E. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*. 1974. Vol. 3. №3. P. 175–183.
20. Copernicus Browser. URL : <https://browser.dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення : 27.01.2025).
21. Dr. Bader A., Dr. Ali E. B., Dr. Mohamed A. B., Dr. Nader M. Comparative Study of SAVI and NDVI Vegetation Indices in Sulaibiya Area (Kuwait) Using Worldview Satellite Imagry. *International Journal of Geosciences and Geomatics*. 2013. Vol. 1. №2. P. 01–12.
22. Elsu C. A., Dr. K. V. Ramesh, Sridevi H. Quantification and Understanding the Observed Changes in Land Cover Patterns in Bangalore. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. P. 597–603.
23. Faz A. J., Acosta J. A. Accumulations of major and trace elements in particle size fractions of soils on eight different parent materials. *Geoderma*. 2011. Vol. 161. №1-2. P. 30–42.
24. Gao B. C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58. №3. P. 257–266.
25. Herbei M. V. Using Remote Sensing Techniques in Environmental Management. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*. 2016. Vol. 73. №2. P. 230.
26. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25. №3. P. 295–309.
27. Huete A. R., Justice C. R. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. №1-2. P. 195–213.
28. Jackson R. D., Huete A. R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*. 1991. Vol. 11. №3-4. P. 185–200.
29. Jiang Z. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. №10. P. 3833–3845.

30. Khaledian Y. Assessment and Monitoring of Soil Degradation during Land Use Change Using Multivariate Analysis. *Land Degradation & Development*. 2016. Vol. 28. №1. P. 128–141.

31. Koohikeradeh E., Jose Gumiere S., Bonakdari H. NDMI-Derived Field-Scale Soil Moisture Prediction Using ERA5 and LSTM for Precision Agriculture. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. №6. P. 2399.

32. Kumar D. S. Electromagnetic Spectrum. URL : <https://apniphysics.com/electromagnetic-spectrum/> (дата звернення : 30.01.2025).

33. Landale B. J. Ukraine war: Why Bakhmut matters for Russia and Ukraine. URL : <https://www.bbc.com/news/world-europe-64877991> (дата звернення : 21.02.2025).

34. Li Y. Evaluate the Winter Wheat GVMI and NDMI correlations with the Rainfall. *Smart World Congress (SWC)*. 2024. P. 2089–2094.

35. Lozano F. J., Suárez-Seoane S., de Luis E. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 107. №4. P. 533–544.

36. Mahdi S. A., Jasim S. N. Detection of Vegetation Cover Changes from 1988-2022 in the University of Baghdad Campus by Remote Sensing and GIS Techniques (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1262, №4. P. 042054.

37. MODIS Normalized difference moisture index - NDMI. URL : <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/modis/ndmi/> (дата звернення : 13.03.2025).

38. NDVI and NDMI vegetation indices: instructions for use Agriculus. URL : <https://www.agriculus.com/en/vegetation-indices-ndvi-ndmi/> (дата звернення : 31.05.2025).

39. NDMI: Normalized Difference Moisture Index. URL : https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/?utm_source (дата звернення : 03.03.2025).

40. Normalized difference vegetation index. URL : <https://custom-scripts.sentinel-hub.com/sentinel-2/ndvi/> (дата звернення : 31.03.2025).
41. Qi J. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. №2. P. 119–126.
42. Quinton J. N., Rickson R. J. The Role of Soil Erosion in the Movement of Pollutants. *Soil Monitoring*. 1993. P. 141–156.
43. Salman A. K., Wheib K. A. The Relationship Between the Above-Ground Biomass and the Vegetation Cover Indices at Different Salinity Levels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1158. №2. P. 122003.
44. Savi determination in carrots: comparing constant and dynamic soil adjustment factors. URL : <https://northcentralfertility.com/proceedings/> (дата звернення : 13.02.2025).
45. SAVI from First Principles. URL : <https://www.streambatch.io/knowledge/savi-from-first-principles> (дата звернення : 21.12.2024).
46. Shomko O., Davydova I. Dynamics of vegetation (ndvi) and humidity (ndmi) indices of reclaimed areas disturbed by ilmenite mining in zhytomyr polissia. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2024. Vol. 144. №1. P. 131–139.
47. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). URL : <https://space4water.org/taxonomy/term/1242> (дата звернення : 27.04.2025).
48. Strashok O., Ziemiańska M., Strashok V. Evaluation and Correlation of Normalized Vegetation Index and Moisture Index in Kyiv (2017–2021). *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23. №9. P. 212–218.
49. Suyeda F. D., Setiawan B. Utilization of NDMI Method in Landsat 8 Satellite Imagery for Analysis of Multi-Hazard Susceptibility. *GMPI Conference Series*. 2022. Vol. 1. P. 63–70.

50. Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*. 1986. Vol. 7. №11. P. 1395–1416.

51. Viscarra R. A. A global spectral library to characterize the world's soil. *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 155. P. 198–230.

52. Wu X. Agricultural Drought Monitoring Using an Enhanced Soil Water Deficit Index Derived from Remote Sensing and Model Data Merging. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, №12. P. 2156.