

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ АГРОЕКОЛОГІЇ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

О. Г. Тараріко
О. В. Сиротенко
Т. В. Ільєнко
Т. Л. Кучма

Агро- екологічний супутниковий моніторинг

AGROECOLOGICAL
EARTH
OBSERVATION

Київ
АГРАРНА НАУКА
2019

УДК 631.4:631.47:631.459КП
А 33

*Рекомендовано до друку
вченою радою Інституту агроєкології і природокористування НААН
10 листопада 2017 р. (протокол № 10)*

Рецензенти:

Л. Я. Новаковський –

доктор економічних наук, професор, академік НААН,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
(Національна академія аграрних наук України);

А. Д. Баласв –

доктор сільськогосподарських наук, професор, член-кореспондент НААН
(Національний університет біоресурсів і природокористування України);

В. П. Ландін –

доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник
(Інститут агроєкології і природокористування НААН)

А 33 **Тараріко О. Г., Сиротенко О. В., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л.**
Агроєкологічний супутниковий моніторинг. – К.: Аграр.
наука, 2019. – 204 с.

ISBN 978-966-540-455-2

У монографії розглянуто науково-методичні засади, зміст та завдання супутникового агроєкологічного моніторингу. Проаналізовано діючі системи супутникового знімання у світі, режим та умови дистанційного моніторингу об'єктів агроландшафтів, систем наземних тестових спостережень, а також використання супутникових даних в агросфері України.

Удосконалено класифікацію деградаційних процесів в агроландшафтах, результати визначення стану посівів, умов вологозабезпечення та просторового розповсюдження кризових посушливих явищ, а також прогнозування впливу змін клімату на продуктивність і валові збори зернових культур за супутниковими даними.

Рекомендовано для спеціалістів управлінських та виробничих структур сільськогосподарства, наукових співробітників, аспірантів і студентів аграрного профілю.

УДК 631.4:631.47:631.459КП



Монографію видано за підтримки проекту Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН і Глобального екологічного фонду «Інтегроване управління природними ресурсами деградованих ландшафтів лісостепової та степової зон України» (GCP/UKR/004/GFF).

ISBN 978-966-540-455-2

© О. Г. Тараріко, О. В. Сиротенко,
Т. В. Ільєнко, Т. Л. Кучма, 2019
© Державне видавництво
«Аграрна наука» НААН, 2019

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	9

Розділ 1

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ В СИСТЕМІ АГРО-ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ	12
1.1. Зміст та завдання агроєкологічного моніторингу	13
1.2. Огляд діючих систем супутникового агромоніторингу	17
1.3. Сучасний стан використання ДЗЗ в системі аграрного виробництва	22
<i>Література до розділу 1</i>	28

Розділ 2

СИСТЕМА ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО АГРОМОНІТОРИНГУ	31
2.1. Основні принципи дистанційного зондування агросфери	31
2.2. Діючі системи супутникового знімання	52
2.3. Режим та умови дистанційного моніторингу об'єктів агроландшафтів на різних рівнях управління	58
2.4. Система збору інформації – територіальна спостережна мережа	66
<i>Література до розділу 2</i>	79

Розділ 3

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ АГРОЛАНДШАФТІВ	83
3.1. Обґрунтування класів наземного покриву сільсько-господарських територій для моніторингу трансформації агроландшафтів	83
3.2. Оптичні характеристики індикаторів агроландшафтів	86
3.3. Ландшафтні індекси для аналізу динаміки землекористування і виявлення зон деградації ландшафтного різноманіття	97
<i>Література до розділу 3</i>	103

Розділ 4

КЛАСИФІКАЦІЯ ПРОЯВІВ ДЕГРАДАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ	106
<i>Література до розділу 4</i>	130

Розділ 5

МОНІТОРИНГ СТАНУ ПОСІВІВ, ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ПЛОЩ І ПРОДУКТИВНОСТІ (УРОЖАЙНОСТІ) ЗА ТЕРИТОРІАЛЬНОЮ ВИБІРКОВОЮ МЕРЕЖЕЮ	135
<i>Література до розділу 5</i>	158

Розділ 6

МОНІТОРИНГ КРИЗОВИХ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ	161
<i>Література до розділу 6</i>	174

Розділ 7

МОНІТОРИНГ АГРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ	176
7.1. Моніторинг динаміки температурного режиму	179
7.2. Моніторинг динаміки опадів	183
7.3. Моніторинг вмісту вологи у ґрунті	184
7.4. Прогноз ризиків вияву посушливих явищ та адаптація агросфери до змін клімату	186
<i>Література до розділу 7</i>	190

Розділ 8

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ АГРОСФЕРИ УКРАЇНИ	192
8.1. Актуальність супутникового агроекологічного моніторингу в агросфері України	195
8.2. Визначення оптимального варіанта розв'язання проблеми на основі порівняльного аналізу можливих варіантів	197
8.3. Мета і терміни реалізації Концепції	198
8.4. Способи впровадження даних дистанційного зондування в систему агромоніторингу	198
8.5. Очікувані результати	200
ПІСЛЯМОВА	201

Перелік умовних позначень та скорочень

АБД – атрибутивна база даних

АКП – аерокосмічний полігон

ВІ – вегетативний індекс

ГБД – геоінформаційна база даних

ГІС – геоінформаційна система

Дані дистанційного зондування Землі – дані і матеріали оброблення даних, отриманих за допомогою апаратури дистанційного зондування, яку встановлено на борту космічного апарату, і які передаються або доставляються на Землю з космосу за допомогою телеметрії у вигляді електромагнітних сигналів

Дані наземні – допоміжні дані, зібрані на місцевості. Одержану з них інформацію використовують як навчальну вибірку при тематичному обробленні матеріалів дистанційного обстеження території

ДДЗ – дані дистанційного зондування

Дешифрування знімків – виявлення, розпізнавання і визначення характеристик об'єктів, зображених на космознімках

Дешифрувальні ознаки – характеристики об'єкта в натурі за даними наземних обстежень

Діапазон спектральний – інтервал електромагнітного спектра, що визначається двома довжинами хвиль, двома частотами або хвильовими числами

Ділянки еталонні – області у межах тестових аграрних полігонів,

що розпізнаються на зображенні з відмінними властивостями, які можна застосовувати для ідентифікації інших подібних областей

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – спостереження, вимірювання та фіксація енергетичних і поляризаційних характеристик власного і відображеного випромінювання елементів суші, океану та атмосфери Землі у різних діапазонах електромагнітних хвиль за допомогою приладу реєстрації, який з ними не контактує

ІЧ – інфрачервона зона електромагнітного спектра

КБО – Конвенція боротьби з опустелюванням

ЛА – лабораторний аналіз

ЛР – ландшафтне різноманіття

Просторово розподілені дані – дані про фактичний просторово-часовий розподіл мінливості процесів на земній поверхні за допомогою реєстрації електромагнітного випромінювання

ПТК – природно-територіальний комплекс

СДМЗ – система дистанційного моніторингу земель

Система багатозональна – знімальна система, здатна сприймати і фіксувати дані одночасно у різних вузьких інтервалах електромагнітного спектра

Система збору даних – ряд приладів та засобів, за допомогою яких вимірюють фізичні змінні і записують до введення у систему обробки даних

СКЯ – спектральний коефіцієнт яскравості

Спектральний аспект ландшафту – спектральні відгуки множини фізіономічних об'єктів ландшафту

Спектральні діапазони – виділені для зручності діапазони довжин хвиль електромагнітного спектра, наприклад, видимий діапазон, рентгенівський діапазон, інфрачервоний діапазон, середній інфрачервоний діапазон

ТАП – тестові аграрні полігони

ТД – тестова ділянка

Тестовий аграрний полігон (ТАП) – одиниця вибірки територіального вибіркового обстеження об'єктів агроландшафтів за даними аерокосмічного знімання

ЦАКДЗ – Центр аерокосмічних досліджень Землі

Цифрова карта місцевості (ЦКМ) – цифрова модель місцевості, записана на машинному носії у встановлених структурі та кодах, у прийнятій для топографічних карт проекціях, системі координат і висот, яка за точністю та змістом відповідає карті відповідного масштабу

ЦКМ – цифрова картографічна модель

ЦРЗЗ – Центр радіофізичного зондування Землі
ім. А. І. Калмикова НАН України

ЦМР – цифрова модель рельєфу

ЧКХ – частотно-контрастні характеристики

ЧПХ – частотно-просторові характеристики

ЧЧХ – частотно-часові характеристики

ШСЗ – штучний супутник Землі

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer –
удосконалений радіометр дуже високого розрізнення

CLC – Corine Land Cover

CWSI – Crop water stress index – індекс водного стресу рослин

EEA – European Environment Agency – Європейське агентство
довкілля

ESA – European Space Agency – Європейське космічне
агентство

GMES – Global Monitoring for Environment and Security –
Європейська система глобального моніторингу навколишнього
середовища і забезпечення безпеки

GEOSS – Global Earth Observation System of Systems – глобальна «система систем»

ID – Index drought – індекс посухи

MNDWI – Modified normalized differential water index – модифікований нормований різницевий водний індекс (mndwi)

MODIS – Moderate Resolution Imaging Sensor – датчик зображення помірного розрізнення

MSI – Moisture stress index – індекс стресу вологи

NDTI – Normalized differential temperature index – нормалізований різницевий температурний індекс

NDVI – Normalized differential vegetation index – нормалізований різницевий вегетаційний індекс

NDDI – Normalized differential drought index – нормалізований різницевий індекс посухи

NDWI – Normalized differential water index – нормалізований різницевий водний індекс

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration – Національне управління океанічних і атмосферних досліджень

NWI – Normalized water index – нормалізований водний індекс

OBIA – Object-Based Image Analysis – об’єкто-орієнтовний аналіз зображень

TCI – Temperature condition index – індекс температурних умов

VCi – Vegetation condition index – індекс умов росту рослинності

VHI – Vegetation health index – індекс стану рослинності

WSVI – Water Supplying Vegetation Index – індекс водних запасів

Вступ

Під час ювілейної сесії Генеральної Асамблеї ООН (2015 р.) відбувся Самміт зі сталого розвитку, де було розглянуто питання «Порядок денний «Період після 2015 р.», яким зокрема передбачено до 2030 р. викоринити бідність і повсюдно сприяти економічному процвітання, соціальному розвитку та охороні довкілля. Прийняті комплексні та взаємопов'язані 17 Глобальних цілей сталого розвитку до 2030 р. є цілями для всіх країн. Ці цілі та 169 завдань спрямовано на подолання основних системних перешкод на шляху до сталого розвитку. Зокрема, Ціль 1 передбачає «Подолати бідність у всіх її проявах», а Ціль 2 – «Подолати голод, досягти продовольчої безпеки і поліпшити харчування та сприяти сталому розвитку сільського господарства».

Україна має високий природно-ресурсний потенціал агросфери і за умов належного матеріально-технічного та інформаційного забезпечення може виконувати не лише національну, але й значною мірою загальносвітову місію продовольчої безпеки. Нинішнє зростання сільськогосподарського виробництва в Україні відбувається доволі високими темпами, незважаючи на зменшення державної фінансової підтримки, галузеву асиметрію та низьку ефективність використання основних видів ресурсів. Натомість значних масштабів набули різноманітні деградаційні процеси. Сільськогосподарські ландшафти піддаються надвисокій розораності, неконтрольованій ерозійній деградації, дегуміфікації, виснаженню родючості ґрунтів, забрудненню водних джерел, знищенню малих річок, простежується збіднення ландшафтного та біотичного різноманіття, що збільшує ризики досягнення збалансованого розвитку агроєкосистем, а також спроможність їх адаптації до змін клімату.

Сучасна екологічна та продовольча ситуація у світі потребує запровадження оперативного моніторингу, об'єктивного аналізу результатів, а також оцінювання стану використання агроресурсного

потенціалу та виробництва сільськогосподарської продукції, зокрема зерна, що сприятиме удосконаленню стратегії і тактики формування сталих високопродуктивних агроєкосистем.

Наявна державна система моніторингу та оцінювання екологічного стану об'єктів агросфери, яка нині діє в Україні, потребує істотного удосконалення завдяки використанню можливостей, які надає сучасний рівень розвитку засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та ГІС геоінформаційних-технологій, що сприятиме інтеграції України в європейські та міжнародні проекти, зокрема GMES – Європейська система глобального моніторингу навколишнього середовища і забезпечення безпеки, GEOSS – глобальна «система систем» та інших ініціатив ESA і EEA з використання аерокосмічної інформації не лише у системі моніторингу, але й у виробничій сільськогосподарській діяльності. Отже, удосконалення традиційної системи моніторингу агроресурсів та оперативне інформаційне забезпечення АПК через впровадження технологій ДЗЗ сприятиме швидкому оновленню тематичних даних стосовно структури і агроєкологічного стану сільськогосподарських ландшафтів, систем землекористування, ґрунтового покриття, водних ресурсів, лісомеліоративних заходів, зрошуваних земель та посівів сільськогосподарських культур. Усе це створює умови для істотного удосконалення існуючої традиційної системи агроєкологічного моніторингу, що дасть змогу приймати своєчасні управлінські рішення на засадах відтворення агроресурсного потенціалу та підвищення конкурентоспроможності аграрного виробництва.

В Україні результати ДЗЗ було вперше використано для глобального оцінювання ландшафтів України, зокрема співвідношення необроблюваних (природних) територій, які піддаються сільськогосподарській діяльності, тобто території агросфери (О. О. Созінов та ін., 2005). Як показали отримані дані, частка агросфери займає близько 64% загальної площі. Таким чином, було встановлено, що переважна частина території України складається з агроландшафтів (АЛ), від екологічного стану яких залежать не лише умови проживання населення, але й продуктивність агроєкосистем, якість ґрунтового покриття та поверхневих вод, збереження ландшафтного різноманіття і в цілому сталий розвиток сільських територій. Але, крім глобального оцінювання в цілому агросфери, важливим є оцінювання прояву деградаційних процесів у кожному конкретному

агроландшафті, зокрема у межах водозбірних басейнів річок. Це стосується прояву ерозійних процесів на їх територіях, глобальної дегуміфікації ґрунтів, виснаження їх родючості і, як наслідок, – зниження їх продуктивності, забруднення поверхневих вод. Безумовно, що вирішення цих питань ґрунтуватиметься на результатах моніторингу прояву цих небезпечних явищ з використанням сучасних можливостей ДЗЗ/ГІС-технологій. А відтак сприятиме формуванню сталих агроєкосистем завдяки раціональному використанню наявного агроресурсного потенціалу, своєчасної адаптації аграрного виробництва до глобальних кліматичних змін і, як наслідок, забезпечення продовольчої безпеки країни, нарощування експортного потенціалу та сталого розвитку агропромислового комплексу в цілому.

Отже, удосконалення сучасної системи агроєкологічного моніторингу з метою інформаційного забезпечення агропромислового комплексу в умовах глобальної конкуренції, розповсюдження різноманітних деградаційних процесів та доволі швидких змін клімату є одним із ключових питань сталого розвитку аграрного виробництва на засадах інтегрованого управління земельними, водними і біологічними ресурсами.



Дистанційне зондування Землі в системі агро- екологічного моніторингу

Нині глобальна і регіональна інформація щодо сільського господарства потрібна для реагування на різні суспільні потреби. Наприклад, національна та міжнародна аграрна політика, глобальна торгівля і продовольча безпека значною мірою залежать від надійної та своєчасної інформації щодо виробництва сільськогосподарських культур. Розв'язується ця проблема через організацію моніторингових досліджень природного середовища. Система агромоніторингу повинна своєчасно надавати інформацію про стан агресурсного потенціалу, зокрема і посівів на локальному, регіональному та національному рівнях.

Супутникова моніторингова інформація щодо стану природних ресурсів, зокрема земельних, водних і біологічних, стала набувати все більшого значення у системі управління, прийняття рішень та прогнозних оцінок в аграрному секторі економіки

Дистанційне зондування у поєднанні із моделюванням може своєчасно надавати інформацію про стан агроєкосистем на великих територіях, у достатній просторовій деталізації і, що важливо, за економних витрат.

Досвід розвинутих країн, передусім США (програма FAS), країн ЄС (програма MARS), свідчить про високу ефективність використання супутникових даних у сфері управління та оперативного інформаційного забезпечення сільського господарства й управлінських структур різного адміністративного рівня.

1.1. ЗМІСТ ТА ЗАВДАННЯ АГРОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Термін «моніторинг» було введено у міжнародну наукову практику у 1971 р. Науковим комітетом з проблем довкілля Міжнародної ради наукових союзів. На той час моніторинг розглядали як метод одержання оперативних даних щодо особливостей впливу антропогенних факторів на водне та повітряне середовище біосфери [1]. Однак пізніше, з посиленням антропогенного тиску на природні ландшафти, зміст поняття «моніторинг» значно розширився і вже передбачав здійснення систематичних спостережень не лише за окремими, але й за всіма компонентами навколишнього середовища та об'єктами антропогенного походження за допомогою створення інформаційної системи [2,3].

У широкому розумінні, **моніторинг** – це система постійного спостереження за явищами та процесами, що відбуваються у довкіллі, результати якого спрямовано на обґрунтування управлінських рішень для безпеки людей та об'єктів економіки. У межах системи спостереження здійснюють оцінювання, контроль об'єкта, управління станом об'єкта залежно від впливу природних і антропогенних факторів середовища.

Предметом моніторингу є організація та функціонування системи моніторингу довкілля, оцінювання і прогнозування стану екосистем, їх елементів та характеру впливу на них природних та антропогенних факторів.

Об'єктами моніторингу залежно від рівня та мети досліджень є навколишнє середовище і його елементи, зокрема атмосферне повітря, підземні та поверхневі води, земельні ресурси, лісові ресурси, ґрунтовий покрив, сільськогосподарські угіддя, агроландшафти, урботериторії, інфраструктура агломерацій, заповідники, посіви сільськогосподарських культур, меліоровані землі, відходи життєдіяльності, несприятливі природні процеси.

Залежно від рівня управління розрізняють детальний, локальний, регіональний, національний, міжнародний та глобальний моніторинги.

Детальний моніторинг можна виконувати на території об'єднаної територіальної громади, об'єкта природно-заповідного фонду (біосферного заповідника, природного ландшафтного парку), водозбірної басейну малої річки чи фермерського господарства.

Локальний моніторинг – територіально можна проводити у межах окремого адміністративного району, водозбірного річкового басейну, території господарства, сівозміни і навіть поля.

Регіональний моніторинг – це система комплексних екологічних досліджень, що, як правило, функціонує у межах окремого фізико-географічного району.

Національний (державний) моніторинг – це система екологічного моніторингу, що функціонує завдяки реалізації різних за масштабами та призначенням видів моніторингу на території країни.

Міжнародний моніторинг – це система комплексних біосферних спостережень за станом природних і великих техногенних об'єктів, які виконуються за єдиними методологічними принципами та програмами.

Глобальний моніторинг – це загальнобіосферна система спостережень за станом компонентів довкілля загальнопланетарного масштабу, яку реалізують за єдиними програмами, визначеними міжнародними угодами та нормативними документами, переважно з використанням космічних апаратів.

Залежно від об'єкта та критеріїв спостереження розрізняють такі види моніторингу довкілля: санітарно-гігієнічний, геоекологічний, кліматичний, геофізичний і агроекологічний.

Агроекологічний моніторинг – це багатоцільова спостережно-інформаційна система за станом агроландшафтів, систем землекористування ґрунтового покриву, розвитку деградаційних процесів. Важливою складовою є спостереження за станом водних ресурсів, посівами, лісами, меліорованими територіями і поселенською інфраструктурою та іншими складовими агросфери. Актуальним у цьому відношенні є вивчення напрямів і швидкості розвитку процесів, що можуть негативно впливати на екосистеми та аграрне виробництво, вчасне виявлення негативних змін, їх оцінювання та прогнозу розвитку з метою відвернення кризових явищ і прийняття оптимальних управлінських рішень в аграрних виробничих системах.

До *об'єктів агроекологічного моніторингу* належать:

1. **Структура агроландшафтів і систем землекористування:** орні землі; пасовища; лісомеліоративні заходи; річки, ставки, водноболотні угіддя та інші їх структурні елементи.

2. **Ґрунтовий покрив:** ареали ґрунтових відмін, прояви і поширення деградаційних процесів, зокрема ерозії, дегуміфікації та

дефляції. Виявлення зон підтоплення, перезволоження та засолення, оцінювання еколого-меліоративного стану зрошуваних та осушуваних земель.

3. Рослинні ресурси: природні угіддя, структура посівних площ, сівозміни, стан посівів у різні періоди вегетації, прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур.

4. Зміни клімату та його просторово-часовий вплив на агро-екосистеми: просторове розповсюдження зміни температурного режиму, стан зволоження, процеси опустелювання, посушливі кризові явища, сніговий покрив, прояв низьких температур на стан перезимівлі озимих культур.

Світовий досвід використання даних космічного знімання та сучасних геоінформаційних технологій свідчить не лише про можливість і доцільність значного удосконалення системи агроекологічного моніторингу щодо стану природних ресурсів, сільськогосподарської статистики, зокрема підвищення точності, об'єктивності і частоти спостережень, але й дає змогу істотно удосконалити методи оперативного моніторингу та контролю агросфери в цілому. Завдяки об'єктивності дані дистанційного зондування використовують як елемент, що доповнює, узагальнює, деталізує і доповнює інформацію традиційних наземних джерел моніторингу.

Перевагами супутникового моніторингу є: оперативність робіт; оглядовість, тобто можливість обстеження у разі необхідності великих площ одразу, комплексність, яка полягає у можливості спостереження, оцінювання та прогнозу розвитку всіх характеристик та параметрів об'єктів. Можливість дослідження окремої території комплексно з визначенням усіх її елементів, а також виконувати детальний якісний та кількісний аналіз з використанням великої кількості індикаторів екологічних процесів і фіксацію на карті зон найбільшого тиску на довкілля і прояву кризових явищ.

Метою аерокосмічного моніторингу є спостереження, аналіз і відображення просторово-часових змін в агроландшафтах і системах землекористування для визначення їх динаміки на різних адміністративних рівнях – від окремих господарств до структури району, області і країни в цілому. У цьому відношенні важливим є оцінювання екологічного стану систем землекористування, ґрунтових і водних ресурсів, посівів, лісових насаджень в агроландшафтах, прояв різноманітних деградаційних та кризових явищ. Уся ця

інформація є підґрунтям прийняття обґрунтованих зважених управлінських рішень та їх оперативної корекції у системі агропромислового виробництва.

Основними завданнями моніторингу агросфери, засобами і методами аерокосмічного знімання є такі напрями:

- оперативне визначення структури агроландшафтів, посівних площ, сівозмін, стану посівів упродовж сезону вегетації та прогнозування їх продуктивності, особливо зернових культур;
- визначення динаміки змін структури агроландшафтів і систем землекористування;
- моніторинг ґрунтового покриву, розповсюдження деградаційних процесів земель, поверхневих вод та збереження біорізноманіття;
- моніторинг кризових явищ, процесів опустелювання та деградації агроресурсів;
- оцінювання впливу змін клімату на стан агроресурсів та продуктивність зональних агроecosистем;
- моніторинг меліорованих земель в аридній та гумідній зонах.

Згідно з переліком основних завдань аерокосмічного агромоніторингу та існуючих систем дистанційного зондування різного просторового розрізнення можливо виділити для кожного з рівнів агроecологічного моніторингу такі задачі і способи їх вирішення:

- на загальнодержавному (національному) та регіональному рівнях переважно використовують знімальні системи низького і середнього просторового розрізнення з метою:
 - визначення стану посівів у межах країни на регіональному та локальному рівнях упродовж сезону вегетації;
 - прогнозування врожаю основних сільськогосподарських культур у цілому по країні і для окремих регіонів;
 - визначення зон кризового стану агроecosистем;
- на локальному (адміністративний район) і детальному рівнях як правило використовують знімальні системи високого просторового розрізнення для вирішення задач:
 - визначення структури агроландшафтів для планування сталого розвитку територій об'єднаних сільських громад;
 - контролю систем землекористування;
 - визначення структури посівних площ;
 - контролю сівозмін;

- визначення площ посівів окремих культур у межах адміністративних одиниць або певних територій (статистичні показники за категоріями обліку);
- визначення стану посівів упродовж сезону вегетації у межах адміністративних одиниць або певних територій (зокрема формування біомаси, вологозабезпеченість, строкатість посівів, діагностика азотного живлення);
- встановлення територій кризового стану посівів, зокрема прояву посухи, вимерзання та визначення можливої шкоди;
- прогноз урожаю сільськогосподарських культур у межах адміністративних одиниць і в цілому по країні;
- моніторингу стану ґрунтів, зокрема визначення й оцінювання стану зон ерозійної деградації та дегуміфікації;
- контролю використання й управління зрошуваними та осушеними землями;
- інвентаризації агролісів, зокрема агролісомеліоративних об'єктів;
- інвентаризації багаторічних насаджень, у тому числі виноградників.

1.2. ОГЛЯД ДІЮЧИХ СИСТЕМ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ

Дослідження та розробка супутникового моніторингу сільськогосподарства почалися із системи Landsat-1 (ERTS) на початку 70-х років XX ст. У 1974 р. Міністерство сільськогосподарства США спільно з NASA та NOAA ініціювало експеримент з інвентаризації зернових культур «the Large Area Crop Inventory Experiment» (LACIE) [4,5]. Метою цього експерименту було вдосконалення методів прогнозування зернових культур [6]. На початку 80-х років минулого століття було розпочато програму AgRISTARS (Agriculture and Resource Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing – обстеження сільськогосподарства та інвентаризація ресурсів за допомогою аерокосмічного дистанційного зондування), яка використовувала можливості супутника NOAA з радіометром AVHRR (Advanced Highly Resolution Radiometer) здійснювати щоденний глобальний моніторинг. Завдяки дослідженням, проведеним у цих спільних програмах NASA–USDA, було виявлено значний потенціал

використання дистанційної просторової інформації для моніторингу та управління сільськогосподарськими угіддями.

Це дало підстави для створення систем супутникового моніторингу сільськогосподарських ресурсів на глобальному рівні для чотирьох основних напрямів:

- прогнозування виробництва сільськогосподарських культур;
- спостереження за змінами у землекористуванні та розповсюдження деградаційних процесів;
- дослідження впливу змін клімату на стан агроресурсів та в цілому сільськогосподарського виробництва;
- раннє попередження ризиків і загроз нестачі харчів на глобальному і регіональному рівнях.

Зараз існують глобальні та національні системи моніторингу агросфери засобами ДЗЗ. Зокрема, до глобальних належить GIEWS (The UNFAO Global Information and Early Warning System) – система глобальної інформації та раннього попередження ФАО (<http://www.fao.org/giews/earthobservation/>) [7]. GIEWS здійснює моніторинг стану основних продовольчих культур у всьому світі з метою оцінювання перспектив виробництва. Для підтримки аналізу та доповнення наземної інформації в системі використовують дані ДЗЗ, які можуть забезпечити отримання цінної інформації про стан вологозабезпечення та розвиток рослинності упродовж вегетаційного періоду. Окрім оцінювання опадів та NDVI, здійснюється визначення індексу аграрного стресу (ASI), що є оперативним індикатором для завчасного визначення сільськогосподарських угідь, які постраждали від посушливих явищ. Портал GIEWS Earth Observation забезпечує отримання цих даних на глобальному та національному рівнях. Сезонні показники, які використовують у системі, призначені для ідентифікації посівних площ з високою ймовірністю водного стресу. Ці індекси ґрунтуються на даних ДЗЗ про рослинний покрив та температуру поверхні суші, а також на інформації щодо глобальної маски посівів і вегетаційні цикли сільськогосподарських культур, отриманих за історичними даними. На остаточних картах виділено аномальний розвиток рослинності та потенційну посуху в посівах сільськогосподарських культур під час вегетаційного періоду. Всі вегетаційні показники на рівні країни ґрунтуються на 10-денних даних від METOP-AVHRR, NOAA-AVHRR і NOAA, FEWSNet і ECMWF. Дані та продукти до-

ступні через портал GIEWSEarthObservation, згруповані у сезонні глобальні показники (ASI, середнє VHI та ін.), глобальні показники (аномалії NDVI, VCI, VHI) та показники на рівні країн (опад, вегетаційні індекси, графіки).

Одним зі спільних проєктів NASA та Закордонної сільськогосподарської служби (FAS -Foreign Agricultural Service) департаменту сільського господарства США (USDA) є проєкт Global Agricultural Monitoring (GLAM) [8, 9]. Проєкт GLAM зосереджено на застосуванні даних, отриманих від інструмента NASA MODIS (спектрорадіометр з помірною роздільною здатністю) для надання інформації системі підтримки прийняття рішень FAS. Веб-портал GLAM цієї системи (<https://glam1.gsfc.nasa.gov/>) показує супутникову інформацію щодо стану рослинності по всьому світу на різних просторових рівнях (глобальному, країни, регіону), а веб-портал Crop Explorer (<https://ipad.fas.usda.gov/cropeexplorer/>) – інформацію щодо стану рослинності, посушливих явищ, вологості ґрунту, метеорологічних даних по різних регіонах світу. USDA FAS із системою GLAM нині є найбільшим постачальником регулярних, своєчасних, об'єктивних прогнозів стану рослинництва в глобальному масштабі завдяки глобальному покриттю даними спостереження Землі, а також інструментами аналізу для моніторингу стану рослин та оцінювання виробництва у глобальному масштабі, що є партнерством USDA з NASA [8]. Проєкт GLAM також відіграє провідну роль у компоненті Ag-07-03 сільськогосподарського моніторингу «Групи спостережень Землі» (GEO). GEO є складовою GEOSS (глобальної системи спостереження Землі), що надає інструменти підтримки прийняття рішень широкому колу користувачів.

GEO було започатковано розробку програми глобального сільськогосподарського моніторингу (GEOGLAM) як елемента GEOSS у відповідь на зростаючу потребу в поліпшенні сільськогосподарської інформації [9]. Мета GEOGLAM полягає у розширенні можливостей міжнародної спільноти виробляти і розповсюджувати актуальні, своєчасні та точні прогнози сільськогосподарського виробництва на національному, регіональному і глобальному рівнях за допомогою супутникових та наземних спостережень. Ця ініціатива спирається на наявні програми та ініціативи в галузі сільськогосподарства і моніторингу на національному, регіональному та глобальному рівнях, а також посилює і зміцнює їх через міжнародні

мережі, оперативно орієнтовані дослідження, обмін даними та методами. GEOGLAM випускає інформативний набір карт та діаграм, що описують фази вирощування сільськогосподарських культур, умови рослин за регіонами та кліматичні рушійні сили, що впливають на ці умови [10].

У рамках проекту USGS FEWS-NET було розроблено Систему раннього попередження USAIDFEWS (Early Warning and Environmental Monitoring Program) (<https://earlywarning.usgs.gov/>), портал якої надає доступ до геопросторових даних, продуктів супутникового зображення та похідних продуктів цих даних для підтримки діяльності з моніторингу посухи у всьому світі. На ньому доступні інструменти, що мають відношення до виробництва та прогнозування сільськогосподарських культур.

Map Viewer дає змогу користувачам візуалізувати часові ряди адміністративних та врожайних зон NDVI, декадні і сезонні сукупні опади. Програмне забезпечення Early Warning eXplorer (EWX) являє собою інтерактивний веб-інструмент картографування, який дає змогу користувачам візуалізувати оцінку опадів на рівні континентів (RFE), температуру поверхні землі (LST), дані про загальну кількість доступної води (TPW) та аномалії на різних етапах часу, а також аналіз часових рядів.

Монітор стану посухи (DSM) – це експериментальний інструмент підтримки прийняття рішень на основі умов погоди та інформації щодо сільськогосподарських культур. Він містить правила моніторингу посухи, які визначають узагальнений показник посухи на національному та субнаціональному рівнях. DSM доступний за адресою <http://earlywarning.usgs.gov/fews/dsm/index.php>.

GeoWRSI – програма є геопросторовою, автономною реалізацією моделі водного балансу конкретної культури для вибраного регіону світу. Отримані результати можуть бути використані при оцінюванні та контролі умов вирощування рослин упродовж сезону, або які можуть бути використані при моделюванні врожайності.

GeoCLIM – інструмент просторового аналізу, призначений для кліматологічного аналізу історичних даних про кількість опадів та температуру і може бути використаний для отримання й аналізу кліматичних даних, суміщення даних метеостанцій із супутниковими даними для створення більш точних наборів даних, аналізу сезонних тенденцій та візуалізації кліматичних даних.

Окрім наведених систем на сьогодні існує ряд інших як глобальних, так і регіональних оперативних систем моніторингу сільськогосподарства, що забезпечують критичну інформацію про сільськогосподарську продукцію у різних масштабах. Зокрема, це місія MARS FOODSEC [11] спільного науково-дослідного центру Європейської комісії – моніторинг продовольчої безпеки для груп ризику регіонів світу з програмою прогнозу врожайності і моніторингу посівів зернових MARS-Stat; GMFS (Global Monitoring for Food Security) – програма Європейського космічного агентства глобального моніторингу для продовольчої безпеки [12]; CSI-CGIAR (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group on International Agricultural Research) – консорціум із просторової інформації консультативної групи міжнародних сільськогосподарських досліджень.

Отже, у багатьох країнах пріоритетним є застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для: отримання оперативної та актуальної інформації про земельні ресурси, кризові і деградаційні явища, визначення водного режиму, стану посівів та прогнозування врожайності різних культур. Багато розвинених країн вже використовують космічну інформацію для господарської діяльності і створили національні ефективні системи оперативного інформаційного забезпечення сільськогосподарського виробництва [13].

У США Національною службою сільськогосподарської статистики здійснюється програма моніторингу орних земель як на рівні країни, так і на рівні штатів – Cropland Data Layer Program.

У Бразилії ще у 2003 р. розроблено Geosafra – національний проєкт сільськогосподарського моніторингу та прогнозування.

У Китаї створено CHARMS (China Agriculture Remote Sensing Monitoring System) – систему дистанційного моніторингу сільськогосподарства Китаю та China Crop Watch System – систему спостережень за зерновими культурами [14].

У Казахстані Міністерством сільського господарства, Національним центром космічних досліджень і технологій Національного космічного агентства з 2002 р. створено систему оперативного моніторингу врожаю засобами дистанційного зондування Казахстану [15].

У Росії з 2003 р. Міністерством сільського господарства здійснюються заходи щодо створення системи дистанційного моніторингу земель сільськогосподарського призначення (СДМЗ).

Аналогічні системи розроблено і в інших країнах: Франції, Великій Британії, Німеччині, Австралії, Індії, Польщі, Угорщині, Чехії та ін.

Одними із сучасних тенденцій у розробці систем супутникового моніторингу сільськогосподарських ресурсів є інтеграція і застосування даних різної природи, відповідних прогностичних моделей, наприклад, у межах програм Copernicus, GEOSS.

1.3. СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ ДЗЗ В СИСТЕМІ АГРАРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Агропромисловий комплекс України має пріоритетне значення для продовольчої безпеки, розв'язання соціально-економічних проблем, здоров'я населення, реалізації продукції на світовому продовольчому ринку та сталого розвитку держави в цілому. Сільськогосподарське виробництво здійснюється на величезній території і потребує адекватних засобів контролю агресурсного потенціалу. Землі сільськогосподарського призначення займають близько 43 млн га, або понад 70% території, а орні землі – до 32 млн га. Входження у світовий економічний простір потребує підвищення конкурентоспроможності аграрного виробництва, розробки та запровадження нових інформаційних агротехнологій, більш досконалих методів контролю за станом агресурсів та їх управління.

Але нині чинна система науково-інформаційного забезпечення національного АПК ґрунтується в основному на недостатньо оперативних, трудомістких і витратних методах збору, зберігання, обробки та аналізу інформації про стан агросфери. Затримка з її надходженням на різні адміністративні рівні та виробничі структури негативно впливає на якість і своєчасність прийняття управлінських рішень та запровадження більш досконалих агротехнологій. Однак, як було наведено вище, не повною мірою використовують такі ефективні методи оперативного контролю агресурсів як сучасні засоби дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космосу, що широко застосовують у світовій практиці. Без впровадження матеріалів ДЗЗ у систему контролю стає проблематичним покращення якості інформаційного забезпечення сільськогосподарського виробництва та відповідно інтеграції національного АПК у міжнародні глобальні проекти. Отже, удосконалення традиційної системи моніторингу

агроресурсів як складової державної системи моніторингу довкілля через застосування ДЗЗ/ГІС-технологій є надзвичайно актуальним завданням як для галузі сільського господарства, так і державної системи моніторингу довкілля.

Особливо актуальним у цьому відношенні є аналіз динаміки зміни кліматичних чинників, просторового розповсюдження деградаційних процесів опустелювання та деградації агроландшафтів, збереження їх різноманіття, удосконалення систем землекористування та агротехнологій, зокрема для потреб точного землеробства. Важливим є спостереження за станом посівів і прогнозування їх урожайності та валових зборів, зокрема зернових культур, а також отримання даних офіційної сільськогосподарської статистики, контролю та перевірки надання субсидій і страхування.

В операційних системах супутникового моніторингу сільськогосподарських ресурсів простежується тенденція щодо інтеграції і застосування даних різної природи, відповідних прогностичних моделей, наприклад, у межах програм GMES, GEOSS.

В Україні подібні системи не розробляють, хоча необхідні передумови є. Попри наявність потужного аграрного потенціалу та значної кількості установ, які мають певні напрацювання усфері застосовування супутникових даних в інтересах агропромислового комплексу, і досі не розроблено єдиної державної системи супутникового моніторингу агроресурсів.

В Україні методи дистанційного моніторингу сільгоспкультур почали опрацьовувати ще у 80- і 90-х роках минулого століття Держкомгідромет та створеним у системі Міністерства сільського господарства колишнього СРСР, зокрема філіал Всесоюзного науково-дослідного центру «Агроресурси» – інститут УкрНДПТІ «Агроресурси». Моніторинг проводили у вигляді щорічних аеровізуальних обстежень стану посівів озимих зернових культур у весняний і осінній періоди вегетації. При проведенні аеровізуальних обстежень часто використовували засоби відеознімання з літаків. Із середини 90-х років ХХ ст. у зв'язку із значним збільшенням вартості авіаційного обслуговування ці обстеження припинили.

На початку 90-х років минулого століття в УкрНДПТІ «Агроресурси» розробляли концептуальні положення щодо впровадження матеріалів аерокосмічного знімання в загальну систему агромоніторингу [16]. Зокрема, було визначено перелік сільськогосподарських

об'єктів, які доцільно досліджувати засобами аерокосмічного зондування, поставлено задачі дистанційного моніторингу та вимоги до нього. Передбачалося, що система інформаційного забезпечення дистанційного моніторингу буде ґрунтуватися на розробленій для території України мережі великих аерокосмічних полігонів (АКП) і тестових ділянок (ТД) та зон їх обслуговування, а отримані при проведенні за мережею АКП і ТД синхронних наземних та аерообстежень з відеосупроводом дані про стан посівів та їх продуктивність будуть екстраполюватися на території зон обслуговування. Розробляли методичні підходи та прийоми візуально-інструментального й автоматизованого дешифрування багатозональних зображень з оцінювання стану посівів польових культур і рівня їх пошкодження метеорологічними і біологічними факторами та стану ґрунтів.

Водночас методичні розробки щодо окремих елементів дистанційного моніторингу посівів сільськогосподарських культур авіаційними спектрометричними засобами знімання виконували в Українському науково-дослідному гідрометеорологічному інституті (УНДГМІ) [17,18]. За результатами досліджень було розроблено удосконалену методику визначення наземної фітомаси за даними авіаційних спектрофотометричних спостережень для території України.

Опрацювання методів радіолокаційно-радіометричного зондування сільськогосподарських посівів та стану ґрунтів, розробка і створення авіаційного апаратного комплексу АДЗ здійснювали у Центрі радіофізичного зондування Землі (ЦРЗЗ) ім. А.І. Калмикова НАН України.

З 1997 р. Інститут статистики Держкомстату України розпочав роботи з розробки методів і технологій використання даних космічного знімання для отримання статистичних показників площ, стану і продуктивності посівів з використанням територіальної вибіркової мережі [19], які з 2006 р. було продовжено в Інституті агроєкології і природокористування (ІАіП) НААН [20].

Варто зауважити, що за останні 10–15 років в установах НАН України та НААН, Державного космічного агентства, Мінагрополітики України виконувалися розрізнені дослідження з використання методів ДЗЗ в аграрному виробництві та природокористуванні. З метою консолідації цих наукових розробок та координації науково-дослідних робіт у майбутньому Інститутом агроєкології і природо-

користування НААН разом із ДП «Дніпрокосмос» Державного космічного агентства розроблено Концепцію науково-технічної програми «Моніторинг агроресурсів і прогнозування їхнього стану з використанням даних ДЗЗ» (скорочена назва «Агрокосмос»), яка була першим кроком до створення державної інтегрованої інформаційної системи моніторингу агроресурсів з використанням супутникових даних. У рамках програми науково-дослідних робіт Національної академії аграрних наук України розроблено науково-методичне і нормативне забезпечення створення та функціонування наземного інформативного блоку супутникового агроекологічного моніторингу та методичне забезпечення з екологічного оцінювання агроландшафтів, визначення статистики площ, стану і продуктивності посівів, контролю сівозмін, визначення ерозійної деградації агроландшафтів та ґрунтового покриття [21–23]. Виконано аналіз та прогноз впливу змін клімату на врожайність і валові збори зернових культур на ближню і віддалену перспективу в рамках проекту «Проведення просторової оцінки ступеня сприятливості майбутніх кліматичних умов для продуктивності зернових культур і лісових насаджень». У 2008–2011 рр. сумісно із ДП «Дніпрокосмос» проведено НДР з апробації методичного забезпечення та створення автоматизованої технології класифікації посівів на території трьох тестових районів, розташованих у різних агроландшафтних умовах, зокрема Миронівського Київської області, Канівського Черкаської області і Магдалинівського Дніпропетровської області.

За технологією і методикою MARS в УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого здійснено моделювання процесу росту та розвитку окремих сільськогосподарських культур і агрометеорологічний прогноз урожайності основних культур для адміністративних районів України. Ці роботи сприяють інтеграції України в міжнародну систему MCYFS (система прогнозу врожайності на основі програми MARS). За результатами моделювання формують кількісні прогнози врожайності, які друкують у бюлетенях.

Національним науковим центром «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» започатковано роботи з моніторингу різноманітних характеристик ґрунту та створення відповідних інформаційних баз даних, електронних ґрунтових карт з використанням супутникових даних. Проводиться підготовка до чергового великомасштабного обстеження ґрунтів на засадах ДЗЗ/ГІС. Інсти-

тут водних проблем і меліорації НААН здійснює розробки щодо використання даних ДЗЗ при інтегрованому управлінні водними та земельними ресурсами на типових зрошувальних системах, виконувалася низка проектів з країнами Євросоюзу (Нідерланди, Бельгія, Фінляндія) стосовно розробки методик використання даних ДЗЗ для визначення стану посівів в умовах зрошуваних земель, показників стійкості агроландшафтів та водних і енергетичних балансів зрошуваних земель.

Важливими для аграрного виробництва є результати досліджень, отримані у Центрі аерокосмічних досліджень Землі (ЦАКДЗ) Інституту геологічних наук (ІГН) НАН України, Інституті космічних досліджень НАН України, а також в аграрних університетах, зокрема Національному університеті біоресурсів і природокористування України.

У 2000–2001 і 2006–2010 рр. інститутами НАН України і НААН, Держкомстатом України, а саме ЦАКДЗ ІГН НАН України, Інститутом географії НАН України, Інститутом агроєкології і природокористування НААН, Інститутом статистики Держкомстату та ДП «Дніпрокосмос» сумісно виконувалася низка інноваційних і міжнародних проектів за підтримки програмами Tacis Bistro та INTAS, спрямованих на застосування космічних технологій для підтримки сільськогосподарської реформи у сфері сільськогосподарської статистики та впровадження інформаційних технологій дистанційного моніторингу стану рослинного покриву і створення автоматизованої технології класифікації посівів культур [24]. У 2009 р. за підтримки Міністерства аграрної політики та продовольства України і Державного національного космічного агентства Інститут агроєкології і природокористування НААН спільно із ДП «Дніпрокосмос» та фірмою AG RapidEye (Німеччина) реалізували пілотний проект «Моніторинг аграрних ресурсів з використанням даних RapidEye» (AGRO-UA).

У цілому, за останні роки до справи супутникового моніторингу аграрного потенціалу залучалися понад 12 установ та організацій. Але, попри значний обсяг проведених наукових досліджень, їхні результати залишаються розділеними, малопов'язаними між собою, не доведеними до системного та технологічного застосування у виробничій діяльності, а також створенні галузевої системи супутникового агроєкологічного моніторингу.

Питання недоведеності використання космічної інформації в управлінській і виробничій діяльності АПК пов'язано з необхідністю забезпечення функціонування систем агромоніторингу потужними обчислювальними ресурсами, системами зберігання баз даних, спеціалізованим програмним забезпеченням оброблення супутникових і різноманітних тематичних даних та моделювання прогнозного оцінювання. Особливо важливим у цьому відношенні є створення системи тестових аграрних полігонів для отримання калібрувальної інформації і валідації моделей та методик, а також адаптації напрацьованих в ЄС моделей і методик та їх впровадження в інформаційну систему супутникового агроекологічного моніторингу.

Перспективи розвитку вітчизняних засобів космічного знімання, значна кількість існуючих різноманітних закордонних систем космічного спостереження, що забезпечують можливість отримання даних ДЗЗ на регулярній основі, наявність високого наукового кадрового інтелектуального потенціалу створюють передумови для реалізації вітчизняної системи оперативного дистанційного агроекологічного моніторингу. Ця масштабна робота потребує координації науково-дослідних робіт наукових установ Національної академії наук України, Національної академії аграрних наук України, Мінагрополітики України, Мінприроди України, Державного космічного агентства, університетів та виробничих структур.

Найдоцільніше розв'язувати цю важливу проблему через створення міжвідомчого інформаційно-аналітичного центру «Агрокосмос» на базі Інституту агроекології і природокористування НААН. Важливим є також організація в його складі мережі тестових аграрних полігонів і сівозмін, які доцільно розмістити на території дослідних господарств Національної академії аграрних наук України.

Література до розділу 1

1. Герасимов И.П. Научные основы современного мониторинга окружающей среды. *Известия АН СССР. Серия география*. 1975. № 3. С. 13–25.
2. Last J. (1993). Global change: Ozone depletion, greenhouse warming, and public health. *Annual Review of Public Health*. Vol. 14:115–136.
3. Коломісць В.Ф. Міжнародні інформаційні системи: підручник; за ред. проф. В.П. Гондюла. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2001. 458 с.
4. Macdonald R.B., Hall F.G. (1980). Global crop forecasting. *Science*. Vol. 208: 670–679.
5. Bauer M.E. LACIE: (1979). An experiment in global crop forecasting. *Crops Soils Mag*. Vol. 31: 5–7.
6. Pinter P.J. Jr., Ritchie J.C., Hatfield J.L., Hart G.F. (2003). The agricultural research service's remote sensing program: An example of interagency collaboration. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*. Vol. 69: 615–618.
7. UN Food and Agriculture Organization (FAO) Global Information and Early Warning System (GIEWS). URL: <http://fao.org/giews>
8. Бондар О.І., Тараріко О. Г., Браєвич І. М. та ін. Впровадження європейських стандартів і нормативів у Державну систему моніторингу довкілля України: наук.-метод. посіб. Київ: Інрес, 2005. 272 с.
9. Soares J., Williams M., Jarvis I. et al. (2011). The G20 Global Agricultural Monitoring Initiative (GEO-GLAM). *Technical Report*: 16.
10. Becker-Reshe I., Justice C.O., Sullivan M. J. et al. (2010). Monitoring global croplands with coarse resolution Earth observation: The Global Agriculture Monitoring (GLAM) project. *Remote Sens*. N 2: 1589–1609.
11. Monitoring Agricultural ResourceS (MARS). Joint Research Center, European Commission: Ispra Italy. URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/monitoring-agricultural-resources-mars>
12. Global Monitoring of Food Security (GMFS) Program of the European Union. URL: <http://gmfs.info>

13. *Review of the available remote sensing tools, products, methodologies and data to improve crop production forecasts.* (2017). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome: 94.
14. *Institute of Remote Sensing Applications (IRSA) of the Chinese Academy of Sciences (CAS). China Crop Watch Program.* URL: <http://cropwatch.com.cn/en>
15. *Жантаев Ж.Ш., Абсаметов М.К., Бекмухамедов Б.Э. и др.* Современное состояние и перспективы развития дистанционного зондирования Земли в Национальном центре космических исследований и технологий Республики Казахстан. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 2. № 5. С. 77–88.
16. *Шевченко А., Сиротенко О.* Концепція аерокосмічного зондування агрономічних ресурсів в Україні. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Геодезія, картографія та аерофотознімання».* 1997. Вип. 58. С. 149–151.
17. *Антоненко В.С., Гаценко Р.В.* Оценка состояния посевов и прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине по данным многоспектральной космической съемки. *Наук. пр. УкрНДГМІ.* 2005. Вип. 254. С. 55–71.
18. *Антоненко В.С.* Дистанционная инструментальная оценка состояния посевов озимой пшеницы в начальные периоды вегетации. *Труды УкрНИГМИ.* 2001. Вип. 249. С. 221–229.
19. *Сиротенко О.В.* Система аерокосмічного сільськогосподарського агромоніторингу. Система дослідження та моделювання в землеробстві : зб. наук. пр. Київ: Нива, 1998. С. 286–293.
20. *Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Демидов О.А. та ін.* Методичні рекомендації зі створення мережі тестових аграрних полігонів в системі спостережень за посівами за матеріалами космічної інформації. Київ: Інститут агроекології і природокористування НААН. 2010. 30 с.
21. *ДСТУ 7307:2013.* Дистанційне зондування Землі з космосу. Наземні дані щодо контролю стану посівів і продуктивності сільськогосподарських культур. Загальні вимоги. Чинний від 01.01.2014.
22. *Тараріко О.Г., Демидов О.А., Андрущенко А.В. та ін.* Методичні рекомендації з агроекологічної оцінки структури агроланд-

шафтів і систем землекористування за даними дистанційного зондування Землі високого просторового розрізнення. Київ: Інститут агроєкології і природокористування НААН, 2012. 33 с. DOI: 10.5281/zenodo.1401212

23. *Методичні рекомендації з визначення та ідентифікації водної ерозії ґрунтів в агроландшафтах за даними космічного знімання високого просторового розрізнення*. Київ. Інститут агроєкології і природокористування НААН, 2013. 31 с. DOI: 10.5281/zenodo.1401255
24. *Бродский Л., Бушуев Е.И., Волошин В.И. и др.* Проект INTAS по разработке автоматизированной технологии классификации земных покрытий: научные задачи, основные результаты и перспективы. *Косм. наука технол.* 2009. Т. 15. № 2. С. 36–48. URL: <https://doi.org/10.15407/knit2009.02.036>



Система інформаційного забезпечення дистанційного агромоніторингу

2.1. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ АГРОСФЕРИ

Дистанційне зондування Землі – це процес одержання інформації про стан об'єктів земної поверхні за даними вимірювань, отриманих на відстані від об'єкта, тобто без прямого контакту з об'єктом, за допомогою реєстрації електромагнітного випромінювання, яке відбивається, поглинається чи розсіюється розміщеними на ній об'єктами.

Поширення електромагнітного випромінювання здійснюється за допомогою електромагнітних хвиль. Прикладами електромагнітних хвиль є світло, радіохвилі, рентгенівські промені, гамма-промені. Електромагнітна хвиля характеризується частотою та хвильовим вектором k , що визначає напрямок поширення електромагнітної хвилі, а також її довжину. Залежно від частоти чи довжини хвилі (ці величини пов'язані між собою), електромагнітні хвилі належать до певного спектрального діапазону (див. вкл. рис. 1) [1].

Електромагнітні хвилі з найменшою частотою (або найбільшою довжиною хвилі) належать до радіодіапазону. Останній використовують для передачі сигналів на відстань за допомогою радіо, телебачення, мобільних телефонів. У радіодіапазоні працює радіолокація. Радіодіапазон поділяють на метровий, дециметровий, сантиметровий, міліметровий залежно від довжини електромагнітної хвилі.

Електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі від 400 до 760 нм належить до діапазону видимого світла. Залежно від частоти і довжини хвилі видиме світло розрізняють за кольорами (рис. 2.1).

Електромагнітні хвилі з частотою, вищою за 760 нм, належать до інфрачервоного діапазону, де знаходиться теплове випромінювання тіла.

Хвилі з довжиною, меншою за 400 нм, називають *ультрафіолетовими*. Людське око їх не розрізняє, хоча їхні властивості не дуже відрізняються від властивостей хвиль видимого діапазону. Більша частота, а отже, й енергія квантів такого світла призводить до більш руйнівної дії ультрафіолетових хвиль на біологічні об'єкти.

Випромінювання поділяють на *природне* та *штучне*. Під *природним* випромінюванням розуміють природне освітлення земної поверхні Сонцем або теплове – власне випромінювання Землі. *Штучне* випромінювання це випромінювання, яке створюється при опроміненні джерелом (пристроєм реєстрації), розташованим на носії. Таким чином, залежно від джерела електромагнітного випромінювання інструментальні методи ДЗЗ поділяють на *пасивні*, де джерелом випромінювання є Сонце, та *активні*, для яких джерелом випромінювання є самі сенсорні системи, які забезпечують первинне опромінення земної поверхні з подальшою реєстрацією відбитого від об'єкта сигналу. До таких систем належать лазерні радарні системи, локатори бічного огляду, локатори із синтезованою апертурою тощо.

Важливою особливістю ДЗЗ є наявність проміжного середовища між об'єктами і приладами реєстрації (супутниковими сенсорами), що впливає на випромінювання, зокрема це атмосфера та несприятливі метеорологічні явища. Атмосфера поглинає частину відбитих променів і пропускає промені певних довжин хвиль. Ділянки спектра, в межах яких електромагнітні хвилі добре проходять крізь атмосферу, досягаючи прийомних пристроїв систем дистанційного зондування, називають *вікнами прозорості атмосфери* (рис. 2.1, а). Тому всі знімальні системи працюють тільки в тих спектральних діапазонах, які відповідають вікнам прозорості, зокрема від оптичних хвиль до радіохвиль у діапазоні довжин 0,3 мкм – 3 м (рис. 2.1, б). Причому для об'єктів агросфери найбільшу інформативність має видимий і ближній інфрачервоний діапазон.

Потік сонячної радіації, що приходить у ландшафтну оболонку (після проходження шару атмосфери), ділиться на декілька частин: частина радіації поглинається природними об'єктами, інша – ними пропускається, а третя – відбивається. Завдяки тому, що енергетичне співвідношення між цими трьома складовими для різних природ-

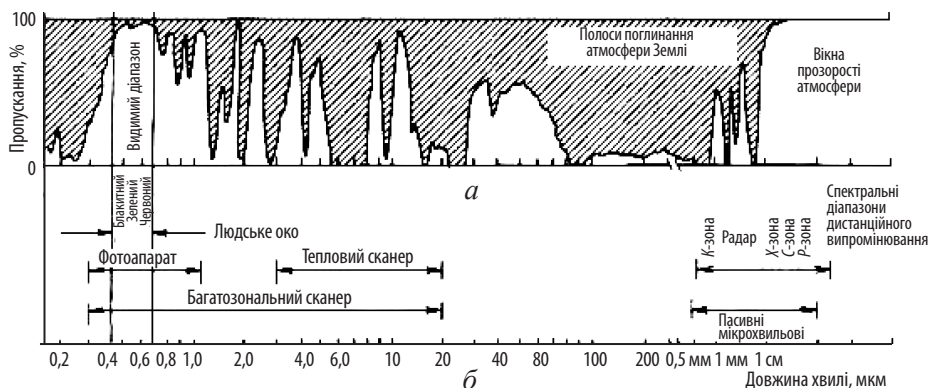


Рис. 2.1. Вікна прозорості атмосфери (а) і спектральні діапазони дистанційного зондування (б) [15]

них об'єктів різне, око людини здатне їх розрізнити. Цю взаємодію електромагнітного випромінювання із землею поверхнею можна визначити за формулою:

$$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda),$$

де E_i – спадаючий потік енергії; E_r – відбитий потік енергії; E_a – адсорбована (поглинена) енергія; E_t – передана (пропущена далі у напрямі поширення) енергія.

Поглинутим випромінюванням є та частина світлового потоку, яка, потрапляючи в об'єкт, трансформується в енергію інших видів. Поглинальна здатність більшості природних об'єктів спектрально селективна. Наприклад, рослини поглинають головним чином випромінювання голубої і червоної зон спектра, що використовуються в процесі фотосинтезу. В об'єктах неживої природи поглинута променева енергія перетворюється в теплову, механічну і хімічну. Частина поглинутої енергії, яка йде на нагрівання поверхні, повертається у простір у вигляді теплового випромінювання, що перебуває в інфрачервоній частині спектра.

Енергія відбитого об'єктами випромінювання в загальному вигляді складається з двох частин: енергії випромінювання відбитого безпосередньо поверхнею об'єкта, і енергії випромінювання, розсіяного внутрішніми структурними складовими об'єкта.

Друга складова відбитої енергії зумовлена проходженням падаючого світлового потоку в середину об'єкта, вибіркоvim його поглинанням і подальшим розсіюванням внутрішніми елементами об'єкта у верхню півсферу частини світлового потоку, що не поглинута об'єктом. Ці внутрішні елементи природних об'єктів вельми різноманітні як за фізико-хімічними властивостями, так і за розмірами. Геосистеми ландшафту є середовищем особливо складного багатоярусного розсіювання випромінювання [3]. Інформацію про спектральні відбивні властивості об'єкта закладено саме у другій складовій відбитого випромінювання, оскільки розсіяна внутрішніми елементами радіація є результатом взаємодії падаючого випромінювання з «товщею» речовини об'єкта [4]. Випромінювання, яке потрапило в об'єкт і перетворене в результаті вибіркового поглинання, має селективний спектральний склад, характерний для речовини з певними властивостями (рис. 2.2, а).

Відбивну здатність об'єкта характеризують сукупністю деяких параметрів. Зокрема, коефіцієнт повного відбиття, або альbedo об'єкта A – відношення світлового потоку, що відбивається даною поверхнею в усіх напрямках F , до повного потоку, який поступає на досліджувану поверхню F_0 [4]:

$$A = F/F_0.$$

Оскільки природні об'єкти в загальному випадку мають вибіркoве поглинання, то відбите від них випромінювання спектрально селективне. Спектральну відбивну здатність об'єктів описують на-

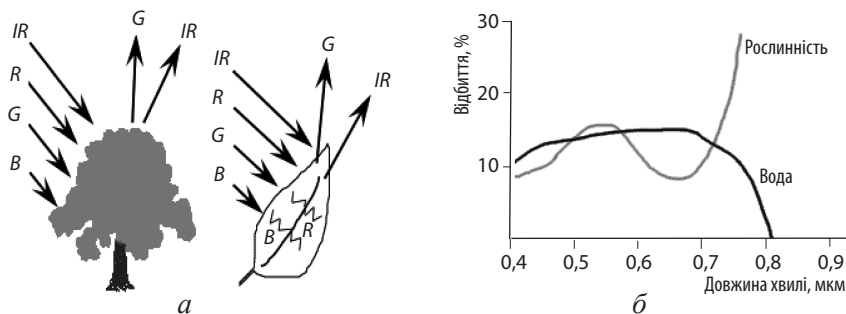


Рис. 2.2. Взаємодія електромагнітного випромінювання із наземними об'єктами (а) і спектральні криві (б):

B – синя частина спектра, діапазон довжин хвиль 0,4–0,48 мкм; G – зелена – 0,5–0,56; R – червона – 0,62–0,74; IR – інфрачервона – 0,74–2000 мкм

бором коефіцієнтів спектральної яскравості r_λ , які є відношенням спектральних яскравостей об'єкта B_λ та ідеальної поверхні розсіювання (еталона) $B_{0\lambda}$, що знаходяться в однакових умовах освітлення і спостереження [5]:

$$r_\lambda = B_\lambda / B_{0\lambda}.$$

Зміни значень коефіцієнтів спектральної яскравості залежно від довжини хвилі електромагнітного спектра описують графіком – спектральною кривою (рис. 2.2, б). Спектральна характеристика (відбивна здатність) різних природних об'єктів є різною, а відтак, аналізуючи зображення у різних спектральних діапазонах, можна ідентифікувати ті чи інші елементи ландшафтів або визначати їх стан.

Візуальне визначення окремих об'єктів земної поверхні й отримання їх диференційованого зображення на знімках залежить від їх контрасту. Контраст яскравості K між двома об'єктами являє собою відношення різниці яскравості цих об'єктів ($B_1 - B_2$) до їх суми, тобто:

$$K = (B_1 - B_2) / (B_1 + B_2).$$

Спектральні відбивні властивості рослинного покриву, в тому числі посівів сільськогосподарських культур, визначають п'ятьма фізичними чинниками [6,7]: оптичними властивостями компонентів покриву, морфологією, відбивними властивостями ґрунту, напрямками освітлення і візування, оптичними властивостями атмосфери.

Взаємодія світла з рослинним покривом є функцією його геометричної структури. Структура рослинного покриву є головним чинником, що визначає перенесення випромінювання всередині покриву і від нього. Для оцінювання відбивних властивостей рослинного покриву важливі такі фізичні параметри: загальна площа фітоелементів (відбиваючих органів), їх орієнтація та їх відносне положення у просторі.

Спектральні характеристики рослин визначають здатністю їх листя відображати, поглинати і пропускати сонячну енергію. Відбиття у видимій області спектра визначають концентрацією пігментів, у ближній інфрачервоній області – щільністю структури мезофілу, а в середній ІЧ-області домінуючий вплив на відбиття має вміст води у тканинах. Біохімічні та морфологічні параметри визначають ступінь поляризації, величину інтегральної інтенсивності, її спект-

ральний та кутовий розподіл і є першопричиною змін характеристик відбиття залежно від виду рослин, стадії розвитку, старіння та стресів. Спектральні характеристики відбиття листків є інформативною основою для вирішення обернених задач – визначення за допомогою них фізіологічних та морфологічних параметрів.

У синій (0,4–0,48 мкм) і червоній (0,6–0,7 мкм) областях спектра відбивна здатність листка дуже низька (рис. 2.3). Ця низька відбивна здатність відповідає двом смугам поглинання хлорофілу. У зеленій області довжин хвиль (~0,54 мкм) через відносну відсутність поглинання знаходиться максимум відбивної здатності. Здорова рослинність у цій області довжин хвиль сприймається оком як зелена. У стані стресу утворення хлорофілу зменшується, поглинання енергії рослинами у смугах поглинання хлорофілу падає і листя здається жовтуватим. Цю властивість рослинності ефективно використовують при виявленні хвороб рослин та інших чинників, що призводять рослинність у стресовий стан. У ближньому ІЧ-діапазоні довжин хвиль (~0,7 мкм) відбивна здатність рослинності помітно збільшується. У цьому діапазоні здорова зелена рослинність вирізняється дуже високою відбивною здатністю (~45–50%), дуже високим коефіцієнтом пропускання (~45–50%) і дуже низьким поглинанням (менше 5%). З погіршенням стану рослинності її відбивна здатність у зеленому та БІЧ-діапазонах знижується, що відображається на спектральній кривій. Інтенсивність поглинання-відбиття хвиль певної довжини також залежить від типу рослинності та структури листка. Рослини з більш шорсткою структурою у ближньому ІЧ-діапазоні мають більший коефіцієнт відбиття, аніж рослини з більш щільними листками.

У середньому ІЧ-діапазоні на спектральні характеристики зеленої рослинності впливають смуги сильного водного поглинання на довжинах хвиль 1,4, 1,9 і 2,7 мкм, а максимуми відбивної здатності знаходяться приблизно при 1,6 і 2,2 мкм між зонами водного поглинання. Ступінь поглинання рослинністю падаючої сонячної енергії в середньому ІЧ-діапазоні є функцією загальної кількості води, наявної в листках, яке, у свою чергу, є функцією вмісту вологи у листках і товщини листка. При зменшенні вмісту вологи у листках їх відбивна здатність у середньому ІЧ-діапазоні довжин хвиль помітно збільшується.

У видимій, ближній інфрачервоній і середній інфрачервоній частинах спектра виявляються чіткі відмінності відбивної здатності. У

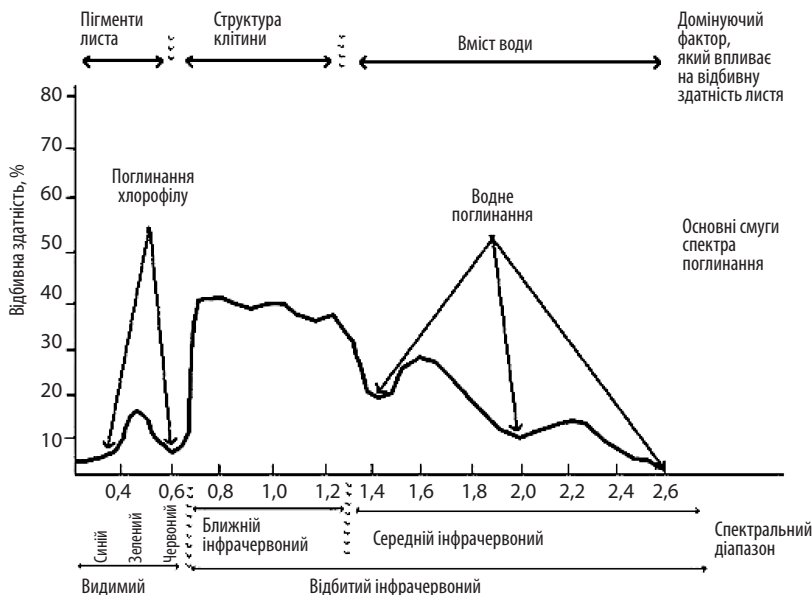


Рис. 2.3. Основні характеристики спектрального відгуку зеленої рослинності

видимому діапазоні довжин хвиль домінуючим чинником є пігментація листа. Внутрішня структура листка впливає на рівень відбивної здатності у ближньому ІЧ. Загальний вміст вологи у рослинності впливає на відбивну здатність у середньому інфрачервоному діапазоні; велика частина падаючої енергії поглинається водою, наявною в листках, а інша її частина відбивається.

При дослідженні оптичних властивостей агрофітоценозів розглядають не окремі рослини, а систему ґрунт–рослинність, спектральний образ якої залежить як від оптичних характеристик рослинності, так і ґрунтів. Згідно з Харінім [8] при побудові кривих СКЯ-рослинності достатньо вибрати значення R_λ на шести характерних довжинах хвиль: 500, 550, 600, 660, 755, 845 нм.

Оптичні характеристики ґрунтового покриття. Згідно з першими дослідженнями спектрометричних характеристик природних об'єктів Кріновим [9] було виділено чотири типи кривих СКЯ-ґрунтів:

- *тип 1* – крива, що рівномірно підіймається у напрямку червоної ділянки спектра ($r_\lambda = 0,022 - 0,071$); $\gamma = 1,64$;

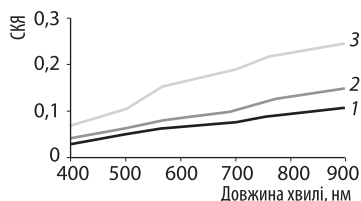


Рис. 2.4. Спектральні характеристики ґрунтів:

1 – чорноземи потужні;
2 – темно-сірі;
3 – дерново-підзолисті

- *тип 2* – крива, що рівномірно підіймається у тому самому напрямку у видимій частині спектра і з більш крутим підйомом в інфрачервоної ділянці спектра. Уся крива розташована вище кривої 1 типу ($r_\lambda = 0,064 - 0,270$); $\gamma = 1,67$;
- *тип 3* – крива має більш крутий підйом і опуклість на ділянці спектра 550–650 нм. Уся крива розташована ще вище;
- *тип 4* – опукла крива з крутим підйомом. Розташована значно вище всіх трьох попередніх типів ($r_\lambda = 0,357 - 0,753$); $\gamma = 1,95$.

Характерним для всіх типів кривих є збільшення значень відбивної здатності зі збільшенням довжини хвилі (рис. 2.4). Це є однією з найважливіших характеристик відбивної здатності ґрунтів. Найяскравіше виражена спектральна характеристика ґрунтів у червоній частині спектра, ближньому, середньому і тепловому діапазонах інфрачервоного випромінювання. Якісні і кількісні відмінності спектральних характеристик різновидів ґрунтів у цих діапазонах дають змогу розпізнавати їх і дешифрувати.

Колір ґрунтів є важливою діагностичною ознакою, який характеризує різні їх властивості. Чорне забарвлення є ознакою накопичення у ґрунті гумусу, а також деяких сульфідів, оксидів марганцю, деревного вугілля, магнетита тощо. Білий відтінок ґрунту пов'язаний з наявністю у ньому чотирьох найпоширеніших компонентів кварцу, каолініту, вапна і водорозчинних солей. Жовте забарвлення характерне для ґрунтів, що містять велику кількість оксидів заліза і передусім лимоніту.

На спектральний коефіцієнт відбиття ґрунту впливають такі властивості ґрунту, як:

- *текстура ґрунту* – під текстурою розуміють співвідношення фракцій механічного складу ґрунту. Відповідна кількість цих фракцій визначає назву текстури (піщана, глиниста, пилуватий суглинок і т.д.). Спектральна відбивна здатність ґрунту залежить від її текстури, тобто від впливу текстури на здатність

грунту утримувати вологу. Розмір частинок ґрунту також сильно впливає на відбивну здатність. Якщо інші чинники постійні, то із зменшенням розміру частинок ґрунт має більш гладку поверхню і тим більше падаючої енергії відбивається від неї;

- *вміст води* – з підвищенням вологості зменшується спектральна яскравість усіх ґрунтів незалежно від довжини хвилі випромінювання. Вологі і мокрі ґрунти на багатозональних зображеннях завжди мають темніші тони, ніж аналогічні сухі ґрунти;
- *шорсткість поверхні* – чим менше шорсткість ґрунту, тим вище відбивна здатність. На нерівностях ґрунту – в порах і міжпоровому просторі – виникає багатократне віддзеркалення, що приводить до збільшення поглинання енергії падаючого потоку випромінювання і відповідно до зменшення реєстрованої частки відбитого потоку випромінювання;
- *вміст органічної речовини (гумусу)* – вміст гумусу в ґрунті впливає на його родючість, зокрема фізико-хімічні й агрофізичні властивості. Залежність між вмістом гумусу і відбивною здатністю у видимому діапазоні довжин хвиль нелінійна й обернено пропорційна;
- *вміст окислу заліза Fe_2O_3* – збільшення вмісту окислу заліза може викликати значне зменшення відбивної здатності у короткохвильовій частині видимого діапазону спектра і збільшення у довгохвильовій і ближній інфрачервоній області спектра.

На основі аналізу впливу на розподілення значень спектрального коефіцієнта відбиття ґрунту таких властивостей ґрунту як текстура ґрунту, вміст органічних речовин, води, оксидів заліза і ґрунтових мінералів можна класифікувати стан поверхні [10–15].

Першу успішну спробу класифікації ґрунтів за кривим СКЯ зробив американець Condid [16], який визначив три основних типи кривих СКЯ-ґрунтів. Результатом цих робіт став каталог (атлас) кривих СКЯ для 290 районів США і Бразилії в інтервалі довжин хвиль 0,52–2,32 мкм для різних значень вмісту води з описом типу ґрунту, ґрунтоутворювальної породи, кліматичних і топографічних умов у районі взяття зразка та ґрунтового горизонту з якого він відібраний.

Для отримання всієї кривої СКЯ-ґрунтів він запропонував проводити вимірювання у п'яти «критичних» точках 440, 540, 640, 740, 860 нм. Було встановлено кореляційну залежність між яскравістю

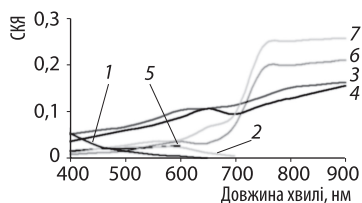


Рис. 2.5. Спектральні характеристики водної поверхні і берегової лінії:

1 – вода; 2 – морська вода; 3 – пісок;
4 – суглинок; 5 – мокрий суглинок;
6 – луки зелені; 7 – луки пожовклі
[2, 4, 17]

на будь-якій довжині хвилі й яскравістю на вказаних вище довжинах хвиль. Точність визначення СКЯ становила $\pm 1-2\%$.

Оптичні характеристики водних об'єктів. Спектральні характеристики водної поверхні вирізняються максимальними значеннями коефіцієнтів спектральної яскравості у синій зоні ($r_{400\text{нм}} = 0,15$) з пониженням значень r_{λ} у ближній інфрачервоній зоні до 0,01 (рис. 2.5). Враховуючи спектральні характеристики водної поверхні і берегової лінії, представлені піщаними або глинистими відкладеннями, вологолюбною рослинністю, значення контрасту між ними у весняний, літній і осінній періоди будуть великими, особливо у ближній інфрачервоній зоні. Текстура зображення водної поверхні однорідна, щільна.

Процеси розсіяння і поглинання світла, що відбуваються у товщі води, визначають оптичними параметрами води, в якій перебувають органічні і неорганічні речовини у вигляді розчинів або суспензії – передусім різною зваженою муттю і фітопланктоном. Вода, розчини і частинки мають власні коефіцієнти поглинання і розсіяння. Вони мають тенденцію ослаблювати спрямоване і дифузне випромінювання. Ослаблення потоку випромінювання, що проходить, виражається через коефіцієнт аттенуації (ослаблення), який визначають із суми коефіцієнтів розсіяння і поглинання.

У чистій воді розсіяння і поглинання відбуваються тільки на рівні молекул та іонів. Поглинання чистою водою мінімально для хвиль завдовжки близько 0,47 мкм.

Блакитний колір глибоких прозорих вод виникає у результаті сильного розсіяння у короткохвильовій частині світлового потоку молекулами води. Оскільки вода містить органічні і неорганічні домішки, відбуваються додаткові побічні оптичні процеси. Прозорість і колір води змінюються.

Домішки у воді, які впливають на спрямований вгору від води потік випромінювання, можна об'єднати у три групи:

- *жовта речовина* (гелі) – до неї відносять усі розчинені у воді органічні сполуки, які сильно поглинають ультрафіолетові і блакитні промені, через що вода набуває жовто-бурого кольору;
- *зважена речовина* (твердий стік), під якою розуміють усі частинки, присутні у воді. До цієї групи входять глинисті матеріали, пісок, зерна й уламки кварцу та інших мінералів, цілі і зруйновані скелети планктону та інших організмів;
- *фітопланктон* утворює третю, особливу групу зважених речовин. Необхідний у його складі для фотосинтезу пігмент завдяки хлорофілу дає дуже сильні шари поглинання у блакитній і червоній зонах спектра випромінювання і визначається фітопланктоном [2].

Частинки гелю (жовтої речовини), які перебувають у воді, не зв'язані і мають кожна своє спектральне відображення. Порівняно із розсіянням світла у чистій воді воно незначне. Поглинання світла частками гелю зменшується по експоненті зі збільшенням довжини хвилі світла. А-хлорофіл фітопланктону поглинає в основному випромінювання у блакитній (близько 0,44 мкм) і червоній (близько 0,675 мкм) зонах спектра. Мінімум поглинання видимої частини випромінювання знаходиться на хвилі довжиною приблизно 0,53 мкм. Поглинання світла хлорофілом у блакитній зоні і розсіяння його фітопланктоном надає воді зеленого кольору.

Додаткове розсіяння світла відбувається на оболонках мікроорганізмів планктону, що приводить до сильного віддзеркалення у жовто-блакитній зоні спектра від вод, багатих на планктон.

Зі збільшенням помутніння води домішками неорганічних частинок змінюється колір води у довгохвильовій зоні спектра (жовто-жовто-гарячій-червоній, 0,576–0,609 мкм). Тут знаходиться мінімум аттенуації забруднених муттю вод озер і річок. Поглинання світла неорганічними частинками твердого стоку дуже мале і залежить від довжини хвилі світла. У формуванні величини сигналу, що йде від води, поглинання випромінювання відіграє тільки підлеглу роль. Для частинок розміром понад 2 мкм спектральне розсіяння загалом зменшується. Процеси розсіяння частинками, що перебувають у суспендованому стані (планктон, осад, аерозолі), вирізняються ознаками, описаними законом розсіяння Мі. Розсіяння залежить від розміру частинок і їх показника заломлення. Розсіяння світла молекулами відбувається за законом Релея.

Методи візуальної класифікації елементів ландшафту. Численні роботи щодо дешифрування і класифікації елементів ландшафту, за даними дистанційного зондування [10,16–30], мають теоретичний характер, або стосуються класифікації елементів ландшафту певної географічної зони або одного з об'єктів ландшафту. Серед методів дешифрування традиційно використовувався візуальний аналіз на основі інтерпретації дистанційних зображень. При візуальному дешифруванні на зображенні виділяють об'єкти, або їх фрагменти, що напевно відомі оператору.

Згідно з Аковецьким [17] логічна структура процесу оброблення знімків, зокрема і тематичного, складається з таких етапів: виявлення, розпізнавання, класифікація та інтерпретація.

Виявлення – це роздільне сприйняття елементів (об'єктів) зображення без виявлення їх сутності.

Розпізнавання – отримання цілісного відокремленого образу і поділ його на елементи зі встановленням їх якісних і кількісних характеристик з оцінкою отриманого образу.

Класифікація – виявлення сутності загальних ознак індивідуальних об'єктів, перехід від індивідуальної до узагальненої характеристики.

Інтерпретація – аналіз природних ресурсів та прогноз динаміки розвитку явища або змін об'єкта на основі виявлених відомостей про об'єкти.

Виявлення і розпізнавання об'єктів виконують за прямими і непрямыми демаскуючими ознаками і, як правило, із залученням додаткових тематичних, зокрема картографічних, матеріалів.

Демаскуючими ознаками об'єктів місцевості є характеристики об'єкта у натурі – прямі і непрямі ознаки:

- *прямі* – це форма (геометрично визначена або невизначена), розмір, тон, колір (відбивна або випромінювальна здатність або коефіцієнт яскравості), структура (рисунок) або текстура, фотометричні характеристики (аналіз розподілення поля характеристик яскравості) і тіні (форма і розмір) зображення об'єктів;
- *непрямі* – відносне розташування, сліди діяльності, приуроченість, взаємозв'язок і взаємозумовленість.

Форма об'єкта – це основна пряма ознака дешифрування. Є надійною ознакою дешифрування штучних об'єктів і споруд. Однак для природних об'єктів (луки, ліс та ін.) властива невизначена форма і

часто не може бути використана як головна й єдина ознака. Розрізняють компактну, лінійну, площинну, сітчасту, деревовидну, комбіновану і т.д. Лінійна форма порівняно із компактною розпізнається на зображеннях більш дрібного масштабу. Важливими є особливості лінійної форми, наприклад, за звивистістю форми можна відрізнити дорогу від річки. Ще однією ознакою форми є характер меж між двома об'єктами – різкі, розпливчасті, кутасті, систематичні, постійні або однорідні безструктурні, розмиті з невизначеною структурою, різкі з чітко вираженою структурою, світлотіньові змінної структури. При аналізі космічних знімків середнього і низького розрізнення розмір та форма не мають першорядного значення – відбувається перехід до комплексів об'єктів, а при аналізі знімків високого просторового розрізнення ці ознаки знову набувають значення.

Розмір об'єкта є менш важливою ознакою дешифрування, ніж форма. Розмір зображення об'єктів на знімку залежить від його масштабу. Розмір об'єкта на первинному зображенні можна визначити перемноживши його довжину в пікселях на зображенні на значення просторового розрізнення.

Тіні об'єкта на знімку є суперечливою ознакою дешифрування. Іноді тільки тінь дає можливість визначити об'єкт або його характеристики, а іноді тінь, закриваючи об'єкти або їхні елементи, створює візуальну перешкоду для дешифрування знімка. Тіні поділяють на власні і падаючі. *Власна тінь* – це тіньова сторона предмета не освітлена Сонцем, яка підкреслює об'ємність об'єкта. Чіткі межі між освітленими і затіненими частинами свідчать про наявність кутів поверхні об'єкта. *Падаюча тінь* – це тінь, що відкидається предметом на землю або інші предмети. Вона передає форму об'єктів у вигляді, близькому до звичного. Рельєф впливає на довжину тіні, подовжує або укорочує її залежно від напрямку нахилу місцевості. Контраст тіні і фона може перевершувати контраст об'єкта і фона, наприклад, окреме дерево на лузі. У цих випадках тінь може бути єдиною ознакою дешифрування. У багатьох випадках за довжиною тіні можна визначити висоту об'єкта.

Тон (яскравість) – це сигнал (Digital Number) у відповідному місці зображення об'єкта, що реєструється приладом. Ненадійний з причини впливу атмосфери. Велику роль відіграє радіометрія (оптична щільність). Тон зображення об'єкта зумовлюється в основному:

- відбивною здатністю об'єкта, при цьому чим інтенсивніше відбиває об'єкт промені світла, тим світліше його зображення на знімку, наприклад, зображення свіжого снігу в 14 разів світліше, ніж зораного мокрого чорнозему;
- зовнішньою структурою поверхні об'єкта, гладка поверхня на знімку світліша від шорсткої, наприклад ґрунтова дорога, прокладена через зоране поле, світліше ріллі, незважаючи на те, що колір майже однаковий;
- освітленістю об'єкта, тобто чим більше освітлений об'єкт, тим світліше його зображення на знімку. Найбільшу освітленість має та частина об'єкта, на яку сонячне світло падає прямовисно;
- періодом року, коли виконується зйомка, – улітку місцевість має велику розмаїтість тонів, але на знімку тон одного об'єкта може бути схожим на тон іншого; у перехідні періоди (восени або навесні) знімки виходять строкаті, темного тону через зволоження ґрунту.

Дослідами встановлено, що людське око здатне візуально розрізняти до 25 ступенів сірого тону. Кожний об'єкт зондування на зображенні має свій унікальний тон відповідно до властивостей своєї відбивної здатності.

Колір об'єкта – при зниженні ролі натурального кольору (вплив атмосфери) істотними стають відмінності у кольорі при штучно спотвореній передачі кольорів. Збільшується роль відмінностей у спектральній яскравості об'єкта. Людське око розрізняє на кольоровому зображенні у 2,5 рази більше тонів, ніж на чорно-білому. Колір дає змогу більш деталізувати об'єкти, однак при оцінюванні кольору немає об'єктивних стандартних критеріїв.

Структура (рисунок) об'єкта – формується узагальненими закономірно рисунками індивідуальних об'єктів, що повторюються. Поєднує прямі ознаки компактної групи однорідних і різнорідних деталей зображення місцевості на знімку. Характеризується властивостями, зумовленими повторюваністю, розміщенням і кількістю цих безпосередньо розпізнаваних деталей та є найстійкішою із прямих ознак. Вона мало залежить від умов зйомки. При дешифруванні об'єктів, особливо на знімках порівняно дрібних масштабів, ця ознака стає основною. Структура виражає «перерви» у середніх значеннях пікселя і може бути гомогенна, лінійна, клітинна, нерегулярна, строката тощо. До структури належить також просторовий розподіл

елементів зображення, тобто ознака географічного розподілу елементів на супутниковому зображенні, який може бути подовжнім, розсіяним, постійним, нерегулярним, спорадичним, безладним, сконцентрованим, згрупованим, перемінним.

Текстура об'єкта – це група малих неоднорідностей, що повторюються. Виражається через узгодженість різних тонів на зображенні і визначає елементи, що є занадто маленькими, щоб бути поміченими індивідуально. Текстура не повинна бути переплутана з деталлю. Вона виражає середній розмір елементів зображення.

Фотометричні характеристики (аналіз розподілення поля характеристик яскравості) об'єкта – це статистичні показники: середня оптична щільність відповідає середній яскравості об'єкта; середнє «а» оптичної щільності (деталь щільності залежна від контрасту деталей об'єкта); середня довжина хвилі реєстрограми, а також дисперсія цих величин; математичне очікування середньої щільності; середній тон зображення; комбінація ознак (*мат.* Очікування оптичної щільності та її середньоквадратичне відхилення).

Непрямі ознаки дешифрування вказують на наявність або характеристику об'єкта, що не визначені за прямими ознаками, або усувають багатозначність і невизначеність прямих ознак. Дані ознаки засновані на природних закономірних взаємозв'язках просторового розміщення окремих об'єктів чи компонентів ландшафту, або між природними об'єктами і результатами господарської діяльності людини. Ці закономірні взаємозв'язки між об'єктами місцевості виявляються у двох основних напрямках – приуроченість одних об'єктів до інших, або зміна властивостей одних об'єктів у результаті впливу на них інших.

За приуроченості одних об'єктів до інших на знімках розпізнають:

- об'єкти, прямі ознаки яких не дають змоги розпізнати об'єкт, оскільки вони виражені недостатньо чітко або неповною мірою. Наприклад, у селах житлові будівлі розташовані ближче до вулиці, ніж нежитлові. Дороги, що підходять до річки і починаються на іншому березі, свідчать про наявність порома або човнового перевозу;
- об'єкти, відображені на знімку одним і тим самим тоном.

За змінами у властивостях одних об'єктів у результаті впливу на них інших розпізнають:

- об'єкти, закриті іншими об'єктами; наприклад, пригноблені ліси на болотах мають меншу висоту дерев, більш світлі і дрібні крони і меншу їхню зімкнутість, що дає змогу за формою положу лісу розпізнавати заболочені ділянки в лісах;
- сліди діяльності або функціонування об'єкта; це різні розробки, кар'єри, гідровузли й інші спорудження, що призводять до антропогенного впливу на середовище.

Використання непрямих ознак для дешифрування об'єктів, коли відсутні прямі ознаки, у кожному конкретному випадку виконують на основі географічної вивченості і польових обстежень району з урахуванням імовірності появи тієї або іншої ознаки.

Комплексні дешифрувальні ознаки, які відображають структуру природно-територіальних комплексів (ПТК), є більш визначеними і стійкими, ніж прямі ознаки їх елементів, і становлять основу ландшафтного методу дешифрування. Тональна структура зображення складається з таких компонентів: форми, площі і тону. Тональна структура на зображенні – це, як правило, географічне урочище. Згідно з Подобєдовим Н.С. [31] та іншими вченими тональну структуру зображення класифікують за геометричним, оптичним і генетичним принципами. Це основні приклади тональних структур з усього різноманіття географічних урочищ.

Геометрична класифікація оснований на системі і взаємному положенні точок, ліній, площ і має тип: точковий, лінійний, площадний, комбінований, сітчастий і деревовидний.

Оптична класифікація оснований на вираженості і мінливості тонів, які утворюють геометричні форми. За оптичними властивостями ПТК можна розділити на: однорідні безструктурні; розмиті з непевною структурою; різкі з чітко вираженою структурою; світло-тіньові мінливої структури.

Генетична класифікація будується стосовно ПТК або їх компонентів, наприклад стосовно боліт, рослинності. Ця класифікація не достатньо розроблена.

Методи автоматизованої класифікації елементів ландшафту.

З розвитком технічних і програмних засобів обробки та зростаючим попитом на швидке оновлення даних щодо природних об'єктів широкого застосування набули методи автоматизованого оброблення просторових тематичних даних і даних дистанційного зондування. На європейському рівні подібні дослідження проводять, в основно-

му, в рамках комплексних міжнародних проектів GEOLAND FP6 і GMES GSH Land [30].

Сучасна методологія класифікації ґрунтується на ландшафтно-системному підході та комплексному використанні оптичних спектральних і просторових ознак, методів автоматизованого оброблення матеріалів багатоспектральної космічної зйомки та їх комп'ютерної тематичної інтерпретації [30]. У загальному вигляді рішення задачі класифікації передбачає формалізацію експертних знань щодо набору ознак дешифрування об'єктів (спектральних, індексних, структурних, текстурних, контекстуальних), які на етапі реалізації моделі представлено як певні алгоритми обробки і правила рішення класифікації. Використовуються різні алгоритми теорії розпізнавання образів, математичної статистики та кластерний аналіз. Класифікація ґрунтується на тому, що будь-який об'єкт дослідження характеризується сукупністю кількісних ознак його зображення, що становлять образ. Таким чином, класифікація – це тематична обробка супутникового знімку, за якою він поділяється на однорідні за якимось критерієм області (класи об'єктів). Отримане зображення є тематичною картою. Оскільки зазвичай виділяють змістовно інтерпретовані класи об'єктів, то класифікація є процедурою автоматизованого дешифрування ДДЗ.

Процедура класифікації ґрунтується найчастіше на статистичному аналізі різних характеристик зображення: просторових, спектральних або часових. До найпростіших просторових характеристик відносять: текстуру, контекст, форму і структурні співвідношення. До часових характеристик належать сезонні зміни стану земних покривів (особливо рослинності), які можуть слугувати їх індикаторами. Основну інформацію про природу об'єктів на земній поверхні зосереджено в їх спектральних характеристиках. Тому в більшості відомих алгоритмів класифікації використовують спектральні образи (сигнатури) типів покриттів, а сама класифікація цифрового знімка полягає у групуванні пікселів відповідно до прийнятих правил класифікації.

Відповідно до правил класифікації можливі такі типи класифікації зображень:

- автоматизовані технології, або неконтрольована класифікація;
- інтерактивні технології, або контрольована класифікація (класифікація з навчанням);

- технології класифікації за нейронними мережами.

Автоматизовані технології неконтрольованої класифікації (без попереднього експертного навчання) передбачають прямі дешифрувальні ознаки.

Суть неконтрольованої класифікації (unsupervised classification), або кластеризації (cluster), яку іноді називають класифікацією без навчання, полягає у поділі всіх пікселів зображення на групи (класери), назва, спектральні характеристики і навіть саме існування яких попередньо невідомо. Критерієм віднесення пікселів до того чи іншого кластеру слугують схожість спектральних характеристик. Найчастіше серед алгоритмів неконтрольованої класифікації використовують алгоритми K-Means та ISODATA [21,29].

Контрольована класифікація (supervised classification), або класифікація з навчанням, використовує істотно більше непрямих і контекстуальних ознак, але в межах заданих вирішальних правил – паралелепіпеда, мінімальної відстані, відстані Махалобиса, максимальної подібності, мінімального спектрального кута. Підхід ґрунтується на ознаках об'єктів, належність яких до певного класу відома (наприклад, ознаки об'єктів визначено на еталонних ділянках). Цей підхід часто використовують при моніторингу екосистем [30]. Класифікацію виконують, зазвичай, при існуванні достатніх еталонних даних, передусім у випадку існування даних польових досліджень.

Технології оброблення зображень на основі нейронних мереж займають позицію між інтерактивним обробленням і традиційним аналізом зображення. Нейронні мережі є узагальненою назвою групи алгоритмів, які вміють навчатися на деяких прикладах, використовуючи приховані закономірності з потоку даних. Найбільш якісні результати можна отримати при паралельному обробленні декількох різночасових, геометрично суміщених багатоспектральних зображень тестової території [19, 24, 26, 27, 32, 33].

Наведені вище підходи до автоматизованого оброблення є технологіями аналізу растру зображення ДЗЗ. Більш загальна й універсальна модель класифікації ґрунтується на об'єктно-орієнтованому аналізі зображень (OBIA). Він базується на представленні інформації як об'єктів зображення (сегментів) – множини чарунок растру, тобто на тому положенні, що важлива семантична інформація, необхідна для інтерпретації зображення, міститься не в одному будь-

якому пікселі, а в значимому об'єкті зображення, який представлено полігоном однорідних пікселів, і у взаємних відносинах між об'єктами. Основною перевагою об'єктно-орієнтованого підходу є можливість урахування не лише власних ознак виділених сегментів зображення, але й ознак оточуючих об'єктів (просторового контексту). Процес класифікації ґрунтується на нечіткій логіці, що дає змогу інтегрувати для класифікації широкий спектр різних ознак об'єктів: спектральних значень, форми чи текстури. Використання не лише атрибутів об'єкта зображення, але також і залежностей між об'єктами зображення і мережевою структурою, дає можливість проводити складну класифікацію, що включає локальний контекст.

Прикладом реалізації об'єктно-орієнтованого підходу до автоматизованої класифікації земних покривів є розроблена ДП «Дніпрокосмос», ЦАКДЗ НАН України та Інститутом агроєкології і природокористування НААН у межах виконання міжнародного проекту (INTAS-06-1000024-9100) технологія автоматизованої класифікації класів покривних елементів ландшафтів CORINE LCC за даними багатозональної системи високого розрізнення ASTER [34].

В основу технології автоматизованої класифікації об'єктів і визначення структури агроландшафтів було покладено формалізовані експертні знання стосовно сигнатури ознак (спектральних, текстурних, контекстуальних) окремих класів земних покриттів.

Основними дешифрувальними ознаками були форма об'єкта, його розмір, тінь, тон (яскравість), колір, структура і текстура.

При класифікації об'єктів агроландшафтів слід ґрунтуватися на комплексному використанні кількох програмних засобів обробки, повною мірою використовуючи переваги кожного з них [35,36]:

- ENVI + IDL – попередня обробка, класифікація на основі пікселя, можливості перегляду й обробки зображення, окремі процедури посткласифікації;
- Definiens Professional – сегментація, класифікація, посткласифікація.

Технологія тематичного оброблення передбачала такі етапи:

- збирання необхідних даних для класифікації (зображення, растрові і векторні карти, додаткові дані);
- попередня обробка у середовищі ENVI, включаючи географічну прив'язку, формування інформативних шарів зображення, тематичних шарів перешкод (хмари, тіні від хмар), тематичних

шарів об'єктів простих однорідних класів (наприклад, масиви лісів), а також протяжних об'єктів (приміром, дороги), що є фізичними кордонами між об'єктами різних класів;

- об'єктно-орієнтована класифікація (OBIA) у середовищі DEFiNiENS Professional, включаючи багаторівневі процеси сегментації, класифікації на різних рівнях ієрархії та з різними правилами рішення, модифікації форми об'єктів (reshaping) та їхню векторизацію (див. вкл. рис. 2);
- посткласифікація в середовищі DEFiNiENS Professional, що передбачає злиття об'єктів до заданої мінімальної площі картування (MMU) з використанням певних правил генералізації;
- валідація результатів класифікації земних покриттів за спеціально розробленою методикою.

Посткласифікаційні процедури виконували з метою вилучення поодиноких полігонів, які за своїм просторовим розміром менші від площі, вибраної як мінімальна для полігону, що картографується (minimum mapping unit – MMU).

У процесі класифікації зображень існує ціла низка умов і факторів, які перешкоджають отриманню високого ступеня відповідності результатів дійсному стану об'єктів агроландшафтів. Це помилки, що виникають при геометричній корекції зображення, а також при незадовільній атмосферній корекції. Окрім того, можливі помилки на етапі попереднього визначення номенклатури класів, або методична похибка прийнятого методу класифікації тощо.

Кількісне оцінювання точності класифікації земних покривів виконують у разі проведення процедури валідації, яку здійснюють через зіставлення отриманих даних класифікації (classified data) з фактичними даними (reference data). При цьому як фактичні дані можна використовувати дані польових (наземних) спостережень, картографічні матеріали або іншу достовірну та доступну інформацію

Валідація оцінює можливість отримання тематичної мапи земних покривів (Land Cover) за узгодженою номенклатурою базових класів з помилкою, що не перевищує встановлених допустимих показників [35].

Отримати необхідні характеристики для дешифрування об'єктів агроландшафтів лише за дистанційними знімками без будь-яких натурних визначень у більшості випадків неможливо. Процедура отримання та обліку калібрувальної інформації, тобто еталонуван-

ня, становить необхідний елемент технологічної схеми аерокосмічних досліджень. Наземні спостереження необхідні для визначення ознак дешифрування окремих об'єктів або ПТК, визначення взаємозв'язків між характеристиками і параметрами підстилаючої поверхні, які визначають приладами дистанційного зондування. Так, для визначення характеристик ґрунтового покриття (вміст гумусу, ступінь змитості, засоленість і т. ін.) за допомогою наземних приладів встановлюють кореляційну залежність між коефіцієнтами спектральної яскравості поверхні Землі і параметрами ґрунту, що визначаються. Банк даних, в якому зберігають спектральні образи заданого класу ґрунтово-рослинного покриття і які характеризують територію досліджень, використовують для тематичної обробки та інтерпретації результатів дистанційного зондування.

За результатами численних досліджень об'єктів агроландшафтів встановлено [6, 12, 13, 18, 37 і т.д.], що елементи агроландшафтів належать до:

- малоконтрастних об'єктів і можуть бути класифіковані за відбивною здатністю;
- лінійних (довжина більш ніж утричі перевершує ширину) і площинних (мають великі розміри) об'єктів;
- об'єктів природного походження, для яких характерною є довільність форми контуру і відсутність строгої впорядкованості у розташуванні на місцевості. Зовнішній вигляд об'єкта поверхні природних об'єктів характеризується структурою зображення (набір форм, розмірів, тонів (кольорів), що беруть участь у побудові рисунка). Її постійність зумовлена єдністю утворювальних елементів (крони дерев, трава і т.д.), генералізацією і текстурою (просторове розташування елементів структури, їх взаємне поєднання);
- стаціонарних об'єктів або динамічних об'єктів, які міняють свої характеристики (СКЯ) впродовж сезону вегетації;
- складних (групових) об'єктів, що складаються з упорядкованої сукупності простих (одиночних) об'єктів, об'єднаних цільовим призначенням, наприклад: орна земля, представлена посівами різних сільськогосподарських культур; сади, представлені окремими деревами і т.д.

Водні об'єкти відносять до висококонтрастних, стаціонарних, лінійних і площинних, з гладкою структурою об'єктів.

Предметом динамічних аерокосмічних досліджень агроресурсів є просторово-часові зміни властивостей і відносин об'єктів та явищ, що пізнаються за допомогою серії різночасових знімків, на яких динаміка об'єкта виявляється у зміні геометричних, тонових і структурних характеристик зображення – прямих індикаторів. Одномоментні знімки, представляючи конкретні відображення динамічного явища, на певний час дають змогу досліджувати умови та фіксувати територіальні аспекти динаміки явища і його морфологічну структуру на певному етапі розвитку. На одиночному знімку, що являє собою конкретне відображення динамічного явища на певний час, досліджують умови та фіксують територіальні аспекти динаміки явища і його морфологічну структуру на певному етапі розвитку. Крім того, одиночний знімок може фіксувати попередні стадії розвитку явища, забезпечуючи ретроспективне дослідження динаміки на основі непрямого дешифрування з використанням просторово-часових рядів. Така фіксація здійснюється через непрямі індикатори, а головною основою такого дешифрування слугують ландшафтно-індикаційні методи вивчення природних процесів, що дають можливість виявити процес за зовнішнім виглядом ландшафту. Ці методи активно розробляють на сучасному етапі розвитку методів аерокосмічного зондування (роботи С.В. Вікторова, А.Г. Воронова, Е.А. Востокової та їх послідовників) і мають для методики дешифрування динаміки природних процесів базове значення.

2.2. ДІЮЧІ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗНІМАННЯ

На сьогодні для моніторингу земної поверхні, зокрема і об'єктів агроландшафту, світова аерокосмічна галузь пропонує великий вибір систем дистанційного зондування Землі різного геометричного і радіометричного розрізнення.

Для вибору необхідної системи дистанційного знімання необхідно враховувати чотири основні характеристики сенсорних супутникових систем, які визначають придатність отриманих ними даних для вирішення тих чи інших тематичних завдань – це просторове, спектральне, радіометричне та темпоральне розрізнення.

Просторове розрізнення – характеризує здатність сенсорної системи розрізняти на місцевості об'єкти певних розмірів (як правило

вимірюється у метрах). Відповідно залежно від просторового розрізнення супутникові системи поділяють на:

- системи з надвисоким просторовим розрізненнями (менше 1 м);
- системи з високим просторовим розрізненням (1–5 м);
- системи із середнім просторовим розрізненням (5–30 м);
- системи з низьким просторовим розрізненням (30 м і більше).

Спектральне розрізнення – це здатність сенсорної системи реєструвати електромагнітне випромінювання специфічного частотного діапазону. Дискретний діапазон частот, які реєструє супутник, називається *смужою реєстрації*, або *каналом*. Залежно від спектрального розрізнення (кількості каналів) сенсорні системи поділяють на:

- панхромні (один широкий діапазон у видимій області спектра);
- багато- і мультиспектральні (від 2 до 30 каналів);
- гіперспектральні (понад 30 каналів).

Радіометричне розрізнення (або контрастність) характеризується чутливістю системи при зміні амплітуди (інтенсивності) відбитого сигналу (яскравості об'єкта). Чим вища чутливість сенсора до яскравості об'єкта відносно фону, тим більш дрібні об'єкти можуть бути виявлені. Так 1-бітне зображення має два значення яскравості (чорне і біле), 8-бітне – до 256 значень (відтінків) сірого кольору, 11-бітне – до 2048 значень сірого.

Темпоральне розрізнення (або цикл знімання) – це проміжок часу між двома зйомками одного і того самого об'єкта. Темпоральне розрізнення визначають параметрами супутникової орбіти, а також смужою огляду сенсору. Чим частіше носій сенсорної системи (літак чи супутник) з'являється над об'єктом, тим вище темпоральне розрізнення.

Наразі близько 30 супутникових систем спостереження за Землею з низьким та середнім просторовим розрізненням (від 30 м і більше) працюють у навколоземному просторі, забезпечуючи космічну зйомку у різних спектральних діапазонах для глобальних та регіональних досліджень. Перелік таких систем, назви сенсорів та їх основне призначення наведено у *табл. 2.1*. Майже усі ці дані розповсюджують безкоштовно.

Значно менша кількість даних з високим просторовим розрізненням (від 1 до 30 м) перебуває у вільному доступі для наукових досліджень. З представленою у *табл. 2.2* переліку супутникових

Таблиця 2.1. Сучасні супутникові системи низького та середнього просторового розрізнення

№ з/п	Назва		Розрізнення (просторове/темпоральне)	Застосування
	супутника	сенсора		
1	Aqua Агентство: NASA/JAXA/ INPE	AIRS, AMSR-E, AMSU-A, CERES, HiRDLS, HSB, MODIS	Від 250 м / 1 день	Біологічні і фізичні процеси, температура поверхні суші та океану
2	Aura Агентство: NASA/ NSOIFM/ NIVR/UKSA	HiRDLS, MLS (EOS-Aura), OMI, TES	Від 13 × 25 км / 16 днів	Хімія і динаміка атмосфери Землі від землі через стратосферу
3	CryoSat-2 Агентство: ESA	DORIS-NG, Laser Reflectors, SIRAL	Від 30 км / 369 днів (з 30-денним псевдо-підциклом), РЛ-діапазон	Товщина льодового покриву
4	GOCE Агентство: ESA	EGG, GPS, Laser Reflectors, LRR, SSTI	Від 100 км / 61 день	Циркуляції океану, геодезія, фізика твердої Землі
5	GOSAT Агентство: JAXA/MOE/ NIES	TANSO-CAI, TANSO-FTS	1 км / 3 дні	Спостереження за парниковими газами
6	Landsat-8 Агентство: USGS/ NASA	TIRS	Від 100 м / 16 днів	Природні ресурси, спостереження за наземним покривом, моніторинг довкілля, сільське та лісове господарство
7	MetOp-A, B Агентство: EUMETSAT/NOAA/ CNES/ ESA	IASI	12 км /101 хв	Метеорологія, кліматологія, вміст вологи у ґрунті
8	Meteosat-10 Агентство: EUMETSAT/ ESA	GERB, MSG Comms, SEVIRI	Від 1 км /15 хв	Метеорологія, кліматологія

Закінчення табл. 2.1

№ з/п	Назва		Розрізнення (просторове/ темпоральне)	Застосування
	супутника	сенсора		
9	OCO-2 Агентство: NASA	Spectrometer	2,25 × 1,29 км / 16 днів	Вимірювання вуглекислого газу
10	OrbView-2 Агентство: GeoEye	SeaWiFS	1,1 км / 3 дні	Глобальні океанічні біооптичні властивості
11	OSTM/Jason-2 Агентство: NASA/ NOAA/CNES/ EUMETSAT	AMR, DORIS-NG, GPSP, JMR, LRA, POSEIDON-3	11,2 × 5,1 км / 10 днів	Фізична океанологія, геодезія, сила тяжіння, клімат, морська метеорологія
12	Proba-V Агентство: ESA	Vegetation Imaging multi-spectral radiometers	Від 100 м / 1 день	Класифікація наземного покриву землі, розвиток рослинності
13	SMOS Агентство: ESA	Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS)	35 км / 3 дні	Вологість ґрунту, солоність океану
14	Swarm Агентство: ESA	ACC, ASM, EFI, GPS Receiver, Laser Reflectors, STR, VFM	–	Трирічна місія дослідження геомагнітного поля Землі сузір'ям трьох супутників, розміщених на різних орбітах
15	Sentinel-3 Агентство: ESA	OLCI, SLSTR, SRAL	Від 300 м / від 1 дня	Дослідження океану, стан морської поверхні
16	Sentinel-5P Агентство: ESA		7 × 3,5 км / 1 день	Склад атмосфери і служби контролю якості повітря
17	Terra Агентство: NASA/ METI/ CSA	MODIS, MOPITT, MISR, ASTER, CERES	Від 250 м / 1 день	Біологічні і фізичні процеси, температура поверхні суші та океану, вимірювання CO у тропосфері
18	Topex/Poseidon Агентство: NASA/CNES	DORIS, LRA, POSEIDON-1 (SSALT-1), TMR, TOPEX	11,2 × 5,1 км / 10 днів	Фізична океанологія, геодезія, гравітація

Таблиця 2.2. Супутникові системи високого просторового розрізнення

№ з/п	Назва		Розрізнення (просторове/ темпоральне)	Застосування
	супутника	сенсора		
1	Sentinel-1A, -1B Агентство: ESA	C-Band SAR	5 × 20 м / 10 днів, РЛ-діапазон	Дані С-діапазону (радіолокаційні дані) для оперативного використання, зокрема цифрові моделі рельєфу, наземний покрив
2	Sentinel-2A, -2B Агентство: ESA	MSI (Sentinel-2)	Від 10 м / 10 днів	Підтримка моніторингу земель та пов'язаних послуг
3	SPOT-6, 7 Агентство: CNES	NAOMI	Від 1,5 м / 26 днів	Наземний покрив, сільське і лісове господарство, цифрові моделі рельєфу, моніторинг довкілля
4	GeoEye Агентство: GeoEye Inc	GIS	0,41 м / 3 дні	Наземний покрив, сільське і лісове господарство, цифрові моделі рельєфу, моніторинг довкілля
5	Envisat Агентство: ESA	ASAR	Від 12,5 м / 35 днів, РЛ-діапазон	Фізична океанологія, поверхня землі, снігу і льоду, хімія атмосфери, динаміка атмосфери
6	ERS-1,2 Агентство: ESA	AMI/SAR/Image	25 м / 35 днів, РЛ-діапазон	Природні ресурси, фізична океанографія, геодезія, наземні та атмосферні дослідження
7	WorldView-3,4 Агентство: DigitalGlobe	SpaceView™ 110	0,31 м / 1 день	Наземний покрив, сільське і лісове господарство, цифрові моделі рельєфу, моніторинг довкілля
8	Landsat-7 Агентство: USGS/NASA	Enhanced Thematic Mapper +	Від 15 м / 16 днів	Природні ресурси, наземний покрив, сільське і лісове господарство, моніторинг довкілля
9	Landsat-8 Агентство: USGS/NASA	OLI	Від 15 м / 16 днів	Природні ресурси, наземний покрив, сільське і лісове господарство, моніторинг довкілля

Закінчення табл. 2.2

№ з/п	Назва		Розрізнення (просторове/ темпоральне)	Застосування
	спутника	сенсора		
10	Terra Агентство: NASA/ METI/ CSA	ASTER	Від 15 м / 16 днів	Наземний покрив, сільське і лісове господарство, моніторинг довкілля
11	CBERS 4 Агентство: INPE/ CRESDA	DCS , IRS, MUX, PAN (CBERS), WFI-2	Від 20 м / 26 днів	Природні ресурси, моніторинг довкілля, спостереження за наземною поверхнею
12	UK- DMC2 Агентство: UKSA	SLIM-6	Від 22 м / 1 день	Картографування, моніторинг сільськогосподарських культур, екологічних ресурсів, ліквідація наслідків стихійних лих
13	GEDI Агентство: NASA	LIDAR	Від 25 м / лідар	Лісовий покрив, вуглецевий цикл
14	TerraSAR-X Агентство: EADS Astrium, DLR (SRN)	SAR	Від 1 м / 3 дні, РЛ-діапазон	3 д моделі рельєфу, екзогенні процеси
15	Planet / RapidEye Агентство: PlanetLabs	REIS	5 м / 5,5 днів	Наземний покрив, сільське і лісове господарство, моніторинг довкілля

систем високого просторового розрізнення дані SPOT поширюють на комерційній основі, а супутникові системи ERS і ENVISAT наразі завершили місію, однак їх дані доступні для ретроспективних досліджень.

Таким чином, наявна велика кількість даних різних супутникових систем дає змогу отримувати інформацію про агросферу та кліматичні процеси практично на безперервній основі. Галузь спостереження за Землею з космосу розвивається дуже динамічно і найближчі роки та навіть місяці планується запуск нових супутникових систем, зокрема систем Sentinel програми Копернікус Європейського космічного агентства.

Алгоритми обробки даних, особливо нових супутникових систем, потребують удосконалення та валідації на тестових територіях

у різних кліматичних зонах й окремих визначених природних об'єктах з використанням наземних спостережень і високоточних вимірювань у польових умовах. Окрім того, можуть виникати складнощі з одночасним використанням даних, отриманих різними сенсорами, оскільки навіть незначна різниця у спектральному діапазоні, яку фіксує сенсор, може значно впливати на якість сигналу, а відтак необхідно попередньо виконувати верифікацію даних. Ще одним значним обмеженням використання даних дистанційного зондування є потреба в ефективних алгоритмах атмосферної корекції даних з урахуванням об'єкта дослідження, оскільки навіть незначні зміни у концентрації газів, аерозолів та пилу у повітрі впливають на рівень відбиття електромагнітного випромінювання об'єктом спостереження, створюючи похибки у значеннях. Також варто відзначити, що зазвичай дані космічної зйомки мають великий обсяг і для їх обробки та інтерпретації потрібно використовувати спеціалізовані програмні засоби і сучасне апаратне забезпечення.

2.3. РЕЖИМ ТА УМОВИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ АГРОЛАНДШАФТІВ НА РІЗНИХ РІВНЯХ УПРАВЛІННЯ

Ефективність вивчення об'єктів агроландшафту та їх моніторинг засобами дистанційного зондування зумовлено застосуванням відповідних систем і режимом дистанційного знімання. Умови і періоди космічних зйомок та відповідно якість одержуваних матеріалів визначають природними факторами (географічними, геофізичними, метеорологічними та ін.), властиві територіям знімань. Крім того, ці фактори мають безпосередній вплив на просторово-часовий розподіл відбивних і випромінювальних характеристик поверхні. Тому для вибору оптимальних ретроспективних матеріалів або визначення оптимальних умов космічного знімання (спектральних інтервалів, просторового розрізнення, частоти зйомки) слід визначити частотно-контрастні (ЧКХ), частотно-просторові (ЧПХ) і частотно-часові характеристики (ЧЧХ) об'єктів земної поверхні, які відносять до об'єктів агроландшафту [18].

Правильний вибір оптимальної сукупності спектральних інтервалів (каналів) на основі аналізу частотно-контрастних характеристик забезпечує ефективність вивчення об'єктів агроландшафтів за-

собами багатозонального знімання за умови максимальної інформативності за їх мінімальної кількості. Це пов'язано з великим обсягом отримуваної інформації та необхідністю вилучення її надлишку.

При розрахунку частотно-контрастних характеристик проводять відбір з природного середовища об'єктів агроландшафту, що вивчаються, визначення ймовірності зустрічі кожної пари суміжних об'єктів, які формують оптичний ефект, та визначення інформаційної значущості контрастів кожного із суміжних природних утворень [18].

Виходячи з переліку характерних для території України об'єктів агроландшафтів (рілля, ліси, луки, пасовища, неугіддя, болота та водні об'єкти) та даних польових і камеральних досліджень на основі визначених частот зустрічі їх суміжних контрастів, розраховано вірогідності зустрічі прикордонних контрастів об'єктів агроландшафту. При подальших розрахунках частотно-контрастних характеристик, враховуючи те, що різниця у спектральній яскравості між сільськогосподарськими об'єктами упродовж вегетації може змінюватися досягаючи мінімальних значень, необхідно вводити коефіцієнт мінімальної спектральної яскравості Δg , мінімального спектрального контрасту $K\lambda$, який можна прийняти як 0,05 (відповідно $K\lambda = 0,1$) [18]. За цими розрахунками для візуальної ідентифікації об'єктів агроландшафтів перший варіант набору складається з таких спектральних інтервалів – 520–580, 640–680 і 800–900 нм, а другий – 510–530, 540–560, 580–680, 730–820, 760–790 і 760–840 нм

При виборі найбільш інформативних каналів багатозонального знімання для дешифрування об'єктів агроландшафту можна скористатися і розрахунками наземних спектральних контрастів між різними типами природних утворень, розрахованих для пар суміжних об'єктів 11 типів класифікації Крінова (табл. 2.3) [9].

Частотно-просторові характеристики визначають за даними розмірів ділянок різних сільськогосподарських об'єктів і розраховують за виразом:

$$R = M - t\sigma / \sqrt{N},$$

де M – середня довжина об'єкта; t – для вірогідності 0,9 дорівнює 1,96; σ – дисперсія; N – кількість об'єктів.

Так, за даними розрахунків, достатнім просторовим розрізненням для розпізнавання об'єктів агроландшафтів (посіви, луки, пасо-

Таблиця 2.3. Рекомендовані спектральні інтервали для багатозонального знімання

Класи і типи утворень на фоні інших типів*	Рекомендовані інтервали, нм		Типи утворень на фоні інших типів	Рекомендовані інтервали, нм	
	перший варіант	другий варіант		перший варіант	другий варіант
I ₁	510–530 730–820	730–840	II ₄	500–520 590–690 770–800	620–690 710–840
			III	720–840	720–840
I ₂	500–670 760–790	500 650–680 740–840	Всередині утворень I кл.	500–630	
I ₃	500–670	500–550 580 610–670	Всередині утворень II кл.	500 530–690	570 590–690 750–840
			Між утвореннями I і II кл.	500–520 590–670 750–800	500–520 620–670 740–830
II ₂	500–520 580–680	570 590–600 650–700 720–840	Між утвореннями III і I кл.	720–840	710–840
II ₃	500–520 540–560 590–680 760–40	670–680 720–840	Між утвореннями III і II кл.	720–840	730–840

* Згідно з класифікацією Крінова I клас – оголення та ґрунти; I₁ – ґрунти чорноземні і піщані; I₂ – ґрунти опідзолені, суглинки; I₃ – піски, виходи гірських порід; II – глини; II – рослинні утворення; II₂ – хвойні породи в літній період, суходольні луки, трав'яні покриви з недостатньо соковитою рослинністю; II₃ – листяні породи в літній період і всі трав'яні покриви з густою і соковитою рослинністю; II₄ – лісові насадження в період осіннього різноманіття кольорів і спілі (пожовтілі польові структури); III клас – водні поверхні, водойми [9].

вища, ліси, болота, озера, ставки, водосховища) визначено порогове просторове розрізнення не більше 10 м, а для лінійних об'єктів (лінійні ерозійні форми на початковій стадії, річки, лісосмуги) – не більше 5 м [34]. При польовому агрохімічному обстеженні згідно з «Методическими указаниями по агрохимическому обследованию почв сельскохозяйственных угодий» (1982 р.) найменшою елементарною ділянкою для агрохімічного обстеження є 1 га, а оптимальний крок для відбору зразків становить 50 м. За проведеними до-

слідженнями мінливості спектральних характеристик і вмісту гумусу було встановлено, що оптимальною, з точки зору формування мережі для спектрометричних спостережень ґрунтового покриття, є мережа з оптимальним кроком, яка відповідає вказаним вище «Методическим указаниям...» [38]. Цим умовам задовольняють існуючі системи багатозонального космічного знімання високого просторового розрізнення (див. *табл. 2.2*).

Оптимальний час і періодичність проведення дистанційних знімків визначається за розрахунковими частотно-часовими характеристиками, які поділяють на *добові, метеорологічні і сезонні*.

Оптимальні добові частотно-часові характеристики залежать від висоти Сонця і складають для майже всієї території України 20–30 град. І лише в гірських районах ці значення будуть більші – 40–50 град [4]. Сучасні системи космічного знімання забезпечують в період вегетації місцевий час знімання відповідно до необхідної висоти Сонця.

Метеорологічні умови мають найбільший вплив на режим дистанційних зйомок і їх якість. Вони визначаються цілим рядом метеорологічних елементів, таких як: хмарність, вологість і температура повітря тощо. За результатами аналізу метеорологічних умов за даними багаторічних спостережень дев'яти метеорологічних елементів (ряд 50 років) були визначені середні багаторічні значення інтегральної оцінки метеорологічних умов для території України (*табл. 2.4*) [39].

Середньобагаторічні метеорологічні дані, характерні для території України, не мають обмежень за несприятливими факторами щодо проведення дистанційних знімків протягом теплого періоду (середина березня – середина листопада).

При визначенні *режиму моніторингу* об'єктів агроландшафтів

Таблиця 2.4. Середні багаторічні значення інтегрального оцінювання метеорологічних умов для території України, %

Місяць	Вірогідність метеорологічних умов			
	від-мінні	добрі	задо-вільні	незадо-вільні
Січень	1,3	5,3	82,9	10,5
Лютий	0,7	3,3	62,4	33,6
Березень	3,3	7,9	43,4	45,4
Квітень	9,9	36,8	50,0	3,3
Травень	59,9	37,5	2,0	0,6
Червень	52,6	42,8	3,9	0,7
Липень	12,5	69,1	17,1	1,3
Серпень	10,6	32,2	44,7	12,5
Вересень	42,8	44,7	10,5	2,0
Жовтень	2,7	7,2	78,9	11,2
Листопад	7,2	60,5	30,3	2,0
Грудень	1,3	21,1	76,3	1,3

(зокрема посівів, ґрунтового і рослинного покриву, водних об'єктів) необхідно враховувати як сезонні умови зйомки, так і частотно-часові характеристики фенологічних факторів. До цих факторів належать фази розвитку окремих видів рослин, які становлять рослинні асоціації. Враховуючи стан рослинних асоціацій та їх індикативні властивості, оптимальні строки дистанційного зондування для визначення структури агроландшафтів зміщують на пізньовесняний – ранньолітній періоди (кінець травня – червень), тобто час максимальних відмінностей у вегетативному розвитку різноманітних рослинних угруповань. Оптимальними періодами дистанційного зондування ґрунтового покриву для визначення його характеристик, зокрема й ерозійної деградації, є ранньовесняний – ранньолітній і ранньоосінній – пізньоосінній періоди найменших значень проективного покриття рослинами.

Для прогнозування продуктивності посівів сільськогосподарських культур достатньо вимірювань параметрів посівів на репродуктивній стадії через що виникає проблема частоти спостережень. Необхідним є ще і моніторинг для оцінювання стану посівів. Згідно з вимогами МСГ США до системи агромоніторингу найвищий пріоритет надається вирішенню задачі оцінювання стану посівів, що за оптимальних умов потребує щонедільних спостережень. Десять днів є прийнятним терміном, а чотирнадцять – максимальним. Натомість дослідження за програмою «Агрістарс» (США) привели до формальної рекомендації 4-денного циклу. Такий цикл створює середню частоту спостережень у помірній зоні 8 днів.

Фаза колосіння є вирішальною для визначення продуктивності пшениці озимої. За середніми багаторічними даними, ця фаза настає в умовах України на півдні (АР Крим) 22 травня і на північному заході (Львівська область) – 4 червня. Тобто, перебуває у межах 12-денного періоду. Якщо спостереження проводити один раз на вісім днів, і одному спостереженню буде заважати хмарність, майже не залишається можливостей для проведення вирішального спостереження водночас на всій території. Враховуючи це, найдоцільнішим є використання космічних систем з невеликим циклом знімання (часовим періодом між зніманням однієї і тієї самої точки земної поверхні). До таких систем відносять метеорологічні штучні супутники Землі NOAA, обладнані багатозональним високоточним радіометром AVHRR 2/3, який два рази на добу забезпечує зніман-

ня практично всієї поверхні Землі. Радіометр працює в діапазонах 0,58–0,68; 0,725–1,1; 3,55–3,93; 10,3–11,3 і 11,4–12,4 мкм з просторовою роздільною здатністю 1,1 км і шириною смуги огляду близько 3000 км (див. розділ 2.2). Важливими характеристиками зображення є просторове r і радіометричне (яскравість, температура) ΔI розрізнення знімальної апаратури.

Як відомо, просторове розрізнення залежить від довжини хвилі вимірювання λ , діаметра об'єктива (у випадку радіолокації – розмірів апертури антени) D і висоти орбіти H таким чином:

$$r \sim (\lambda/D) H.$$

Радіометричне розрізнення визначають передусім шириною динамічного діапазону приладу, який використовують. Тобто, кількість рівнів дискретизації, які відповідають переходу від яскравості абсолютно чорного до абсолютно білого тіла.

Для приладу AVHRR просторове розрізнення r (фізичний розмір пікселя на поверхні Землі) становить близько 1 км, а радіометричний діапазон відповідає 1024 рівням яскравості. Для виявлення елементарного об'єкта повинна виконуватися умова:

$$I_{об} (S/r^2) > \Delta,$$

де $I_{об}$ – яскравість об'єкта; S – його площа.

З урахуванням цієї формули мінімальний розмір об'єкта, який спостерігається на поверхні Землі, наприклад лісової пожежі, для якої $I_{об} = 1024$, становить 30×30 м.

Супутник TERRA має цикл знімів від 12 до 24 год. Його апаратурний комплекс складається зі сканерної системи MODIS, яка проводить знімання у 36 діапазонах видимого і ближнього, середнього і дальнього ІЧ-випромінювання з просторовим розрізненням від 250 до 1000 м, і смугою огляду 2300 км.

Комплексування цих двох космічних систем дає можливість отримати доволі короткі періоди циклу знімів. Спектральні діапазони дають змогу отримувати вегетаційні індекси за даними спектральних характеристик червоного та ближнього інфрачервоного каналу, визначити температурний режим поверхні за даними дальньої інфрачервоної зони.

Другим критерієм визначення періодичності (циклу) знімів може бути річний хід щільності часового розподілення контролюю-

Таблиця 2.5. Режим знімань знімальних систем ШСЗ NOAA і TERRA

Місяць	Дека-да	Цикл зйомки (дні)
Березень	2 3	1 2
Квітень	1 2 3	2 4 5
Травень	1 2 3	4 4 2
Червень	1 2 3	2 5 1
Липень	1 2 3	1 2 2
Серпень	1 2 3	4 5 10
Вересень	1 2 3	4 2 1
Жовтень	1 2 3	1 2 4

чого фактора. Це – дати настання і тривалості критичних, з точки зору формування продуктивності посівів, фаз вегетації. До таких критичних періодів у розвитку і формуванні врожаю, наприклад зернових колосових культур, відносять: кущіння (осінь–весна), вихід у трубку, колосіння, наливання зерна. У ці критичні періоди дистанційні знімання повинні досягати максимальної частоти.

Для визначення частоти знімання системи ШСЗ NOAA і TERRA було залучено дані середніх багаторічних дат настання фаз розвитку зернових колосових культур усіх областей України і АР Крим [39].

Найбільш крайні значення дат настання фаз розвитку представлено у *табл. 2.5*. Розподіл термінів настання дат фаз розвитку на півдні і півночі та їх тривалість свідчать про те, що настання подальших критичних фаз на півдні відбувається тоді, коли на півночі ще не закінчилася попередня. Це враховували при розрахунку циклів знімань. Згідно із середніми багаторічними даними початком настання фаз вегетації є 10 березня. У період з 10.03 по 30.04 достатньо отримувати дані 1 раз у 8 днів; з 30.04 по 30.05 цикл знімань 4 дні; з 30.05 по

10.06 – 2 дні; з 10.07 по 30.07 – 8 днів; з 30.07 по 30.12 цикл знімань 10 днів. Ці інтервали визначено без урахування метеофакторів.

Враховуючи вірогідність метеорологічних умов на період березень–жовтень та сезонних фенологічних змін, пов'язаних з розвитком рослин у часі, функціонування систем дистанційного моніторингу з ШСЗ NOAA і TERRA може здійснюватися згідно з циклами знімань, представленими у *табл. 2.6*.

Режим зйомок може корегуватися залежно від дії наявних метеорологічних умов.

Цикл знімань кожного періоду (критичних фаз вегетації) є достатнім для отримання необхідної кількості знімків для забезпечення побудови карти розподілу спектральних характеристик на території України.

Моніторинг посівів сільськогосподарських культур системами високого просторового розрізнення доцільно проводити за мережею тестових ділянок, розташованих у межах стратифікованих зон у періоди максимальної диференціації відбивних характеристик різних сільськогосподарських культур і настання фаз вегетації, які є визначальними для формування продуктивності. Такими визначальними фазами для зернових колосових культур є фази виходу в трубку і колосіння. У фазі колосіння і повної стиглості спостерігають значну диференціацію відбивних характеристик посівів сільськогосподарських культур, що дає змогу провести їх ідентифікацію за матеріалами дистанційних знімів. Для визначення площ, засіяних озими культурами, важливими є також період сівби, фази припинення осінньої та відновлення весняної вегетації (див. *табл. 2.5*).

Враховуючи вірогідність метеорологічних умов у перерахованих вище часових інтервалах, програма дистанційного моніторингу системами високого просторового розрізнення на прикладі тестових

Таблиця 2.6. Середні багаторічні дати настання фаз розвитку зернових колосових культур

Фаза розвитку рослин	Пшениця озима		Жито озиме		Ячмінь ярий	
	південь	північ	південь	північ	південь	північ
Сівба	25.09	31.08	25.09	31.08	—	—
Сходи	07.10	10.09	07.10	10.09	—	—
Кущіння	03.11	01.10	03.11	01.10	—	—
Припинення осінньої вегетації	02.12	25.10	02.12	25.10	—	—
Відновлення весняної вегетації	14.03	31.03	14.03	31.03	—	—
Сівба	—	—	—	—	20.03	17.04
Сходи	—	—	—	—	08.04	01.05
3-й лист	—	—	—	—	19.04	15.05
Кущення	—	—	—	—	30.04	25.05
Вихід у трубку	08.04	26.04	08.04	26.04	07.05	01.06
Поява нижнього стеблового вузла	22.04	09.05	22.04	09.05		
Колосіння	22.05	04.06	22.05	04.06	31.05	22.06
Цвітіння	27.05	12.06	27.05	12.06		
Стиглість молочна:	11.06	02.07	11.06	02.07	13.06	10.07
воскова	27.06	20.07	27.06	20.07	25.06	27.07
повна	06.07	27.07	06.07	27.07	07.07	02.08

Примітка. Виділено дати настання критичних фаз розвитку.

Таблиця 2.7. Режим знімань системами високої роздільної здатності (ШСЗ RapidEye, Terra ASTER та ін.)

Полігон	Знімання			Загальна кількість знімань
	Початок	Кінець	Періодичність	
Миронівський район Київської області	10.04	25.04	1	1
	01.06	10.06	1	1
	10.07	25.07	1	1
	05.09	10.10	1	1
	10.10	20.10	1	1
Канівський район Черкаської області	10.04	25.04	1	1
	01.06	10.06	1	1
	10.07	25.07	1	1
	05.09	10.10	1	1
	10.10	20.10	1	1
Компаніївський район Кіровоградської області	05.04	20.04	1	1
	20.05	30.05	1	1
	01.07	10.07	1	1
	10.09	01.10	1	1
	25.10	10.11	1	1
Чаплинський район Херсонської області	15.04	25.04	1	1
	20.05	30.05	1	1
	25.06	10.07	1	1
	20.09	01.10	1	1
	25.10	10.11	1	1

районів Миронівського, Канівського, Компаніївського і Чаплинського буде виглядати таким чином (табл. 2.7).

Для забезпечення гнучкості функціонування системи моніторингу агроландшафту доцільно використовувати декілька типів космічних багатозональних знімальних систем. Найбільш оптимальним є поєднання систем низької і середньої роздільної та систем високої роздільної здатності. Системи низького просторового розрізнення дають змогу отримувати дані стосовно інтегрального стану об'єктів агроландшафту, зокрема рослинного покриття, та розподілення полів фізичних характеристик на великих площах, а систе-

ми високого просторового розрізнення – дані стосовно структури, площ об'єктів агроландшафту та окремих фізичних характеристик локальних об'єктів. Окремо, системи низької роздільної здатності варто використовувати на регіональному рівні для визначення проблемних і кризових територій.

2.4. СИСТЕМА ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ – ТЕРИТОРІАЛЬНА СПОСТЕРЕЖНА МЕРЕЖА

Якісне і достовірне тематичне оброблення та інтерпретація матеріалів дистанційного знімання неможливе без даних про характеристики й ознаки об'єктів досліджень та їх стану. Отримання таких еталонних даних забезпечується проведенням наземних обстежень об'єктів. Процедура отримання та обліку калібрувальної інформації,

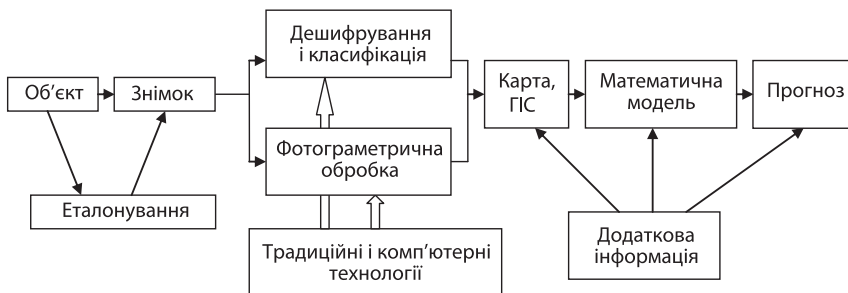


Рис. 2.6. Принципова схема аерокосмічних досліджень

тобто еталонування, становлять необхідний елемент технологічної схеми аерокосмічних досліджень (рис. 2.6)

Цей блок інформаційного забезпечення тематичного оброблення дистанційної інформації формують з даних, отриманих за мережею тестових полігонів. Особливе значення має така тематична наземна інформація, яку отримують у режимі постійного моніторингу із періодичним дистанційним зніманням об'єктів агроландшафту. Вона використовується, зокрема при ідентифікації окремих культур, визначення їх стану протягом сезону вегетації, для прогнозування їх продуктивності та валових зборів у межах окремих адміністративних утворень.

Отримання тематичної інформації забезпечується регулярним проведенням регламентних робіт на мережі тестових аграрних полігонів (ТАП) у межах певних територіальних утворень. Кількість ТАП повинна задовольняти умовам статистичної достовірності з максимальним охопленням ландшафтної різноманітності з урахуванням природних факторів, представництва типових для регіону сільськогосподарських культур, типів ґрунтів, рівня агротехніки, культури землеробства та соціально-економічних чинників.

Враховуючи те, що Україна займає велику площу, і її територія має доволі різноманітну просторову структуру посівів сільськогосподарських культур, зумовлену значною диференціацією зональних і регіональних природних умов, створення оптимальної територіальної вибіркової мережі забезпечується стратифікацією території на гомогенні (однорідні) райони щодо розподілених показників (урожайність, площі), які визначають, а також факторів (агрометеорологічні й агроландшафтні), що зумовлюють процес формування

самої продуктивності та мають зональний характер – з півночі на південь широтна зональність агроландшафтна, із заходу на схід – агрометеорологічна. Отже, полігони повинні знаходитися в усіх географічно-кліматичних зонах України.

Вибіркова спостережна мережа. Основною функцією підсистеми збору інформації є інформаційне забезпечення геоінформаційної системи, яке здійснюється регулярно в режимі моніторингу. Як свідчить закордонний досвід, якісний і оперативний дистанційний моніторинг спирається на територіальну вибірку мережу збору наземної тематичної та дистанційної інформації, яка стає основою функціонування систем інформаційного забезпечення [40]. Наприклад, статистичне бюро ООН періодично публікує дані про вибірконе обстеження у країнах – членах ООН. Вибірковий метод нині має велике значення у дослідженнях стану сільськогосподарських об'єктів таких країн, як США, Канада і більшості країн Європи та Азії.

Такі вибірккові спостереження дають змогу в умовах просторової неоднорідності природних умов і ресурсів та пов'язаного з цим характеру господарської діяльності отримувати різноманітні тематичні дані, пов'язані з площами, які знаходяться у вибірці, або господарствами, до яких відносяться ці площі.

Тематичні дані, що стосуються сільськогосподарського землекористування, традиційно збирають тільки наземними методами, тоді як зображення зі штучних супутників Землі, особливо ті, що мають високу роздільну здатність, досить добре підходять до сумісного використання з традиційними методами збору при описі об'єктів агроландшафтів. Але як наземні, так і дистанційні методи в основі своїй використовують вибірку в її статистичному розумінні.

Для реалізації вибіркового методу потрібна побудова спеціальної територіальної мережі, яка дає можливість використовувати її для спостереження і збору різноманітної тематичної інформації.

Є ціла низка способів відбору одиниць спостереження, кожний з яких дає можливість приблизно оцінювати об'єм вибірки, задаючи той чи інший рівень точності кінцевого результату. Точність оцінювання може бути значно підвищена, якщо досліджувану територію поділити на гомогенні групи одиниць, або шари з подальшою аллокацією сумарної вибірки на даних шарах. Так, при проведенні у США вибіркових досліджень у межах окремих штатів, земельну

площу окремого штату поділяють на шість-вісім шарів землекористування. У подальшому кожний шар поділяють на підшари на основі групування площ гомогенних за складом вирощуваних сільськогосподарських культур. У середині шару (чи підшару) площу може бути поділено на вибіркові одиниці, або сегменти, на основі яких і проводять моновибіркові дослідження (комплекс робіт з обробки аеро- і космічної інформації), а також наземні обстеження. Таким чином, процес вибірки є багатоступеневим, де кожний ступінь – етап має задачу на підвищення статистичної ефективності і зниження фінансових витрат.

Територіальні і дистанційні дослідження у сільському господарстві Франції також проводять на основі вибіркового методу обстежень. Так, як і в США ці дослідження багатоступеневі. На першому етапі проводять стратифікацію всієї території. У кожній страті здійснюють систематичний поділ території мережею квадратів. У середині кожного квадрата будують квадратні сегменти, які в подальшому обстежують. Сегмент – це фактично одиниця вибірки. Сегменти відбирають випадково, або систематично, місцезнаходження їх може змінюватися кожного року, а може бути стабільним і декілька років.

Варто відмітити, що добре обґрунтована стратифікація дає змогу значно скоротити дисперсію характеристик об'єктів, які вивчаються, і використовувати меншу за об'ємом вибірку, тобто скоротити фінансові витрати на ці роботи.

Для втілення вибіркового методу, в основу якого покладено змішану систему стратифікації, потрібно передусім провести групування об'єктів агроландшафтів на основі їх схожості, визначити тип вибіркової схеми досліджень основних груп об'єктів, провести математико-статистичний аналіз вибірових вимірювань та апробацію розробленої територіальної сітки і схеми вибірки на одній із тестових територій.

Виділення ієрархії тестових територій передбачає певну систему робіт. Так, наприклад, вибираючи статистично достовірний матеріал на обліковій ділянці і визначаючи їх необхідну кількість, характеризують тестове поле. Група тестових полів визначає сегмент (тестова ділянка); група сегментів – страту; група страт – природно-господарський район; група останніх – адміністративну область, країну (рис. 2.7) [29, 40].



Рис. 2.7. Узагальнення даних на різних рівнях

Елементарні територіальні одиниці повинні бути у складі загальної геоінформаційної системи, забезпечуючи її нормальне функціонування, і входити у систему місцевих органів збору й обробки інформації для прийняття рішень на районному та обласному рівнях.

Для вибору розташування тестових районів у різних агроландшафтних умовах можна скористатися деякими варіантами природного (фізико-географічного) районування України, останнє з яких розробили у 2003 р. [41], або

спеціалізованого тематичного. Але використання їх для побудови територіальної вибіркової мережі з ряду причин є проблематичним. По-перше, у фізико-географічному районуванні головним об'єктом дослідження є відновлена природа, а в дослідях з економіко-географічного районування природа виступає в ролі ресурсного поля, а по-друге, всі схеми економічного і природно-господарського районування не є актуальними і не відображають сучасних тенденцій розвитку сільського господарства, формування нових та зміни історично складених територій з певною спеціалізацією, більш дрібних, ніж сільськогосподарські зони, що недостатньо для обґрунтування мережі інформаційного забезпечення системи космічного моніторингу. Просте співставлення природного і господарського районування не відображає реального природокористування. Тому для зменшення впливу пов'язаного з внутрішньою неоднорідністю об'єктів дослідження й умов їх існування (у сільськогосподарському виробництві – це рельєф земної поверхні, ґрунтові та агрокліматичні умови, агротехнології тощо) необхідно провести спеціалізоване районування території України.

Теоретичною та методичною базою при проведенні аналізу згідно із класифікацією А.Н. Ракітнікова може слугувати аналіз двох основних аспектів: галузевого і технологічного [42].

Так, для територій, де розвивається однорідне в технологічному плані землекористування, і де головні природні фактори не змінюються в значних межах, можна обмежитися одним галузевим аспектом. У свою чергу, для забезпечення повноти досліджень

сільськогосподарського використання земель потрібно різнобічно відобразити особливості розміщення і співвідношення сільськогосподарських угідь, напрямків використання окремих їх видів (орних земель, зрошення, багаторічних насаджень, природних кормових угідь тощо) у поєднанні із типологічною характеристикою сільськогосподарського використання земель у цілому.

Визначальний вплив на рівень і коливання врожайності сільськогосподарських культур мають природні умови – агрокліматичні (тепло- і вологозабезпеченість), рельєф (горизонтальне та вертикальне розмежування, експозиція і крутизна схилів), родючість ґрунтів. На диференціацію території за показниками врожайності можуть впливати і регіональні відмінності в агротехніці вирощування культур. Сортовий склад культур також може мати вплив на регіональну диференціацію території за рівнем і коливаннями врожайності.

Досвід такого районування було реалізовано при математико-картографічному моделюванні з метою стратифікації території України за структурою і продуктивністю основних сільськогосподарських культур [43]. В основу районування було покладено такі загальні ознаки, як кількісні характеристики посівних площ та врожайності ряду основних однорічних сільськогосподарських культур за період 1999–2005 рр., тобто територія стратифікувалася залежно від сучасного стану щодо спеціалізації й інтенсивності галузі рослинництва (див. вкл. рис. 3). За аналогічним підходом було проведено стратифікацію території України за структурою і продуктивністю зернових колосових культур (див. вкл. рис. 4).

У стратифікованому відібраному шарі формується нова вибірка, де і буде вимірюватися змінна, тобто збиратися тематичні наземні дані. У різних країнах світу використовують ту чи іншу схему вибірок, або їх комбінації. Вибіркова мережа може складатися із площ (ділянок, згрупованих у сегменти – тестові ділянки), або безрозмірних елементів (ліній – відрізків – точок), на основі яких будуть оцінюватися змінні, що відносяться до площі досліджуваної зони. Найпоширенішою формою кінцевої одиниці вибіркового обстеження є тестові ділянки геометричної форми, як правило квадратної.

Розміри сегментів, які покладено в основу вибіркового методу досліджень, можуть змінюватися залежно від об'єкта обстеження; наявності та якості мережі доріг; кількості полів, які підлягають обстеженню; наявності транспортних засобів; матеріальних ресурсів.

Вони залежать і від масштабу (рівня) досліджень: національного, регіонального і детального.

Оптимальним розміром сегмента вважається такий розмір, який дає змогу досягти найкращої точності за мінімальних витрат, провести обстеження упродовж дня, включаючи пересування по ньому. Ідеальним вважається розмір, який дає можливість досліднику виконати відповідну роботу на двох сегментах упродовж дня. Так, для малих ділянок у Франції при обстеженні площ і структури посівів використовують квадратні сегменти, площею 36 га, а в регіонах з великими полями – сегменти площею 50 га. У США, де поля за розмірами ще більші, розмір сегмента залежить від стратифікованої групи: 1 кв. миля (259 га) у групах, де понад 50% землі зайнято в обробітку, 2 кв. милі (518 га) у групі, де від 15 до 49% землі зайнято в обробітку, 0,25 кв. милі (65 га) в агроміській групі і 4 кв. милі (1036 га) у групі лук і пасовищ.

Зазначимо, що у 1989 р. Національний інститут сільськогосподарських досліджень Іспанії провів порівняння різних схем вибірок, на основі якого було зроблено висновок, що якщо при використанні квадратних сегментів залучають аерокосмічну інформацію, то ефективність дистанційних досліджень значно підвищується.

Розрахунок площ елементарних тестових ділянок в агроландшафтних умовах України для кожної виділеної гомогенної зони проводили за матеріалами космічного знімання, на яких агроландшафт представлено полем радіометричних характеристик різноманітних сільськогосподарських об'єктів (земельних угідь, посівів сільськогосподарських культур, природної рослинності та ін.). Використовували метод розрахунку оператора осереднення для опису фонових радіометричних характеристик космічних зображень високого просторового розрізнення [40].

В основу цього методу покладено уявлення про те, що елементи фізико-географічного (у нашому випадку – агроландшафтного) середовища зазнають великих і нерегулярних змін у просторі та часі, тому адекватний їх опис з урахуванням обмеженої мережі спостережень та похибок вимірювань практично нездійснений. Фактори відомі тільки у вигляді полів їх фонових значень з деяким масштабом осереднення, не визначеним у випадках суб'єктивної процедури створення фону. Фонова функція, що відображає головні (великомасштабні) особливості полів елементів фізико-географічного се-

редовища, піддається картографуванню. В основу картографування покладено інтегральні елементи, які описують значний клас природних явищ. Коли вибрано метод побудови фонового поля, тобто знайдено оптимальний оператор осереднення, то процедура побудови фонових карт стає об'єктивною [44].

Визначений оптимальний розмір оператора осереднення для кожної зони буде водночас і оптимальним розміром територіальної одиниці вибіркового спостережень (тестового аграрного полігона) у цій зоні.

Вимірювання інтегральних значень радіометричних характеристик проводили за космічними знімками високого просторового розрізнення у межах агроландшафтних зон за випадковою мережею спостережень. Загальна площа територій ділянок становила приблизно 25% загальної площі зони.

Розподілення оптимальних операторів осереднення по території України в межах різних агроландшафтних зон показано на вклейці на рис. 5.

Розмір тестового аграрного полігона (ТАП) для території України можна прийняти 5×5 км.

Об'єм вибірки розраховують за відомою з математичної статистики формули безповторної вибірки:

$$n = \frac{t^2 \sigma^2 N}{(N-1) \Delta^2 + t^2 \sigma^2},$$

де N – об'єм генеральної сукупності; t – нормальне відхилення; σ^2 – дисперсія; Δ – точність, з якою бажають отримати результат дослідження.

Зазначимо, що при районуваному відборі генеральну сукупність ділять на кілька частин (страт) і для кожної з них вираховують об'єми вибірок. Останні можна отримати кількома способами. Так, якщо площі страт нерівні між собою ($N_1 \neq N_2 \neq \dots \neq N_s$), то можна загальний об'єм вибірки N_0 поділити на кількість страт S :

$$n_i = N_0 / S, \\ \text{тоді } n_1 = n_2 = \dots = n_s.$$

Другий спосіб враховує нерівність страт і об'єми окремих вибірок:

$$n_1 = N_0 N_1 / N; \dots n_s = N_0 N_s / N.$$

Є спосіб, який враховує не лише різницю в об'ємах страт, але і варіацію самої ознаки. У цьому способі об'єми окремих вибірок розраховують за формулами:

$$n = \frac{N_0 N_1 \sigma_1}{\sum N \sigma},$$

де $\sum N \sigma = N_1 \sigma_1 + \dots + N_s \sigma_s$.

Після того, як об'єм вибірки розраховано, на карті, де нанесено мережу квадратів на основі кілометрової сітки, за допомогою випадкових чисел відбирають необхідну їх кількість. При цьому загальна площа відібраних квадратів має дорівнювати об'єму вибірки.

Для отримання оцінки репрезентативності вибірки проводять розрахунок її помилок. При безповторному відборі середню квадратичну помилку середнього X_0 знаходять таким чином:

$$\mu = \frac{\sigma}{\sqrt{N_0}} \sqrt{\frac{N - N_0}{N - 1}},$$

або з урахуванням надійності (нормованого відхилення):

$$\Delta = \frac{t\sigma}{\sqrt{N_0}} \sqrt{\frac{N - N_0}{N - 1}} = \sqrt{\frac{t^2 \sigma^2}{N_0} \left(1 - \frac{N_0}{N}\right)}.$$

Зазначимо, що коефіцієнт $(1 - N_0/N)$ враховують тільки тоді, коли $N_0/N > 0,2$.

Після вирахування об'ємів вибірок у межах страт, визначають межі сегментів (тестових аграрних полігонів).

Межі сегментів можуть мати фізичний або формальний (нематеріальний) зміст. З фізичних меж сегментів (як і зазначених вище страт) частіше всього приймають такі фізичні об'єкти, які характеризуються значною тривалістю існування (так звані довготермінові ознаки): автомобільні шляхи з покриттям; вторинні всепогодні дороги; місцеві дороги; залізничні шляхи; постійні водотоки (річки і струмки); постійні дренажні й іригаційні системи; постійні межі полів тощо.

Нематеріальними межами сегментів частіше всього приймають сторони квадратної сітки. Ця форма сегментів найбільш придатна до використання сумісно з матеріалами дистанційних зйомок. Розраховану кількість ТАП для окремої територіально-адміністративної одиниці реалізують за мережею квадратів, сформованих на основі

кілометрової сітки цифрової картографічної моделі за допомогою таблиці випадкових чисел.

На рис. 6 (див. вкл.) представлено визначену територіальну вибірку мережу на два тестових райони – Миронівський район Київської області і Канівський район Черкаської області.

Визначену мережу для обстеження посівів можна використовувати упродовж багатьох років (за даними закордонних дослідників від 10 до 15 років).

Функціонально вибірка мережа забезпечує отримання необхідних даних про стан об'єктів агроландшафтів протягом сезону вегетації як для забезпечення процесу оброблення матеріалів дистанційного зондування, так і для отримання необхідної тематичної інформації для підтримки режиму моніторингу у випадку неможливості отримання даних дистанційного зондування через метеоумови.

Структура бази даних вибіркової мережі. При моделюванні стану об'єктів агроландшафту в системі дистанційного моніторингу передбачено використання різних типів даних – табличних, картографічних, растрових. Основою для функціонування тестової ділянки може слугувати розроблена схема інформаційного забезпечення необхідними даними, що представлена на рис. 2.8, а для адміністративного району – на рис. 2.9.

Алгоритми, що реалізують моделі тематичного оброблення даних передбачають використання різних типів даних – табличних, картографічних, растрових даних, а саме: оперативні дані дистанційної інформації; різноманітна тематична інформації про елементи агроландшафтів та їх стан (для страти, регіону, всієї України); статистична інформація по ТАПах; цифрова картографічна тематична інформація; цифрова картографічна основа; ретроспективні дистанційні і тематичні дані.

Інформаційний процес при моделюванні показників стану елементів агроландшафтів можна розглядати і як певне наслідування результатів моделювання на різних масштабних рівнях. Така схема наслідування показана на рис. 2.8.

Структура атрибутивної бази даних (АБД) включає в себе дані про страти, адміністративні одиниці, ТАПи, статистичні, кліматичні, фенологічні, біометричні, агрохімічні показники, дані про характеристики рельєфу, а також опис одержаних даних дистанційного зондування.



Рис. 2.8. Структура даних для тестової ділянки

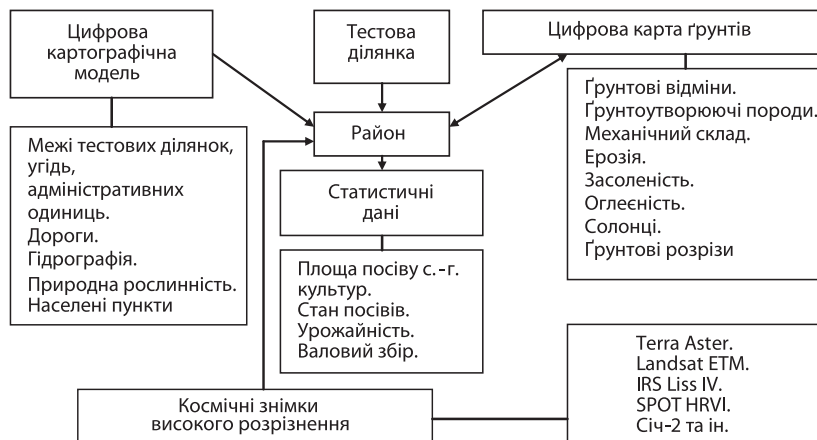


Рис. 2.9. Структура даних для рівня району

Умовно базу даних можна розділити на такі логічні сегменти: каталог знімків; сегмент показників ТАПа; сегмент показників страт та адміністративних утворень (районів, областей).

Призначенням сегмента «Каталог знімків» є зберігання інформації про одержані дані ДЗЗ, що будуть використані при автоматизованому тематичному обробленні та моделюванні. Сегмент включає в себе дві зв'язані таблиці – таблиці одержаних знімків та класифікатор супутникових систем.

Сегмент даних «Тестовий аграрний полігон» слугує для накопичення і зберігання статистичних і тематичних даних стосовно показників елементів агроландшафтів та їх стану. Ключовим об'єктом цього сегмента є таблиця «Тестовий аграрний полігон», яка логічно зв'язана з цифровим картографічним шаром тестових аграрних полігонів у просторовій базі даних, та таблицею знімків у сегменті «Каталог знімків».

У сегмент входять такі блоки інформації: статистичної інформації про тестові полігони; агрохімічних показників полів тестових полігонів; агробіологічних показників розвитку культур; морфометричних показників рельєфу; характеристик ґрунтового покриття.

Блок статистичної інформації, агрохімічних і агробіологічних показників логічно зв'язані з картографічним шаром полів у ГБД.

Блок агрохімічних показників полів тестового аграрного полігона включає в себе таблицю полів, таблицю агрохімічних показників, класифікатор агрохімічних показників.

Таблиця полів логічно зв'язана з картографічним шаром полів у ГБД.

Блок агробіологічних показників розвитку культур на тестових полях ТАПа включає в себе таблицю полів, таблицю агробіологічних показників, класифікатор агробіологічних показників, класифікатор фази розвитку рослини.

Блоки морфометричних показників рельєфу і характеристик ґрунтового покриття логічно зв'язані відповідно із картографічними шарами рельєфу і ґрунтів.

Таблиця елементів агроландшафтів логічно зв'язана із картографічними шарами рослинного покриття, гідрографії і полів у ГБД.

Класифікацію показників визначають за проектом СОУ 01.1-37-907:2010 «Дистанційне зондування Землі. Наземні обстеження посівів. Класифікатор об'єктів і функцій».

Процес автоматизованого тематичного оброблення матеріалів дистанційного зондування та моделювання передбачає виконання цілої низки операцій просторового аналізу і картографічного відо-

браження результатів у межах ТАПів, полів, страт. Для цього використовують цифрову картографічну модель (ЦКМ), яка є важливою складовою масиву даних, який застосовують для процесу оброблення й аналізу.

Для зберігання шарів цифрової карти використовують реляційну базу даних. Шари можуть зберігатися як у персональній базі даних MS Access, так і у клієнт-серверній БД, такої як Oracle чи MS SQL Server.

Кожний шар цифрової карти зберігається у вигляді таблиці. Картографічні шари географічної БД можна умовно розділити на ряд груп.

Група базових топографічних шарів. У цій групі зберігаються такі базові шари: математичні елементи, елементи планової і висотної основи – позначки висот (рельєф суші, виражений горизонталями); гідрографія і гідротехнічні споруди (гідрографічна мережа); населені пункти; промислові об'єкти; дорожня мережа і дорожні споруди (залізниці, автомобільні шляхи); рослинний покрив; адміністративний устрій, огорожі й окремі природні явища та об'єкти.

Атрибутивний склад таблиць наведено у формулярі «Топографічна електронна карта України з тематичною інформацією МНС масштабу 1:500 000».

У ГБД формуються такі тематичні шари: метеостанцій; зон обслуговування метеостанцій; страт; ТАПів; меж земельних ділянок (полів) у межах ТАПів.

Цифрова модель ґрунтового покриття включає в себе шари просторових об'єктів та зв'язані з ними атрибутивні таблиці, а саме шари: ґрунтових відмін; ґрунтоутворювальних порід; гранулометричного складу ґрунтів; вологоємності ґрунтів; ерозії ґрунтів (ступеня змитості); ступеня засоленості; кутів нахилу; експозиції схилів; агрохімічні карти земельних ділянок; бонітування (класифікації врожайності) ґрунтів; оптимального районування сільськогосподарських культур.

Реалізація розробленої структури бази даних і її функціонування потребує наявності програмних засобів, які б надавали можливість підтримувати об'єктно-орієнтовану модель даних, маніпулювали просторовими об'єктами, представлені як у растровому, так і у векторному форматі, інтегрувати дані різноманітної природи і представляти ці дані в єдиному робочому просторі, а також алгоритми прогнозування із засобами візуалізації вхідних даних для цих алгоритмів та засобами візуалізації вихідних даних.

Література до розділу 2

1. *Физика*. Большой энциклопедический словарь; гл. ред. А.М. Прохоров. 4-е изд. Москва: Большая Российская энциклопедия, 1999. С. 874–876.
2. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии: пер. с нем. Москва: Мир, 1988. 343 с.
3. *Тоомінг Х., Росс Ю.* Радиационный режим посева кукурузы по ярусам и описывающие его приближенные формулы. *Исследования по физике атмосферы*. 1964. № 6. С. 63–80.
4. *Толчельников Ю.С.* Оптические свойства ландшафта. Ленинград: Наука, 1974. 252 с.
5. *Кондратьев К.Я.* Актинометрия. Ленинград: Гидрометеиздат, 1965. 365 с.
6. *Войнов О.А.* Мониторинг состояния агроценозов аэрокосмическими методами. Киев, 2005. 392 с.
7. *Рачкулик В.И., Ситникова М.В.* Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 287 с.
8. *Харин Н.Г.* Дистанционные методы изучения растительности. Москва: Наука, 1975. 131 с.
9. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований. Москва; Ленинград: Изд. АН СССР, 1947. 271 с.
10. *Виноградов Б.В.* Дистанционная индикация содержания гумуса в почвах. *Почвоведение*. 1981. № 11. С. 114–123.
11. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг гумусового состояния почв. *Почвоведение*. 1988. № 4. С. 38–47.
12. *Кондратьев К.Я., Васильев О.Б., Федченко П.П.* Опыт распознавания почв по их спектрам отражения. *Почвоведение*. 1978. № 4. С. 5–17.
13. *Кондратьев К.Я., Вандышева Н.М., Козодеров В.В. и др.* Оценка параметров почвенно-растительного покрова по многоспектральным спутниковым данным. *Исследования Земли из космоса*. 1992. № 3. С. 88–95.
14. *Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E.* (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using

- ground-based multispectral data. Unpaginated CD-ROM (13.pdf). In Proc 5th Int Conf on Precision Agric, Bloomington, MN 16–19 July 2000 ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. URL: <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/4190/1/IND43939070.pdf>
15. Dwivedi R.S., Ramana K.V. (2003). The delineation of reclamative groups of ravines in the Indo- Gangetic alluvial plains using IRS-1D LISS-III data. *International Journal of Remote Sensing*. 24 (22): 4347–4355.
16. Condit H.R. (1970). The spectral reflectance of American soils. *Photogram. Eng.* V. 36. N 9: 955–966.
17. Аковецкий В.И. Дешифрирование снимков. Москва: Недра, 1983. 374 с.
18. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды. Москва: Мысль, 1976. 286 с.
19. Atkinson P.M., Tatnall A.R.L. (1997). Neural networks in remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*. 18 (4): 699–709.
20. Doucette P., Agouris P., Stefanidis A. et al. (2001). Selforganised clustering for road extraction in classified imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 55 (5–6): 347–358.
21. Duo Wang, Bo Cheng. (2010). An unsupervised classification method of remote sensing images based on ant colony optimization algorithm. ADMA'10 Proceedings of the 6th international conference on Advanced data mining and applications: Part I: 294–301.
22. Hansen M.C., Defries R.S., Townshend J.R.G. et al. (2000). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*. 21 (6–7): 1331–1364.
23. Hansen M.C., DeFries R.S., Townshend J.R. et al. (2006). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*. 21: 1331–1364.
24. Gong P. (1996). Integrated analysis of spatial data from multiple sources: Using evidential reasoning and artificial neural network techniques for geological mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 62 (5): 513–523.
25. Im J., Jensen J.R. (2005). A change detection model based on neighborhood correlation image analysis and decision tree classification. *Remote Sens Environ*. 99: 326–340.

26. Tarariko O., Syrotenko O., Grekov V. (2008). Net of Agrarian Testing. Polygons in System of Remote Monitoring of Agrarian Resources in Ukraine. Digital Earth Summit on Geoinformatics 2008: Tools for Global Change Research. Wichmann Heidelberg: 274.
27. Lenka C., Milan C. (2005). Supervised classification of plant communities with artificial neural networks. *Journal of Vegetation Science*. 16: 407–414.
28. Li Z. (2008). Fuzzy ARTMAP based neuro-computational spatial uncertainty measures. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 74 (12): 1573–1584.
29. Martinez E. Remote Sensing Techniques For Land Use Classification Of Rio Jauca Watershed Using Ikonos Images. URL:http://gers.uprm.edu/geol6225/pdfs/e_martinez.pdf
30. Perumal K., Bhaskaran R. (2010). Supervised Classification Performance Of Multispectral Images. *Journal of Computing*. Vol. 2. Issue 2/February: 124–129.
31. Подобедов Н.С. Полевая картография. Москва: Недра. 1977, 238 с.
32. Скаун С.В., Насуро Е.В., Лавренюк А.Н. и др. Анализ применимости нейронных сетей для классификации спутниковых данных. *Проблемы управления и информатики*. 2007. № 2. С. 105–117.
33. Bossard M., Feranec J., Otahel J. (2000). The revised and supplemented Corine Land Cover nomenclature. *Techn. Rept EEA*. N 38: 110.
34. Бродский Л., Бушуев Е.И., Волошин В.И. и др. Проект INTAS по разработке автоматизированной технологии классификации земных покрытий: научные задачи, основные результаты и перспективы. *Космічна наука і технологія*. 2009. Т. 15. № 2. С. 36–48.
35. Соукап Т., Бушуєв Є., Попов М. та ін. Номенклатура базових класів земельного покриття та основні підходи до їх автоматизованої класифікації за даними дистанційного зондування: матеріали XII міжнар. наук.-техн. симп. «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології», 10–15 вересня 2007 р., Алушта (Крим). Львівське астрономо-геодезичне товариство, 2007. С. 59–61.
36. Соукап Т., Бушуєв Є.І., Попов М.О. та ін. Технологія та класи-

- фікація елементів земних покриттів за даними дистанційного зондування з космосу. *Вісник аграрної науки*. 2008. № 8. С. 20–23.
37. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. Москва: Наука, 1984. 320 с.
38. Сиротенко О. Оперативне визначення показників родючості ґрунту при наземному забезпеченні дистанційного картографування ґрунтів. Регіональна нарада «*Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у вирішенні проблем Полісся*»: тези доповідей. Київ, Луцьк, 2002. С. 37–39.
39. Гриценко В.А., Сиротенко О.В., Чернін В.М. Визначення частотно-часових характеристик дистанційного моніторингу фаз вегетації і стану посівів на території України для знімальних систем ШСЗ NOAA і Січ-1. *Проблеми статистики*. 2002. № 4. С. 189–194.
40. Сиротенко О. Вибіркові обстеження структури і площ сільськогосподарських культур загального користування за матеріалами дистанційного знімання. Регіональна нарада «*Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у вирішенні проблем Полісся*»: тези доповідей. Київ; Луцьк. 2002. С. 35–37.
41. Маринич О.М., Пархоменко О.М., Петренко О.М. та ін. Удосконалена схема фізико-географічного районування України. *Український географічний журнал*. 2003. № 1. С. 16–20.
42. Ракитников А.Н. География сельского хозяйства (Проблемы и методы исследования). Москва: Мысль, 1970. 342 с.
43. Курач Т.М., Сиротенко О.В., Чернін В.М. Математико-картографічне моделювання при проведенні стратифікації території України за показниками статистики сільськогосподарських культур. *Проблеми статистики*: зб. наук. пр. 2005. Вип. 7. С. 249–253.
44. Бойчук В.В., Марченко А.С. Фон и вариация физико-географической сферы. Москва: Наука, 1968. 62 с.



Визначення структури аглоландшафтів

Зміна наземного покриття відображає рівень трансформації агроландшафтів під дією природних чи антропогенних чинників. Для емпіричних досліджень таких змін, класифікація має фундаментальне значення, оскільки дає змогу кількісно вимірювати співвідношення між об'єктами та виконувати різноманітні функції моделювання і прогнозування [1, 2].

3.1. ОБҐРУНТУВАННЯ КЛАСІВ НАЗЕМНОГО ПОКРИВУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТРАНСФОРМАЦІЇ АГРОЛАНДШАФТІВ

Сучасні методи картування наземного покриття значною мірою ґрунтуються на результатах досліджень, які було розпочато з 1960 р. Геологічною службою США, та зокрема Джеймсом Андерсоном. Дж. Андерсон та ін. (1976) розробили ієрархічну трирівневу систему класифікації наземного покриття і землекористування з найбільш детальним третім рівнем [3]. З того часу дослідження, спрямовані на розробку та застосування даних про наземний покрив, стали одним із важливих напрямів ландшафтних й екологічних досліджень з використанням ДЗЗ.

Європейська агенція з охорони навколишнього середовища у 1985–1991 рр. розпочала збір даних щодо стану навколишнього середовища та виділення природних об'єктів на рівні екосистем з метою прийняття рішень щодо їх охорони. Відповідно до цієї програми було розроблено класифікацію та цифрові карти наземного покриття країн ЄС [1, 2, 4, 5]. Система специфікації класів отримала назву CORINE (Coordination of Information on the Environment – Коорди-

нація інформації про довкілля) Land Cover (скорочено CLC), і нині доступні дані за 2012–2014 рр. на територію країн ЄС [6, 7]. Номенклатура CORINE Land Cover складається з трьох рівнів і 44 класів елементів. Класифікацію було прийнято в Україні як ДСТУ «Дистанційне зондування Землі з космосу. Наземні дані щодо контролю стану посівів і продуктивності сільськогосподарських культур. Загальні вимоги» (7307:2013, чинний від 01.01.2014).

З огляду на необхідність наявності даних щодо наземного покриву усієї території Земної кулі, складність їх розробки з деталізацією у глобальному масштабі, а також доступність даних аерокосмічної зйомки із середнім просторовим розрізненням, таких як MODIS (NASA) і MERIS (Європейське космічне агентство), ряд досліджень було спрямовано на розвиток методик класифікації таких даних. Продовольчою та сільськогосподарською організацією ООН (Food and Agriculture Organization, FAO) було розроблено систему класифікації наземного покриву, на основі якої Центром спільних досліджень (Joint Research Center) та Європейським космічним агентством було створено у 2009 р. Глобальну карту покривних елементів Землі (акронім GlobCover 2009), яка охоплює територію усієї Земної кулі з просторовим розрізненням 300 м [8].

Однак систему GlobCover 2009 можна ефективно використовувати тільки для глобальних досліджень, а для агроекологічного оцінювання структури ландшафту вона не здатна забезпечити необхідний рівень детальності, зокрема для виділення орних земель, лісосмуг, заліснених яружних територій, які можуть відігравати важливе значення у структурі та функціях ландшафту.

Загалом класифікатори даних дистанційного зондування Землі розробляють для відображення області наземного покриття, яке можна вважати однорідним (наприклад, трав'яна рослинність, вода, ліс, забудова та інші природні чи антропогенні об'єкти), або для сукупності елементарних областей, які своєю комбінацією формують єдину структуру наземного покриву, що ідентифікується дистанційно.

З розвитком природоохоронних ініціатив почали використовувати принципово інший підхід до розробки класифікатора екосистем, за якого як найменшу картографічну одиницю розглядають біотоп, або середовище існування. Так, для виконання Директиви ЄС про збереження природних оселищ та видів природної фауни і флори

(92/43/ЄЕС), Директиви про охорону природних видів птахів (2009/147/ЄС) та Резолюції Бернської конвенції 1996 р. було започатковано мережу NATURA 2000 для держав-членів ЄС, елементами якої є типи природних середовищ, рідкісні і такі, що перебувають під загрозою зникнення або руйнування, та Смарагдову мережу як інструмент для сприяння охороні біотопів у загальноєвропейському контексті, що ґрунтується на Палеоарктичній класифікації оселищ [2, 5, 9, 10]. На їх основі Європейським центром з охорони природи та біорізноманіття було розроблено класифікацію середовищ існування (біотопів, оселищ) European Nature Information System – EUNIS (1996–2002). У EUNIS для класифікації використовують біотичні ознаки (рослинність), які є чутливими індикаторами абіотичного середовища, дають можливість візуально оцінити межі екосистем та відображають характер їх емерджентності [1]. Однак визначити видовий склад рослинних угруповань за даними супутникової зйомки є проблематичним. Тому картографування за класифікацією EUNIS повинно ґрунтуватися на польових обстеженнях [5], що ускладнює застосування цієї класифікації у системі аерокосмічного моніторингу.

За основу класифікації елементів структури агроландшафтів за даними дистанційного зондування Землі доцільно взяти розроблену систему специфікації класів CORINE. При цьому для більш ефективного оцінювання ландшафтного різноманіття, аналізу динаміки наземного покриття та забезпечення контролю сівозмін, доцільною є деталізація класифікатора наземного покриття до 4-го рівня, зокрема у частині сільськогосподарських угідь [11].

Більшість країн ЄС, зокрема сусідні з Україною держави, такі як Чехія, Словаччина, Угорщина мають розроблені системи класифікації CORINE до 4-го рівня [12]. Однак існуючі європейські класифікації не можна автоматично застосовувати для будь-якої держави, оскільки вони потребують адаптації з урахуванням національних природно-кліматичних умов. При цьому має зберігатися форма класифікації (ієрархічна структура, категоризації, символіка, структура описів та характеристик), а зміни та деталізація мають бути доцільними для підвищення ефективності моніторингу різноманітності екосистем [1].

Доцільно додавати елементи 4-го рівня для всіх або деяких класів при дотриманні таких основних умов: додаткові елементи повинні включати всі землі, які входять до відповідної категорії 3-го

рівня; новостворені елементи не повинні бути пов'язані з більш ніж однією категорією 3-го рівня.

Інформація про наземний покрив має відповідати особливим вимогам, зокрема інформація повинна бути картографічною, а також статистичною, повинна бути можливість відтворювати та оновлювати інформацію легко і швидко у різних масштабах для використання на різних рівнях прийняття рішень [6].

При виборі одиниці картографування було визначено такі основні характеристики з огляду на технічні можливості, практичне застосування та відповідність до технічної документації CORINE [6, 7]:

- одиниця картографування має бути такою за розміром ділянкою землі, яка з урахуванням масштабу дослідження відрізняється від оточуючих об'єктів;
- структура елементарного об'єкта картографування з точки зору наземного покриття має бути достатньо стабільною, щоб її використовували як одиниці для збору інформації;
- одиниця картографування має бути об'єктом обробки даних супутникового дистанційного зондування Землі, що відображає конкретне уявлення про неоднорідність і різноманітність об'єктів поверхні Землі.

З огляду на викладене вище, за мінімальну площу одиниці картографування рекомендовано застосовувати 5 га (замість 25 га для класифікатора 3-го рівня) [12].

Запропоновано деталізацію до 4-го рівня класифікатора CORINE з урахуванням досвіду сусідніх з Україною країн [11], класифікації EUNIS та її удосконаленої версії, розробленою Я.П. Дідухом та співавторами для опису біотопів лісостепової зони України [1] (табл. 3.1).

3.2. ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІНДИКАТОРІВ АГРОЛАНДШАФТІВ

В агроландшафтних умовах України переважають середньо-яскраві ландшафти. Характер кривих їх коефіцієнтів спектральної яскравості зумовлений властивостями рослинного покриття. У літній час криві коефіцієнтів характеризуються наявністю максимумів у зеленій і ближній інфрачервоній зонах спектра. Широке розповсюдження мають культурні елементи ландшафту, криві r_λ яких визна-

Таблиця 3.1. Деталізація класифікатора CORINE до 4-го рівня для земель сільськогосподарського призначення [11]

Деталізація класифікатора			
Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Рівень 4
Сільськогосподарські області	2.1. Орна земля	2.1.1. Незрошувана орна земля	2.1.1.1. Зернові колосові культури суцільного посіву 2.1.1.2. Просапні культури 2.1.1.3. Однорічні та багаторічні трави
		2.1.2. Постійно зрошувана земля	2.1.2.1. Постійно зрошувана земля
		2.1.3. Поля рису	2.1.3.1. Поля рису
	2.2. Багаторічні культури	2.2.1. Виноградники	2.2.1.1. Виноградники
		2.2.2. Сади та ягідники	2.2.2.1. Сади фруктових та деревних культур 2.2.2.3. Ягідники
		2.2.3. Оливкові гаї	2.2.3.1. Оливкові гаї
	2.3. Пасовища	2.3.1. Пасовища	2.3.1.1. Пасовища і луки без деревної чи чагарникової рослинності. 2.3.1.2. Пасовища і луки з деревною чи чагарниковою рослинністю (від 15 до 40%)
	2.4. Гетерогенні сільськогосподарські області	2.4.1. Однорічні культури з включенням багаторічних культур	2.4.1.1. Однорічні культури з включенням багаторічних культур
		2.4.2. Складні зразки культивування	2.4.2.1. Складні зразки культивування без забудови (однорічні культури з включенням пасовищ і/або багаторічних трав'яних чи деревних культур) 2.4.2.2. Складні зразки культивування із включенням забудови (однорічні культури з включенням пасовищ і/або багаторічних трав'яних чи деревних культур)
		2.4.2. Складні зразки культивування	2.4.2.1. Складні зразки культивування без забудови (однорічні культури з включенням пасовищ і/або багаторічних трав'яних чи деревних культур) 2.4.2.2. Складні зразки культивування із включенням забудови (однорічні культури з включенням пасовищ і/або багаторічних трав'яних чи деревних культур)

Закінчення табл. 3.1

Деталізація класифікатора			
Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Рівень 4
Сільськогосподарські області	2.4. Гетерогенні сільськогосподарські області	2.4.3. Земля, переважно зайнята сільським господарством із значними областями природної рослинності	2.4.3.1. Земля, переважно зайнята сільським господарством із значними областями природної рослинності з переважанням орних земель 2.4.3.2. Земля, переважно зайнята сільським господарством із значними областями природної рослинності із переважанням луків 2.4.3.3. Земля, переважно зайнята сільським господарством із значними областями природної рослинності з переважанням лісочагарникової рослинності
		2.4.4. Області агролісоводства	2.4.4.1. Полезахисні лісові смуги 2.4.4.2. Протирозійні лісові насадження 2.4.4.3. Лісочагарникові насадження навколо водних об'єктів

чаються сумісним впливом ґрунтів та рослинності та відрізняються більш згладженою формою.

Орні землі як об'єкт дешифрування складаються із впорядкованої сукупності посівів сільськогосподарських культур і розораних полів та відносяться до складних об'єктів.

У весняний період оптичні властивості польових угідь пов'язані з ріллею і озимими культурами (пшениця озима і ріпак озимий). Спектральні властивості розораних масивів цілком регламентуються відбивною здатністю ґрунтів, тобто криві їх коефіцієнтів спектральної яскравості поступово піднімаються від синьої до ближньої інфрачервоної зони спектра.

$$\frac{r_{560\text{нм}}}{r_{680\text{нм}}} = 0,7, \quad \frac{r_{680\text{нм}}}{r_{740\text{нм}}} = 0.$$

Зміни оптичних характеристик орних земель, до яких відносять посіви зернових, технічних культур, одно- і багаторічних трав, а також перелоги, пов'язані із сезонною динамікою змін спектральних характеристик культивованих посівів сільськогосподарських культур.

З відновленням весняної вегетації озимих культур їх криві коефіцієнтів спектральної яскравості різко знижуються у всій видимій області спектра ($r_{500\text{нм}} = 0,03\text{--}0,04$), а в зеленій і ближній інфрачерво-

ній зонах спектра з'являються максимуми відбиття, характерні для хлорофілу ($r_{560\text{nm}} = 0,05\text{--}0,06$).

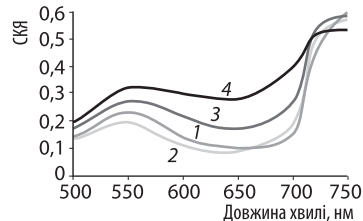
Вказані особливості оптичних властивостей польових угідь характерні для періоду від оранки під ярі культури та їх сівби (кінець березня – початок квітня) до початку кушіння злаків (кінець квітня – перша декада травня).

У періоди виходу в трубку (травень) і колосіння (перша декада червня) озимих і ярих зернових збільшується проективне покриття ґрунту рослинністю і висота рослин, що призводить до зниження яскравості поля – виразнішим стає зелений максимум кривої коефіцієнтів спектральної яскравості. Під час цвітіння колос (середина червня), що створює кольоровий аспект посіву, має ясно-зелений колір, а поля – сизувато-ясно-зелений. Їх коефіцієнти спектральної яскравості знов дещо зростають. Максимум кривої r_λ у зоні 540–580 нм згладжується. У фазу молочної стиглості колір поля змінюється на зеленувато-жовтий, а при досягненні фази воскової стиглості і повного дозрівання зернових колосових культур – на солон'яно-жовтий [13]. Коефіцієнти спектральної яскравості у цей період ще більше зростають. Зникає максимум відбиття у зеленій зоні і мінімум у зоні 680–690 нм, а значення r_λ у ближній інфрачервоній зоні знижується до 0,15–0,18 (рис. 3.1).

Відмінності спектральних яскравостей польових культур у цей період підкреслюють неоднорідність ґрунтового покриття. Після жнив зернових культур аспект полів різко змінюється – збільшується вплив ґрунтового покриття на відбивні характеристики поля. Загальна яскравість поля зростає, а в кривій r_λ з'являється незначний максимум у зоні 540–580 нм, зумовлений наявністю бур'янів. Через 2–3 тижні після жнив інтенсивне заростання бур'янами досягає проективного покриття до 20–30% і більше. Такі ділянки вирізняються зеленим аспектом, крива їх r_λ має максимум у зоні 540–580 нм [13].

Рис. 3.1. Спектральні характеристики посівів пшениці озимої в основні фази розвитку:

1 – вихід у трубку; 2 – колосіння;
3 – молочно-воскова стиглість;
4 – воскова стиглість [13]



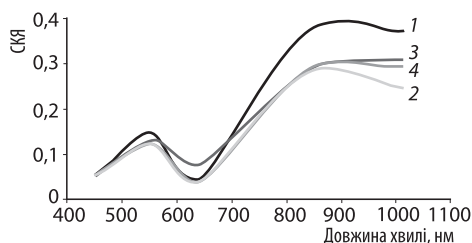


Рис. 3.2. Спектральні характеристики посівів групи зернових культур:

1 – пшениця; 2 – ячмінь; 3 – овес;
4 – жито [13]

Поля просапних культур (кукурудза, буряки цукрові, соняшник) у першій половині весни характеризуються тими самими оптичними властивостями, що і поля, призначені для ярих культур. Відмінності між ними з'являються у перед- і ранньолітний періоди. У другій половині літа ґрунт полів покритий рослинами, які у цей час відіграють основну роль у формуванні кольорового аспекту. За рахунок великого проективного покриття рослинністю поля мають низьку яскравість, а криві їх r_λ характеризуються наявністю максимуму в зоні 540–580 нм. Схожість культур в оптичному відношенні пояснюється однаковими відбивними властивостями їх листя і морфологією рослин (рис. 3.2).

Оптичні властивості полів, зайнятих багаторічними травами, визначають фазами їх розвитку. У зв'язку із зимівлею частини зеленого листя рослин криві коефіцієнтів спектральної яскравості полів багаторічних трав вже у ранньовесняний період мають характерний для хлорофілу максимум відбиття в зоні спектра 540–580 нм. Проте внаслідок малого проективного покриття поверхні ґрунту рослинами максимум кривих r_λ у зеленій частині спектра у цей період виражений слабо.

У пізньовесняний і ранньолітний період коефіцієнти спектральної яскравості полів багаторічних трав знижуються. Максимум кривої r_λ у зеленій частині спектра зростає. У середині літа максимум відбиття полів у зеленій зоні спектра має найбільшу величину:

$$\frac{r_{560\text{нм}}}{r_{500\text{нм}}} = 2,3.$$

На кривій r_λ конюшинового поля з'являється другий максимум у зоні 600–640 нм, зумовлений цвітінням конюшини. У кінці літа при дозріванні конюшини поля набувають бурого відтінку. Максимум у видимій зоні спектра на кривій r_λ знижується і згладжується.

Після скошування і прибирання трав яскравість полів знов зростає завдяки участі ґрунту у створенні спектрального аспекту. Крива r_λ поля поступово піднімається до довгохвильової частини спектра. У серпні відростає отава, і яскравість полів знову знижується, а крива r_λ набуває максимуму в зеленій зоні спектра.

Структурні ознаки орної землі визначають рельєфом місцевості. На вузьких звивистих вододілах яружно-балкового рельєфу з високим ступенем вертикального і горизонтального розмежування сільськогосподарського угіддя мають геометрично невизначену форму – криволінійні контури визначають простяганням і формою поверхні вододілів. Тон зображення полів однорідний безструктурний.

На пласких вододільних просторах поля мають геометрично визначену форму: подовжену прямокутну, трапецієподібну і трикутну. Тон зображення полів однорідний безструктурний (див. вкл. рис. 7).

До заплав річок віднесено осушені орні землі. Структура посівів складається в основному з посівів багаторічних трав. Тон полів під вегетуючими сільськогосподарськими культурами однорідний, іноді смужкуватий. Це пов'язано з проведенням певних технологічних робіт. Текстура розораних полів великоплямиста (див. вкл. рис. 7). Плямистість викликана декількома причинами: ґрунтовими відмінами, різним гранулометричним складом ґрунтів, і відповідно різним ступенем зволоження ґрунтів.

Масиви зрошуваних земель на території України в основному розташовані у південних областях. Районована структура посівів складається із зернових колосових культур, технічних (кукурудза, соняшник) і незначних площ посівів багаторічних культур. Динаміка зміни оптичних характеристик зрошуваних орних земель ідентична сезонній динаміці зміни спектральних характеристик посівів сільськогосподарських культур на незрошуваних орних землях.

Особливістю структури зображення є наявність системи нарізки сільськогосподарських угідь у вигляді квадратної сітки (сторони розміром від 0,8 до 1 км, площею – від 60 до 100 га), геометрично визначеної форми у вигляді кругів, квадратів, прямокутників, що пов'язано із застосуванням технічних систем поливу, і ортогональною системою іригаційних каналів та доріг (див. вкл. рис. 8). Зрошувальні канали і канави виражаються на зображенні прямолінійністю контурів і чіткістю кутів повороту. При їх будівництві залишаються

відвали вийнятого ґрунту, які створюють вали і греблі. Тон зображення відвалів найчастіше світлий. Крім того, рослинність добре демаскує канали і канави. Чітко виражений і малюнок зрошувальної і осушувальної мережі, коли від магістрального каналу відходять канали другого порядку з прямолінійними відрізками, чіткими кутами поворотів і рівними краями, а від них своєю чергою – вужчі і дрібніші канави. За наявності води в каналах (канавах) у момент зйомки вони зображаються переважно темним тоном.

Текстура полів вегетуючих сільськогосподарських культур під поливом плямиста, що пов'язано з нерівномірним поливом. Тон полів вегетуючих сільськогосподарських культур без поливу однорідний безструктурний, іноді смужкуватий. Це пов'язано з проведенням певних технологічних робіт (див. вкл. рис. 9).

Контури садів мають переважно геометрично визначену форму у вигляді прямокутників з чіткими межами. Розміри площ знаходяться в межах 7–15 га. Текстура плямиста – складається із закономірно і порівняно розрідженим розміщенням у межах їх контурів більш темних плям – проєкцій крон і тіней дерев розташованих, як правило, рядами (див. вкл. рис. 10).

Непрямою ознакою для садів є їх розташування поблизу населених пунктів.

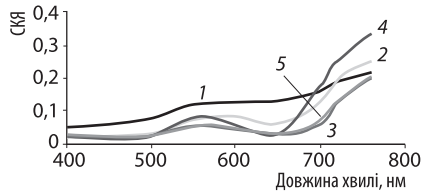
Зміни спектральних характеристик пасовищ за сезонами року пов'язані зі зміною ступеня їх зволоження, динамікою видового складу, висотою і зімкнутістю травостою, а також зі зміною спектральної яскравості рослин у різні фенологічні фази їх розвитку.

Рослинний покрив пасовищ, розташованих на надрічкових територіях (низовинних), складається з різнотравно-злакових співтовариств. У рослинному покриві широко представлено осоки, війник, лисохвіст, тимофіївка і мезогідрофільне різнотрав'я. Їм властиві низька відбивна здатність і виразні максимуми відбиття у зеленій та ближній інфрачервоній частинах спектра [13].

У період сходу снігу на початку весни велика частина низовинних пасовищ, представлених осоковими, осоково-війниковими і мезофільно-різнотравно-злаковими угрупованнями, звільняється від поверхневих вод і перебуває у стані перезволоження. У розпал весни залишки торішньої відмерлої рослинності, які вистилають поверхню, швидко просихають і набувають буро-ясно-сірого забарвлення. Коефіцієнти спектральної яскравості у цей період мають великі значен-

Рис. 3.3. Мінливість спектральних характеристик пасовищ, розташованих на прирічкових територіях упродовж вегетації [13]:

1 – середина травня; 2 – 31 травня;
3 – 8 червня; 4 – 2 липня; 5 – 27 липня



ня і дещо збільшуються від синьої до інфрачервоної області спектра. Характерного для зеленої рослинності максимуму в зоні 540–580 нм у цей час у кривій r_{λ} немає. Через тиждень після звільнення від води буро-сіре забарвлення пасовищ змінюється зеленувато-бурим, що зумовлено появою молодих пагонів трав. У пізньовесняний період крива r_{λ} у зоні зелених променів набуває виразного максимуму. У середньолітній період, в період апогею вегетації злаків низовинні пасовища мають малу яскравість і чітко виражений максимум кривої r_{λ} у зоні 540 – 580 нм. Скошене пасовище характеризується значно вищою яскравістю, ніж те, яке вегетує (рис. 3.3).

Отава, яка з'являється через декілька тижнів після покосу, знижує коефіцієнти яскравості пасовища і знов додає йому інтенсивного зеленого забарвлення. Невикошені ділянки пасовищ унаслідок відмирання рослинності до кінця літа стають буро-зеленими, максимум кривої r_{λ} у зоні 540–580 нм згладжується (див. вкл. рис. 11).

Рослинний покрив мезофільних (різнотравно-злакових) пасовищ, розташованих на схилах вододілів, починає вегетацію раніше, ніж пасовища на надрічкових територіях, і вирізняються менш значними сезонними змінами оптичних характеристик. Проте відмінності у темпах вегетації можуть бути пов'язані з орієнтацією схилів. У пізньовесняний період більшість видів злакової рослинності мезофільних пасовищ виходять у трубку, а в кінці травня починає колоситися. Пасовища набувають зеленого аспекту, який істотно не змінюється з початку червня до настання пізньолітного сезону.

Крива коефіцієнтів спектральної яскравості характеризується чималими значеннями коефіцієнтів яскравості по всьому спектру. Максимум відбивної здатності у зеленій зоні спектра згладжений. Це є наслідком малого проектного покриття ґрунтів рослинністю і наявністю відмерлих частин рослин, які, як і ґрунти, збільшують яскравість даної фації і виполужують її криву r_{λ} . Упродовж теплового періоду року значення СКЯ зазнають дуже малих змін. Відміннос-

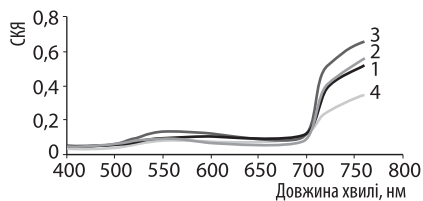


Рис. 3.4. Мінливість спектральних характеристик пасовищ, розташованих на схилах водорозділів, упродовж вегетації:

1 – травень; 2 – червень; 3 – липень;
4 – кінець липня

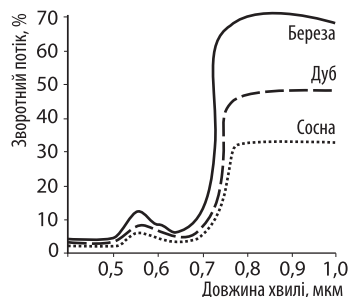


Рис. 3.5. Спектральні характеристики порід дерев

ті у відбивній здатності окремих фрагментаріїв пасовища незначні (рис. 3.4, див. вкл. рис. 12).

Спектральні характеристики лісових масивів мають ті самі властивості, які характерні для рослинного покриву – максимум поглинання у синій і жовтогарячочервоній зонах спектра і певні зміни упродовж вегетації (рис. 3.5).

Веgetативні частини молодих рослин, які мало поглинають променисту енергію, характеризуються більшою відбивною здатністю ніж рослини, які перебувають у стадії повної зрілості, що пов'язано з накопиченням за час життя рослини хлорофілу і темнозabarвлених продуктів дихання. Так, молода хвоя сосни у кінці травня має $r_{560\text{нм}}=0,20$ і $r_{740\text{нм}}=0,43$, а в серпні – 0,06 і 0,20 відповідно. При цьому молоді рослини мають відносно велике поглинання променистої енергії в червоній зоні спектра, тому максимумами їх кривих r_{λ} виражені сильніше, ніж у старих рослин. Так, якщо у пагонів сосни в кінці травня, $r_{560\text{нм}}/r_{660\text{нм}}$ близьке до 1, то в серпні цей параметр наближається до 2. Більш різка зміна кривих r_{λ} хвої і листків рослин при їх старінні спостерігається в інфрачервоній частині спектра. Так, $r_{740\text{нм}}$ молодій хвої ялини становить 0,4, а в кінці її розвитку – 0,2. Особливо значне зниження інфрачервоного відбиття спостерігається у рослин у кінці вегетації (див. вкл. рис. 13).

В умовах України спектральні характеристики об'єкти агролісководства мають ті самі властивості, які характерні для спектральних характеристик лісових масивів – максимум поглинання у синій і жовтогарячочервоній зонах спектра. Незначна мінливість значень кривої СКЯ зумовлена породним складом об'єктів (див. вкл. рис. 14).

Спектральні характеристики водної поверхні вирізняються максимальними значеннями коефіцієнтів спектральної яскравості у синій зоні ($r_{400\text{nm}}=0,15$) з пониженням значень r_λ у ближній інфрачервоній зоні до 0,01 (див. розд. 2.1). Враховуючи спектральні характеристики водної поверхні та берегової лінії, яка представлена піщаними або глинистими відкладеннями, вологолюбною рослинністю, значення контрасту між ними у весняний, літній і осінній періоди будуть великими, особливо у ближній інфрачервоній зоні. Текстура зображення водної поверхні однорідна, щільна (див. вкл. рис. 15).

Для деяких класів наземного покриття 3-го рівня CORINE не раціонально вводити додаткову класифікацію на 4-му рівні через складність деталізації або її недоцільність для підвищення ефективності моніторингу різноманіття агроландшафтів. До таких класів належать: постійно зрошувана земля (код 2.1.2.1), поля рису (код 2.1.3.1), виноградники (код 2.2.1.1), оливкові гаї (код 2.2.3.1), однорічні культури з включенням багаторічних культур (код 2.4.1.1). Характеристики цих класів на 4-му рівні відповідають описам та дешифрувальним ознакам 3-го рівня, описаних у технічному описі CORINE (CLC 2006). Варто відзначити, що класи поля рису (код 2.1.3.1), виноградники (код 2.2.1.1), оливкові гаї (код 2.2.3.1) не є типовими угіддями агроландшафтів лісостепової зони України, однак вони залишені у класифікації з огляду на вимогу з розробки 4-го рівня деталізації CORINE, і полягають у тому, що додаткові елементи мають включати всі землі, які входять до відповідної категорії 3-го рівня [6].

Для ефективного моніторингу структури та стану агроландшафтів доцільно розділити клас незрошувана орна земля (код 2.1.1) на три класи на 4-му рівні деталізації: *зернові колосові культури суцільного висіву, просапні культури, однорічні чи багаторічні трави*. Такий розподіл відображає інтенсивність сільськогосподарського обробітку землі з урахуванням його впливу на різноманіття біоти. Трав'яні насадження та культури суцільного висіву мають позитивний вплив на біорізноманіття в агроландшафтах, забезпечуючи кормову базу, захист від хижаків і шляхи міграції для багатьох видів тварин. На противагу просапні культури, окрім іншого, негативно впливають на стан та агроекологічні функції ґрунтового покриття і біорізноманіття мікроорганізмів ґрунту [14, 15].

Ягідники (код 2.2.2.3). Ягідники подібно до культурних деревних насаджень мають геометричну форму, однак вирізняються більш дрібною структурою та поздовжніми смугами міжрядь.

Клас *пасовища (код 2.3.1)* доцільно розділити на *пасовища і луки без деревно-чагарникової рослинності (код 2.3.1.1)*, *пасовища і луки з деревно-чагарниковою рослинністю (код 2.3.1.2)*, оскільки такий розподіл відображає гетерогенність та різноманіття агроландшафтів. Зокрема, пасовища з деревно-чагарниковою рослинністю можуть характеризуватися наявністю екотонного ефекту.

До класу *складних зразків культивування (код 2.4.2)* доцільно відносити однорічні культури з включенням пасовищ і/або багаторічних трав'яних чи деревних культур із забудовою, та без забудови. Дешифрувальні ознаки класу *складні зразки культивування без забудови (код 2.4.2.1)* подібні до класу орних земель та пасовищ. Клас *складні зразки культивування із включенням забудови (код 2.4.2.2)* відзначається наявністю прямолінійних об'єктів – територій тваринницьких ферм, польових станів, присадибної забудови тощо.

Клас *земля переважно зайнята сільським господарством з істотними областями природної рослинності (код 2.4.3)* доцільно розділити на 4-му рівні на три класи: *земля, переважно зайнята сільським господарством з істотними областями природної рослинності із переважанням орних земель (код 2.4.3.1)*, *із переважанням луків (код 2.4.3.2)*; *із переважанням лісочагарникової рослинності (код 2.4.3.3)*. До відповідних класів належать території, на яких понад 50% займає орна земля і наявні вкраплені ділянки природної рослинності, а саме лугової та лісочагарникової. Розмір окремих природних ділянок є надто дрібним для виділення її в окремий клас (менше 5 га). Дешифрувальні ознаки відповідних класів визначають дешифрувальними ознаками орних земель та відповідно луговою та лісочагарниковою рослинністю.

Області агролісоводства (код 2.4.4) доцільно розділяти на *полезахисні лісосмуги (код 2.4.4.1)*, *протиерозійні лісові насадження (код 2.4.4.2)* та *лісочагарникові насадження навколо водних об'єктів*. Виділення цих класів обґрунтовується їх значною роллю як структуроутворювального елементу агроландшафтів.

Отже, на 4-му рівні класифікатора CORINE запропоновано додати 20 класів наземного покриття (див. *табл. 3.1*), які стосують-

ся категорії «сільськогосподарські області» (див. вкл. рис. 16), що уможливить виконання детальнішого дешифрування матеріалів космознімань [11].

Для забезпечення уніфікованої класифікації супутникових зображень при різних масштабах, включаючи глобальний, розроблено декілька класифікаторів, серед яких одним з найбільш детальних та найпоширеніших на міжнародному рівні є ієрархічний трирівневий класифікатор CorineLandCover (CLC), прийнятий в Україні як ДСТУ (7307:2013. Чинний від 01.01.2014). Для більшості країн Європи деталізовано CLC до 4-го рівня на регіональному рівні, тому в контексті інтеграції України до європейських моніторингових програм та більш ефективного спостереження за біологічним та ландшафтним різноманіттям існує потреба в деталізації для України CLC до 4-го рівня з урахуванням українських природно-кліматичних умов.

3.3. ЛАНДШАФТНІ ІНДЕКСИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ І ВИЯВЛЕННЯ ЗОН ДЕГРАДАЦІЇ ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

Внаслідок високої розораності на території рівнинної частини України майже не залишилося природних ландшафтів. Через незбалансовану структуру агроландшафтів, переважно прямокутну організацію території сільськогосподарських угідь в умовах складного рельєфу, недотримання ґрунтоохоронних заходів, меж водоохоронних зон, від'ємного балансу гумусу та біогенних елементів в агроландшафтах широкого розповсюдження набули різноманітні деградаційні процеси, а також виснаження родючості ґрунтів. Надмірна фрагментація природного рослинного покриву на окремі ізольовані ділянки та зміна морфоструктури ландшафтів унаслідок сільськогосподарського використання земель порушують просторову цілісність екосистем та її стале функціонування [5]. Недостатня щільність мережі лісозахисних і протиерозійних об'єктів та насиченість сівозмін інтенсивними культурами зменшують не лише екологічну стійкість, але й продуктивність агроландшафтів. Відсутність системи моніторингу та контролю за їх структурою і використанням земель поглиблює зазначену проблему, а в цілому призводить до нераціонального використання біотичного потенціалу агроландшафтів.

Однією із ключових цілей сталого землекористування є досягнення екологічно оптимальної організації території з урахуванням цілісності середовищ існування біологічних видів. Отже, структурна неоднорідність ландшафту, яка може оцінюватися за допомогою індексів ландшафтного різноманіття, має вирішальне значення для стабільного функціонування як загалом сільськогосподарських ландшафтів, так і систем землекористування.

Ряд учених розглядає поняття ландшафтного різноманіття як синонім екосистемного різноманіття, і таким чином визначає його як «розміри, форма та зв'язність різноманітних екосистем на великій території» [9, 11, 16]. В офіційних документах [17] термін «ландшафтне різноманіття» (ЛР) визначають як формальне вираження численних зв'язків, що мають місце в даний час між індивідумом або суспільством та топографічно окресленою територією, і зовнішній прояв яких є результатом впливу природних та людських чинників, а також їх комбінацій упродовж певного часу.

З метою обґрунтування використання індексів ландшафтного різноманіття для оцінювання змін у структурі землекористування і ландшафтного різноманіття з використанням даних дистанційного зондування було проведено дослідження у межах двох адміністративних районів – Канівського Черкаської області та Миронівського Київської області. Завданнями дослідження було встановлення динаміки структури землекористування за індексами ландшафтного різноманіття у часі (2001–2012 рр.) і визначення зон збільшення та/чи зменшення ландшафтного різноманіття у межах території дослідження й аналіз, з якими змінами у структурі землекористування вони пов'язані.

Значна територія цих районів представлена агроландшафтами Центрального Лісостепу України зі складним розмежованим рельєфом, високою розораністю та проявом ерозійної деградації. Наприклад, за даними дешифрування супутникових знімків, частка сільськогосподарських угідь у межах Миронівського району досягає 85%. Як еталон ландшафтного різноманіття регіону дослідження використовували територію Канівського природного заповідника, який розташований на півночі Канівського району.

Як дані щодо структури землекористування було використано карти наземного покриття з поділом на класи, які використовують у класифікації MODIS Landcover [18]: водні об'єкти, хвойні ліси, широ-

колистяні ліси, мішані ліси, чагарники, трав'яна рослинність, водно-болотні угіддя, сільськогосподарські угіддя, міська забудова та промислові території, мішана природна рослинність, рідка рослинність. Для оцінювання можливостей взаємозаміни вхідних карт наземного покриття різного масштабу вивчали залежність між значеннями індексів ЛР, визначених за картами наземного покриття з просторовим розрізненням 30 м (яку було розроблено методом класифікації за навчальною вибіркою серії знімків Landsat 5 у різні фази вегетації) та просторовим розрізненням 250 м (за стандартним продуктом MODIS—CD12Q1 [18] з даними про наземний покрив з наземною верифікацією на тестових аграрних полігонах [19]). Коефіцієнт кореляції Пірсона було визначено для середніх значень індексів ЛР растрових поверхонь тестових аграрних полігонів (розміром 5×5 км, вибраних відповідно до методики [19]), отриманих за даними 30- і 250-метрової карт наземного покриття. Індeksi ландшафтного різноманіття визначали за допомогою програмного забезпечення Fragstats 4 [20]. Аналіз просторового розподілу динаміки індексів ЛР виконували з використанням програмного забезпечення ArcGIS.

Як показники ландшафтної структури було вибрано такі індeksi ландшафтного різноманіття: фрактальної розмірності (FRAC), різноманіття Шеннона (SHIDI), однорідності Сімпсона (SIEI), які було обрано на підставі того, що ці індeksi характеризують територію у різних аспектах ландшафтної структури, тобто: індекс фрактальної розмірності відображає міру складності периметра площі елементів ландшафту, індекс різноманіття Шеннона – кількість класів та рівень пропорційності розподілу площі кожного класу, а індекс однорідності Сімпсона – рівень домінування певного класу ландшафтної структури (див. вкл. рис. 17).

Аналіз залежності між масштабами вхідних даних (розрізнення 30 і 250 м) виявив кореляцію з коефіцієнтами за Пірсоном від 0,67 – для індексу різноманіття Шеннона, 0,69 – для індексу фрактальної розмірності та 0,74 – для індексу однорідності Сімпсона ($p < 0,01$), що дає підстави для заміни даних середнього просторового розрізнення (до 30 м) на дані низького просторового розрізнення (250 м) на регіональному рівні.

Одна з основних переваг використання даних MODIS на регіональному рівні полягає у можливості використовувати вже створені карти наземного покриття на всю територію України, які входять

до стандартних щорічних продуктів MODIS [18] та знаходяться у вільному доступі, тоді як обробка і класифікація зображень Landsat потребують значного часу та спеціальних навиків експерта, що ускладнює їх застосування у системі оперативного моніторингу.



Рис. 3.6. Динаміка структури землекористування Канівського району за 2001–2012 рр., %

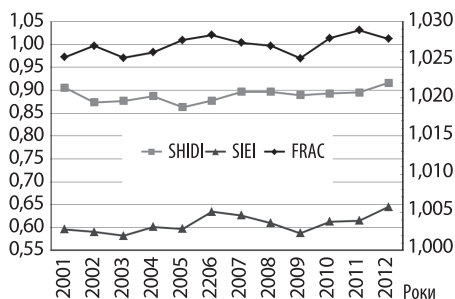


Рис. 3.7. Динаміка індексів ландшафтного різноманіття Канівського району за 2001–2012 рр.

Таблиця 3.2. Динаміка ландшафтного різноманіття території Миронівського району, 2001–2012 рр.

Рік	FRAC – індекс фракталь- ної розмір- ності	SHIDI – індекс різноманіт- тя Шеннона	SIEI – індекс одно- рідності Сімпсона
2001	1,0093	0,2095	0,1572
2002	1,0099	0,1995	0,1490
2003	1,0101	0,2086	0,1510
2004	1,0095	0,2033	0,1518
2005	1,0105	0,2284	0,1742
2006	1,0112	0,2334	0,1825
2007	1,0113	0,2482	0,1948
2008	1,0097	0,2195	0,1697
2009	1,0099	0,2194	0,1684
2010	1,0110	0,2225	0,1766
2011	1,0102	0,2396	0,1756
2012	1,0144	0,2826	0,2193

Отже, для вивчення динаміки структури землекористування було використано карти наземного покриття за даними MODIS з розрізненням 250 м за 2001–2012 рр., побудовано графіки змін площі кожного класу структури ландшафту (рис. 3.6), а також графіки динаміки індексів ландшафтного різноманіття окремо для Канівського (рис. 3.7) і Миронівського районів (табл. 3.2).

Відповідно до результатів, представлених на графіках (рис. 3.7) у межах Канівського району, простежується зниження значень ландшафтного різноманіття у 2002–2003, 2005 (для SHIDI і SIEI) і у 2009 р., а підвищення його рівня у 2006-му і 2011–2012 рр. (окрім

індексу FRAC, який у 2012 р. знижується). Подібна тенденція спостерігається також на території Миронівського району – підвищення значень індексів ландшафтного різноманіття у 2006 і 2011–2012 рр., а зниження – у 2008 р. При порівнянні значень ландшафтних індексів з графіком динаміки землекористування (рис. 3.6, 3.7) виявляється обернено пропорційна залежність між часткою сільськогосподарських угідь у структурі земель Канівського району та індексами ЛР з коефіцієнтом кореляції Пірсона $-0,85$ ($p < 0,01$). Отже, зі зменшенням площі сільськогосподарських угідь рівень ландшафтного різноманіття зростає. Особливо ця тенденція прослідковується у 2007–2008 і 2012 рр., коли площі сільськогосподарських угідь є найменшими за весь період спостереження, а значення індексів SHIDI та SIEI є найвищими. З іншого боку, у 2001 р. було зафіксовано найбільшу площу сільськогосподарських угідь, однак значення індексу SHIDI за цей період є одним з найвищих, що може підтверджувати те, що на значення індексів ландшафтного різноманіття впливає не лише площа, а й просторовий розподіл елементів ландшафту. Для індексу FRAC залежність від площі сільськогосподарських угідь є менш вираженим порівняно з іншими представленими індексами, оскільки він більшою мірою залежить від форми елементів ландшафту, яка визначається через оцінювання периметра площі об'єктів землекористування.

За допомогою порівняльного аналізу розподілу індексів ландшафтного різноманіття за різні роки можна виявити зони підвищення чи/або зменшення рівня ландшафтного різноманіття і визначити просторові та структурні фактори таких змін. З використанням функцій растрової алгебри в ArcGIS було пораховано різницю між значеннями індексу SIEI за роки, коли спостерігалася різка зміна у значеннях, зокрема 2000–2009 рр. (спадання рівня ЛР), і 2011–2012 рр. (зростання значень ЛР). Результати аналізу з виділеними зонами підвищення (зелений колір) і зниження (червоний колір) значень SIEI показано на вклейці рис. 18.

Таким чином, стало можливим виявити зони, на яких спостерігається зниження рівня ландшафтного різноманіття, визначити їх площу та локалізувати місця, які потребують змін у структурі землекористування, зокрема через зменшення негативного агротехногенного впливу на земельні і водні ресурси та консервації деградованих і малопродуктивних земель.

Продемонстровано застосування індексів ландшафтного різноманіття як ефективного інструмента оцінювання екологічного стану агроландшафтів, аналізу динаміки землекористування та виявлення зон деградації ландшафтного різноманіття, на підставі яких можуть прийматися обґрунтовані оптимальні управлінські рішення щодо поліпшення територіальної структури сільськогосподарських ландшафтів і систем землекористування у межах адміністративних районів.

Для дослідження функціонального значення індексів ландшафтного різноманіття щодо продуктивності агроєкосистем досліджували залежність між нормалізованим диференційованим вегетаційним індексом (NDVI) пшениці озимої та значеннями ландшафтних метрик. NDVI відображає рівень фотосинтезуючої активності рослинного покриву та використовується як індикатор стану і продуктивності посівів [21]. Як додаткові незалежні змінні у моделі множинної регресії було враховано також максимальну крутизну схилу на полі, що визначалася за результатами морфометричного аналізу рельєфу, а також тип ґрунту.

За результатами регресійного аналізу було виявлено пряму залежність між NDVI пшениці озимої та значеннями ландшафтних метрик з урахуванням максимального значення крутизни схилу поля і типу ґрунту з коефіцієнтом кореляції Пірсона 0,507 і коефіцієнтом множинної детермінації 0,257, тобто це означає, що 26% дисперсії значень NDVI зумовлено використаними у моделі лінійної множинної регресії даними (значущість за критерієм Фішера $p < 0,05$). Автокореляція відсутня відповідно до тесту Дарбина-Ватсона (1,845).

Як видно з *табл. 3.3*, найбільший вплив на значення NDVI посівів пшениці озимої мають такі індекси: щільності меж, розподілу ядер, контакту та різноманіття Шеннона ($p < 0,05$). Тому зазначені індекси ландшафтного різноманіття можна використовуватися для розрахунку вартості екосистемних послуг агроландшафтів, пов'язаних з ландшафтним різноманіттям, наприклад запилення чи біологічний контроль, що впливають на рівень урожайності сільськогосподарських культур.

У результаті оцінювання території Канівського та Миронівського районів за індексами ландшафтного різноманіття було виявлено, що значна частина правобережжя Канівського району (а саме 220 км²) та північна частина Миронівського району є оптимальною за індексом різноманіття Шеннона, однак стан південно-східної час-

Таблиця 3.3. Коефіцієнти множинної лінійної регресії при аналізі нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI) пшениці озимої

Змінна	Нестандартизовані коефіцієнти	Стандартна похибка	Стандартизовані коефіцієнти	Критерій Стюдента
Константа	22,642	10,926	–	2,072
Індекс щільності фрагментів	-0,009	0,007	-0,171	-1,191
Індекс: щільності меж розподілу ядер контакту	0,006	0,003	0,867	1,947
різноманіття Шеннона	0,084	0,05	0,801	1,702
Індекс: зчеплення	-0,009	0,008	-0,682	-1,026
рівномірності Сімпсона	-0,238	0,214	-0,84	-1,112
Індекс: зчеплення	-0,294	0,121	-0,427	-2,425
рівномірності Сімпсона	-0,277	0,351	-0,302	-0,789
Тип ґрунту	-0,015	0,006	-0,317	-2,381
Максимальний кут нахилу схилу на полі	-0,013	0,005	-0,281	-2,457

тини Миронівського району характеризується як критичний, зокрема через високий рівень розораності, та потребує вжиття заходів з оптимізації структури землекористування. Окрім того, було створено карти зонування території Канівського та Миронівського районів за індексами ландшафтного різноманіття (див. вкл. рис. 19). На ньому представлено структуру тестового аграрного полігона М14, розташованого у зоні кризового рівня ландшафтного різноманіття за Шенноном, та який переважно складається з орної землі. На противагу тестовий аграрний полігон М1 перебуває у зоні оптимального рівня ландшафтного різноманіття і значну частину його структури займають природні угіддя.

Загалом аналіз структури ландшафтів підтверджує, що річкова мережа, а також мережа заліснених ярів та лісосмуг сприяють вищому рівню ландшафтного різноманіття.

Література до розділу 3

1. Дідух Я.П. Теоретичні підходи до створення класифікації екосистем. *Український фітоценологічний збірник*. 2005. № 1. С. 3–14.
2. Дідух Я.П., Фіцайло Т.В., Коротченко І.А. та ін. Біотопи лісової та лісостепової зон України. Київ: ТОВ «Макрос», 2011. 288 с.

3. *Anderson J.R., Hardy E.E., Roach J.T. et al.* (1976). A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. United States Department of the Interior. URL: <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>
4. *Тараріко О.Г., Демидов О.А., Андрущенко А.В. та ін.* Методичні рекомендації з агроєкологічної оцінки структури агроландшафтів і систем землекористування за даними дистанційного зондування Землі високого просторового розрізнення. Київ, 2012. 33 с.
5. *Свідзінська Д.В.* Методи геоєкологічних досліджень: геоінформаційний практикум на основі відкритої ГІС SAGA. Київ: Логос, 2014. 402 с.
6. *CLC2006 Technical Guidelines.* (2007). URL: http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_17
7. *CLC2012 Reference Documents.* (2012). URL: <http://clcqg.gisat.cz/help/CLC%20QC%20Tool%20Help.html?CLC2012ReferenceDocuments.html>
8. *GLOBCOVER* (2009). Products Description and Validation Report. URL: http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf
9. *Проценко Л.Д., Дідух Я.П., Болтачов О.Р. та ін.* Смарагдова мережа в Україні. Київ: Хімджест, 2011. 192 с.
10. *ESA Landcover* (2010). ESA latest map of world's land cover. URL: http://www.esa.int/esaCP/SEM5N3TRJHG_index_1.html
11. *Кучма Т.Л.* Індикація ландшафтного різноманіття за даними дистанційного зондування Землі: дис. на здобуття канд. сільськогосподарських наук: спец. 03.00.16 «Екологія (сільськогосподарські науки)». Київ: Інститут агроєкології і природокористування НААН. 2015. 175 с.
12. *Feranec J., Otahel J.* (2014). The 4th level corine land cover nomenclature for the Phare countries. URL: https://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Miljoe-tilstand/3_natur/nordlam/nldocs/wsOct01T1/jferanec.pdf
13. *Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П.* Аэрокосмические исследования почв и растительности. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 232 с.
14. *Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В. та ін.* Формування збалансованих агроландшафтів на принципах ґрунтозахисної

- контурно-меліоративної системи землекористування. *Землеробство*. 2015. Вип. 1. С. 13–18.
15. *Нестеров Ю.В.* Практичні поради зі збереження біорізноманіття у сільськогосподарських угіддях. Київ: Wetlands International Black Sea Programme, 2005. 64 с.
 16. *Пузаченко Ю.Г.* Биологическое разнообразие в биосфере: системологический и семантический анализ. *Биосфера*. 2010. Т. 1. № 1. С. 25–37.
 17. *Pan-European Biological and Landscape Diversity Strategy* (Sofia, Bulgaria, 23–25 October 1995). URL: <https://www.cbd.int/doc/nbsap/rbsap/peblids-rbsap.pdf>
 18. *User Guide for the MODIS Land Cover Type Product (MCD12Q1)*. URL: http://www.bu.edu/lcsc/files/2012/08/MCD12Q1_user_guide.pdf
 19. *Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Демідов О.А. та ін.* Методичні рекомендації із створення мережі тестових аграрних полігонів в системі спостережень за посівами за матеріалами космічної інформації. Київ: Інститут агроєкології НААН. 2010. 30 с.
 20. *McGarigal K.* FRAGSTATS: Spatial Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. URL: <http://iale.org.uk/files/pdfs/What-is-Fragstats.pdf>
 21. *Тараріко О.Г., Сиротенко О.В., Ільєнко Т.В. та ін.* Оцінка впливу змін клімату на продуктивність зернових культур та їх прогнозування за супутниковими даними. *Вісник аграрної науки*. 2013. № 10. С. 10–16.



Класифікація проявів деградації земель за даними дистанційного зондування

Однією з цілей і завдань земельної реформи було розв'язання проблеми раціонального використання земель сільськогосподарського призначення та охорони ґрунтів, яка мала стати пріоритетним напрямом державної політики у сфері земельних відносин з огляду на те, що ґрунти є життєво важливим ресурсом. Але нині після 25-річних перетворень земельних відносин простежується стійка тенденція до погіршення якісного стану земель та родючості ґрунтів. Зокрема, неконтрольованого розвитку набули процеси ерозійної деградації, дегуміфікації, виснаження родючості та підкислення ґрунтів.

Ерозійна деградація агроландшафтів і систем землекористування є однією з нерозв'язаних проблем агросфери не лише України, але й багатьох регіонів світу. З метою консолідації міжнародних зусиль з подолання глобальних процесів деградації земель, їх опустелювання та зумовлених ними екологічних і соціально-економічних наслідків, було прийнято відповідну Конвенцію ООН «Про боротьбу з опустелюванням» (КБО). Україна стала стороною КБО і взяла на себе зобов'язання з виконання її положень. Однак негативні тенденції, пов'язані з деградацією та опустелюванням земель, а також виснаженням родючості ґрунтів, продовжують поглиблюватися, а в останні десятиріччя набули глобального характеру, тобто охоплюють сільськогосподарські угіддя у всіх природно-кліматичних зонах. Від водної ерозії потерпають сільськогосподарські землі на площі до 12,5, а від вітрової – до 5,5–6,0 млн га, що становить понад половину орних земель. У результаті щороку втрачається до 15–20 т/га родючого шару ґрунту, а площа еродованих земель збільшується до 100 тис. га, а під час прояву вітрової ерозії й, особливо,

чорних бур, які можуть охоплювати площу до 10–12 млн га, втрати ґрунту можуть сягати 50–100 т/га. Крім знищення основного засобу виробництва у сільському господарстві ці небезпечні явища негативно впливають на екологічний стан агроландшафтів.

За таких умов вкрай актуальним стає створення сучасної системи моніторингу проявів зазначених негативних явищ. При визначенні просторового розповсюдження ерозійних процесів, оцінювання інтенсивності їх розвитку, а також отримання вхідних даних про параметри рельєфу, ґрунтового покриву, агротехнічних заходів, стану зволоження поверхні ґрунту для моделювання ерозії на конкретних територіях, крім традиційних наземних спостережень використовували матеріали аерознімальних, що підтверджується великою кількістю публікацій [1–14]. Але з початком запуску космічних систем високого просторового розрізнення розпочалась розробка якісно нових технологій визначення розповсюдження ерозійної деградації ґрунтів та яроутворення [6, 9, 15]. За нинішньої доступності зображень земної поверхні високого просторового розрізнення знімальних систем Landsat 8, SPOT, ASTER, RapidEye, Sentinel стає можливим ідентифікувати просторову еродованість ґрунтового покриву та яружно-балкових систем, що й зумовлює необхідність розробки та апробації моделей класифікації водної ерозії в агроландшафтах за даними багатозонального космічного знімання високого просторового розрізнення.

В основу класифікації ерозійних процесів ґрунтового покриву, за даними дистанційного зондування, покладено формалізовані експертні знання стосовно сигнатури ознак (спектральних, текстурних, контекстуальних) та їх різноманітних проявів. Для визначення ознак необхідною є процедура отримання калібрувальної інформації, тобто еталонування, що становить обов'язковий елемент аерокосмічних досліджень. Для визначення спектральних характеристик і стану ґрунтового покриву, зокрема вмісту гумусу, ступеня еродованості та ін., за даними наземних обстежень визначають регресійні моделі та дешифрувальні ознаки.

Індикація ґрунтів, уражених ерозією, за даними дистанційного зондування, пов'язана з оцінкою визначальних факторів ерозії, до яких належать властивості ґрунту, рослинності, топографії і характер використання території. Згідно із законами механіки (гідродинаміки) значний вплив на ерозійні процеси має лінійна протяжність

схилів, їх ухил та форма. Сприяють розвитку ерозійних процесів увігнуті схили з великою кількістю улоговин, які сприяють концентрації поверхневого стоку і, як наслідок, збільшенню швидкості водного потоку, а відтак і виносу змитого ґрунту за межі поля або водозбірного басейну. Таким чином, головними параметрами рельєфу, що впливають на ерозійні процеси, є: ухили полів в агроландшафтах, їх довжина, форма, а також глибина місцевих базисів ерозії. На схилах південної експозиції водна ерозія проявляється найінтенсивніше, що пов'язано з більш швидким сніготаненням.

Форми і структуру рельєфу можна ідентифікувати на основі візуальної інтерпретації космічних зображень [16]. Проте сучасні просторові моделі визначення ерозії для оцінки характеристик схилів потребують як вхідні дані цифрові моделі рельєфу (ЦМР). Традиційно такі моделі отримують за топографічними картами або, рідше, за матеріалами аерофотозйомки, але нині для отримання ЦМР достатньої якості з вертикальною точністю <20 м існує досвід використання стереооптичних зображень, отриманих із ШСЗ SPOT і ASTER [17], або SAR-зображення [18], які можна використовувати для дослідження ерозії. Так, наприклад, Khawlie і співавт. [19] розраховували градієнт схилу за ERS SAR інтерферометричною ЦМР. Також ERS SAR інтерферограми, інтерферометричний продукт, отриманий перед етапом побудови ЦМР, було використано безпосередньо для виділення схилів [11]. ЦМР, отримані за даними SPOT HRV, було використано для візуальної інтерпретації ознак ерозії [13] і визначення схилів та їх форми [20]. Стереодані MOM-2 дали змогу побудувати ЦМР і провести розрахунок довжини схилів і градієнтів [21].

Як відомо, водну ерозію ґрунтів поділяють на два головні види: площинну, коли ґрунтовий покрив схилу більш менш одноманітно пошкоджений ерозією, і лінійну або яружну, коли змив і наступний за ним розмив ґрунтів відбуваються по лінійних рубежах, внаслідок чого на першому етапі утворюються мікроулоговини і невеликі розмиви уздовж схилу, які надалі можуть перетворюватися на яри (рис. 4.1). При значному розвитку ці два види водної ерозії (площинна і лінійна) виступають як чітко різні явища.

Класифікацію ерозійної деградації ґрунту за багатозональними зображеннями високого просторового розрізнення проводять на основі моделювання зв'язків між наземними і спектральними по-

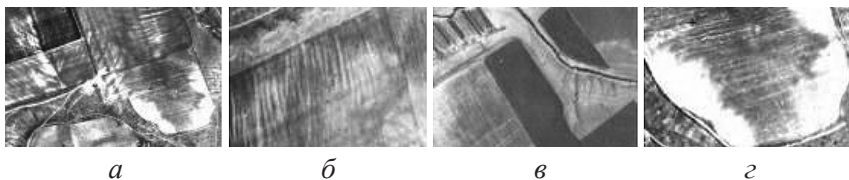


Рис. 4.1. Зображення проявів ерозійної деградації ґрунтового покриву на матеріалах дистанційного зондування:

а – прояви ерозійної деградації ґрунтів схилів; *б* – мікроулоговинна ерозія; *в* – яружна ерозія; *г* – площинна ерозія

казниками, використовуючи лабораторні та наземні радіометричні та спектрометричні вимірювання.

При визначенні площинної ерозії за космічними даними використовують два підходи, пов'язані зі станом поверхні ґрунтового покриву: ґрунтовий покрив у стані розораності і закритий рослинним покривом. Перший підхід полягає у визначенні ерозійних процесів на основі вивчення дешифрувальних ознак, передусім спектральних характеристик ґрунту залежно від змін вмісту гумусу, гранулометричного складу та інших характеристик ґрунту. Добре відомими у цьому відношенні є дослідження спектральних характеристик ґрунтів, виконані Б.В. Виноградовим, К.Я. Кондратьєвим, П.П. Федченко, В.В. Козодеровим, Condit та ін. [4–7, 8, 9, 22–24].

На території України дослідження ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського» показали, що за аналізом спектральних характеристик з високою точністю можна оцінювати такі параметри ґрунту, як вміст гумусу [24–26], його гранулометричний склад [27], вміст рухомих форм заліза [28]. У 1999 р. А.В. Шатохіним, А.Б. Ачасовим та М.О. Линдіним було запропоновано технологію аерокосмічного контролю за гумусованістю ґрунтів [29]. Водночас розробляли оновлену методологію ґрунтового картографування на засадах використання матеріалів ДЗЗ, яка дістала логічне завершення у 2005 р. у вигляді методики «Коригування ґрунтово-картографічних матеріалів за допомогою космічної зйомки» [24]. Під керівництвом С.Ю. Булигіна було розроблено алгоритм картографування параметрів протиерозійної стійкості ґрунтів за даними ДЗЗ [3].

Другий підхід полягає в оцінюванні продуктивності (врожайності) або біомаси рослинності, наявності або відсутності її стрес-

сів, заснований на вивченні спектральних властивостей рослинного покриву [30]. При моніторингу ерозійних процесів доцільно комплексно використовувати ці два підходи, що доповнюють один одного та найбільш повно і всебічно відображають різні, але тісно взаємопов'язані, прояви процесів, що зумовлюють стан та родючість ґрунтів.

Складність і різноманітність будови ґрунтів, а також багатогранність процесів, які протікають під час взаємодії випромінювання з окремими компонентами ґрунту, утруднюють теоретичний опис залежностей між відбивною здатністю і фізико-хімічними параметрами ґрунту. Тому при вивченні відображення ґрунтів, зокрема й ерозійних процесів, переважає емпіричний підхід.

Спектральні властивості ґрунтів та дешифрувальні ознаки проявів водної ерозії. Сприйнятливість ґрунтів до ерозії визначають такими його властивостями, як: текстура, структура, вологопроникливість, щільність, шорсткість та вміст органічних речовин. Такі властивості ґрунту, як текстура ґрунту, вміст органічних речовин, вологи, оксидів заліза і ґрунтових мінералів впливають на спектральний коефіцієнт відбиття, що дає можливість класифікувати стан поверхні [5, 7, 9, 22, 31]. Змив верхніх шарів ґрунту також призводить до змін спектральних характеристик його поверхні. У зв'язку зі змивом верхніх генетичних горизонтів зменшується вміст гумусу та сполук заліза у верхньому біологічно активному шарі ґрунту. У результаті поверхня освітлюється, а на сильноеродованих ґрунтах ґрунтоутворювальна порода поступово стає видимою на поверхні [32]. Це призводить до зміни забарвлення верхнього шару ґрунтового покриву, і відповідно до змін у його спектральних яскравостях (рис. 4.2). Якщо ці зміни добре відомі і кількісно визначені, то за даними багатозональних космічних зніманих можна давати просторові та часові оцінки інтенсивності ерозійних процесів [9, 33, 34].

Варто відмітити, що ґрунти навіть достатньо невеликого регіону, наприклад фізико-географічного району, значно варіюють за своїми спектрофотометричними характеристиками. Це не дає можливості екстраполювати визначені залежності, отримані при дослідженнях певних територій на інші землі. На думку Б.В. Виноградова [4], використання аналітично заданих функцій залежності даних дистанційного зондування від вмісту гумусу можливе тільки за обов'язкового одержання серії градуированих кривих на ключових майданчиках у

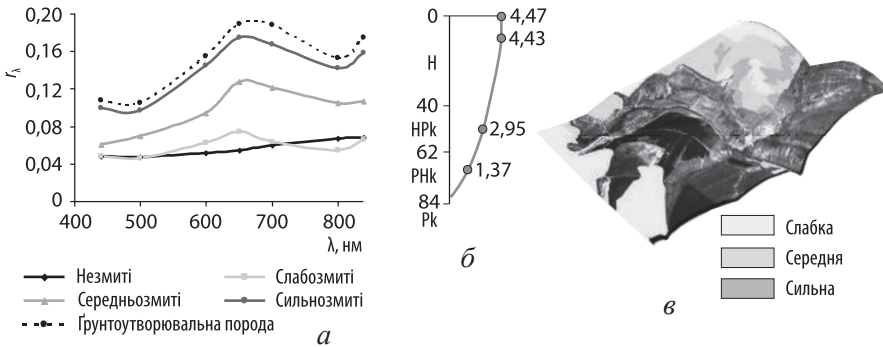


Рис. 4.2. Просторове визначення ерозії чорнозему звичайного за змінами спектральних характеристик поверхні:

a – криві СКЯ різного ступеня змитості; *б* – розподілення значень вмісту гумусу по профілю; *в* – класифікація площинної ерозії

межах типових ландшафтів. Це дасть змогу екстраполювати одержані результати на території ландшафтів-аналогів з однотипними ґрунтами, ґрунтоутворювальними породами, засоленням і зволоженням.

Ця думка знаходить підтвердження у висновках Henderson із спів-авт. [35]. Ними встановлено, що залежність вмісту гумусу від його оптичних характеристик є слабкою, якщо у вибірці містяться зразки ґрунтів з різних ландшафтів. Однією із причин цього називається вплив неоднорідності ґрунтоутворних порід. Аналогічні висновки наведено у роботах Fernandez та ін. [24]. Просторова неоднорідність відображення ґрунту пов'язана з неоднаковим вмістом і складом органічних сполук, серед яких найбільшу властивість забарвлення мають гумінові кислоти і, можливо, речовини групи гуміна. Ще за результатами досліджень Обухова й Орлова [36] було встановлено, що на співвідношення відображення та поглинання і на колір ґрунту значно впливає вміст органічної речовини, співвідношення гумінової кислоти та фульвокислот, а також сполук заліза. Так, гумінова кислота сильно поглинає світло, сумарне відображення, за даними Обухова, сягає 2%. Гумінова кислота практично ахроматична речовина. Фульвокислоти відображають в 1,5–2 рази більше у синій і в 3–4 рази більше енергії у середній і червоній зонах. Таким чином, на характер спектрального коефіцієнта яскравості (СКЯ) ґрунту впливає співвідношення гумінових та фульвокислот у гумусі ґрунту, яке визначається типом ґрунтоутворення.

Кількісно цей фактор визначають вмістом гумінових кислот у складі гумусу, тобто відношенням Сгк:Сфк і згідно з Орловим, оптичною щільністю гумусових речовин. Ці ознаки, як правило, корельовані. Фракційний склад гумусу закономірно змінюється і за вертикальним профілем ґрунту. Як правило, з глибиною знижується частка гумінових кислот і збільшується частка фульвокислот, тобто відношення Сгк:Сфк змінюється до 0,1–0,3, а іноді й до нуля. Очевидно, що залежно від співвідношення Сгк:Сфк будуть змінюватися й оптичні характеристики ґрунту, що, у свою чергу, буде впливати на кореляційні залежності між СКЯ-ґрунту і вмістом гумусу.

Оцінка ступеня еродованості ґрунтового покриття. Використання систем багатозонального і гіперспектрального знімання дає можливість отримувати кількісні характеристики спектрального відбиття та випромінювання й формалізувати процеси моделювання, що надає можливості для застосування автоматизованої класифікації еродованих земель. Застосовують різноманітні алгоритми неконтрольованої або контрольованої класифікації [31, 37–39]. Комбінування даних різних знімальних систем [40] і регресійних моделей визначення ерозії та її інтенсивності за значеннями спектрального відбиття [13], дає можливість доволі задовільно визначати розподілення еродованості ґрунтового покриття в агроландшафтах.

Логічна модель визначення та ідентифікації водної ерозії ґрунту ґрунтується на комплексному використанні даних космічного знімання, наявної тематичної і картографічної інформації та опорних тематичних даних щодо характеристики ґрунтового покриття (спектральні, агрохімічні) (рис. 4.3) [12]. Водна ерозія ідентифікується на основі класифікації за основними дешифрувальними ознаками у межах однорідних за оптичними характеристиками ґрунтових ареалів, геостатистичного аналізу і математичного моделювання вмісту гумусу за різного ступеня еродованості ґрунту з подальшим картографічним моделюванням ерозійної деградації у просторі.

На першому етапі реалізації моделі проведено об'єктно-орієнтовану класифікацію на базі формалізованих експертних знань щодо сигнатури ознак (спектральних, структурних, текстурних і контекстуальних) для ідентифікації класу (маски) сільськогосподарських угідь з диференціацією на класи «зорані землі», «землі під посівами» і «землі під природною рослинністю».

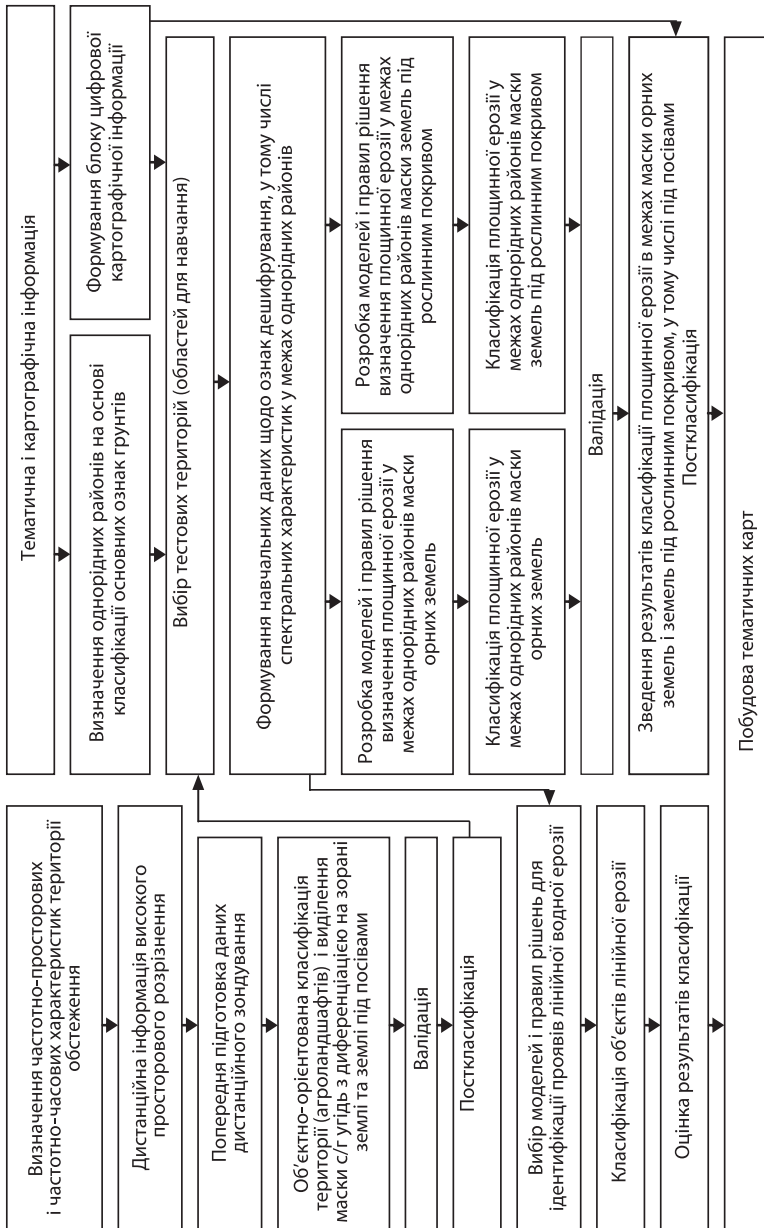


Рис. 4.3. Логічна модель класифікації водної ерозії ґрунтів за матеріалами дистанційного знімання високого просторового розрізнення [12]

При вирішенні завдання об'єктно-орієнтованої класифікації маси сільгоспугідь доцільно використовувати як вихідні інформативні шари зображення багатозонального космоснімка, так і NDVI та текстурні індекси, підготовлені на етапі попередньої обробки ДДЗ. Сформувавши ієрархію класів та встановивши для кожного класу правила рішення і порогові значення, здійснюють класифікацію на рівнях, які, наприклад, ідентифікують посіви озимих культур і природну рослинність, та видаляють помилкові одиничні об'єкти.

Подальшим етапом класифікації є розробка правил рішення для визначення та ідентифікації проявів водної ерозії за матеріалами ДДЗ. У цьому відношенні необхідною стає процедура отримання навчальної вибірки. Вона є обов'язковим технологічним елементом аерокосмічних досліджень і використовується для створення регресійних моделей визначення дешифрувальних ознак.

За польових умов діагностику градацій еродованості ґрунтів проводять за їхніми морфологічними ознаками – ступенем еродованості генетичних горизонтів. Наразі підходи до класифікації еродованих ґрунтів поділяють на дві великі групи: методики, що встановлюють ступінь змитості ґрунтів за зменшенням частини їхнього генетичного профілю, і методики, які визначають ступінь еродованості ґрунтів за зменшенням вмісту гумусу.

За еталон діагностики еродованих ґрунтів за ступенем змитості прийнято однойменний «типовий образ» повнопрофільного ґрунту, який, як правило, є характерним для плато. При проведенні робіт з картографування, наприклад, чорноземних ґрунтів, використовують схему класифікації ґрунтів за ступенем еродованості відповідно до їхнього забарвлення: при слабкій еродованості – слабоосвітлене, середній – освітлене, а сильній – світле.

Існують деякі відмінності в окремих підтипах ґрунтів, але принцип (тренд) втрати гумусу у кожній з трьох ступенів змитості для чорноземів відповідає приблизно ряду: 20, 40 і 60%. Внаслідок втрати найбільш багатих гумусом і відповідно найбільш темних за тоном горизонтів на поверхні оголюються шари, які мають інше, як правило, менш інтенсивне забарвлення. Можливими є два варіанти. Перший варіант: якщо забарвлення монотонно і рівномірно зменшується вниз по ґрунтовому профілю, як це відбувається у чорноземах, тоді ступінь змитості (або ступінь еродованості) можна визначити через співставлення спектрів відбиття верхнього горизонту змитого ґрунту

і спектрів відбиття різних горизонтів незмитого. Збіг спектрів вказує, який з горизонтів знаходиться на поверхні. Другий варіант більш складний і відноситься до ґрунтів, профіль яких складений різними за кольором горизонтами. При оранці верхній орний шар формується завдяки змішуванню частини верхнього гумусного горизонту, яка залишилася з нижчим. Вклад кожного шару в змішаний колір залежить від ступеня змитості та потужності змішаних горизонтів. При цьому досвід дешифрування свідчить, що найбільша контрастність у тонах зображення простежується на свіжозораних ділянках або ділянках з рослинами у фазу сходів. На полях з розвиненими посівами на змитість ґрунтів може вказувати стан посівів (зрідженість або з низьким вмістом хлорофілу); однак вона може бути зумовлена й іншими факторами. На ділянках, зайнятих природним або аборигенним рослинним покривом значної зімкнутості, прямі ознаки площинного змиву ґрунтів використовувати, як правило, не вдається.

Враховуючи те, що еталонних моделей індикації еродованості типових ґрунтових відмін за спектральними ознаками не існує, загальним підходом до визначення цих ознак (індикаторів) є отримання даних щодо них безпосередньо на тестових ділянках і топопрофілях у межах території дослідження. Вибір масиву точок для навчальної вибірки і валідації результатів дешифрування здійснюють у межах однорідних за оптичними характеристиками ґрунтів територій. Їх формують на основі кластеризації даних за вмістом фізичної глини в ґрунтах, розташованих у межах території дослідження.

Але значна кількість зразків ґрунту, необхідних для навчальної вибірки, а також великий обсяг аналітичних робіт не забезпечують оперативності отримання даних. Більш прийнятним є визначення вмісту гумусу за спектральними характеристиками безпосередньо в польових умовах за розрахованими математико-статистичними моделями зв'язку. Обсяг навчальної вибірки за цих умов скорочується до вибірки даних, необхідних для розрахунку моделей. Інший обсяг навчальної вибірки для ідентифікації еродованих площ визначають безпосередньо за даними польового спектрометрування. При застосуванні такої технології зменшуються витрати і тривалість проведення робіт із просторового визначення ступеня еродованості ґрунтового покриву.

Відпрацювання методів класифікації площинної ерозії було проведено на Кіровоградському тестовому полігоні за матеріалами зні-



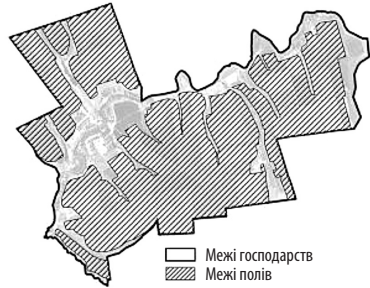
Рис. 4.4. Технологічна схема передпольового камерального етапу з класифікації водної ерозії ґрунтів за матеріалами дистанційного знімання високого просторового розрізнення

мання ШСЗ Landsat від 17 квітня 2013 р. і в межах тестових полігонів Канівського району за даними ШСЗ RapidEye за квітень 2009 р.

Для визначення показників, за якими проводили групування ґрунтових відмін в однорідні райони, на попередньому камеральному етапі було залучено літературні та фондові джерела щодо різноманітних показників профілів типових ґрунтових відмін [41, 42]. Аналіз передбачав визначення провідних ознак (характеристик ґрунту), пов'язаних з відношенням $S_{гк}:S_{фк}$ і за цими ознаками, по аналогії, диференціювати ґрунтові відміни при проведенні польових робіт на групи з однаковим типом гумусу (рис. 4.4).

За результатами обробки літературних і фондових джерел щодо різноманітних показників профілів типових ґрунтових відмін, зокрема даних щодо гранулометричного складу, $pH_{вод.}$, $pH_{сол.}$, гідролітичної кислотності, ємності поглинання, ступеня насиченості основами, фізичних характеристик, вмісту гумусу, співвідношення $S_{гк}:S_{фк}$, гру-

Рис. 4.5. Маска класу «орних земель», класифікована у межах тестового господарства Кіровоградського полігона



пового і фракційного складу гумусу найбільш значущі кореляційні залежності відношення Сгк:Сфк було встановлено з фракцією гранулометричного складу менше 0,01 і 0,001 мм (відповідно $r=0,76$; $r=0,69$), ступенем насиченості основами ($r=0,65$), гідролітичною кислотністю ($r=0,5$). У свою чергу ступінь насиченості основами тісно корелює з тими самими фракціями гранулометричного складу ($r=0,82$), $pH_{\text{сол.}}$ ($r=0,74$) і з $pH_{\text{вод.}}$ (0,5).

Виділення різних класів ґрунтових відмін за гранулометричним складом було проведено на основі кластерного аналізу даних гранулометричного складу за фракціями 0,01 і 0,001 [43]. Класи, виділені при кластеризації даних за гранулометричним складом (фракції 0,01 і 0,001) і відношення Сгк:Сфк майже повністю відповідають класам ґрунтових відмін, виділених за гранулометричним складом. Враховуючи це, групування ґрунтових відмін тестових аграрних полігонів за відношенням Сгк:Сфк проводили за гранулометричним складом ґрунту.

На першому етапі групування у межах тестового господарства за даними ШСЗ Landsat було класифіковано маску класу «орних земель» і виділено зорані землі (рис. 4.5), а на основі даних із вмісту фізичної глини виокремлено однорідні за оптичними характеристиками класи ґрунтів. У межах маски «орних земель» виділено п'ять ґрунтових класів (рис. 4.6). З аналізу співвідношення площ однорідних класів ґрунтів випливає, що до основних (фонових) належать такі їхні класи: чорноземи звичайні важко-суглинкові (клас 1) та чорноземи зви-

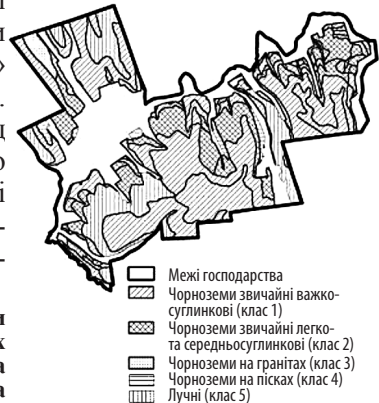


Рис. 4.6. Схема однорідних за оптичними характеристиками класів ґрунтів у межах орних земель тестового господарства Кіровоградського полігона

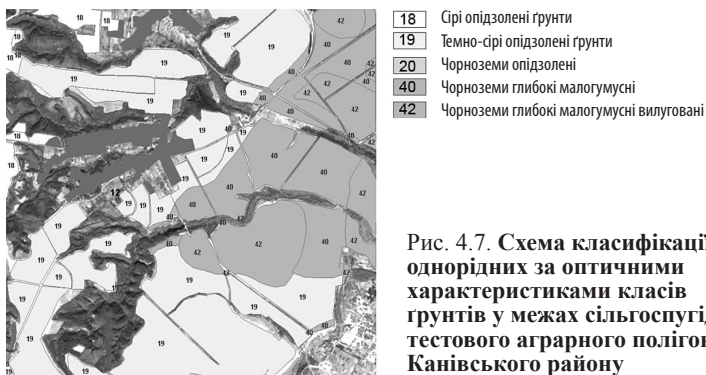


Рис. 4.7. Схема класифікації однорідних за оптичними характеристиками класів ґрунтів у межах сільгоспугідь тестового аграрного полігону Канівського району

чайні легко- та середньосуглинкові (клас 2), які разом становлять близько 80% загальної площі.

Площа п'ятого класу дорівнює лише 2% загальної площі і при об'єднанні з четвертим класом, який є близьким за спектральними властивостями, займає близько 5%. Тому при розробці моделей множинної регресії ці два класи було об'єднано.

На тестовому аграрному полігоні Канівського району в межах класифікованої за даними RapidEye маски «орних земель» виділено п'ять однорідних за оптичними характеристиками класів ґрунтів (рис. 4.7).

Процедури відбору зразків ґрунту при польових обстеженнях та визначення їх фізико-хімічних характеристик у камеральних лабораторних умовах не забезпечують належної оперативності при формуванні навчальної вибірки. Більш прийнятним є визначення їх характеристик за математико-статистичними моделями зв'язку з оптичними характеристиками безпосередньо у польових умовах. У цьому випадку зменшується тривалість як польового, так і камерального періоду і витрати на проведення робіт. Лабораторній обробці піддається лише певна кількість зразків ґрунту, необхідна для розробки регресійних моделей. Таку технологію збору даних для навчальної вибірки було апробовано на тестових полігонах.

Обстеження елементів агроландшафтів і систем землекористування, що зазнали впливу деградаційних процесів різного ступеня та інтенсивності, проводили на обраних уздовж схилів профілях, які охоплювали деградаційні процеси різного ступеня у межах однорідних районів. Профілі розташовували на зораних полях і посівах

пшениці озимої. Зорані землі обстежувались у ранньовесняний і ранньоосінній періоди, а поля під посівами пшениці озимої – у фазі відновлення вегетації – кушіння, виходу в трубку, колосіння та повної стиглості.

Спектральні характеристики ґрунту визначали польовим спектрометром РПС-1 (у восьми спектральних інтервалах, характерних для кривої СКЯ-ґрунтів – 440, 490, 532, 615, 670, 763, 800, 900 нм) з додержанням умов згідно з [22], які забезпечували мінімальний рівень похибок при вимірюваннях *in situ*. Координатну прив'язку точок відбору проводили приладом GPS. Спектральні характеристики ґрунтів визначали також для фонових ґрунтових відмін при вибіркового закладанні повних ґрунтових розрізів. Спектрометрування генетичних горизонтів з метою визначення оптичних характеристик ґрунтоутворювальних порід та проміжних генетичних горизонтів проводили з відбором зразків для лабораторних аналізів. Під час проведення обстежень на посівах пшениці озимої визначали індекс NDVI приладом GreenSeeker Handheld Crop Sensor та хлорофіл і вміст азоту в рослинах приладом Chlorophyll Meter SPAD-502Plus (N-сенсор) в режимі *in situ*.

Визначення моделей зв'язку СКЯ з умістом гумусу проводили для ґрунтових відмін, розташованих у межах однорідних районів тестових територій, зокрема: сірих опідзолених супіщаних; темно-сірих опідзолених легкосуглинкових; темно-сірих опідзолених та чорноземів опідзолених і реградованих легкосуглинкових; чорноземів глибоких малогумусних крупнопилуватолегкосуглинкових; чорноземів типових слабогумусованих легкосуглинкових; чорноземів типових легкосуглинкових; чорноземів типових малогумусних легкосуглинкових; чорноземів звичайних малогумусних важкосуглинкових; чорноземів звичайних малогумусних середньосуглинкових (див. рис. 4.6, 4.7). Розраховано парні коефіцієнти кореляції СКЯ, координат кольору, суми координат кольору, вегетаційних індексів і відсоткового вмісту гумусу (табл. 4.1). Перелік вегетаційних індексів складався з: індексу вмісту вапна – $SK=r_{450}+r_{650}$ [44], індексу вмісту органічної речовини – $SO=r_{750}/r_{450}$ [45], індексу вмісту заліза – $RF=r_{750}-r_{900}$ [46] та індексу мінералізації – $IM=TM1/TM2$ [44] ($TM1, TM2$ – 1,2 канали сканера TM ШС3 Landsat).

Як видно з аналізу таблиці, вміст гумусу в усіх ґрунтових відмінах має від'ємний кореляційний зв'язок з усіма СКЯ (коефіцієнт

Таблиця 4.1. Парні коефіцієнти кореляції вмісту гумусу в ґрунті і СКЯ (440, 490, 532, 615, 670, 763, 800, 900 нм), координат кольору (X, Y, Z, W) і вегетаційних індексів тестових аграрних полігонів

Показ- ник	Сірі опідзолені і супіщані	Темно-сірі опід- золені легкосуг- линкові	Темно-сірі опідзо- лені та чорноземні опідзолені регра- довані легко- суглинкові	Чорноземні типові слабогумусовані легкосуглинкові	Чорноземні типові малогумусні лег- косуглинкові	Чорноземні типові і легкосуглинкові	Чорноземні гли- бокі малогумусні крупнопилувато- легкосуглинкові	Чорнозем звичай- ний малогумус- ний
R440	-0,3122	0,3641	-0,6326	-0,4111	0,2035	-0,3712	-0,1426	0,1292
R490	-0,4195	0,3909	-0,7566	-0,3067	0,0680	-0,5747	-0,3871	-0,5450
R532	-0,3672	0,3391	-0,7409	-0,4421	-0,5132	-0,4727	-0,2755	-0,4470
R615	-0,4196	0,4393	-0,7778	-0,4514	-0,4049	-0,5603	-0,4538	-0,4758
R670	-0,4053	0,3887	-0,7345	-0,2012	-0,5134	-0,5135	-0,3751	0,2706
R763	-0,3772	-0,1294	-0,7371	-0,4671	-0,2639	-0,5999	-0,3972	-0,6325
R800	-0,3783	-0,3246	-0,6239	-0,4085	-0,2253	-0,4542	-0,1282	-0,2049
R900	-0,2243	-0,2884	-0,5745	-0,3818	-0,505	-0,3756	-0,0417	-0,1143
X	0,3476	-0,4376	-0,7252	-0,4336	-0,1542	-0,5384	-0,3415	-0,1415
Y	0,3934	-0,4112	-0,7557	-0,4469	-0,5178	-0,5720	-0,3647	-0,3979
Z	0,3581	-0,3706	-0,6526	-0,4193	0,1468	-0,4141	-0,1779	0,0346
W	0,3665	0,4007	-0,6953	-0,4193	-0,0298	-0,4947	-0,2707	-0,1164
I1	-0,2055	-0,3550	0,5187	0,2242	-0,3086	0,0659	-0,23	-0,5878
I2	-0,4502	-0,3146	0,2560	-0,4671	-0,4285	0,1304	0,1381	-0,2699
I3	-0,3565	0,4218	-0,6797	-0,3368	-0,0572	-0,4497	-0,2483	0,2754
I4	-0,0927	0,3915	0,1783	0,2180	-0,0685	0,0221	-0,3480	-0,2928
I5	-0,1443	0,2625	-0,0489	0,0919	0,2268	-0,1105	0,1407	-0,1468

Примітка: I1 – 763/440 нм; I2 – 763/490 нм; I3 – 440+660 нм; I4 – 763–900 нм; I5 – 490/612 нм.

парної кореляції досягає максимальних значень від 0,42 для сірих опідзолених супіщаних до 0,78 для темно-сірих опідзолених та чорноземів опідзолених реградованих легкосуглинкових) і координатами кольору (X, Y, Z) та їх сумою (W). Вегетаційні індекси також переважно мають від'ємний кореляційний зв'язок.

Враховуючи значні похибки при проведенні польових вимірювань, вихідні робочі дані замінюють на дані, вираховані в результаті тренд-аналізу, і розраховують рівняння множинної регресії (табл. 4.2) [47].

У табл. 4.3 дано порівняльний аналіз вмісту гумусу, визначеного за лабораторними аналізами у зразках темно-сірого опідзоленого

Таблиця 4.2. Коефіцієнти рівнянь множинної регресії визначення вмісту гумусу за даними спектроскопічних вимірювань

Показник	Сірі опідзолені суглинки	Темно-сірі опідзолені легкосуглинкові	Темно-сірі опідзолені та чорноземні опідзолені регродовані легкосуглинкові	Чорноземи				Чорнозем звичайний малогумусний
				типові слабогумусовані легкосуглинкові	типові малогумусні легкосуглинкові	типові і легкосуглинкові	глибокі малогумусні крупнопилуватолегкосуглинкові	
Constant	-1,70080	1,07256	1,945457	1,31373	-3,37124	0,40389	-0,000683	-3,85562
R1	-13,7291	-6,54414	1,208911	4,14618	-2,48655	0,19490	0,0000402	-1,12764
R2	3,29618	0,72665	2,5483	-11,1237	80,92308	0,93438	-0,000012	80,89326
R3	5,77938	-0,70894	-1,154132	-1,8084	16,36818	0,13655	-0,000522	104,0212
R4	8,78940	1,87395	-3,262705	1,16471	-22,2726	0,56069	-0,000059	-106,271
R5	6,12494	10,8336	1,255662	2,80828	3,96171	4,52892	0,0000132	0,909513
R6	8,21638	0,26066	1,669276	-0,56576	1,90319	0,39748	0,0007804	0,232739
R7	-0,68584	-3,05222	-0,435054	1,103094	-12,4203	1,25285	0,0000382	-0,00035
R8	-0,15945	0,84361	-0,579729	3,03894	2,03204	-0,31895	21505,076	21,26917

Таблиця 4.3. Порівняльний аналіз даних вмісту гумусу, визначених лабораторними аналізами (ЛА) та розрахованими за регресійною моделлю за спектральними характеристиками (СКЯ)

ЛА	СКЯ	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	ЛА	СКЯ	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %
2,54	2,25	0,29	11,43	2,46	2,27	0,19	7,53
2,21	2,24	0,03	-1,16	2,29	2,24	0,05	2,39
2,61	2,22	0,39	14,98	2,29	2,29	0,00	0,16
2,36	2,27	0,09	3,74	2,43	2,31	0,12	5,09
2,43	2,16	0,27	11,29	2,43	2,32	0,11	4,48
2,36	2,26	0,10	4,07	2,3	2,31	0,01	0,56
2,54	2,26	0,28	11,03	2,2	2,31	0,11	5,02
2,54	2,29	0,25	9,95	2,27	2,27	0,00	0,07
2,39	2,34	0,05	1,89	2,27	2,28	0,01	0,40
2,39	2,23	0,16	6,65	2,2	2,46	0,26	11,79
2,32	2,25	0,07	3,17	2,23	2,41	0,18	8,22
2,61	2,27	0,34	13,14	,34	2,40	0,06	2,36
2,73	2,31	0,42	15,40	2,23	2,53	0,30	13,34
2,36	2,24	0,12	5,03	2,27	2,16	0,11	4,70

деградованого легкосуглинкового ґрунту та розрахованого за моделями множинної регресії за даними спектральних вимірювань СКЯ. Середню абсолютну похибку розраховано за моделлю множинної регресії $\Gamma = 1,945 + 1,209 \cdot R1 + 2,548 \cdot R2 - 1,154 \cdot R3 - 3,263 \cdot R4 + 1,256 \cdot R5 + 1,669 \cdot R6 - 0,435 \cdot R7 - 0,58 \cdot R8$ ($\gamma = 0,978$) і становила 0,1560997, а середня відносна похибка – 6,311609%.

Рівняння множинної регресії є робочими моделями для визначення вмісту гумусу безпосередньо у польових умовах. Таким чином, технологія для визначення вмісту гумусу за спектральними характеристиками дає змогу оперативно з незначними витратами часу і коштів формувати навчальну вибірку.

Визначення еродованості орних земель (відкритого ґрунту). У межах виділеної маски орних земель Кіровоградського тестового полігона за координатами точок навчальної вибірки визначають поканально радіометричні характеристики точок багатозонального знімка ШСЗ Landsat (див. вкл. рис. 20). Формують вибірки для однорідних класів і розраховують матрицю кореляцій радіометричних характеристик і вмісту гумусу (табл. 4.4).

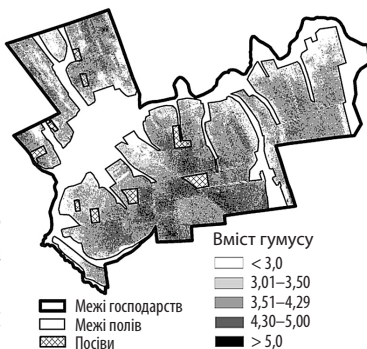
Для кореляції радіометричних характеристик і вмісту гумусу спостерігають від'ємні значення. Окрім того, виявилося, що для

Таблиця 4.4. Парні коефіцієнти кореляції вмісту гумусу в ґрунті та радіометричних характеристик ШСЗ Landsat*

Спектральний канал	Довжина хвилі, мкм	Просторове розрізнення, м	Чорнозем	
			звичайні важко-суглинкові, клас 1	звичайні легко- та середньосуглинкові, клас 2
R1	0,433–0,453	30	-0,08616424	0,17508811
R2	0,450–0,515	30	-0,18671322	-0,13465445
R3	0,525–0,600	30	-0,38384836	-0,14096474
R4	0,630–0,680	30	-0,32709449	-0,43665725
R5	0,845–0,885	30	-0,31383183	-0,00590255
R6	1,560–1,660	30	-0,27921164	-0,29464546
R7	2,100–2,300	30	-0,16285069	0,0224444
R8	0,500–0,680	15	0,14082281	-0,16322813
R9	1,360–1,390	30	0,44868727	-0,1352743
R10	10,30–11,30	100	0,48759112	0,17323846
R11	11,50–12,50	100	-0,08616424	0,21780346

Примітка. Для третього і четвертого класів навчальна вибірка була замалою для формування двох класів.

Рис. 4.8. Карта розподілення вмісту гумусу, отримана за даними космічного знімання з ШСЗ Landsat



кожного ґрунтового класу вищий коефіцієнт кореляції має різну комбінацію спектральних каналів. Це підтверджує доцільність районування ґрунтів.

Методом множинної регресії для кожного однорідного класу ґрунтів розраховували рівняння множинної регресії і здійснювали їх валідацію. Для першого класу ґрунтів підсумкове значення регресії для залежної змінної становило 0,85391, для другого класу ґрунтів – 0,799607. За результатами валідації абсолютна похибка для першого класу дорівнювала 0,32%, для другого – 0,28%, відносна похибка – відповідно 9 і 7,4%. На наступному етапі із застосуванням растрового калькулятора за вихідним знімком у межах окремого однорідного класу за відповідним рівнянням множинної лінійної регресії розраховують вміст гумусу.

Після виконання операції розрахунку вмісту гумусу в межах окремих класів ґрунту створюється мозаїка зображення на всю територію дослідження (рис. 4.8).

Для диференціації ступеня змитості використовують дані вмісту гумусу, отримані для різних генетичних горизонтів ґрунтових профілів, які закладаються в різних ґрунтових класах, а також у різних, за морфометричною ознакою (кути нахилу), ділянках території дослідження. Ґрунтуючись на встановленому розподіленні значень вмісту гумусу за генетичними горизонтами, проводять ідентифікацію оголеного горизонту за розрахованими моделями за спектральними характеристиками. Таким чином, для кожного ґрунтового району отримують відповідні градації класів ерозійності (див. вкл. рис. 21).

Посткласифікація. Для визначення площ еродованих земель та меж територій з різним рівнем ризику водної ерозії необхідно виконати переформатування результатів класифікації з растрового у векторний формат. При автоматичній векторизації растрового формату контури класів повторюють форму пікселів растрової матриці, що

залежно від роздільної здатності растру вносить похибку в розрахунки та ускладнює візуальне сприйняття результатів. Окрім того, часто виникає велика кількість дрібних за площею класів, які можна об'єднати з оточуючим класом. Таким чином, потрібно виконати ряд операцій з автоматизованої генералізації (посткласифікації) зображення з метою видалення мілких контурів (див. вкл. рис. 22).

На першому етапі проводять елімінацію дрібних ділянок, площа яких є настільки незначною, що ними можна знехтувати (рис. 4.9). Подальшим кроком є операція спрощення меж полігонів різних класів (зменшення кількості точок перелому меж полігонів). Результат спрощення меж полігонів представлено на рис. 4.10. На заключному етапі посткласифікації проводять згладжування меж полігонів (рис. 4.11) і складають карти розподілення площинної ерозії (див. вкл. рис. 23).

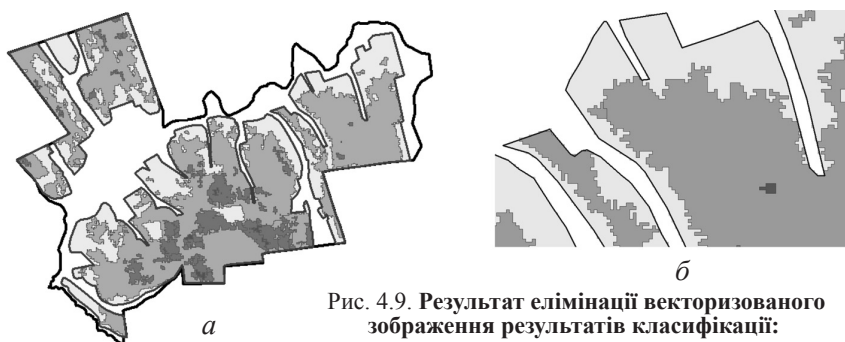


Рис. 4.9. Результат елімінації векторизованого зображення результатів класифікації:

a – у масштабі господарства; *б* – у масштабі окремих полів

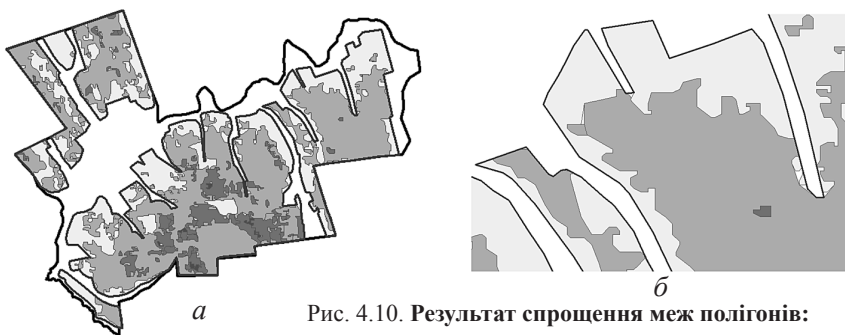


Рис. 4.10. Результат спрощення меж полігонів:

a – у масштабі господарства; *б* – у масштабі окремих полів

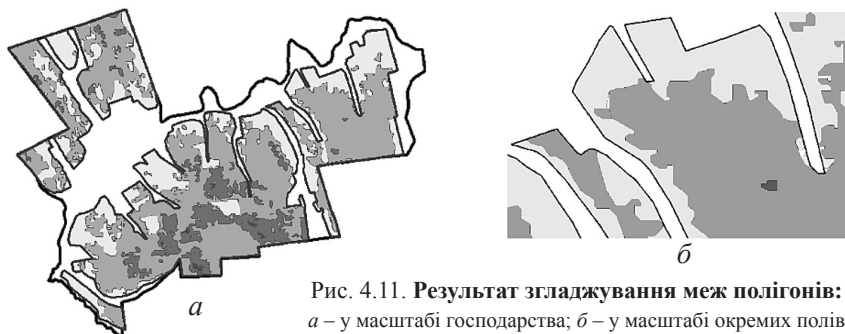


Рис. 4.11. Результат згладжування меж полігонів:
а – у масштабі господарства; б – у масштабі окремих полів

Оцінка ризику розвитку ерозійних процесів. Для оцінювання ризику розвитку ерозійних процесів як показника можна використовувати відсоткову частку полів з кутом нахилу схилу понад 3° у межах адміністративної одиниці. Якщо частка полів з кутом нахилу схилу понад 3° становить менше 10% – господарство має слабкий рівень ризику ерозії, від 10–20% – середній рівень ерозійного ризику, понад 20% – критичний рівень ерозійного ризику.

Загальна площа полів досліджуваного господарства становить 47,67 км². Визначена за картографічними матеріалами площа полів з кутом нахилу понад 3° становить 9,18 км², що сягає 19% загальної площі полів (див. вкл. рис. 24). За цими даними господарство має середній (наближений до критичного) рівень ерозійного ризику.

Середнє значення гумусу в межах ділянок полів з кутом нахилу понад 3° становить 3,12. Загальна площа сильнозмитих ґрунтів, визначена за розподілом вмісту гумусу за даними ДЗЗ сягає 14,71 км² (див. вкл. рис. 25). Це становить 31% загальної площі полів, що перевищує показники, отримані за традиційними методиками. Таким чином, згідно з результатами класифікації площинної ерозії, за даними ДЗЗ, господарство має критичний рівень ерозійного ризику та потребує запровадження протиерозійних заходів на принципах контурно-меліоративної системи зелекористування.

Визначення еродованості за станом рослинного покриву. У межах виділеного класу посівів озимих культур для класифікації площинної ерозії як опосередкованих показників деградації ґрунтів доцільно використовувати запропоновані R. Mathieu [48] вегетаційні індекси: індекс яскравості – *BI* та індекс червоності – *RI*, які визначають відповідно за формулами:

$$BI(x) = \sqrt{\frac{(\rho_{green}(x))^2 + (\rho_{red}(x))^2}{2}},$$

$$RI(x) = 255 \times (r_{red}(x))^2 / (r_{green}(x))^3,$$

та $BI_{re}RI_{re}$:

$$BI_{re}(x) = \sqrt{\frac{(\rho_{green}(x))^2 + (\rho_{rededge}(x))^2}{2}},$$

$$RI_{re}(x) = 255 \times \frac{(\rho_{rededge}(x))^2}{(\rho_{green}(x))^3},$$

де ρ – коефіцієнт спектральної яскравості відповідного каналу.

При опосередкованому визначенні вмісту гумусу за станом рослинного покриву доцільно застосовувати моделі множинної поліноміальної регресії, отриманої за визначеними даними вегетаційних індексів BI і BI_{re} . Ці моделі є більш точними порівняно із моделями множинної регресії, де використовують значення радіометрії з різних каналів. Апробацію цих моделей здійснювали на тестовій ділянці у межах тестового аграрного полігона Канівського району Київської області на посівах пшениці озимої у фазу весняного відновлення вегетації – кущіння за даними RapidEye (див. вкл. рис. 26, 27).

Класифікація лінійної ерозії. Можливості класифікації лінійних форм ерозії, за даними аерокосмічного знімання високого просторового розрізнення, визначають за їхніми геометричними й оптичними характеристиками та просторовою і радіометричною роздільною здатністю систем дистанційного знімання.

При дистанційній діагностиці струмкової ерозії, пов'язаної з виникненням вимоїн, що не зникають у результаті обробки ґрунтів, застосовують прийоми дешифрування, що використовують при обробці матеріалів аерознімання. Деталі і форми яружної ерозії (водороїни, вершки ярів) можна отримати тільки на космознімках самого високого просторового розрізнення (від 2 до 5 м) у вигляді вузьких, чітко окреслених контурів зазубреної форми. Через змив ґрунтів тон зображення зростаючих ярів зазвичай дуже світлий (див. вкл. рис. 26). За формою, розміром і особливостями зображення ярів можна також стверджувати про стадії їхнього розвитку та ступеня активності ерозійних процесів. Активно зростаючі водороїни та яри на початковій стадії розвитку мають широку овальну вершину з кру-

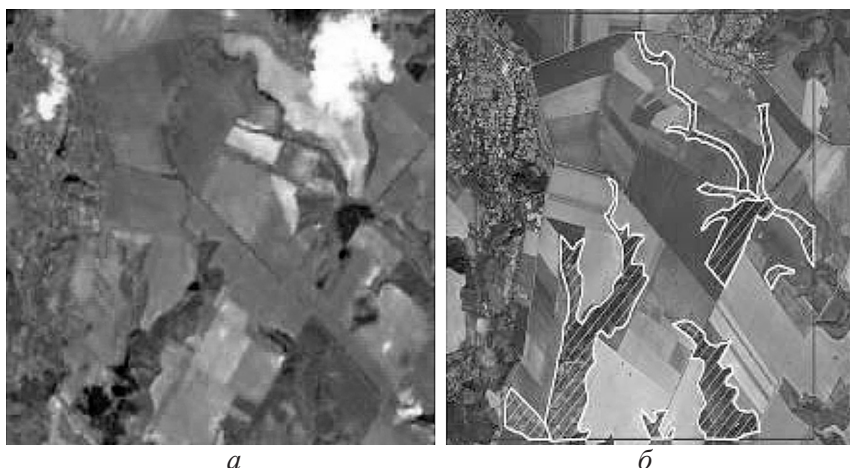


Рис. 4.12. Знімок високого просторового розрізнення ASTER
(просторове розрізнення 15 м, квітень 2013 р.):

а – прояви ерозії – яружно-балкова мережа; *б* – контури ярів

тою задньою стінкою, а яри, які припинили лінійний ріст, мають загострену в плані вершину та більш пологі задерновані схили.

На космічних знімках з роздільною здатністю понад 10 м деталі яружно-балкової системи, як правило, не відображаються, але добре виділяється мережа балок, що мають витягнуту звивисту деревовидну форму (рис. 4.12). Днища і схили балок зазвичай зайняті природною рослинністю, більш густою вологолюбною – у нижніх частинах схилів і по днищу, що зумовлює більш темний тон їх зображення. Характерну особливість знімків яружно-балкової мережі в цілому становить деревоподібний рисунок зображення, зумовлений інтенсивним розвитком ерозійних процесів. Особливо чітко виділяється яружно-балкова мережа з природною трав'янистою рослинністю у весняний і осінній період, при максимальній розораності полів, ще не зайнятих сходами (див. вкл. рис. 27).

Показником еродованості ґрунтового покриву є густина розмежування поверхні ерозійними формами, яку визначають відношенням суми довжин лінійних форм ерозії до одиниці площі даної території [4]. Для визначення розвитку яружної ерозії використовують коефіцієнти яружності, їх густоти, щільність та сумарну протяжність ярів [6].

Коефіцієнт яружності розраховують як відношення площі ярів (га) до площі орних земель (1 км^2).

Коефіцієнт щільності ярів – як кількість ярів на 1 км^2 .

Ступінь яружності розраховують за загальною площею ярів у межах тестового аграрного полігона (див. вкл. рис. 28).

Сумарну протяжність ярів, або густоту *яружності* розраховують як загальну довжину ярів на одиницю площі (1 км^2). За густотою та щільністю яружної мережі розрізняють такі категорії яружності: яри відсутні; дуже низький ступінь яружності (густина менше $0,1 \text{ км/км}^2$, щільність менше $0,4 \text{ од./км}^2$), низький ступінь яружності (густина $0,1\text{--}0,2 \text{ км/км}^2$, щільність $0,4\text{--}0,7 \text{ од./км}^2$); середній ступінь яружності (густина $0,2\text{--}0,5 \text{ км/км}^2$, щільність $0,7\text{--}1 \text{ од./км}^2$); високий ступінь яружності (густина понад $0,5 \text{ км/км}^2$, щільність понад 1 од./км^2).

Загальна модель класифікації визначення ерозійності агроландшафту складається з картографування яружної мережі за топографічними картами крупних масштабів із залученням матеріалів оперативного космічного знімання системами високого просторового розрізнення, розрахунку показників яружної ерозії та створення інтегрованої карти ступеня яружності агроландшафту, на основі якої оцінюють його ерозійність у межах адміністративних утворень (рис. 4.13).

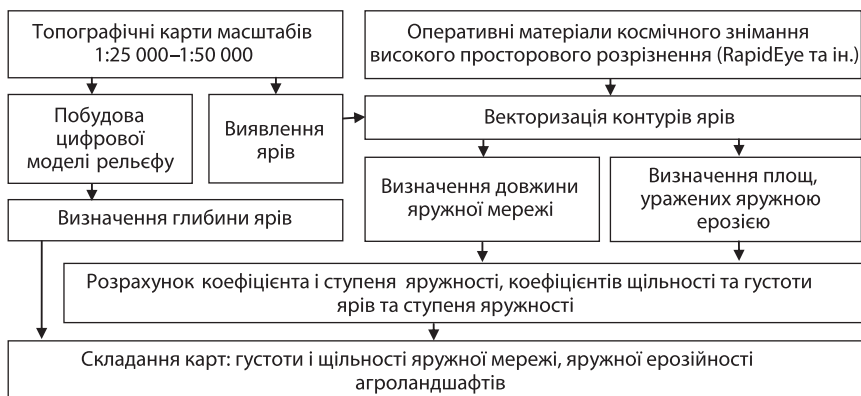


Рис. 4.13. Модель класифікації площ яружності та ступеня яружності за даними ДЗЗ високого просторового розрізнення

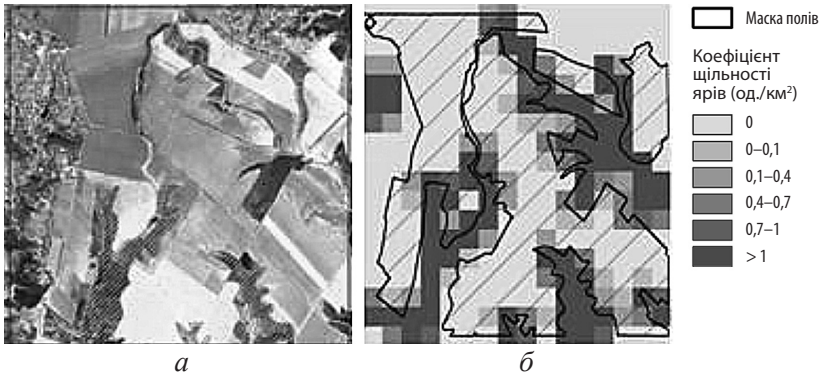


Рис. 4.14. Дешифрування ярів на космічному зображенні:

а – маска посівів, суміщена з картою щільності ярів, складеної за результатами дешифрування; б – у межах ТАП

У результаті дешифрування об'єктів лінійної ерозії за матеріалами оперативного космічного знімання складають інтегровану карту ступеня яружності агроландшафту, на основі якої оцінюють інтенсивність лінійної ерозії як у межах окремих землекористувань, так і адміністративних утворень. Приклад дешифрування ярів та їхньої щільності у межах тестового полігона, за даними космічного знімання високого просторового розрізнення з Aster, наведено на рис. 4.14.

Моніторинг дефляційних процесів ґрунтового покриву. Вітрова ерозія завдає непоправної шкоди ґрунтам, агроекосистемах та навколишньому природному середовищу загалом. Як правило, катастрофічні пилові бурі (чорні бурі), коли швидкість вітру перевищує 17–18 м/с, проявляються з періодичністю у 5–7 років, а локальні – місцевого та агротехнологічного характеру – майже щороку. Важливим є просторовий моніторинг цього небезпечного явища, яке може розповсюджуватися на площі до 5–6 млн га. Це особливо характерно для зони Степу під час проходження кліматичних фронтів. В епіцентрі таких пилових бур втрати ґрунту досягають 50–100 т/га, знищуються посіви не лише ярів, але й озимих культур. Дані космічних знімів є ефективним інструментом оцінювання просторового розповсюдження вітрової ерозії (дефляції) ґрунтів. На вклейці на рис. 29 наведено етапи проходження пилової бурі на території Херсонської області, яка спостерігалася навесні 2007 р.

На часовій послідовності супутникових знімків з ШСЗ NOAA простежується зародження і динаміка проходження пилової бурі, яка покрила всю територію області і р. Дніпро. Руйнівні наслідки дії цієї бурі на сільськогосподарських полях наведено на (див. вкл. рис. 30). Результати цих космічних знімків нагадують про актуальність постійної уваги до запровадження в зоні Степу системи протидефляційних лісомеліоративних та агротехнічних заходів.

Все викладене вище дає можливість зробити висновки, що сучасні супутникові системи є ефективним інструментом визначення інтенсивності ерозійної деградації ґрунтового покриву та просторового її розповсюдження в агроландшафтах. Оперативна та історична супутникова інформація щодо ерозійної деградації земель є науково-методичним підґрунтям удосконалення не лише традиційної системи агроекологічного моніторингу, але й проектування, прогнозування та застосування системи протиерозійних заходів на принципах контурної організації території землекористування, удосконалення структури агроландшафтів, диференційованого використання орних земель, корегування посівних площ і сівозмін відповідно рельєфу, запровадження ґрунтозахисних технологій обробітку та протияружних лісомеліоративних і гідротехнічних заходів, а також консервації сильноеродованих ґрунтів для їх природного відновлення.

Література до розділу 4

1. Андроников В.Л. Аэрокосмические методы изучения почв. Москва: Колос, 1979. 280с.
2. Афанасьева Т.В. Использование аэрометодов при картировании и исследовании почв. Москва: Изд-во МГУ, 1965. 159 с.
3. Булыгин С.Ю., Ачасов А.Б. Использование данных дистанционного зондирования при картографировании параметров эродированности почв. *Стан земельних ресурсів в Україні: проблеми, шляхи вирішення*: наук.-практ. конф.: тези доп. Київ: Центр екологічної освіти та інформації, 2001. С. 94–96.
4. Виноградов Б.В. Дистанционная индикация содержания гумуса в почвах. *Почвоведение*. 1981. № 11. С. 114–123.
5. Виноградов Б.В. Аэрокосмический мониторинг экосистем. Москва: Наука, 1984. 320 с.

6. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг гумусового состояния почв. *Почвоведение*. 1988. № 4. С. 38–47.
7. *Виноградова Н.В.* Возможности спектрофотометрических методов исследований в интерпретации результатов аэрофото-съемки. *Учен. записки инж.-технол. фак. Иван. гос. архит.-строит. Академии*. 1999. № 2. С. 28–30.
8. *Кондратьев К.Я., Васильев О.Б., Федченко П.П.* Опыт распознавания почв по их спектрам отражения. *Почвоведение*. 1978. № 4. С. 5–8.
9. *Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Федченко П.П.* Аэрокосмические исследования почв и растительности. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 231 с.
10. *Методические* рекомендации по применению материалов аэрофотосъёмок для исследования и расчёта характеристик водной эрозии почв. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 110 с.
11. *Liu J.G. et al.* (2001). Land surface change detection in a desert area in Algeria using multi-temporal ERS SAR coherence images. *International Journal of Remote Sensing*. № 22 (13): 2463–2477.
12. *Petrychenko V. F., Tarariko O.H., Syrotenko O.V.* (2014). Space technologies in agri-environmental monitoring system. *Agric. sci. pract.* № 1: 3–12.
13. *Price K.P.* (1993). Detection of soil erosion within pinyon-juniper woodlands using Thematic Mapper (TM) data. *Remote Sensing of Environment*. № 45 (3): 233–248.
14. *Zhang X.* (1999). Soil erosion modelling at the global scale using remote sensing and GIS. Ph.D. Thesis, University of London.
15. *Кравцова В.И.* Космические методы исследования почв. Москва: Аспект пресс, 2005. 190 с.
16. *Сладкопевцев С.А.* Изучение и картографирование рельефа с использованием аэрокосмической информации. Москва: Недра, 1982. 216 с.
17. *Toutin T., Cheng P.* (2003). Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images. *Optical engineering*. N 41 (9): 2102–2106.
18. *Toutin T., Gray L.* (2000). State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. N 55 (1): 13–33.

19. *Khawlie M. et al.* (2002). Remote sensing for environmental protection of the eastern Mediterranean rugged mountainous areas, Lebanon. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. N 57 (1–2): 13–23.
20. *Haboudane D. et al.* (2002). Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally-based information and digital geomorphometric attributes. *International Journal of Remote Sensing*. N 23 (18): 3795–3820.
21. *Reusing M., Schneider T., and Ammer U.* (2000). Modelling soil loss rates in the Ethiopian Highlands by integration of high resolution MOMS-02/D2-stereo-data in a GIS. *International Journal of Remote Sensing*. N 21 (9): 1885–1896.
22. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Особенности методики спектрометрических измерений природных объектов. *Исследования Земли из космоса*. 1993. N 1. С. 15–24.
23. Федченко П.П., Кондратьев К.Я. Спектральная отражательная способность некоторых почв. Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. 231 с.
24. Шатохін А.В., Трускавецький С.Р., Биндич Т.Ю. Коригування ґрунтово-картографічних матеріалів за допомогою космічної зйомки: метод. реком. Харків, 2005. 20 с.
25. Шатохін А.В., Ачасов А.Б., Загородня Л.О. Зв'язок вмісту вуглецю в ґрунтах Лісостепу і Степу України з їх спектральними характеристиками. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 1998. Вип. 59. С. 25–31.
26. Шатохин А.В., Лындин М.А. Сопряженное изучение черноземов Донбасса наземными и дистанционными методами. *Почвоведение*. 2001. № 9. С. 1037–1044.
27. Шатохин А.В. Дистанционное зондирование и геоинформационные технологии при исследовании почвенного покрова. *Третя Українська нарада користувачів аерокосмічної інформації: зб. наук. доп.* Київ: Знання України, 2001. С. 48–62.
28. Трускавецький С.Р., Тененьова Т.П. Вплив вмісту рухомих форм заліза у ґрунтах Полісся на дані багатоспектрального космічного сканування. *Агрохімія і ґрунтознавство*. 2005. Вип. 66. С.72–80.
29. Шатохін А. В., Ачасов А.Б., Линдін М.О. Технологія аерокосмічного контролю за гумусним станом ґрунтів. *Розробки – ви-*

- робництву: зб. наук. пр. Київ: Аграрна наука, 1999. С. 107–108.
30. Чимитдоржиев Т.Н., Ефременко В.В. Об использовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем. *Исследование Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 49–56.
 31. Dwivedi R.S., Kumar A.B., Tewari K.N. (1997). The utility of multi-sensor data for mapping eroded lands. *International Journal of Remote Sensing*. N 18 (11): 2303–2318.
 32. De Jong S.M. et al. (1999). Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data. *Catena*. 37 (3–4): 291–308.
 33. Latz K. et al. (1984). Characteristic variations in spectral reflectance of selected eroded alfisols. *Soil Science Society of America Journal*. N 48 (5): 1130–1134.
 34. Pelletier R.E., Griffin R.H. (1985). Remote sensing techniques for the detection of soil erosion and the identification of soil conservation practices. *Proceedings of IGARSS'85*. IEEE. University of Massachusetts. Amherst. Massachusetts: 40–45.
 35. Henderson T.L. et al. (1992). High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Sci. Soc. m. J.* 56: 865–872.
 36. Обухов А.И., Орлов Л.С. Спектральная отражательная способность главнейших типов почв и возможности использования диффузного отражения при почвенных исследованиях. *Почвоведение*. 1964. № 2. С. 83–82.
 37. Bocco G., Valenzuela C.R. (1993). Integrating satellite remote sensing and Geographic Information Systems technologies in gully erosion research. *Remote Sensing Reviews*. N 7: 233–240.
 38. Floras S.A., Sgouras I.D. (1999). Use of geoinformation techniques in identifying and mapping areas of erosion in a hilly landscape of central Greece. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. N 1 (1): 68–77.
 39. Servenay A., Prat C. (2003). Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma*. N 117 (3–4): 367–375.
 40. Metternicht G.I., Zinck J.A. (1998). Evaluating the information content of JERS-1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. N 53 (3): 143–153.

41. *Атлас* почв Украинской ССР. Киев: Урожай, 1979. 159 с.
42. *Природа* Украинской ССР. Почвы; ред. Н.Б. Венрандер, Д.А. Тютюнник. Киев: Наукова думка, 1986. 216 с.
43. *Сиротенко О.В.* Оперативне визначення показників родючості ґрунту при наземному забезпеченні дистанційного картографування ґрунтів. *Регіональна нарада «Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у вирішенні проблем Полісся»*: тези доп. Київ; Луцьк, 2002. С. 37–39.
44. *Escadafal R., Girard M.-C., Courault D.* (1989). Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*. № 27 (1): 37–46. DOI: 10.1016/0034-4257(89)90035-7.
45. *Courault D.* (1986). Modélisation du comportement spectral de la surface du sol, Etude intraparcellaire. *D.E.A. de Science des sols. INA-PG*. Paris, 102.
46. *Cervelle B. et al.* (1977). Expression quantitative de la couleur, liée au spectre de réflectance diffuse, de quelques roches et minéraux. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.* N 100: 185–191.
47. *Девис Дж.* Статистика и анализ геологических данных. Москва: Мир, 1977. 574 с.
48. *Mathieu R. et al.* (2007). Field-based and spectral indicators for soil erosion mapping in semi-arid mediterranean environments (Coastal Cordillera of central Chile). *Earth Surf. Process. Landforms*. N 32: 13–31.



Моніторинг стану посівів, визначення їх площ і продуктивності (урожайності) за територіальною вибірковою мережею

Дистанційний моніторинг стану посівів сільськогосподарських культур та визначення їх площ і продуктивності доцільно здійснювати на основі раціонального поєднання традиційних систем збору й методів спостереження, різномасштабних оперативних даних дистанційного зондування в межах геоінформаційної системи. ГІС-система забезпечить збір, обробку, відображення і розповсюдження просторово-координованих даних про площі, стан, біометричні характеристики посівів сільськогосподарських культур, агрометеорологічні й агроландшафтні умови їх росту та інтеграцію цих даних на певну територію.

Матеріали дистанційного знімання при моніторингу посівів використовуються як для розробки й обслуговування територіальної вибіркової мережі у вигляді картографічного забезпечення наземних обстежень, так і як один з елементів просторового моделювання стану посівів сільськогосподарських культур.

За моделювання стану й продуктивності посівів сільськогосподарських культур доцільно використовувати системне поєднання математичних і картографічних моделей, так званий метод математично-картографічного моделювання, що надасть математичним моделям географічну просторову конкретність.

Методологічним підходом до просторового математично-картографічного моделювання є використання територіальної вибіркової мережі тестових аграрних полігонів у межах різних гомогенних, з погляду агрокліматичних та агроландшафтних умов, областей для отримання як статистичної, так і навчальної (калібрувальної) інформації про площі й стан посівів упродовж сезону вегетації та визначення чинників кризових явищ і стресових ситуацій (розд. 2.4).

Залежно від мети на тестових полігонах проводять дослідження та збір інформації, яка далі використовується для забезпечення процесу автоматизованого оброблення космознімків на великих територіях.

Єдиний уніфікований підхід щодо збору наземної інформації створює умови для організації відповідних інформаційних баз наземних даних у системі автоматизованого оброблення космічної інформації.

Збирання наземних даних щодо площ посівів, контролю їх стану та продуктивності здійснюють на ТАП за етапами: передпольова камеральна підготовка; польові роботи та камеральна обробка польової інформації.

На першому етапі визначаються періоди проведення наземних підсупутникових спостережень для оцінки стану посівів з урахуванням агрометеорологічних умов поточного року і настанням фенологічних строків їх розвитку. Проводиться підготовка дистанційних і картографічних матеріалів у вигляді формування фрагментів цюгорічних або минулорічних матеріалів дистанційного зондування високого просторового розрізнення на цифровій картографічній основі та розробляється схема маршрутних обстежень (рис.5.1). На цифровій картографічній основі формуються шари адміністративних меж, меж тестових полігонів, меж земельних ділянок (полів), населених пунктів, доріг, гідрографії, природної рослинності.

За проведення наземних польових обстежень на тестовому полігоні потрібно мати точний картографічний документ, який дає змогу визначати положення об'єктів на місцевості з точністю до кількох метрів. Найкраще цим вимогам відповідає знімок, збільшений до масштабу 1:10 000 – 1:25 000. За відсутності свіжого зображення

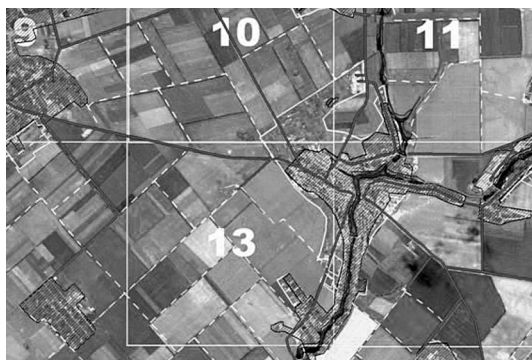


Рис. 5.1. Фрагмент синтезованого космічного знімку високого просторового розрізнення з ШСЗ RapidEye, трансформований на цифрову картографічну основу в межах тестових аграрних полігонів на територію Магдалинівського р-ну

використовують фрагмент космічного знімка минулого року або фрагмент збільшеної до масштабу 1:10 000 – 1:25 000 топографічної карти. Перевагою космічного зображення може бути оперативність його отримання і актуальність інформації. За межами полігону для забезпечення якості польового дешифрування необхідно залишити смугу зображення завширшки до 0,5 км.

Час проведення наземних польових робіт узгоджуються з настанням фенологічних строків розвитку посівів сільськогосподарських культур [1]. Вони проводяться синхронно з космічною зйомкою або в термін найближчий до часу знімання (квазісинхронно) [2].

Отримані на ТАП дані наземних спостережень забезпечують першу пряму оцінку площ і формування на базі зображень представницької вибірки пікселів різних видів землекористування або посівів та стану сільськогосподарських культур для наступної автоматизованої класифікації.

У межах ТАП найменшою територіальною одиницею є поле під посівом сільськогосподарської культури. За проведення польових робіт визначаються сільськогосподарські культури, перевіряються і коригуються їх межі та визначаються показники стану на тестових ділянках у межах тестових полів згідно зі стандартом [3], які фіксуються в координатній системі приладами GPS (див. вкл. рис. 31). За наявності аномальних явищ та стресових ситуацій на посівах сільськогосподарських культур визначають їх межі. Дані спостережень реєструються у відповідних формах результатів наземного обстеження [4].

На етапі камеральної обробки польової інформації проводиться первинна обробка, аналіз даних наземних спостережень та їх систематизація з метою загальної оцінки стану посівів упродовж сезону вегетації, розвитку сільськогосподарських культур та їх урожайності. Коригуються векторні шари розподілення посівів різних культур у межах ТАП та занесення інформації в бази даних.

На основі матеріалів польових спостережень за посівами визначають індикаційні ознаки окремих культур та їх стану, що дає можливість надалі виконати їх автоматизовану класифікацію в межах території всього району досліджень (див. вкл. рис. 32).

У випадку неможливості синхронного отримання матеріалів космічного знімання (метеоперешкоди, неспівпадання циклу знімання з датою настання критичних фаз розвитку тощо) під час моделю-

вання використовують лише дані біометричних показників посіву, отримані за вибіркою тестових полів певної культури в межах територіальної вибіркової мережі.

Отримані за вибірковою мережею дані й співвідношення екстраполюються на всю територію району досліджень і є складовими моделей прогнозування продуктивності на рівні району.

За екстраполяції співвідношень, отриманих за територіальною вибірковою мережею на генеральну сукупність, доцільно застосовувати спосіб прямого перерахунку.

Основною територіальною одиницею системи, в якій здійснюється узагальнення отриманих даних, доцільно прийняти адміністративний район. *По перше*, це основна територіальна одиниця, прийнята за статистичних обстежень. *По друге* – мережа метеорологічних станцій і агрометеопостів, де отримують агрометеорологічні показники, забезпечує інформацією користувачів на рівні району. Тобто маємо перший і основний рівень забезпечення статистичною інформацією про структуру, площі, урожайність, валовий збір сільськогосподарських культур та метеорологічною інформацією про основні фактори впливу на формування продуктивності сільськогосподарських культур. Відомості про бонітет і характеристики ґрунтового покриття (типи ґрунтових відмін, механічний склад, вологомісткість ґрунтів, показників родючості, ступінь впливу ерозійних процесів, агротехнічні заходи) забезпечує районна карта ґрунтів і дані агрохімічної служби району. Отримання даних радіометричних характеристик забезпечують системи космічного знімання високого просторового розрізнення.

Моделювання прогнозу урожаю сільськогосподарських культур для будь-якої території потребує знання двох параметрів – площі, зайнятої певною сільськогосподарською культурою і прогнозованою продуктивністю цієї культури, яка залежить від агрометеорологічних умов росту, що складаються впродовж сезону її вегетації, та агроландшафтних умов, в яких вона вирощується.

Прогнозований урожай у межах адміністративного району є добутком площі посіву сільськогосподарської культури, визначеної за вибірковою територіальною мережею, на розраховану урожайність.

Розрахунок урожаю на рівні області-страта складається із суми прогнозованих валових зборів сільськогосподарських культур на рівні адміністративних районів, які входять у межі області або стра-

ти, а розрахунок у межах країни відповідно із суми валових зборів на рівні областей або страт (рис. 2.9).

На території України виокремлено 19 гомогенних областей (страт) (рис. 2.10). Кожна виокремлена гомогенна область характеризується певним співвідношенням районованих сільськогосподарських культур і їх продуктивністю. Для зернової групи було виокремлено 9 зон (рис. 2.11).

З огляду на те, що продуктивність є інтегрованим показником агроландшафтних умов, кожна з гомогенних областей буде мати відмінності в коефіцієнтах регресійних моделей прогнозування продуктивності сільськогосподарських культур [5].

Визначення стану і продуктивності посівів. В основі визначення стану рослинності, зокрема і посівів сільськогосподарських культур, за даними дистанційного зондування лежать методи аналізу відбитого рослинністю сонячного випромінювання у різних діапазонах спектра електромагнітних хвиль. Співвідношення поглинутої, відбитої та пропущеної рослинами світлової енергії залежить від вмісту в них хлорофілу, вологості, від клітинної структури та ін. (рис. 2.4, розд. 2.1).

Так, у червоній області спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а в інфрачервоній області (0,7–1,0 мкм) є область максимального відбиття клітинних структур листка. Висока фотосинтетична активність, що пов'язана зазвичай з густою рослинністю, веде до меншого відображення в червоній області спектра і більшого в інфрачервоній.

Відбитий потік червоного світла зменшується впродовж періоду вегетації рослини через поглинання хлорофілом фотосинтезувальних листків. Водночас відбитий у ближньому інфрачервоному діапазоні спектра потік збільшується з ростом рослини завдяки процесам розсіювання (відбиттю й передачі) здоровими листками. Інтенсивність зміни коефіцієнта спектральної яскравості сільськогосподарських культур, зокрема зернових колосових, у вегетаційний період має два максимуми: перший максимум – це фаза виходу рослин в трубку, другий – початок швидкого скорочення листової поверхні через засихання листя нижніх ярусів. Співставлення календаря росту зернових культур із сезонним ходом їх КСЯ виявило лише кілька фенологічних фаз, коли спектральна яскравість дає змогу оцінити стан посівів (рис. 5.2.)

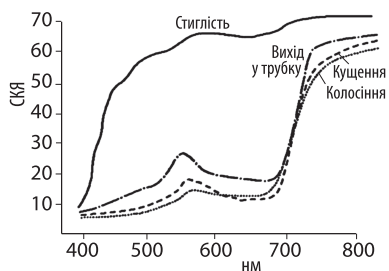


Рис. 5.2. Спектральна яскравість пшениці на різних стадіях вегетації (згідно із Котцовим, Чубиніним). Результати вимірювань на спектрометрі СФ-4 спектральної яскравості листка пшениці. Спрямованість змін у фазах кушення, виходу в трубку і колосіння різна. З розвитком листка відбувається вирівнювання (згладжування) КСЯ в межах головної полоси поглинання хлорофілу. У фазі стиглості відбувається загальна зміна спектральної яскравості, пов'язана з розпадом хлорофілу і висиханням рослини

Такі зернові культури, як пшениця озима, жито озиме, ячмінь, пшениця ярова, мають, особливо на початку вегетації (сходи, кушіння, вихід у трубку), практично однакові спектральні характеристики, хоча й існують невеликі відмінності між видами. Завдяки цим відмінностям можлива ідентифікація різних видів культур та їх стану. У фазі досягання ці відмінності стають значнішими. Отже, для правильної ідентифікації сільськогосподарської культури і визначення її стану необхідна статистична модель відгуку цього типу покриття впродовж сезону вегетації.

Кількість червоної й ближньої інфрачервоної радіації, відбитої від рослинного покриву, змінюється залежно від сонячної радіації, атмосферних умов, покривної структури й складу. Тому просту міру відбитої енергії не можна використовувати ні для визначення біофізичних параметрів, ні для проведення моніторингу вегетації на глобальній, оперативній основі. Це привнесло проблеми через заплутані процеси передачі відбивної здатності світла як на рівні листка (клітинної консистенції, листкової морфології), так і на рівні листового покриву (елементи листка, орієнтація, не фотосинтезувальна вегетація) і фону. Ця проблема була усунута об'єднанням двох або більше хвиль у рівняння або у так званий «вегетаційний індекс» (ВІ).

За результатами численних досліджень [6–16 та ін.] було визначено, що вегетаційні індекси (ВІ), які є своєрідною комбінацією енергетичних яскравостей різних спектральних каналів, вибираються на основі емпіричного досвіду. Їх числові значення використовують для характеристики та оцінки біофізичних параметрів рослинного покриву. На сьогодні є близько 160 варіантів вегетаційних індексів, розрахованих за еталонними кривими спектрального відбиття різних культур та ґрунту. Найпоширеніші представлено в *табл. 5.1*.

Таблиця 5.1. Вегетаційні індекси та способи їх визначення

Назва VI	Алгоритми визначення та умовні позначення
Ratio VI	$RVI = NIR/Red$
Normalized Difference VI	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) = (RVI - 1) / (RVI + 1)$
Infrared Percentage VI	$IPVI = NIR / (NIR + Red) = (NDVI + 1) / 2$
Difference VI	$DVI = NIR - Red$, у цьому випадку ґрунтова лінія має нахил, рівний 1
Perpendicular VI	$PVI = \sin(\gamma) \times NIR - \cos(\gamma) \times Red$, де γ – кут між ґрунтовою лінією та віссю NIR
Weighted Difference VI	$WDVI = NIR - g \times Red$, де g – нахил ґрунтової лінії
Transformed VI	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$
Soil Adjusted VI	$SAVI = [(NIR - Red) / (NIR + Red - Z)] \times (1 + Z)$, де $Z = [0; 1]$, $Z = 0$ для найвищого індексу облиствлення; $Z = 1$ при найменшому облиствленні, або проективному покритті, оптимальним рахують $Z = 0,5$
Transformed SAVI	$TSAVI = (S \times (NIR - S \times Red - a)) / (a \times NIR + Red - S + X(1 + S^2))$, де a – координата крапки перетину ґрунтової лінії з віссю NIR; S – нахил ґрунтової лінії; X – коефіцієнт корекції; для зменшення ґрунтового шуму (в оригіналі (20) $X = 0,08$)
Modified SAVI	Аналогічно SAVI, тільки $Z = 1 - 2 \times S \times NDVI \times WDVI$, де S – нахил ґрунтової лінії
MSAVI 2	Аналогічно SAVI, тільки $Z = 1 - (2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)}) / 2$
Two-axis adjusted VI	$TWVI = [(NIR - Red - \delta) / (NIR + Red + Z)] \times (1 + Z)$ $\delta = \sqrt{2} \times e^{-k \times Lai} \times D$
Atmospherically Resistant VI	$ARVI = (NIR - Rb) / (NIR + Rb)$, де $Rb = Red - \gamma \times (Red - Blue)$, де $\gamma = 1$; при малому покритті рослинністю і невідомому типу атмосфери $\gamma = 0,5$
Soil Adjusted and Atmospherically Resistant VI	$SARVI = [(NIR - Rb) / (NIR + Rb + Z)] \times (1 + Z)$, аналогічно можна отримати ASVI, комбінуючи ARVI та MSAVI 2, можна отримати комбінацію ARVI та MSAVI(TSAVI)
Green VI	$GVI = -0,29 \times MSS4 - 0,56 \times MSS5 + 0,6 \times MSS6 + 0,49 \times MSS7$ $CVI = -0,2848 \times TM1 - 0,2435 \times TM2 - 0,5436 \times TM3 + 0,7243 \times$ $\times TM4 + 0,0840 \times TM5 - 0,1800 \times TM7$ $MSSn$ – відображення в n – каналі сенсора MSS, аналогічно для сканера TM
Brightness and Greenness	$Br = a^b_1 \times Red + a^b_2 \times NIR$ $Gr = a^g_1 \times Red + a^g_2 \times NIR$, де a^k_n – коефіцієнти перетворення від координат Red, NIR до нової системи координат Br, Gr

Закінчення табл. 5.1

Назва ВІ	Алгоритми визначення та умовні позначення
Modified NDVI	$MNDVI = [NDVI / (1 + C_1 \times H_1)] \times (1 + C_2 \times H_2)$ 1) $C_1 = C_2 = 0,001$ без атмосферної корекції; 2) $C_1 = 0,6$; $C_2 = 0,03$ часткова атмосферна корекція; 3) $C_1 = 0,6$; $C_2 = 0,03$ повна корекція $H_1 = (C_{11} \times Red - Blue + C_{12}) / (NIR^2 - Red^2)$ $H_2 = 1 / (C_{11} \times Red - Blue + C_{12})$

Примітка: NIR, Red, Blue – величини яскравості у ближньому ІЧ, червоному та блакитному каналах. Коефіцієнти C_{11} , C_{12} – функція змінених умов атмосфери та яскравості ґрунтів. Наприклад, для атмосферної видимості від 5 до 100 км і при величині відбиття ґрунту в ближньому ІЧ-діапазоні від 0,1 (темні ґрунти) до 0,4 (світлі ґрунти) $C_{11} = 0,55$; $C_{12} = 0,12$.

За способом розрахунку методики визначення ВІ можна умовно розділити на два класи:

- лінійні комбінації яскравостей спектральних каналів з коефіцієнтами, отриманими на основі польових вимірювань – перпендикулярні індекси, наприклад PVI [16], WDI [8,9];
- індекси-відношення яскравостей спектральних каналів, наприклад RVI, NDVI, SAVI [13, 21] і т.д.

Одним з найінформативніших вегетаційних індексів є нормалізований вегетаційний індекс NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) – нормалізована різниця яскравостей у червоній та ближній інфрачервоній зонах електромагнітного спектра, яка об'єднує інформацію про вміст хлорофілу (червона ділянка спектра) та структуру клітин листка (БІЧ-зона спектра).

Розрахунок NDVI ґрунтуються на двох найстабільніших (незалежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої. У червоній ділянці спектра (0,6–0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом, а в інфрачервоній ділянці (0,7–1,0 мкм) є ділянка максимального відбиття клітинних структур листка. Отже, висока фотосинтетична активність (пов'язана, зазвичай з густою рослинністю) веде до меншого відображення в червоній ділянці спектра і більшого в інфрачервоній.

Відношення цих показників один до одного дає можливість аналізувати рослинні об'єкти й чітко відокремлювати їх від інших об'єктів. Використання ж непростого відношення, а нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відображення збільшує точність виміру, дає можливість зменшити вплив таких явищ, як роз-

ходження в освітленості знімка, хмарності, серпанок, поглинання радіації атмосферою та ін.

З огляду на світовий досвід для моніторингу посівів сільськогосподарських культур використовується дистанційна інформація знімальних систем різного просторового і радіометричного розрізнення. Вона досить широко використовується в різних модифікаціях з наземними даними. Різноманітність модифікацій визначається як можливостями знімальних систем, так і особливостями агроландшафтних умов територій дослідження.

Застосування космічних систем знімання низького просторового розрізнення дає змогу контролювати стан рослинного й ґрунтового покриву на рівні країни і регіону, а системи високої роздільної здатності дають можливість контролювати стан посівів сільськогосподарських культур і ґрунтового покриву на рівні окремих господарських одиниць.

Найоптимальнішим є поєднання систем низької і середньої роздільної здатності (радіометр AVHRR метеосупутників серії NOAA, багатозональний сканер MODIS ШСЗ Terra, ШСЗ Landsat-5) і систем високої роздільної здатності (SPOT, RapidEye та ін.). Системи низького просторового розрізнення дають змогу здійснювати моніторинг і отримувати дані стосовно інтегрального стану об'єктів агроландшафту, зокрема рослинного покриву, та розподілення полів фізичних характеристик на великих площах щодобово. Системи високого просторового розрізнення, своєю чергою, забезпечують даними стосовно структури, стану, геометричних характеристик об'єктів агроландшафту та їх окремих характеристик на локальному рівні в межах районів, окремих господарств, окремого поля.

Досвід використання систем низького розрізнення (AVHRR ШСЗ NOAA, MODIS ШСЗ Terra) свідчить про можливість здійснення оперативного агромоніторингу на великих площах, а саме:

- спостереження за розвитком рослин в динаміці та в період станання критичних фаз, які відповідають за формування урожаю;
- оцінювання інтегрального стану рослинного покриву і виокремлення регіонів, що зазнали впливу несприятливих метеофакторів.

Під час дистанційних моніторингових досліджень рослинного покриву, зокрема і посівів сільськогосподарських культур, викорис-

товують сканерні знімки. Складовими елементами дискретних сканерних знімків є пікселі. Зміна розмірів пікселя на знімках різної роздільної здатності веде до перетворення зображення – інтеграції спектральних характеристик об'єктів або їх елементів, які містяться в пікселі. Це – так звана піксельна генералізація [12].

Змістом індексу вегетації для знімальних систем низької роздільної здатності, враховуючи рівень піксельної генералізації, є груба оцінка географічного розташування рослинності, яка відображає стан посівів як гомогенних, так і гетерогенних рослинних покривів (однієї, а в основному 2-х або 3-х і більше сільськогосподарських культур) на цей період розвитку рослин. Індекс дає змогу контролювати стан посівів на рівні різних типів агроландшафтів і характеризує інтегральну біологічну активність рослинного покриву опосередковано через висоту рослинного покриву (біомаса) на різних фазах вегетації, яка відображає швидкість росту рослин, ураження посівів хворобами і шкідниками та втрати урожаю.

З огляду на це важливим є визначення рівня географічного узагальнення для аналізу просторового розподілення значень вегетаційного індексу.

У працях Виноградова [17,18] для оцінки ступеня узагальнення знімків, за якими проводиться вивчення стану рослинності, використовуються ієрархічні рівні класифікації структур рослинного покриву. Системний аналіз показав наявність дискретної системи «вузлових» рівнів генералізації. Частотно-просторовий аналіз розподілення розмірностей фітоценоз дає можливість знайти математичний вираз цих рівнів генералізації.

З метою визначення рівнів узагальнення для аналізу просторового розподілення оцінки інтегрального стану посівів і оцінки умов вегетації в НДІ статистики були проведені роботи з визначення «вузлових рівнів» генералізації на основі визначення фонових функцій, тобто операторів усереднення даних космічного знімання низького, середнього і високого просторового розрізнення [5, 19].

Використовувались знімки HRV (ШСЗ SPOT, розмір пікселя 20×20 м), МСУ-СК (розмір пікселя 170×170 м), МСУ-С (ШСЗ Січ-1, розмір пікселя 490×490 м) і AVHRR (ШСЗ NOAA, розмір пікселя 1100×1100 м), отримані в літній період 2000 і 2001 року на території Київського регіону в певні фази розвитку сільськогосподарських культур.

Вимірювання інтегральних радіометричних характеристик проводилось за випадковою мережею спостережень, послідовно, в усіх каналах знімальних систем у вікнах розміром від 0,25 км² до 900 км². Визначались такі статистичні характеристики: середнє (інтегральне) значення радіометричної характеристики у вікні, дисперсія, стандарт, інтервальні оцінки середнього значення радіометричної характеристики в елементарному вікні і оптимальний оператор усереднення фонових полів (розд.2.4).

У результаті розрахунків даних всіх знімальних систем виявились три рівні узагальнення радіометричних характеристик. Було прийнято, що для рівня країни значення оператора усереднення становило – 24×24 км, для рівня гомогенних (зокрема й адміністративних) областей – 12×12 км і для локального рівня (адміністративних районів) – 5×5 км.

Можливості оцінки інтегрального стану посівів та динаміку їх змін за даними низького просторового розрізнення за весняний і ранньолітній періоди вегетації проілюстровано на рівні країни – територія України і рівні області (гомогенної страти) – Київської області на рис. 5.5–5.8. Як космічні дані з низьким просторовим розрізненням було обрано знімки MODIS ШСЗ Terra, що мають високе темпоральне розрізнення і є можливість оперативного отримання даних у режимі, близькому до реального часу.

Розподілення значень NDVI та порівняльний аналіз їх розподілення за певні періоди вегетації дає можливість екстраполювати вплив агрометеорологічних умов на великі території і є істотним доповненням за експертної оцінки стану посівів у межах країни або певного регіону.

За даними космічного знімання низької роздільної здатності MODIS ШСЗ Terra на 24 квітня 2013 р., озимі культури в західних, північних і частково центральних областях України перебувають переважно в задовільному і доброму стані, що пов'язано з достатніми вологозапасами і позитивним температурним режимом (див. вкл. рис. 33, а). На період до 10 травня стан посівів вирівнюється до оцінки добре, але спостерігається зниження до стану задовільно на окремих територіях в центральних і південних районах, що пов'язано з високим температурним режимом і відсутністю опадів (див. вкл. рис. 33, б).

На території Київської області, за даними космічного знімання на 24 квітня 2013 р., озимі культури перебувають переважно в не-

задовільному стані (див вкл. рис. 34, а), але спостерігаються окремі території в центральній і південній частинах області які характеризуються критичним станом. Це пов'язано з неоднаковим розвитком весняної вегетації різних сільськогосподарських культур. На період до 10 травня, з настанням фази виходу в трубку пшениці озимої, стан посівів підвищується до оцінки добрий та задовільний і лише в південних районах області спостерігається незадовільний стан посівів, що, імовірно, пов'язано з високим температурним режимом і відсутністю опадів. Лише в північних районах спостерігається деяке поліпшення порівняно з періодом до 24 квітня, що пов'язано з незначною кількістю опадів (див. вкл. рис. 34, б, в).

На 26 травня в центральних і південних районах області стан посівів значно поліпшується. Значні опади сприяють зміні значень показника NDVI на добрий і задовільний стан посівів, особливо в південних районах (див вкл. рис. 35). Ця тенденція зберігається і далі (див. вкл. рис. 36), що знаходить своє відображення в характері кривої динаміки NDVI у межах Київської області за період 22 квітня – 25 червня 2013 р. порівняно з середніми багаторічними значеннями NDVI (рис. 5.3). Високий рівень значень NDVI порівняно з середньобагаторічними показниками свідчить і про високий рівень урожаю ранніх зернових. З огляду на це можна прогнозувати валовий збір зернових загалом по області на рівні 2012 і навіть вище.

За динамічного моніторингу сільськогосподарських культур упродовж сезону вегетації важливою є можливість взаємної заміни

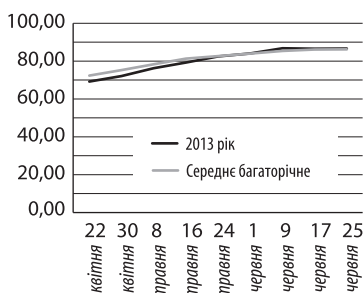


Рис. 5.3. Динаміка NDVI в межах Київської області за період 22 квітня – 25 червня 2013 р. порівняно з середнім багаторічним значенням NDVI (2000–2013 рр.)

та використання супутникових даних різного просторового розрізнення для оцінки їх стану за територіальною вибірковою мережею. З метою визначення цих можливостей було проведено кореляційний аналіз значень вегетаційних індексів (табл. 5.1), розрахованих за даними супутникових знімків. Як аерокосмічні дані низького просторового розрізнення було обрано знімки MODIS ШСЗ Terra (розрізнення 250 м, дати зйомки: 11 квітня, 23 квітня та 24 червня 2009 р.)

завдяки високому темпоральному розрізненню та можливості одержати дані у режимі, близькому до реального часу, а також наявності знімків у відкритому доступі. З середнім просторовим розрізненням було обрано Landsat-5 (розрізнення 30 м, дати зйомки: 21 квітня та 24 червня 2009 р.) та з високим просторовим розрізненням (8 м) – RapidEye (11 квітня 2009 р.).

Аналізувались кореляційні зв'язки між значеннями ВІ, розрахованими за даними MODIS та Landsat-5 в точці відбору проби (тестова ділянка), на тестових полях пшениці озимої та на рівні тестових аграрних полігонів. Кореляція ВІ в точці відбору проби була виявлена, але значення коефіцієнта кореляції були низькими – від 0,318 до 0,38. За аналізу середніх значень ВІ тестових полів пшениці озимої було виявлено високу кореляцію від 0,74 до 0,77 на дату 21–23 квітня (вихід у трубку). На дату 24 червня (молочна стиглість), зокрема від 0,49 для індексу RVI до 0,69 для індексу SAVI. За порівняння середніх значень ВІ на рівні тестових аграрних полігонів було виявлено високу кореляцію, зокрема від 0,81 до 0,91. На 21–23 квітня від 0,906 до 0,912. На 24 червня NDVI – 0,811; RVI – 0,912.

Порівняння значень ВІ, розрахованих за даними MODIS, з даними з високого просторового розрізнення RapidEye за 11 квітня 2009 р., було проведено в двох варіантах – окремо, з використанням червоного діапазону (630–685 нм), і з використанням крайнього червоного діапазону (690–730 нм). У точці відбору проби значення кореляції для ВІ становили: MSR – 0,678–0,700; NDVI – 0,563–0,612; RVI – 0,754–0,757; SAVI – 0,573–0,612, на рівні середніх значень ВІ полів було виявлено кореляцію 0,75–0,8.

З метою перевірки репрезентативності вибіркової мережі було розраховано кореляцію середнього значення ВІ одного району до суми середніх значень ВІ кожного тестового аграрного полігону в межах відповідного району. Розрахунки було проведено на основі семи різних вегетаційних індексів (DVI, GEMI, IPVI, MSAVI 2, MSR, NDVI, RDVI), обчислених за супутниковими даними MODIS для Канівського та Миронівського районів. В усіх випадках кореляція становила понад 0,95, що свідчить про високу репрезентативність мережі ТАП.

Таким чином отримані результати свідчать, що, враховуючи темпоральне розрізнення ШСЗ Terra та незважаючи на достатньо низьке просторове розрізнення приладу MODIS, його можна вико-

ристовувати з певними обмеженнями для визначення стану посівів сільськогосподарських культур у межах адміністративних районів за територіальною вибірковою мережею. Особливо це важливо в період припинення і відновлення весняної вегетації озимих культур, коли частота несприятливих метеоумов дуже велика. За використання цифрової картографічної основи з тестовими аграрними полігонами можна визначати середньостатистичну оцінку стану посівів озимих культур на рівні адміністративних районів (див. вкл. рис. 37) і динаміку їх розвитку перед входженням у зиму (див. вкл. рис. 38).

Моніторинг посівів сільськогосподарських культур системами високої роздільної здатності (RapidEye, Sentinel та ін.) за мережею ТАП доцільно проводити в межах стратифікованих (гомогенних) зон в періоди максимальної диференціації їх відбивних характеристик і настання фаз вегетації, які є визначальними для формування продуктивності. Вегетаційні індекси, які отримують за матеріалами цих систем відображають стан посіву конкретної культури (концентрацію хлорофілу гомогенного рослинного покриву) на окремому полі в цю фазу розвитку.

Так, для прикладу, у *табл. 5.2* наведено фази вегетації пшениці озимої Північного Лісостепу за датами року. Накритичніші фази розвитку пшениці озимої, під час яких закладається 95% продуктивності (урожаю) цієї культури, помічено символом «*». Важливими є також періоди сівби і фаз припинення осінньої та відновлення весняної вегетації.

Конкретні дати проведення зйомки можуть коригуватись залежно від метеорологічних умов року.

Основним методом моніторингу озимини є розрахунок і аналіз значень вегетаційного індексу в періоди початку та завершення ве-

Таблиця 5.2. Фази вегетації пшениці озимої Північного Лісостепу

Сільсько-господарська культура	Дати року					
	30.03–05.04	30.04–10.05	01.06–10.06	01.08–10.08	25.09–10.10	30.10–10.11
	Фази розвитку					
Пшениця озима	ВВВ Кущ.	ВТ*	Кол.* Нал.	Доз.	Сх. Кущ.	ПВ

Примітка: ВВВ – відновлення весняної вегетації; Кущ. – кушіння (восени і навесні); ВТ* – вихід у трубку; Кол.* – колосіння; Нал. – налив зерна; Доз. – дозрівання; Сх. – сходи; ПВ – припинення вегетації.

гетації за допомогою карт вегетаційного індексу. Це пов'язано з істотною зміною щільності зеленої маси рослинності на сільськогосподарських землях, яка відповідає певним значенням нормалізованого вегетаційного індексу NDVI – в період з квітня по листопад. Це правильно як для озимих культур, так і для ярих, а також пов'язано із процесом обробітки земель (оранка, збір урожаю та ін.). При цьому щільність зеленої маси рослинності несільськогосподарських територій з травня по жовтень змінюється неістотно (рис. 5.4).

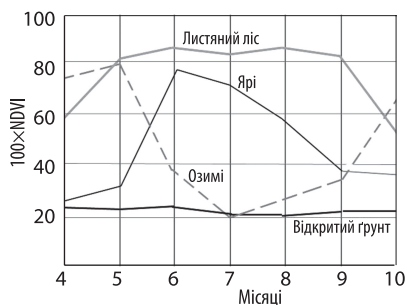


Рис. 5.4. Графік розподілу NDVI за місяцями року для листяного лісу, озимих та ярих культур, відкритого ґрунту

Згідно з аналізом публікацій країн зарубіжжя основними типами моделей для прогнозування урожайності сільськогосподарських культур є прогностичні статистичні, агрометеорологічні, імітаційні, напівемпіричні, детерміновані, емпіричні моделі, для яких застосовують методи коваріаційної статистики. Імітаційні та напівемпіричні моделі – найбільше відповідають реальності [20]. Часто використовується проста регресія з однією незалежною змінною (NDVI, RVI, співвідношення RVI/NDVI, LAI, зелена біомаса, сухий урожай зерна) лінійна та комплексна лінійна регресія (миттєва та добова евапотранспірація, ФАР; регресія між урожаєм та інтегрованим NDVI; часові профілі NDVI та максимальна, мінімальна температура повітря; дані LAC AVHRR ІСЗ NOAA; VCI та ін.).

За моделювання продуктивності посівів за даними низького просторового розрізнення як калібрувальну інформацію доцільно використовувати усереднені дані біометричних характеристик певної сільськогосподарської культури, отримані за територіальною вибірковою мережею в межах адміністративного району. У цьому випадку район приймається як елементарна територіальна одиниця.

Моделювання продуктивності за даними космічного знімання системами середнього і високого просторового розрізнення (SPOT, Landsat, IRS, RapidEye та ін.) здійснюється за вегетаційними індексами, які відображають стан посіву певної культури на окремому

полі в певну фазу розвитку. Вони визначаються емпіричним способом, що пов'язано з певними ґрунтовими, агрометеорологічними та іншими умовами вегетації рослин.

З метою пошуку таких емпіричних залежностей між оптичними характеристиками певної сільськогосподарської культури та її продуктивністю для однієї з агроландшафтних (гомогенних) зон України в НТК статистичних досліджень були проведені експериментальні роботи з визначення біологічної урожайності пшениці озимої за матеріалами космічних знімів сканером «МСУ-Э» (3 канали: 0,5–0,6 мкм; 0,6–0,7 мкм; 0,8–0,9 мкм, геометрична роздільна здатність 45 м, смуга огляду 45 км) високого просторового розрізнення з ШСЗ «Метеор-3М». Моделювання біологічної урожайності здійснювалось за радіометричними характеристиками посівів, визначених у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, а також за матеріалами біометрії рослин, отриманих безпосередньо контактним способом в польових умовах за вибірковою мережею [21].

Під час моделювання продуктивності сільськогосподарських культур за основну територіальну одиницю, в межах якої здійснювався процес прогнозування урожаю, було прийнято адміністративний район.

Експериментальні роботи проводилися в межах території Канівського р-ну Черкаської обл. За моделювання використовувались матеріали багатозональних космічних знімів у каналах 0,5–0,6 мкм (b , від «blue» – синя зона спектра), 0,6–0,7 мкм (g , від «green» – зелена зона) і 0,8–0,9 мкм (r , від «red» – червона зона) 8 квітня (кущіння) і 18 травня (фаза виходу в трубку) 2005 р. та розраховані за ними різноманітні вегетаційні індекси. Наземні дані (біологічний урожай) були отримані контактним способом за вибірковою мережею тестових ділянок на тестових полях пшениці озимої.

На основі кореляційного аналізу між вказаними вище показниками (радіометричними характеристиками, вегетаційними індексами, біологічною урожайністю) кілька з них були відібрані для подальшої математично-статистичної обробки.

Так, найбільші значення коефіцієнтів кореляції r з урожайністю спостерігаються за даними знімання на 8 квітня в синій ($r_b=0,439$) і червоній ($r_r=0,433$) зонах спектра та синтезованому зображенні ($r_s=0,386$). За даними знімання на 18 травня найбільші значення коефіцієнтів кореляції спостерігаються для двох вегетаційних індексів,

а саме, $r_{RVI} = -0,209$; $r_{ARVI} = -0,145$ і двох спектральних каналів – в зеленій ($r_g = 0,126$) і червоній ($r_r = -0,104$) зонах спектра.

Задача розрахунків прогнозних значень урожайності пшениці на основі радіометричних характеристик і вегетаційних індексів, які є фактично комбінаціями радіометричних характеристик вказаних вище каналів багатозональної зйомки, вирішувалась на основі регресійного аналізу.

Реалізація цього аналізу була здійснена двома методами: методом лінійної регресії, за яким вихідні дані використовувались безпосередньо, без будь-якої попередньої обробки, і методом, який передбачає попередню обробку вихідної інформації, наприклад її згладжування чи фільтрацію.

Другий спосіб реалізації регресійного аналізу передбачав попереднє згладжування вихідних даних для відфільтрування систематичних та випадкових похибок. Це згладжування було проведено за локальним адаптивним алгоритмом, заснованим на аналізі кожної сусідньої пари даних. Згладжені вихідні дані було інтерпольовано сплайн-функцією.

Якість проведеного вище моделювання була оцінена поведінкою коефіцієнтів кореляції між значеннями урожайності та значеннями радіометричних характеристик та вегетаційних індексів (табл. 5.3.).

Результати проведеного моделювання засвідчили, що вегетаційні індекси, які широко використовуються для визначення стану рослинного покриву, не досить ефективні для прогнозування продуктивності посівів пшениці на локальному рівні. Це пов'язано, на наш погляд, з тим, що біомаса посівів різних сортів пшениці, що визначається біометричними показниками рослин, не завжди відповідає певному рівню урожайності. Враховуючи це, було проведено поєднане моделювання показників радіометрії об'єктів (тобто посівів пшениці) у трьох зонах багатозональної зйомки (0,5–0,6, 0,6–0,7, 0,8–0,9 мкм) та показників біологічної урожайності із застосуванням методу множинної поліноміальної регресії. Як і у проведених вище дослідженнях, множинна регресія була здійснена у два етапи.

На першому етапі вихідні дані використовувались без будь-якої попередньої математичної обробки. У результаті було отримано модельні значення урожайності $ul_{08,18}$ згідно з датами зйомки. Множинні коефіцієнти кореляції між біологічними та модель-

Таблиця 5.3. Коефіцієнти парної кореляції між значеннями урожайності та значеннями радіометричних характеристик, отриманих за матеріалами знімання

Знімання на 08.04.2005 р.				
Дані	Ознаки			
	<i>b (blue)</i>	<i>r (red)</i>	<i>g (green)</i>	<i>s (синтез)</i>
Вихідні	0,439	0,433	-0,230	0,386
Перший спосіб розрахунків	-0,319	0,475	-0,330	0,598
Другий спосіб розрахунків	0,992	0,919	0,838	0,948
Знімання на 18.05.2005 р.				
Дані	Ознаки			
	<i>g (green)</i>	<i>r (red)</i>	<i>v (RVI)</i>	<i>a (ARVI)</i>
Вихідні	0,126	-0,104	-0,209	-0,145
Перший спосіб розрахунків	0,983	0,989	0,983	0,980
Другий спосіб розрахунків	0,993	0,992	0,976	0,988

Примітка: *b* – радіометричні значення посівів у зоні 0,5–0,6 мкм; *g* – в зоні 0,6–0,7 мкм; *r* – в зоні 0,8–0,9 мкм; *s* – радіометричні значення синтезованої зони; *v* – значення вегетаційного індексу *RVI*; *a* – значення вегетаційного індексу *ARVI*.

ними значеннями урожайності становили: на період знімання 08.04.2005 $r_{08}=0,51$ при стандартному відхиленні $s_{08}=14,43$ і на період 18.05.2005 відповідно $r_{18}=0,42$ і $s_{18}=15,19$. Рівняння множинної регресії мали вигляд відповідно до періодів знімання:

$$ul_{08} = -141,88 + 2,73 \cdot b + 1,25 \cdot g - 0,5 \cdot r;$$

$$ul_{18} = -0,9 + 4,54 \cdot b + 6,67 \cdot g + 0,4 \cdot r,$$

де *g*, *b*, *r* – значення радіометричних характеристик посіву пшениці озимої в каналах 0,5–0,6 мкм, 0,6–0,7 мкм і 0,8–0,9 відповідно.

На другому етапі для мінімізації систематичних і випадкових помилок вихідні дані були попередньо оброблені за допомогою методу сплайн-інтерполяції. У результаті було отримано модельні значення урожайності $u_{208,18}$ згідно з датами зйомки. Коефіцієнти множинної кореляції між біологічними та модельними значеннями урожайності становили: $r_{08}=0,99$ (зйомка 08.04.05 р.) і $r_{18}=0,95$ (зйомка 18.05.05 р.) і відповідно стандартне відхилення $s_{08}=0,55$ і $s_{18}=1,79$.

Рівняння множинної регресії мали вигляд (відповідно до дат знімання):

$$u_{208} = -175,67 + 2,41 \cdot b + 2,7 \cdot g - 0,72 \cdot r;$$

$$u_{218} = 150,09 + 8,04 \cdot b + 13,09 \cdot g + 0,27 \cdot r,$$

де g , b , r – значення радіометричних характеристик посіву пшениці озимої в каналах 0,5–0,6 мкм; 0,6–0,7 мкм і 0,8–0,9 відповідно.

За аналізом результатів проведених експериментів з моделювання продуктивності пшениці озимої було зроблено висновок, що на різних етапах розвитку вегетації доцільним є використання моделей множинної поліноміальної регресії за даними радіометричних характеристик посівів, отриманих у всіх трьох каналах сканера «МСУ-Э». Відносна похибка прогнозування урожайності становила на період 8 квітня приблизно 5,8–10,8%. На період розвитку наступних фаз вегетації (18 травня) спостерігалось зменшення значень відносних похибок за моделями поліноміальних регресій з використанням радіометричних характеристик в зеленому, інфрачервоному каналах або вегетаційних індексів RVI, ARVI ($\approx 1\%$) при варіаціях середньої квадратичної похибки від 3,12 до 4,09. За застосування регресійних моделей з попередньою математичною обробкою вихідних даних відносна похибка становила $\approx 1\%$ при варіаціях середньої квадратичної похибки від 2,04–2,60.

Отже, отримані результати експериментів з використання матеріалів космічного знімання сканера «МСУ-Э» або аналогічних систем, засвідчили можливість їх використання для завчасного прогнозування продуктивності посівів пшениці озимої.

У разі відсутності оперативної дистанційної інформації в критичні щодо формування продуктивності посівів фази розвитку за визначення продуктивності використовують зображення минулого періоду на території аграрних полігонів для координатної прив'язки точок відбору проб з біологічної продуктивності на тестових полях за умови забезпечення статистичної достовірності в межах територіальних адміністративних одиниць.

Визначення структури і площ посівів сільськогосподарських культур. Визначення структури і площ однорічних сільськогосподарських культур за даними вибірових обстежень проводиться в межах адміністративного району. Площа однорічних сільськогосподарських культур в межах генеральної сукупності визначається як сума площ однорічних сільськогосподарських культур, розрахованих в межах адміністративних районів.

Під час застосування способу прямого перерахунку, коли середні величини або співвідношення окремих частин перемножують на кількість одиниць генеральної сукупності, наприклад адміністра-



Рис. 5.5. Класифікована маска сільськогосподарських угідь (посівних площ 2009 р.) у межах Миронівського р-ну Київської обл. ($S=50\,991$ га) і Канівського р-ну Черкаської обл. ($S=41\,544$ га) на цифровій картографічній основі з фрагментами територіальної вибіркової мережі

тивних районів, потрібно знати їх площі. Отже, для проведення розрахунків необхідно визначити площу кожного району.

Площі районів і сільгоспугідь якісно і точно визначаються за цифровою картографічною основою і класифікованою маскою сільгоспугідь в межах територій, які ідентифікують території адміністративних районів (рис. 5.5).

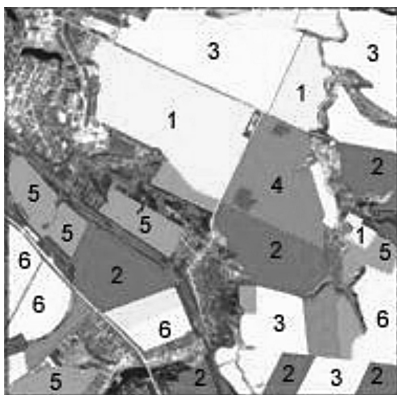


Рис.5.6. Класифікація посівів у межах тестового аграрного полігону:

1 – соняшник; 2 – кукурудза; 3 – пшениця озима; 4 – ріпак; 5 – соя; 6 – ячмінь

Допустиме відхилення визначеної площі району від офіційних даних може досягати $\pm 0,5\%$. Тому проводиться урівноваження площ районів у межах гомогенної або адміністративної області.

За проведення класифікації в межах тестового аграрного полігону за даними польових спостережень визначається загальна площа посівів окремої однорічної сільськогосподарської культури в межах кожного ТАП (рис. 5.6).

На наступному етапі за мережею ТАП визначається співвід-

ношення між площами територій різного землекористування (або в нашому випадку посівів окремої однорічної сільськогосподарської культури) і загальною площею всіх тестових полігонів. Визначене співвідношення площ у вибірці екстраполюється на територію адміністративного району.

Отже, якщо:

A – площа адміністративного району в га;

a – площа ТАП в га;

m – кількість сформованих ТАП;

M – загальна кількість ТАП в адміністративному районі ($M = \frac{A}{a}$);

a_{bi} – площі, які зайняті посівом певної сільськогосподарської культури в га, то площа A_b під певним видом сільськогосподарської культури адміністративного району A визначається таким рівнянням:

$$A_b = A \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{a_{bi}}{a}. \quad (5.1)$$

Дисперсію розраховують за формулою:

$$\sigma(A_b) = A^2 \frac{1}{m} \cdot \frac{1}{m-1} \cdot \frac{M-m}{M} \cdot \sum_{i=1}^m (S_{bi} - S_b)^2, \quad (5.2)$$

де S_{bi} – оцінка частки, зайнятої під окрему сільськогосподарську культуру, в i -тому ТАП; S_b – оцінка середньої частки, зайнятої під окрему сільськогосподарську культуру, в ТАП.

Наприклад, розрахований об'єм вибірки за формулою безповторної вибірки (5.1.) для проведення експериментальних робіт з територіального вибіркового обстеження площ посівів сільськогосподарських культур становив для Миронівського р-ну Київської обл. (загальна площа посівів сільськогосподарських культур (S) – 47700 га, варіація (v) площ посівів дорівнює 94%) за прийнятої вірогідності вибіркового дослідження 0,95 (тобто, коли $t=2$) і точності досліджень – 5% згідно з формулою (5.1) становить 1373 га, за 2% S становить 7468 га. Враховуючи сільськогосподарське використання території в межах 53% загальна кількість ТАП становитиме при точності 5% – 1 ділянка (2590 га), при точності 2% – 6 ділянок (14091га).

Розрахована кількість ТАП вибіркової сукупності реалізовується за мережею квадратів, сформованих на основі кілометрової сітки цифрової картографічної моделі за допомогою таблиці випадкових чисел.

За мережею тестових аграрних полігонів визначається співвідношення між площами територій різного землекористування і загальною площею всіх тестових полігонів (загальною площею посівів сільськогосподарських культур). Визначене співвідношення площ у вибірці екстраполюється на територію району [22].

Як приклад визначення площ посівів однорічних сільськогосподарських культур за даними вибірових обстежень для адміністративного району можна навести розрахунки для території Миронівського р-ну. Загальна площа посівів, визначена на рік обстежень за даними Управління статистики в Миронівському р-ні, становила у великих сільгосппідприємств – 47712 га. Площа маски посівів Миронівського р-ну, отримана в результаті обробки даних космічного знімання системою RapidEye, становила 50991 га. Площа району, визначена за цифровою картографічною моделлю, – 901,6 км² (офіційні дані 904 км², відносна похибка 0,3%).

За даними наземних обстежень територіальної вибіркової мережі було побудовано вектор посівів у межах тестових аграрних полігонів і визначено площі під посівами кожної сільськогосподарської культури в їх межах та для району загалом. Результати розрахунків наведено в *табл. 5.4*.

Відносна похибка визначення площі посівів за вибірковою мережею відносно класифікаційної маски посівів за даними космічних зйомок у межах Миронівського р-ну становила 0,43%, що свідчить про високу точність визначення площ посівів за вибірковою мережею тестових аграрних полігонів.

Контроль за структурою посівних площ і сівозмін. У розв’язанні проблеми раціонального використання земель та охорони ґрунтів важливе місце посідає дотримання екологічно безпечної структури посівних площ і сівозмін. У розрізі ґрунтово-кліматичних умов вони мають забезпечувати не лише високу продуктивність агроєкосистем, а й виконувати функцію оптимізації фітосанітарного стану ґрунту, його водного та поживного режимів. Враховуючи важливість цього питання, Кабінетом Міністрів України у 2010 р. було ухвалено Постанову № 164 «Про затвердження нормативів оптимального співвідношення культур у сівозмінах у різних сільськогосподарських регіонах» [23].

Постановою затверджено нормативи оптимального співвідношення культур у сівозмінах у різних природно-сільськогосподарських регіонах (Поліському, Лісостеповому, Північностеповому, Півден-

Таблиця 5.4. Визначення площ посівів сільськогосподарських культур у Миронівському районі Київської області за даними, отриманими за вибірковою мережею

Сільсько-господарська культура	Площа, визначена в межах територіальної вибіркової мережі	% від площі вибірки	Розрахована площа за вибірко-вими даними	Площа посівів (га) за даними стат. звітності (ф. 4с) великих господарств	Різниця 4–5, га
Пшениця	2608,77	11,59	10477,36	10420,98	+56,38
Ячмінь	3006,02	13,36	12077,44	9654,53	+2422,91
Жито	50,36	0,22	198,88	139,30	+59,58
Кукурудза	2175,75	9,67	8738,68	8640,21	+98,47
Горох	103,81	0,46	415,84	544,2	-128,36
Гречка	307,56	1,37	1238,48	690,39	+548,09
Овес	104,41	0,46	415,84	339	+76,84
Просо	7,5	0,03	27,12	35	-7,88
Ріпак	996,75	4,43	4003,22	2570,97	+1432,25
Соя	1959,68	8,71	7873,84	8745,58	-871,74
Соняшник	1149,75	5,11	4618,96	3114,00	+1504,96
Цукровий буряк	126,15	0,56	506,24	480,00	+26,24
Картопля	2,01	0,01	9,04	–	+9,04
Багаторічні трави	153,78	0,68	614,72	1617,08	-1002,36
Всього	12745,51	56,65	51193	47712,34	+3480,66
Всього у вибірці	22500	–	–	–	–
Маска посівів	–	–	50911	–	–
Площа району	–	–	–	90400	–

ностеповому та Передкарпатському). Допустимі нормативи періодичності вирощування різних культур на одному й тому самому полі становлять:

- для жита озимого, ячменю ярого, вівса – не менше ніж через один рік;
- для пшениці озимої, картоплі – не менше ніж через 2 роки;
- для багаторічних бобових трав, зернобобових, буряку цукрового, ріпаку озимого і ярого – не менше ніж через 3 роки;
- для льону – не менше ніж через 5 років;
- для люпину, капусти – не менше ніж через 6 років;
- для соняшнику – не менше ніж через 7 років.

У сучасних соціально-економічних умовах у багатьох випадках спостерігається порушення наведених вище нормативів, що призво-

дить до погіршення фітосанітарного стану ґрунту, виснаження його родючості, вияву критичних посушливих явищ і, навіть, формування умов для виникнення катастрофічних пилових бур. Особливо характерно це для зони Степу, де упродовж останніх років спостерігається дуже різке збільшення площ посівів соняшнику і ріпаку.

У цьому сенсі актуальним є організація дієвого контролю за дотриманням нормативів структури посівних площ і сівозмін [24]. За допомогою традиційних методів, які ґрунтуються переважно на застосуванні даних наземних польових досліджень, надзвичайно проблематично проконтролювати встановлені параметри. Матеріали космічного знімання надають можливості для контролю за дотриманням нормативів структури посівних площ і сівозмін. У вкладці на рис. 39 представлено фрагменти зображення супутника RapidEye, з якого видно, що в 2009 р. ріпак був висіяний після соняшнику, а в 2010 р. на цьому ж полі знов був посіяний ріпак, що є доволі грубим порушенням нормативів сівозмін. Якщо спостереження проводити щороку, то можна сформувати базу даних структури посівних площ і сівозмін у межах не лише адміністративного району, а й окремих господарств. Наявність такої бази даних буде слугувати підґрунтям ефективного контролю за цим сегментом сільськогосподарської діяльності. При цьому чим більший термін накопичення таких матеріалів, тим точніші й надійніші будуть результати визначення порушення структури посівних площ і сівозмін.

Література до розділу 5

1. *Методичні рекомендації з наземних обстежень в системі моніторингу стану посівів за даними космічного знімання*. Інститут агроєкології і економіки природокористування НААН. Київ, 2010. 23 с.
2. *Гриценко В.А., Сиротенко О.В., Чернін В.М.* Наземні підсупутникові спостереження в сільськогосподарській статистиці. *Проблеми статистики*: зб. наук. праць. Київ: НДІ статистики Держкомстату України, 2002. Вип. 2. С. 248–253.
3. *Дистанційне зондування Землі з космосу*. Наземні дані щодо контролю стану посівів і продуктивності сільськогосподарських культур. Загальні положення: ДСТУ 7307:2013. [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 18 с.

4. *Дистанційне зондування Землі з космосу. Наземні обстеження посівів. Класифікатор об'єктів і функцій: СОУ 01.1-37-907:2011 [Чинний від 2011-01-08].* Київ: Мінагрополітики, 2011. 12 с.
5. *Сиротенко О.В., Чернін В.М.* Моделирование продуктивности посевов озимой пшеницы за данными космического зондирования сканером «МСУ-Э» штучного спутника Земли «Метеор-ЗМ». *Проблемы статистики*: зб. наук. праць. Київ: НТК статистичних досліджень Держкомстату України. 2005. Вип.7. С. 249–253.
6. *Baret F., Guyot G.* (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Rem. Sens. Environ.* V. 35: 161–173.
7. *Clevers J.G.P.W.* (1989). The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. *Rem.Sens.Environ.* V. 29: 25–37.
8. *Heute A.R.* (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Rem.Sens.Environ.* V. 25: 295–309.
9. *Wiegand C.Z. et al.* (1991). Vegetation Indices in Crop Assessments. *Rem.Sens.Environ.* V. 35: 105–119.
10. *Richardson A.J., Wiegand C.L.* (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogr.Eng. and Rem. Sens.* V. 43: 1541–1552.
11. *Кондратьев К.Я. и др.* Оценка параметров почвенно-растительного покрова по многоспектральным спутниковым данным. *Исследования Земли из космоса*. 1992. № 3. С. 88–95.
12. *Кравцова В.И.* Генерализация аэрокосмического изображения: континуальные и дискретные снимки. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 256 с.
13. *Kozoderov V.V. et al.* (1992). Cosmos 1939 data processing for FIFE 1989. *J.Geophys.Res.* V. 97. N D17: 18779–18784.
14. *Baret F., Guyot G., Major D.* (1989). TSAVI: A vegetation index which minimized soil brightness effects on LAI or APAR estimation. *Proceedings of 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89*. Vancouver. Canada: 1355–1358.
15. *Чимитдожиев Т.Н., Ефременко В.В.* Об исследовании различных индексов вегетации в дистанционном зондировании экосистем. *Исследования Земли из космоса*. 1998. № 3. С. 49–56.

16. *Richardson A.J., Everitt J.H. (1992). Using spectra vegetation indices to estimate rangeland productivity. Geocarto Internat. V. 1: 63–69.*
17. *Виноградов Б.В. Преобразованная Земля: аэрокосмические исследования. Москва: Мысль, 1981. 296 с.*
18. *Виноградов Б.В. Системное картографирование растительности на многомасштабных интеграционных уровнях. Картографирование географических систем. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1981. С. 112–121.*
19. *Бойчук В.В., Марченко А.С. Фон и вариация физико-географической сферы. Москва: Наука, 1968. 62 с.*
20. *Кольнобрицький М.І., Сиротенко О.В. Сучасний стан моделювання продуктивності сільськогосподарських культур за даними космічного знімання Землі. Статистика України. 2002. № 3. С. 41–49.*
21. *Сиротенко О. Вибіркові обстеження структури і площ сільськогосподарських культур за матеріалами дистанційного знімання. Регіональна нарада «Можливості дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій у вирішенні проблем Полісся»: тези доповідей. Київ; Луцьк, 2002. С. 35–37.*
22. *Тараріко О.Г. та ін. Методика обробки даних дистанційного зондування землі для оцінки стану посівів озимої пшениці. Аграрна наука виробництву. Науково-інформаційний бюлетень завершених наукових розробок. 2008. № 3. С. 7.*
23. *Про затвердження нормативів оптимального співвідношення культур у сівозмінах в різних сільськогосподарських регіонах: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 лютого 2010 р. № 164.*
24. *Методичні рекомендації щодо оптимального співвідношення сільськогосподарських культур у сівозмінах різних ґрунтово-кліматичних зон України: за ред. М.Д. Безуглого, А.С. Заришняка. Київ, 2008. 37 с.*



Моніторинг кризових посушливих явищ

Стан вологозабезпеченості сільськогосподарських культур є дуже важливим для їх розвитку та формування врожаю. Глобальні зміни клімату у світі спричиняють перебудову глобальних процесів переносу тепла та вологи на всіх континентах, що характеризується різким збільшенням природних катаклізмів, зокрема посух. Зміни кліматичних умов зумовлюють необхідність розгляду їх наслідків не лише на глобальному рівні чи, навіть, на рівні України, а також на локальному рівні. Найбільшого негативного впливу в цих умовах зазнає сільське господарство.

За даними Світового банку, якщо не відбудеться кардинальних змін в економіці, способах виробництва і рівні споживання, середньорічна температура в Україні до 2100 року може підвищитись на 3,2–4,5°C [1], що призведе до посилення посух, скорочення морозного періоду в середньому до 50 днів, збільшення кількості та інтенсивності літніх високих температур, зростання частоти виявів екстремальних кліматичних явищ. Зокрема, велику небезпеку становить підвищення температури повітря до рівня, що перевищує оптимальне і припустиме максимальне значення (вище 30°C), за якого коренева система рослин не в змозі компенсувати витрати вологи на транспірацію листовою поверхнею, що спричиняє у рослин водний стрес та депресію фотосинтезу.

Завчасно виявити настання посухи за наявних методів визначення запасів продуктивної вологи є складним завданням. Саме тому актуальною є розробка нових методів виявлення посушливих явищ із застосуванням сучасних геоінформаційних (ГІС) технологій і дистанційного зондування Землі з космосу (ДЗЗ), які є підставою для коригування агротехнології в напрямі оптимізації умов волого-

забезпеченості. Супутникова інформація дає змогу в оперативному режимі екстраполювати дані спостережень, отримані за мережею метеостанцій, на великі території і отримати точнішу оцінку розповсюдження критичних кліматичних і погодних негативних впливів на посіви сільськогосподарських культур.

Загальновідомі результати використання даних дистанційного зондування Землі досліджень з цих проблем у США (NASA), в європейських програмах MARS [2], системі глобального спостереження Землі GEOSS і створеного в системі глобального моніторингу для довкілля і безпеки GMES сервісу GSE Land [3] оперативного визначення територій, що зазнали впливу посушливих явищ.

Найважливішим екологічним фактором росту й розвитку рослин є їх вологозабезпеченість. Водний статус рослин є їх важливим фізіологічним показником, який визначає первинну продукцію фотосинтезу.

Індикатори кризових посушливих явищ. Визначення кризових посушливих явищ в агроєкосистемах та водних стресів у посівах сільськогосподарських культур ґрунтуються на теоретично і експериментально встановленому взаємозв'язку між станом рослинного покриву, який визначається вмістом пігментів та води в тканинах, і його спектральною відбивною здатністю на різних довжинах хвиль електромагнітного спектра (Б.В. Виноградов, 1976, В.І. Рачкулік та М.В. Ситникова, 1981, В.Я. Кондратьєв, П.П. Федченко, В.В. Козодьоров, 1992, 1999, Т.Н. Чимитдожієв, В.В. Єфременко, 1998, В. Бастіансен, 1998, Г. Роєрінк, 2003, С. Зварт, 2004 та ін.).

Різна спектральна відбивна здатність рослинного покриву пов'язана також з реакцією рослинності на умови зволоження. Зокрема, у середньому інфрачервоному спектральному діапазоні на відбивну здатність зеленої рослинності значний вплив мають смуги поглинання води на довжинах хвиль 1,4; 1,9; 2,7 мкм. Коефіцієнти відбиття в цій області перебувають у зворотному відношенні до об'єму листової вологи. Отже, за визначення реакції рослинності на умови зволоження використовуються вегетаційні індекси, що є математичними комбінаціями цих значень в певних каналах, які є інформативними для цього об'єкта. Отже, опосередкованими показниками стану вологозабезпечення посівів є як окремі вегетаційні індекси, так і їх комбінації (табл. 6.1).

Одним зі шляхів дистанційної індикації водного стресу рослин також може бути визначення термальної радіації, яку випромінює

рослинний покрив [4]. У міру зменшення вмісту вологи в рослинах листкова температура над посівом зростає внаслідок зменшення транспірації. За експериментальними даними залежність між водним дефіцитом листя і температурою повітря на висоті 2 м в широкому діапазоні змін вологозапасів у ґрунті є майже лінійною [5,6]. Це дає можливість визначати вологовміст в рослинах за характеристикою їх термічного режиму. Як індикатор може виступати радіаційна температура посівів, що найкраще характеризує термічний режим тканин рослини [7, 8, 9]. Своєю чергою, температура поверхні будь-якого об'єкта тісно пов'язана з його природним випромінюванням у межах інфрачервоного теплового діапазону (3,0–20,0 мкм). Співвідношення між випромінюванням (R) та абсолютною температурою (T) описується законом Стефана-Больцмана:

$$R = \varepsilon \times \sigma \times T^4,$$

де ε – коефіцієнт випромінювання поверхні; σ – стала Стефана-Больцмана ($5,674 \times 10^{-8} \text{ Втм}^{-2} \text{ К}^{-4}$), одиниці вимірювання R – Втм^{-2} [10].

Останнім часом активно розвиваються методи дистанційного визначення температури земної поверхні за супутниковими даними, що дає змогу докладно досліджувати просторову диференціацію температурного поля. Отримані наземними методами загалом точкові дані (дані метеорологічних станцій, експедиційних вимірювань) не надають такої можливості. Регулярні та широкодоступні супутникові дані для вивчення теплових властивостей земної поверхні почали надходити наприкінці 70-років минулого століття з метеорологічних супутників NOAA (радіометр AVHRR), а згодом із супутників Landsat-5 і Landsat-7 (радіометри TM і ETM+ відповідно), а також супутників Terra (радіометри MODIS і ASTER) та Aqua (радіометр MODIS). Ці дані ДЗЗ нині найдоступніші.

Отже, за фіксуванням на знімках випромінюванням у теплових каналах досліджується радіаційна температура поверхні, усереднена за пікселем знімка і спектральним діапазоном радіометричних вимірювань [11]. Відповідно до результатів попередніх досліджень ступінь поглинання рослинністю сонячної енергії, що надходить, в інфрачервоному діапазоні є функцією вологовмісту листка і його товщини [10]. За зменшення вмісту вологи в листках їх випромінювальна здатність у інфрачервоному діапазоні хвиль помітно змен-

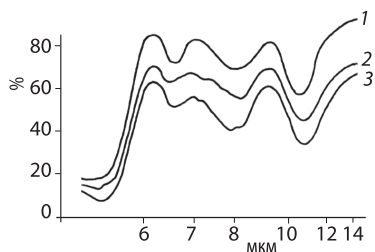


Рис. 6.1. Усереднені криві ІЧ-спектроскопії листків пшениці озимої різного оводнення (водного дефіциту d):
1 – $d=0\%$; 2 – $d=13\%$; 3 – $d=24\%$ [6]

шується. Аналіз ІЧ спектрів поглинання листків пшениці озимої з різним водним дефіцитом показав характерний їх хід з високим поглинанням енергії (40–90%) в основному «вікні прозорості атмосфери» 6–14 мкм з максимумами на довжинах хвиль $\lambda=6,1$; 7,2; 9,3 і 13,7 мкм та чіткими мінімумами поглинання на довжинах хвиль $\lambda = 8,2$ і 10,6 мкм (рис. 6.1) [5]. Перша довжина хвилі майже співпадає з основною полозою водно-

го поглинання $\lambda = 6,27$ мкм, друга відповідає мінімуму поглинання в основному «вікні прозорості атмосфери», третя та четверта довжини хвиль відповідають максимальним довжинам хвиль радіометрів, встановлених на супутниках NOAA (10,5–11,5 і 11,5–12,5 мкм), Terra або Aqua (10,780–11,280, 11,77–12,27 мкм), Landsat (10,40–12,5 мкм). Характерна залежність зниження випромінювальної здатності листків пшениці озимої зі зростанням водного дефіциту в інфрачервоних спектральних діапазонах супутників NOAA, Terra або Aqua, Landsat свідчить про можливість використання даних супутникового знімання для оцінки вологовмісту рослин. Однак з огляду на зазначене вище для радіометра MODIS супутників Terra та Aqua доцільно використовувати лише канали діапазонів 10,78–11,28 і 11,77–12,27 мкм.

Отже, супутникові дані теплового спектрального діапазону та їх комбінації з вегетаційними індексами (табл. 6.1) є також індикаторами вологозабезпеченості агроландшафтів.

Наявність сучасних систем багатозонального знімання різного просторового розрізнення зумовлюють доцільність їх використання для визначення водного стресу на різних рівнях системи агромоніторингу.

Моніторинг кризових посушливих явищ на національному та регіональному рівні.

Знімальні системи аналогічні багатозональному радіометру AVHRR ШСЗ NOAA з низьким просторовим розрізненням (1000 м) та великим оглядом території (до 2800 км) доцільно використовувати на рівні країни для визначення проблемних територій. Зокрема,

Таблиця 6.1. Спектральні індекси – індикатори вмісту вологи агрофітоценозів

Індекси	Назва, формула	Посилання
NDVI	Нормалізований різницевий вегетаційний індекс $NDVI = (R_{БІЧ} - R_{Ч}) / (R_{БІЧ} + R_{Ч})$	J. Rouse (1973)
NDWI	Нормалізований різницевий водний індекс $NDWI = (R_{БІЧ} - R_{СІЧ}) / (R_{БІЧ} + R_{СІЧ})$	B. Gao (1996)
MSI	Індекс стресу вологості $MSI = R_{СІЧ} / R_{БІЧ}$	E. Hunt, B. Rock (1989)
NWI	Нормований водний індекс $NWI = (R_{ЗЕЛ} - R_{СІЧ}) / (R_{ЗЕЛ} + R_{СІЧ})$	H. Xu (2006) О.І. Сахацький (2006)
NDDI	Нормалізований індекс посухи $NDDI = (NDVI - NDWI) / (NDVI + NDWI)$	Q. Xiao et al. (1998)
VCI	Індекс умов росту рослинності $VCI = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times 100$	F. Kogan (1987)
CWSI	Індекс водного стресу рослин $CWSI = (dT - dT_i) / (dT_u - dT_i)$	P. Джексон (1986)
TCI	Індекс температурного режиму $TCI = [(T_{max} - T) / (T_{max} - T_{min})] \times 100$	F. Kogan (2001)
VHI	Індекс стану рослинності $VHI = 0,5 \times VCI + 0,5 \times TCI$	F. Kogan (2001)
WSVI	Веgetаційний індекс водних запасів $WSVI = NDVI / T_s$	M. Hardinsky (1983)
ID	Індекс посухи $ID = (T_{SD} + T_{SH}) / NDVI$	Е.В. Щербенко (2007)
IS	Індекс стресу $IS = \frac{T_s}{100 \times TVI}, \quad TVI = \sqrt{NDVI + 0},$	Р.Д. Мухамедяров, С.Н. Кокутин (1999)
NDVI _{gre}	Нормалізований різницевий вегетаційний індекс «червоного краю» $NDVI_{gre} = (R_{БІЧ} - R_{ЧК}) / (R_{БІЧ} + R_{ЧК})$	E. Barnes (2000)

Примітка: R – коефіцієнт відбиття у відповідному спектральному діапазоні; БІЧ, СІЧ, Ч, ЧК, ЗЕЛ – відповідно ближній інфрачервоний, середній інфрачервоний, червоний, червоного краю, зелений діапазони; T_s – температура поверхні, T_{SD}, T_{SH} – денна, нічна температура поверхні; T_{max}, T_{min} – максимальна, мінімальна температура; dT_u, dT_i – верхня і нижня границя різниці температур поверхні.

за даними його теплових каналів можна проводити експертну оцінку стану вологозабезпеченості агроландшафтів.

Як приклад за даними теплового каналу (4 канал, 10,3–11,3 мкм) AVHRR ШСЗ NOAA, перерахованими у значення температури ви-

Таблиця 6.2. Оцінювання посушливих явищ за вегетаційним індексом TCI

Значення TCI	< 10	< 20	< 30	< 40	≥ 40
Температурні умови	Екстремальний стрес	Сильний стрес	Помірний стрес	Незначний стрес	Сприятливі умови

промінювання земної поверхні (T) [10], було отримано карти її просторового розподілу (див. вкл. рис. 40). За наведеними картами температури поверхні України спостерігалось рівномірне підвищення мінімальної температури від 10–15 до 20–30°C за період з 8 квітня по 6 травня 2017 р.

Розроблений Ф. Коганом за довгочасними серіями цих денних даних індекс температурних умов TCI (*табл. 6.1*), надає можливість ідентифікувати зміни стану рослинності під впливом тепла і дає змогу пояснити температурний вклад для аналізу виникнення посухи, а також надає інформацію для моніторингу стресу рослинності, зумовленому ґрунтовими умовами [12]. Цей індекс набуває значення від 0 до 100 (0 – дуже несприятливі (стресові) температурні умови для рослинності, 100 – винятково сприятливі умови) і класифікується за такою схемою (*табл. 6.2*), розробленою для оцінювання посухи [13].

Аналіз просторового розподілу визначеного індексу температурних умов на початок квітня і травня 2017 р., усередненого за областями, показав, що значення індексу TCI за період з 1 по 8 квітня 2017 р. майже за всіма областями не перевищують 24 (див. вкл. рис. 41, *a*), що відповідає умовам сильного температурного стресу (*табл. 6.2*), однак на початок травня температурні умови за всіма областями поліпшилися до сприятливих, за винятком Черкаської, Кіровоградської, Полтавської і Сумської областей, де спостерігались умови помірного температурного стресу (див. вкл. рис. 41, *b*).

У розробку індексу водного стресу CWSI (Джексон Р. та ін., 1977) за супутниковими даними, отриманими у термальному діапазоні (*табл. 6.2*), покладено зв'язок між температурою поверхні і водним стресом рослин, який ґрунтується на тому факті, що за транспірації вода, яка випаровується, знижує температуру рослин до значень нижчих, ніж температура повітря навколо. Значення CWSI змінюються від 0 до 1. Більші значення вказують на більший стрес. Як приклад – за результатом визначення цього індексу даними MODIS/Terra 7 травня 2009 р. було побудовано карту просторового розподі-

лу водного стресу посівів на території Миронівського і Канівського районів (див. вкл. рис. 42), дані якої свідчать, що на території Миронівського р-ну більша кількість сільськогосподарських угідь перебували в стресових умовах порівняно з Канівським р-ном.

Як непрямий показник вологозабезпечення агроландшафтів, традиційно використовують наведений вище нормалізований різнице-вий вегетаційний індекс (NDVI). Перевагою використання NDVI для оцінки вологозабезпечення є існування готових безкоштовних регулярних продуктів, які включають визначений NDVI за матеріалами знімання AVHRR (доступні кожні 7 днів, просторове розрізнення 4 км), MODIS (доступний кожні 8 днів, просторове розрізнення 250 м) та Proba-V (10-денний композит з просторовим розрізненням 300 м [14]). Важливим у цьому плані є також можливість отримання щоденних (MODIS, просторове розрізнення 250 м, Proba-V, просторове розрізнення 100, 300 м), п'ятиденних (Sentinel-2, просторове розрізнення 10 м) та двотижневих (Landsat, просторове розрізнення 30 м) даних з наступним розрахунком цього індексу для рівня країни, регіонального та локального рівнів за умов відсутності хмарності над територією досліджень.

Для зменшення впливу погодних умов, географічних, екосистемних змін, ґрунтових, рослинних, топографічних умов під час визначення стану рослинності, було введено індекс умов росту рослинності VCI (*табл. 6.1*) (Kogan F., 1987), в якому порівнюють значення NDVI за кілька років [15] і враховують не окремі значення NDVI, а зміни цих значень упродовж вегетаційного періоду. Цей індекс застосовується як показник умов росту рослинності в певному регіоні. Було показано, що він більше пов'язаний з кількістю опадів, ніж NDVI, і має високу кореляцію з водним дефіцитом. У *табл. 6.3* наведено зв'язок умов зволоження рослинності зі значеннями індексу VCI.

Прикладом використання цього індексу є побудовані за ним карти просторового розподілу умов зволоження рослинності на тери-

Таблиця 6.3. Залежність умов зволоження рослинності від значення індексу VCI

Значення VCI	> 70	≥ 36	< 36	< 30
Умови зволоження	Вологі, сприятливі	Близькі до норми	Настання посухи	Стресовий стан рослин

терії України на 8 квітня та 6 травня 2017 р. (див. вкл. рис. 43, а, б). За ними можна зробити висновок, що умови зволоження на 6 травня порівняно з 8 квітня на більшості території України залишилися близькими до норми зволоження, за винятком території кількох центральних областей: Черкаської, Полтавської, Кіровоградської, де підвищився ризик виникнення посухи, і поліпшились на території Одеської та Запорізької областей до сприятливих.

Одними із індикаторів вологозабезпечення посівів є вегетаційні індекси, розроблені з використанням середнього інфрачервоного (СІЧ) діапазону (1,5–3,0 мкм), оскільки за зменшення вмісту вологи відбивна здатність у цьому діапазоні помітно збільшується. Отже СІЧ-канал є критичним для оцінювання вологовмісту рослин. Зокрема, визначення виявів посушливих явищ можна проводити за розробленим В. Gao нормалізованим різницею водним індексом NDWI (табл. 6.1) [16]. Він дає змогу виявити варіації рослинного покриву, пов'язані з умовами зволоження, і визначати весь об'єм вологи у вегетаційному рослинному покриві. Величина індексу збільшується за збільшення вологи. Відповідно до його значень складається карта просторового поширення посушливих явищ в агроландшафтах. Прикладом використання цього індексу для визначення просторового розподілу змін вологозабезпеченості є експериментальні дослідження 2013 р. в Київській обл. і, зокрема в Миронівському р-ні. Для моніторингу динаміки вмісту вологи в рослинах використано мультиспектральні дані 2 та 6 каналів радіометра MODIS супутника Тегга, отримані з інформаційних продуктів MOD09GA за 9 травня і 2 червня 2013 р. із сайту Геологічної служби США (www.mrtweb.cr.usgs.gov). За аналізом динаміки значень водного індексу в період з 9 травня по 2 червня 2013 р. спостерігалось поліпшення умов вологозабезпечення на всій території Київської обл. (див. вкл. рис. 44, а) і майже на всій території Миронівського р-ну (див. вкл. рис. 44, б), що є наслідком випадання біля 27 мм опадів з 12 по 18 травня цього року. Отже, моніторинг умов вологозабезпеченості у різні фази розвитку посівів, за даними приладу MODIS, можливий на різних адміністративних рівнях як області, так і району.

Можливість діагностувати та картувати посуху на значних територіях надають індекси, які *комбінують дані теплових і оптичних спектральних каналів*. На початку посухи між температурними параметрами і NDVI є від'ємна кореляція. Це ґрунтується на тому

факті, що за настання посухи значення індексу NDVI зменшуються. Водночас підвищується температура рослинного покриву, що реєструється в теплових каналах супутникових даних. Ці ефекти пов'язані з умістом вологи в ґрунті і рослинах. Отже індекс, який комбінує показник NDVI та температуру поверхні посівів, відображає вплив посухи на сільськогосподарські культури. Такими індексами є індекс стану рослинності VHI (табл. 6.1) [17], індекс водних запасів WSVI (табл. 6.1) [18]. Для визначення пригніченого стану рослинності було розроблено індекс IS (табл. 6.1), який є універсальним, інтегральним індикатором водно-теплого стресу рослинних ландшафтів [19]. Він відображає основні ознаки пригніченого стану фітоценозів – зниження значень вегетаційного індексу і підвищення температури. Його особливістю є те, що він дає змогу врахувати наявність на знімку неповного покриття рослинністю ґрунтового покриву і виключити таким чином вплив відкритого ґрунтового фону. Теоретичний діапазон значень IS перебуває між 0 і 1, на практиці його максимальна величина не перевищує 0,4. Більші значення свідчать про ймовірність наявності на території стресового стану рослинності, тобто про дефіцит вологи.

У рамках проведення досліджень було побудовано карту його просторового розподілу (див. вкл. рис. 45) за супутниковими даними радіометра MODIS на території Миронівського р-ну Київської обл. і Канівського р-ну Черкаської обл. За просторовим розподілом індексу IS можна зробити висновок, що за 7 квітня 2009 р. вегетаційні умови змінювались на просторі від задовільних в Канівському р-ні до слабкої посухи в Миронівському р-ні, що пояснювалось аналізом метеорологічних даних за цей період, а саме незначною кількістю опадів: 16 мм з 15 березня по 7 квітня, а за перший тиждень квітня – 0,7мм.

Моніторинг кризових посушливих явищ на локальному рівні. Визначення просторового розподілення показників водного стресу в посівах сільськогосподарських культур на локальному рівні проводиться за даними, отриманими зі знімальних систем високого просторового розрізнення. Для цього використовуються матеріали космічного знімання таких космічних систем, як RapidEye, ASTER, ALOS, Landsat 8, Sentinel та ін. Деталізація просторового поширення водного стресу проводиться в межах маски посівів на кожному полі при наявності температурного інфрачервоного каналу за індек-

сом водного стресу рослин (CWSI), середнього інфрачервоного каналу за індексом NDWI (за нормалізованими показниками і за процентним умістом води в рослинах), а при наявності спектрального діапазону червоного краю (*rededge*) за вузькосмуговим індексом NDVI_{re} (табл. 6.1) [20].

Приклад карти просторового розподілу цього індексу за тестовими полігонами 21 квітня 2009 р. за даними супутника RapidEye наведено на вклейці на рис. 46. За отриманою картою можна зробити висновок щодо доброї зволоженості рослин пшениці озимої на 7 тестовому полігоні і недостатньої зволоженості на 10.

Наведені вище дистанційні індикатори вмісту води агрофітоценозів можуть бути систематизовані за спектральними діапазонами матеріалів дистанційного зондування, які вони використовують (табл. 6.4).

Грунтуючись на аналізі основних характеристик космічних систем ДЗЗ (табл. 2.1), можна зробити висновок, що для визначення вологозабезпеченості і стресового стану агрофітоценозів на різних просторових рівнях застосовування супутникових даних і розрахованих за ними спектральних індексів доцільно систематизувати відповідно до табл. 6.5.

Важливим завданням моніторингу вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур за супутниковими даними є визначення можливості заміни спектральних індексів, отриманих за даними ДЗЗ різного просторового розрізнення. Для цього було проведено визначення наведених вище спектральних індексів для тестових тери-

Таблиця 6.4. Спектральні діапазони даних ДЗЗ для дистанційних індикаторів вмісту води агрофітоценозів

Індекс	Діапазон супутникових даних (мкм)
NDVI	0,62–0,75; 0,75–1,3
VCi	0,62–0,75; 0,75–1,3
NDVI _{re}	0,62–0,75; 0,76–0,85
MNDWI, NWI	520–620; 1,2–2,5
NDWI	0,75–1,3; 1,2–2,5
NDDI	0,62–0,75; 0,75–1,3; 1,2–2,5
TCI, CWSI	10,4–12,5
VHI, WCVI, ID, IS	0,62–0,75; 0,75–1,3, 10,4–12,5

торій за супутниковими даними Terra (MODIS), Landsat TM, RapidEye за квітень 2009 р. з використанням програмного забезпечення BEAM – 4.10.3. Для отриманих даних в програмному середовищі ArcGis 10 за допомогою інструменту просторового аналізу Zonal Statistic (модуль Spatial Analyst) було об-

Таблиця 6.5. Систематизація спектральних індексів за просторовим рівнем

Рівень	Супутник	Індекс
Країни	NOAA (AVHRR)	NDVI, VCI, TCI VHI
Регіональний	Terra, Aqua (MODIS)	NDVI, NDWI, MNDWI, NDDI, ID, IS
	Proba-V	NDVI, NDWI, MNDWI, NWI
Локальний	Landsat	NDVI, NDWI, MNDWI, NDDI
	Sentinel-2	NDVI, NDWI, MNDWI, NDDI
	RapidEye	NDVI, NDVIre

раховано зональну статистику і отримано середні значення цих індексів за тестовими полігонами, полями посівів сільськогосподарських культур і точками наземних досліджень. Результати досліджень показали, що існує кореляція між середніми значеннями спектральних індексів за тестовими полями, отриманими за даними космічного знімання Terra (MODIS), просторове розрізнення 500 м; Landsat TM (30 м) і RapidEye (5 м). Зокрема, найкраща кореляція спостерігалася між індексами NDVIre (RapidEye) і NDVI (MODIS) – 0,757; NDVIre (RapidEye) і NWI (MODIS) – 0,745; NDVIre (RapidEye) і NDVI (Landsat TM) – 0,946; NDVIre (RapidEye) і NDWI (Landsat TM) – 0,861; NDWI (Landsat TM) і NDWI(MODIS) – 0,656.

За точками наземних досліджень найкраща кореляція спостерігалася між даними RapidEye і Landsat TM. Зокрема, між індексом NDVIre і NDWI – 0,787. Між даними MODIS і RapidEye кореляція була невисока, що пов'язано з низьким просторовим розрізненням даних MODIS.

Отримані середні значення спектральних індексів за тестовими полігонами показували високу кореляцію між RapidEye і Landsat TM в індексі NDWI (0,809). Для Landsat TM і MODIS кореляція мала високі значення майже за всіма індексами, зокрема найвищі для NDWI (0,918) і MSI (0,959). Як показали дослідження, за тестовими полігонами висока кореляція спостерігалась також і між індексами NDVIre (RapidEye) і NDWI та MSI (MODIS), відповідно 0,940 і -0,814. За отриманими результатами було побудовано узагальнену матрицю кореляції між спектральними індексами систем дистанційного зондування різного просторового розрізнення (табл. 6.6).

Отже, за результатами кореляційного аналізу для визначення вологозабезпеченості посівів сільськогосподарських культур на локальному рівні показано можливість заміни використання ко-

Таблиця 6.6. Матриця кореляції між спектральними індексами

Супутник індекс		Terra (MODIS)		Landsat		RapidEye
		NDWI	MSI	NDWI	MSI	NDVIre
Terra (MODIS)	NDWI	1	-0,871	0,918	0,783	0,940
	MSI	-0,871	1	-0,782	0,959	-0,814
Landsat	NDWI	0,918	-0,782	1	-0,998	0,809
	MSI	0,783	0,959	-0,998	1	-0,792
RapidEye	NDVIre	0,940	-0,814	0,809	-0,792	1



Рис. 6.2. Точки відбору рослинних зразків у межах тестової ділянки

мерційних супутникових даних високого просторового розрізнення RapidEye на дані середнього просторового розрізнення Landsat, Terra (MODIS), які поширюються безкоштовно.

Моделювання стану вологозабезпеченості посівів. Для моделювання стану вологозабезпеченості посівів на локальному рівні за даними ДЗЗ визначається вміст води в рослинах на рівні поля, для чого використовуються навчальні вибірки (рис. 6.2). Для визначення процентного вмісту води в рослинах за даними вибірки рослинних зразків у межах однорідних ділянок розраховується матриця кореляцій спектральних індексів з умістом води в рослинах для кожної точки вибірки [21].

Скажімо, кореляція вмісту води в рослинах пшениці озимої із значеннями індексу NDVIre (11 квітня 2009 р., супутник RapidEye) становила 0,71 і 0,685 для індексу NDWI (5 травня 2012 р., супутник «СІЧ-2»).

Методом множинної регресії для кожної вибірки розраховується рівняння множинної регресії. Як залежна змінна використовується значення вмісту вологи, а як незалежна змінна – відповідні спектральні індекси. Валідація моделей множинної регресії проводиться за довільно вибраними точками в межах кожної ділянки, що не використовувались під час розрахунку моделей [21]. Так було здійснено моделювання вмісту вологи в рослинах пшениці озимої за супутниковими даними високого просторового розрізнення RapidEye (11 квітня 2009 р.) та «СІЧ-2» (5 травня 2012 р.). Відповідно отримано логарифмічну залежність між умістом вологи (V) та індексом NDVI_{re} (середня похибка становила 5,02%) [21]:

$$V = 0,1233 \times \ln(\text{NDVI}_{re}) + 0,8792$$

та поліноміальну для індексу NDWI (середня похибка становила 4%):

$$V = 0,6942 - 0,2986 \times \text{NDWI} + 2,009 \times \text{NDWI}^2 - 6,7197 \times \text{NDWI}^3.$$

Значення вмісту вологи в рослинах розраховують за вихідним знімком засобом растрового калькулятора на всю територію дослідження. Після виконання операції розрахунку вмісту вологи в рослинах у межах окремих ділянок створюється мозаїка зображення на всю територію дослідження, за якою будується карта вологовмісту рослин. У результаті за наведеними вище моделями було побудовано карти просторового розподілу вмісту вологи для полів пшениці озимої (див. вкл. рис. 47). Як бачимо, значення вмісту вологи змінюються у межах 60–75%, що свідчить про задовільну вологозабезпеченість посівів. Отже, за наявності маски посівів можна здійснювати експертне оцінювання вологозабезпечення на локальному рівні у спосіб екстраполяції оперативних даних спостережень.

Визначення водного стресу агрофітоценозів на локальному рівні доцільно застосовувати також за аналізу стану посівів на зрошуваних землях. Отримані дані можуть слугувати базовим підґрунтям для розробки на різних адміністративних рівнях управлінських рішень щодо запобігання розвитку посушливих явищ.

Література до розділу 6

1. URL: <http://climate4development.worldbank.org/>
2. URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/mars>
3. URL: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/GMES_Service_Element
4. Антоненко В.С., Гойса Н.И. Радиационная температура системы «почва–растение» как фактор состояния посевов сельскохозяйственных культур. Киев: АртЭк, 2002. 52 с.
5. Антоненко В.С. К методике определения водного дефицита растений озимой пшеницы в полевых условиях. *Труды УкрНИИ Госкомгидромета*. 1985. Вып. 205. С. 81–87.
6. Антоненко В.С. Модель формирования водного дефицита листьев озимой пшеницы и способ его расчета. *Труды УкрНИИ Госкомгидромета*. 1985. Вып. 213. С. 72–79.
7. Jackson R.D. et al. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*. 17: 1133–1138.
8. Kirkham M.B. (2005). Principles of Soil and Plant Water Relations. USA: Elsevier Academic Press: 500.
9. Pinter P.J., Reginato R.J. (1982). A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigations. *Transaction of the ASAE*. 25: 1651–1655.
10. Dieter L. (1968). Temperature measurements of natural surfaces using infrared radiometers. *Appl. Optics*. V. 7. N 9: 1705–1710.
11. Соловьев В.И., Успенский А.Б. Определение температуры земной поверхности по данным измерений уходящего теплового излучения с геостационарных метеорологических ИСЗ. *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 3. С. 5–17.
12. Kogan F. N. (1990). Remote Sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. N 11: 1405–1419.
13. Kogan F.N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15 (11): 91–100.
14. URL: https://land.copernicus.vgt.vito.be/geonetwork/srv/eng/main.home?uuid=urn:cglsglobal:ndvi300_v1_333m
15. Kogan F.N. (1987). Vegetation index for areal analysis of crop conditions. Preprints, Proc. 18th Conf. Of Agricultural and Forest

- Meteorology (September 15–18, 1987). West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc.: 103–107.
16. Gao B. (1996). NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*. 58: 257–266.
 17. Kogan F.N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 82 (9): 1949–1964.
 18. Hardisky M., Klemas V., Smart R. (1983). The influences of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral reflectance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 49: 77–83.
 19. Мухамедяров Р. Д., Кокутин С. Н. Возможность оценки зеленой биомассы сельскохозяйственных культур системой дистанционного зондирования в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. *Оптический журнал*. 1999. Т. 66. № 4. С. 43–46.
 20. Barnes E.M., Clarke T. R. , Richards S. E. (2000). Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. Unpaginated CD-ROM (13.pdf). In Proc 5th Int. Conf. on Precision Agric, Bloomington, MN 16–19 July 2000 ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. URL: <http://ddr.nal.usda.gov/bitstream/10113/4190/1/IND43939070.pdf>
 21. Льєнко Т. В. Оцінювання вологозабезпеченості агрофітоценозів за даними дистанційного зондування Землі з космосу : автореф. дис. ... канд. сільськогосподарських наук: 03.00.16. Ін-т агроекології і природокористування НААН. Київ, 2014. 26.



Моніторинг агрокліматичних умов

Продовольча проблема, яка загострюється у світі, зумовлена не лише високими темпами збільшення кількості населення, які випереджають виробництво харчових продуктів, а й змінами клімату та процесами опустелювання. Україна має високий природно-ресурсний потенціал агросфери і може забезпечувати не лише національну, а й значною мірою загальносвітову місію продовольчої безпеки. Сучасна продовольча ситуація у світі та прогнозовані зміни клімату потребують об'єктивного аналізу та оцінки його впливу на стан основних агресурсів і виробництво сільськогосподарської продукції, зокрема зерна, удосконалення стратегії й тактики формування сталих високопродуктивних ресурсо-енергоощадних агроєкосистем.

Вивчення проблем зміни клімату та оцінювання окремих його характеристик, зокрема температури та зволоження, в Україні виконуються під егідою Міністерства екології та природних ресурсів. Результати цієї роботи узагальнено у п'яти Національних повідомленнях. Цьому питанню присвячено численні наукові праці низки наукових установ, зокрема Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту [1, 2, 3, 4]. Однак актуальним лишається питання щодо впливу кліматичних змін на екологічний стан агроландшафтів, систему землекористування, ґрунтовий покрив та продуктивність агроєкосистем. Важливим у цьому аспекті є, з одного боку, вивчення і прогнозування виникнення додаткових ризиків, наприклад просторового поширення посух, ерозійної деградації та зниження продуктивності агроєкосистем, а з другого – розв'язання проблеми адаптації та ефективного використання додаткового агресурсного потенціалу у вигляді тепла.

Моніторинг та оцінка агрометеорологічних і кліматичних умов сільськогосподарського виробництва є важливою складовою агропромислового комплексу. До основних завдань агрометеорологічного моніторингу належить: оцінка впливу метеорологічних факторів на стан, розвиток та продуктивність агрокультур; прогноз урожайності; своєчасне надання інформації про агрокліматичні умови для виробників сільськогосподарської продукції та управлінських структур АПК; надання рекомендацій для коригування агротехнологічних практик та структури посівних площ з урахуванням агрометеорологічних і кліматичних умов та пом'якшення їх негативних наслідків чи раціонального використання наявних ресурсів.

Наземний сегмент агрометеорологічного моніторингу забезпечує відділ агрометеорології Українського гідрометеорологічного центру, який проводить спостереження, збір та обробку наземних даних на репрезентативних полях за мережею зі 126-ти метеорологічних станцій (агрометпостів) за основними сільськогосподарськими культурами. Відділ формує агрокліматичні довідники, що містять середні багаторічні показники за період 1986–2005 рр., а також поточні щодакдні дані про умови росту й розвитку агрокультур, тепло- й вологозабезпечення та умов перезимівлі [5,6].

Для оцінювання і прогнозування змін клімату у світовій та вітчизняній практиці широко використовують кліматичні моделі, які розроблено в США, Канаді, Японії, країнах ЄС та ін. [6]. Однак важливим в цьому плані є використання космічної інформації, яка дає можливість оперативно оцінювати не лише зміни клімату, наприклад температурний режим, а їх вплив на рослинність, зокрема й агрофітоценози. Важливим є також оперативне визначення впливу змін клімату на стан та продуктивність посівів сільськогосподарських культур, зокрема на просторове поширення таких кризових явищ, як посуха, вимерзання, хвороби і навіть дефіцит біогенних елементів, наприклад азоту.

Прикладом глобальної системи моніторингу агрокліматичних умов за даними супутникової зйомки є система NOAA STAR NESDIS (National Environmental Satellite Data Information Services), яка була розроблена та підтримується Центром використання супутників і досліджень Національної служби супутникових даних та інформації Національного управління з досліджень океану та атмосфери США (NOAA). Система надає дані про стан рослинності на основі супутникових даних MODIS у вигляді карт та графіків динаміки

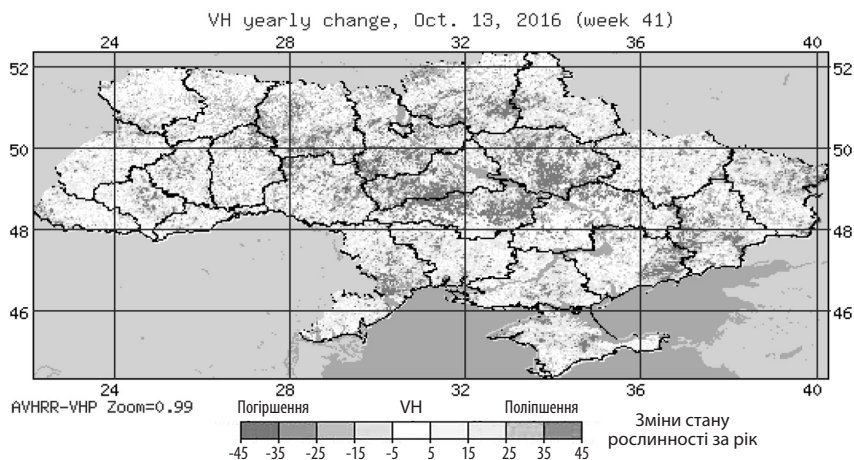


Рис. 7.1. Карта різниці стану рослинності на 13 жовтня у 2016 і 2015 рр.

в масштабі країни чи області, зокрема за такими показниками, як вегетаційний індекс NDVI, індекс здоров'я рослинності VHІ, температурний індекс TCI, індекс умов зволоження VCI та ін. за період понад 30 років (з 1982 р.) [7]. Доступ до архівних даних дає можливість порівнювати стан та умови росту рослинності за три попередні роки та середнє багаторічне (рис. 7.1).

На рис. 7.1 гірший стан рослинності за відповідний період у 2016 р. порівняно з 2015 спостерігається у Житомирській та Рівненській областях, що було пов'язано з системними виявами посушливих явищ у цьому регіоні.

Іншим прикладом є система моніторингу сільськогосподарського стресу (ASIS/GIEWS), розроблена Продовольчою і сільськогосподарською організацією ООН (FAO) у співпраці з Центром спільних досліджень Європейської Комісії (JRC) та Фламандським інститутом технологічних досліджень (VITO). Система надає щодакдну та щомісячну інформацію, отриману за супутниковими даними METOP-AVHRR та даними про опади Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), зокрема за такими показниками: індекс сільськогосподарського стресу, інтенсивність посух, середній індекс здоров'я рослинності, показники атмосферних опадів, показники рослинного покриву [8]. На рис. 7.2 наведено приклад карти індексу сільськогосподарського стресу на території України станом на

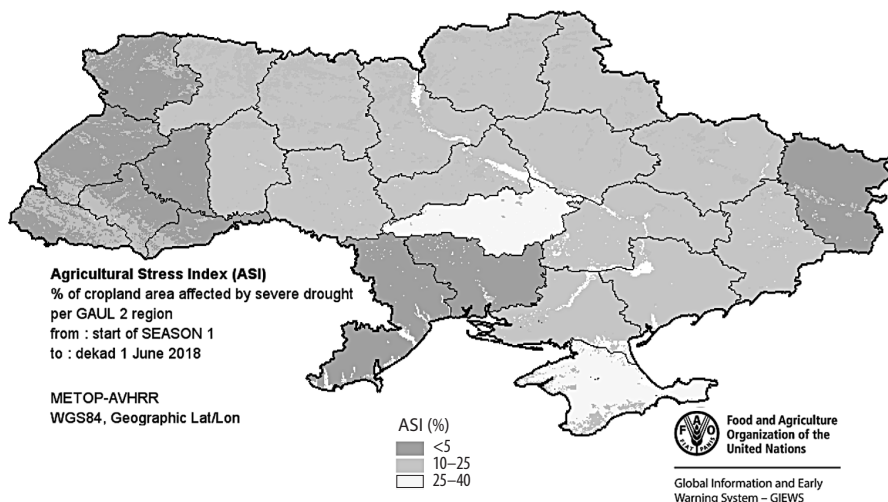


Рис. 7.2. Індекс сільськогосподарського стресу (% орних земель, що зазнали сильної посухи) у межах території України станом на першу декаду червня 2018 р. за даними системи ASIS/GIEWS (FAO, 2019)

першу декаду червня 2018 р. Погіршення агрокліматичних умов на рівні 25–40% спостерігається у Кіровоградській обл. та Криму.

Дані наведених вище систем моніторингу перебувають у вільному безкоштовному доступі та можуть використовуватися науковцями, аграріями та фахівцями агропромислового комплексу. Прикладом комерційних систем моніторингу агрокліматичних умов за супутниковими даними є системи дистанційного управління агровиробництвом Cropio та FeildLook, спрямовані на оптимізацію внесення добрив та зрошення на основі супутникових даних про погоду та стан рослинності у межах поля.

7.1. МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ

Клімат України досить чутливий до глобальних змін. Підвищення температури відбувається швидшими темпами порівняно з глобальними [2, 4]. Так, наприклад, за даними Інституту зрошуваного землеробства НААН [1] за останні 35 років у підзоні Сухого Степу спостерігається стійка тенденція підвищення середньорічної температури від 9,3 (1973–1980 рр.) до 11,3°C (2006–2010 рр.), тобто на 2°C.

Показовими також у цьому аспекті є результати досліджень зміни льодового режиму річок басейну р. Дніпро [9] як індикатора зміни клімату на території України. Встановлено, що з кінця 80-х років ХХ ст. замерзання річок відбувається пізніше на 6 діб, а скресання – раніше на 13 діб. Тривалість періоду з льодовими явищами зменшилася на 25 діб, а товщина льоду на 8 см, що є досить вагомим доказом істотного потепління клімату. Отже, дедалі актуальнішою стає оперативна просторова оцінка впливу змін клімату не лише на стан агроландшафтів, систем землекористування та посівів, а й моніторинг вияву різноманітних кризових явищ, що досить успішно можна вирішувати за допомогою супутникових спостережень [10, 11].

На основі даних SMT (Smoothed Brightness Temperature – згладжена яскравісна температура) радіометра AVHRR, для усіх адміністративних областей України були побудовані графіки динаміки суми ефективних температур на період 1982–2017 рр. та визначені їх алгебраїчні тренди до 2025 та 2050 р. Щоденні дані SMT були усереднені за тиждень та на основі їх значень визначені суми ефективних температур за сезон та за вегетаційний період (квітень – жовтень). У результаті для пілотних Чернігівської, Полтавської та Запорізької областей (рис. 7.3), які відповідно представляють зони Полісся, Лісостепу та Степу, були побудовані графіки динаміки суми ефективних температур, а також їх алгебраїчні тренди за рік, за сезон і за вегетаційний період (квітень–жовтень).

Установлено закономірне підвищення суми ефективних температур у Чернігівській обл. за період з 1982 до 2017 р. на 100°C , а в Полтавській і Запорізькій областях – на 150°C . Отже, в середньому за рік за 35-річний період у зоні Полісся (Чернігівська обл.) сума ефективних температур підвищувалася на $2,8^{\circ}\text{C}$, а в зоні Лісостепу (Полтавська обл.) і Степу (Запорізька обл.) – $4,3^{\circ}\text{C}$.

Якщо припустити, що надалі темпи підвищення температури, які властиві для історичного періоду 1982–2016 рр. збережуться, то за трендом до 2050 р. прогнозована сума ефективних температур в середньому за рік збільшиться у зоні Полісся на 65°C , зоні Лісостепу – на 60°C і зоні Степу – на 55°C . У результаті сума ефективних температур до 2050 р. відповідно за зонами підвищиться до 600°C , $650\text{--}660^{\circ}\text{C}$ і $800\text{--}820^{\circ}\text{C}$ (рис. 7.3), а середньорічна температура підвищиться до кінця ХХІ століття в зоні Полісся на $2,3\text{--}3,0^{\circ}\text{C}$, Лісостепу – $3,0\text{--}3,5^{\circ}\text{C}$ і Степу – $3,0\text{--}4,4^{\circ}\text{C}$.

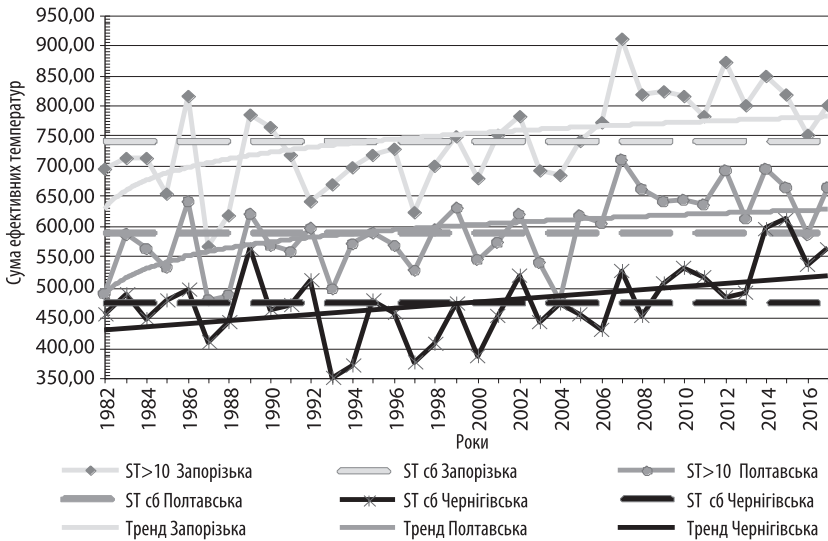


Рис. 7.3. Динаміка суми ефективних температур на території Чернігівської, Полтавської та Запорізької областей упродовж 1982–2017 рр., їх тренди та середні багаторічні значення

Порівнюючи результати прогнозування температурного режиму за моделлю GFDL-30% з результатами отриманими за супутниковими даними можна дійти висновку, що загалом за двома абсолютно різними методами отримано досить близьку закономірність зростання температури повітря на найближчу (2025 р.) та середню (2050 р.) перспективу, що підтверджує високу достовірність прогнозованого потепління в усіх ґрунтово-кліматичних зонах України.

Оцінювання впливу змін клімату на стан рослинності в межах зазначених вище пілотних областей виконували за допомогою кореляційного аналізу взаємозв'язку між динамікою температури та NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який характеризує стан рослинності, отриманого також за супутниковими даними AVHRR NOAA [12]. На діаграмах розсіяння (рис. 7.4) значень суми ефективних температур та сумарних значень NDVI за вегетаційний період спостерігається сильна позитивна кореляція між цими двома показниками в Чернігівській обл. – $R=0,77$ та помірна позитивна кореляція в Полтавській обл. – $R=0,64$. Водночас у Запорізькій обл. вона була значно нижчою і не перевищувала $R=0,35$, що ймовірно

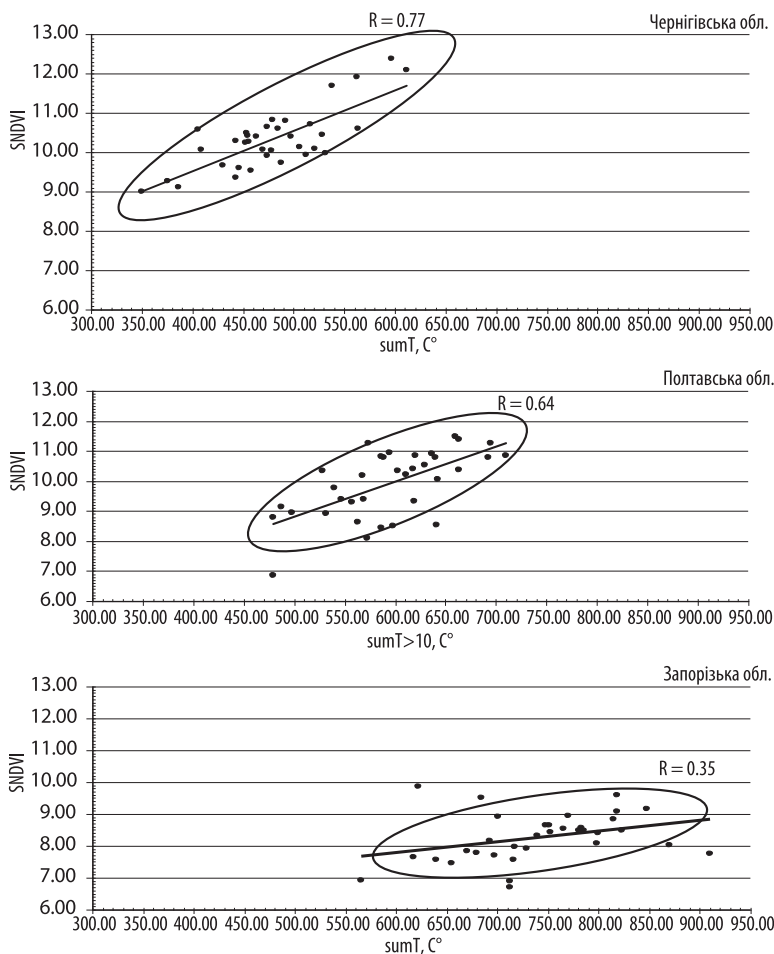


Рис. 7.4. Залежність сумарного NDVI за вегетаційний період від суми ефективних температур на території Чернігівської, Полтавської і Запорізької областей

пояснюється вищими температурами впродовж вегетації і дефіцитом вологи, що призводить до зниження темпів накопичення рослинної біомаси, яка тісно корелює з показником NDVI.

Отже, можна зробити висновок, що підвищення температури нині позитивно впливає на показник NDVI, тобто на стан рослин-

ності, в зоні Полісся (Чернігівська обл.) і Лісостепу (Полтавська обл.). Для зони Степу (Запорізька обл.) цей зв'язок значно слабший, що вказує на важливість застосування агротехнологій, спрямованих на накопичення вологи в ґрунті в осінньо–зимовий період, зокрема таких посівних систем, як no-till та strip-till, які сприяють зменшенню втрат вологи на випаровування.

7.2. МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ ОПАДІВ

Прогнозні оцінки зміни кількості опадів за різними кліматичними моделями суттєво відрізняються і мають значний діапазон середньорічної їх кількості порівняно з сучасними значеннями. За моделлю GFDL-30% кількість опадів за добу має позитивну прогнозу динаміку: в зоні Полісся до 7,5–7,9 мм/добу, Лісостепу 3,6–5,6 мм/добу і Степу 2,9–3,1 мм/добу порівняно з історичним періодом (1986–2005 рр.). За ансамблем кліматичних моделей також прогнозується зростання кількості добових опадів до середини XXI ст. порівняно з історичним періодом (1986–2005 рр.): у зоні Лісостепу до 8 мм/добу і в зоні Степу до 3,8 мм/добу, що відповідає задовільним умовам зволоження [13].

Однак за супутниковими даними кількість опадів за вегетаційний період (рис. 7.5, а) має тенденцію до зниження у зоні Полісся. Зокрема, за лінійним трендом у межах Чернігівської обл. у 2050 р. прогнозується зменшення опадів на 100 мм за період вегетації. Водночас у зоні Лісостепу (Полтавська обл.) спостерігається тенденція до деякого збільшення кількості опадів, а в зоні Степу (Запорізька обл.) значної зміни кількості опадів у період вегетації не очікується.

Отже, спостерігається тенденція до збільшення дефіциту вологи в усіх трьох зонах, що насамперед пов'язано з досить значним підвищенням температури і невизначеністю з кількістю опадів. Слід також зауважити, що навіть при деякому збільшенні кількості опадів за вегетацію за прогнозними оцінками посилиться їх зливовий характер, що на фоні підвищення температури значно зменшить коефіцієнт їх використання в результаті втрат на поверхневий стік та фізичне випаровування.

Навесні, тобто в період посіву зернових культур, у 2017 р. спостерігалось зниження кількості опадів у всіх кліматичних зонах

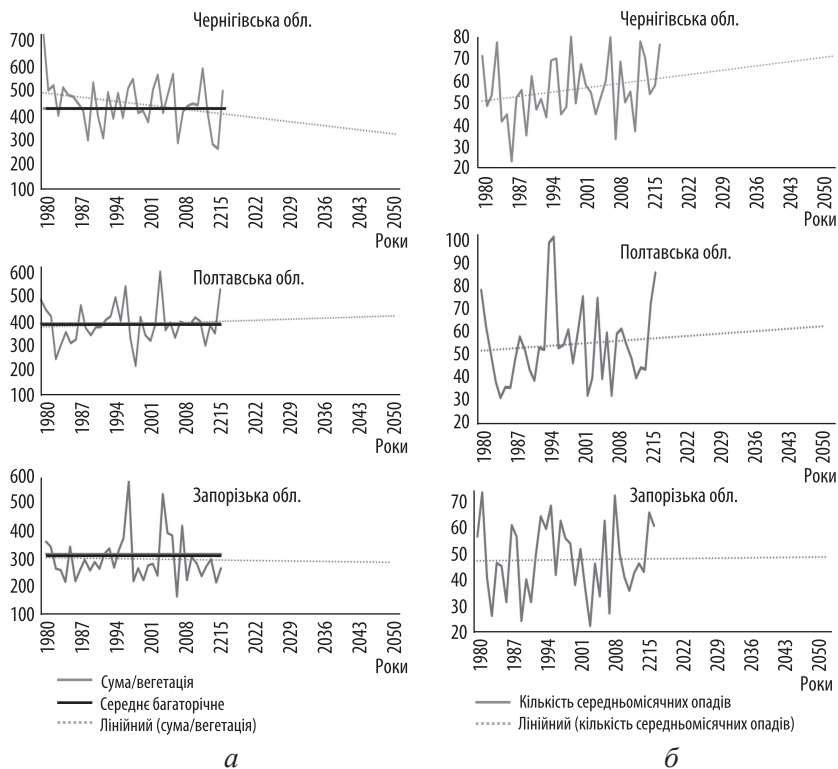


Рис. 7.5. Динаміка сумарної кількості опадів у різних кліматичних зонах України за супутниковими даними усереднені:
 а – за вегетаційний період; б – за весняний період

(рис. 7.5, б). Однак за період 198–2017 рр. можна відзначити тенденцію до незначного збільшення їх середньомісячної кількості в зонах Лісостепу і Полісся, а в Степу такої динаміки не спостерігається. Отже, за трендом на перспективу можна прогнозувати дефіцит вологозабезпечення на період посіву ранніх зернових культур.

7.3. МОНІТОРИНГ ВМІСТУ ВОЛОГИ У ҐРУНТІ

31 січня 2015 р. у США було запущено супутник SMAP (Soil Moisture Active Passive) з мікрохвильовими пристроями для сканування поверхні Землі, які відображають вологість ґрунту та визна-

чать стан замерзання або відлиги. Смуга покриття у 1000 км дає змогу SMAP оновлювати карти вологості поверхневого шару (до 5 см) ґрунту кожні 2–3 дні. Ці дані мають просторове розрізнення 9 км [14].

Для оцінки можливості застосування даних SMAP для створення карт вологовмісту на територію України було виконано порівняння значень вологості ґрунту, отриманої за даних SMAP та наземних вимірювань кількості опадів на мережі метеостанцій Українського гідрометцентру станом на третю декаду вересня 2016 р. (див. вкл. рис. 48). У результаті кореляційного аналізу було виявлено тісний зв'язок між цими даними з коефіцієнтом кореляції 0,66 ($p < 0,5$), що свідчить про ефективність застосування даних SMAP для оцінки та картографування вологозабезпечення.

Оскільки дефіцит вологи в ґрунті визначає сільськогосподарську посуху, SMAP надає важливу інформацію для її раннього запобігання та вжиття заходів для пом'якшення її наслідків через коригування агротехнологій. Для аналізу вияву посушливих явищ були проаналізовані щодакдані значення вмісту вологи у верхньому шарі ґрунту супутника SMAP за період з травня до вересня 2016 р. у межах Київської обл. Було виявлено, що, починаючи з 20 червня 2016 р. і до завершення сезону вегетації вміст вологи у ґрунті залишався низьким, на рівні нижче 0,15 мм (див. вкл. рис. 49).

Для оцінки можливості отримання даних про вміст вологи у ґрунті за супутниковими даними з високим просторовим розрізненням було розроблено методику отримання комбінованого супутникового продукту Sentinel-1/SMAP [15]. За цією методикою значення амплітуди VH і VV радіолокаційних знімків Sentinel-1 з просторовим розрізненням 10 м усереднюються у межах комірки розміром 9×9 км, що відповідає значенням пікселя супутникового продукту *SMAP 9-km soil moisture L3 GRID*. На основі перспесійної моделі визначається рівняння залежності між значеннями вмісту вологи SMAP та усередненими значеннями амплітуди Sentinel-1, також за цим рівнянням отримують значення вологовмісту в межах вихідного 10-метрового радіолокаційного знімка Sentinel-1 (рис. 7.6).

Достовірність отриманих SMAP/Sentinel-1 значень вмісту вологи у ґрунті становила 71%, оцінка точності була виконана за даними проб, відібраних на 18 полях у Вінницькій обл. наприкінці квітня 2017 р. Це підтвердило можливість отримання супутнико-

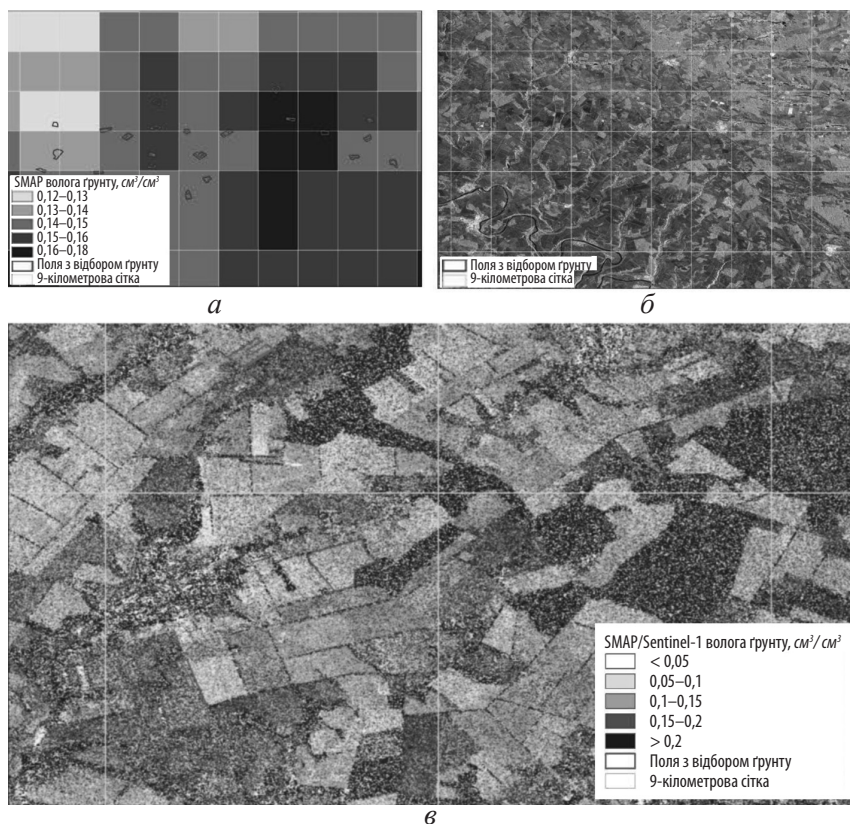


Рис. 7.6. Розробка комбінованого супутникового продукту SMAP/Sentinel-1 (в) на основі моделі лінійної регресії між даними про вологість ґрунту SMAP-9km (а) та значеннями радіолокаційного знімку Sentinel-1 (б)

вих даних про вміст вологи з високим просторовим розрізненням для відкритого ґрунту (передпосівний період) без наземної верифікації даних.

7.4. ПРОГНОЗ РИЗИКІВ ВІЯВУ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ ТА АДАПТАЦІЯ АГРОСФЕРИ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

Внаслідок змін клімату прогнозується збільшення кількості та глибини вияву стихійних метеорологічних явищ, що особливо сто-

сується збільшення кількості опадів зливового характеру та посилення вітрового режиму [3, 16].

На фоні значного збільшення площ посіву просапних культур, особливо таких як кукурудза, соняшник та соя (рис. 7.7), а також просуванням їх на північ у зону Полісся з низькою протиерозійною стійкістю ґрунту, тобто внаслідок інтенсифікації агротехногенного впливу на ґрунтовий покрив [17], можна прогнозувати розширення площ вияву водної ерозії та катастрофічних пилових бур, які можуть поширитись не лише в південних регіонах України, а й у зони Лісостепу і Полісся. Все це негативно впливатиме загалом на екологічний стан агроландшафтів, їх біорізноманіття, водний баланс, стан малих річок, родючість ґрунтів і як результат – спричинюватиме значне скорочення продуктивності агроєкосистем.

Отже, у контексті глобальних і регіональних кліматичних змін зростає актуальність та необхідність розробки й поетапного виконання як загальнодержавних, так і регіональних програм з адаптації всіх галузей аграрного виробництва до нових кліматичних умов. Насамперед це стосується запровадження низьковуглецевих агротехнологій, енерго- та вологозбереження, створення посухостійких сортів і гібридів рослин, захисту від шкідників та хвороб, управління родючістю ґрунтів, їх охорони від деградації та опустелювання, а також удосконалення технологій іригації.

Під адаптацією агроєкосистем до змін клімату потрібно розуміти заходи, що приймаються для попередження, подолання або корисного використання нинішніх або прогнозованих кліматичних змін та їх наслідків. Насамперед для сільськогосподарського виробництва результати процесу реалізації адаптації має знижуватись ураженість агроєкосистем або підвищуватись їх сталість до наслідків змін клімату [13].

Процес адаптації є багатовекторним процесом, який складається з коригування структури посівних площ та підбору сортів і гібридів сільськогосподарських культур, коригування строків посіву, удосконалення вологоощадних технологій обробітку ґрунту, управління його родючістю, технологій іригації, сівозмін та інтегрованих технологій захисту посівів від шкідників і хвороб.

Отже, оперативний просторовий моніторинг впливу змін клімату на вияв різноманітних кризових явищ, стан агроландшафтів, систем землекористування, посівів, а також урожайність зернових культур,

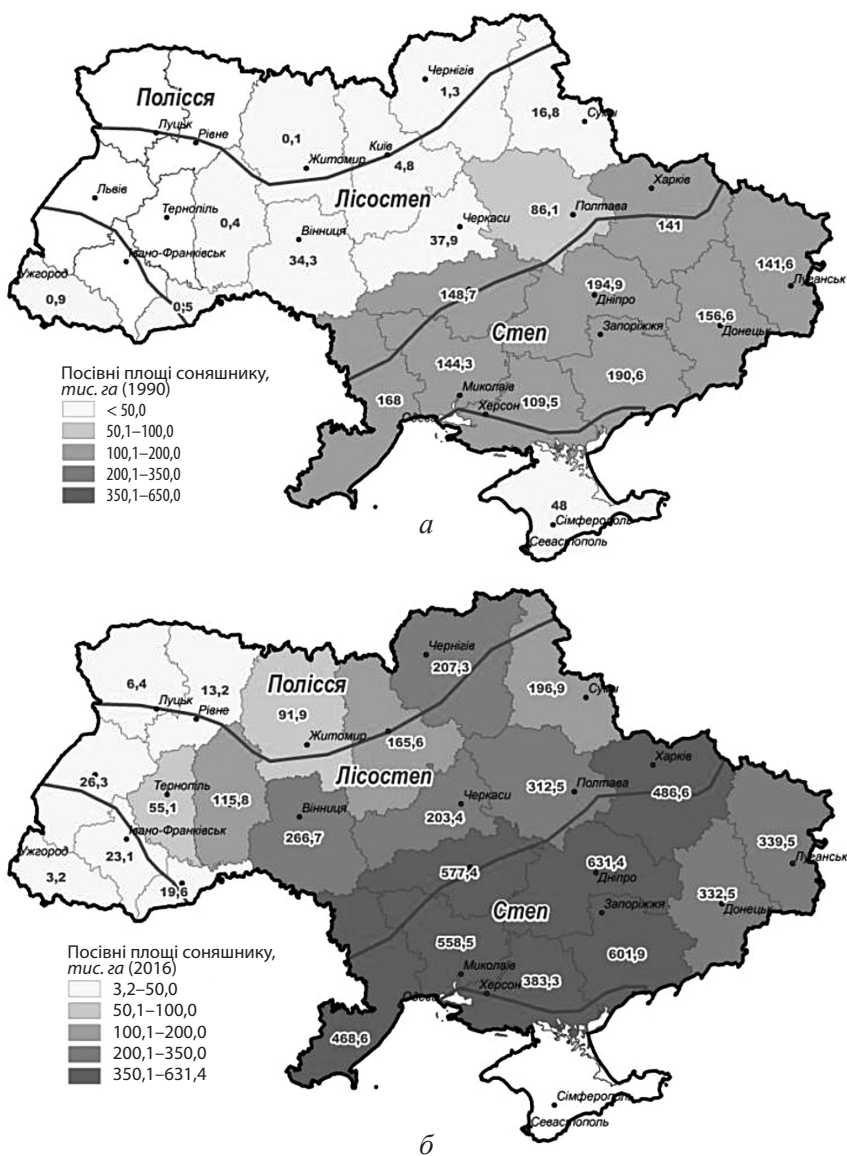


Рис. 7.7. Динаміка посівних площ соняшнику, тис. га:
а – станом на 1990 р., б – станом на 2016 р.

стає на території України дедалі актуальнішим. Важливим у цьому плані є організація системи моніторингу з використанням як традиційних способів, так і аерокосмічної інформації, яка дає можливість в оперативному режимі отримувати необхідну просторову інформацію впливу для підготовки якісніших управлінських рішень на різних адміністративних рівнях. Дистанційне зондування Землі з космосу у поєднанні з математичним моделюванням має вирішальне значення для розуміння сучасних кліматичних процесів, а також накопичення даних і доказової бази для прогнозування глобальних кліматичних змін у майбутньому та розробки ефективної політики задля безпеки та збалансованого розвитку людства.

Зниження ризиків прояву цих негативних явищ потребуватиме запровадження системних заходів, зокрема екологічно досконалішої контурної організації території сільськогосподарських угідь в умовах складного рельєфу, запровадження масштабних лісомеліоративних і гідротехнічних заходів у вигляді водозатримувальних валів-терас, залужених водостоків, полезахисних лісосмуг, ґрунтозахисних технологій обробітку ґрунту і посіву, приведення у відповідність до рельєфу структури посівних площ і сівозмін та ефективніших ґрунто-, водоохоронних технологій обробітку ґрунту тощо [18]. Актуальною в цьому плані залишається консервація еродованих та деградованих орних земель з переведенням їх у природні угіддя, створення водоохоронних та рекреаційних зон. Запровадження цієї системи протиерозійних заходів в умовах потепління клімату є важливою передумовою управління поверхневим стоком, скорочення ризиків прояву ерозійних та посушливих явищ, забезпечення охорони земельних, водних та рослинних ресурсів від деградації й опустелювання, а також відтворення біорізноманіття агроландшафтів і в результаті формування високопродуктивних екологічно збалансованих агроєкосистем [19, 20].

Отже, сучасна супутникова інформація є ефективним інструментом визначення змін клімату на глобальному і регіональному рівнях, зокрема моніторингу динаміки температурного режиму, вмісту вологи в ґрунті, а також визначення ризиків, пов'язаних з проявом процесів опустелювання та посушливих явищ, а також розвитку деградаційних процесів в агроєкосистемах. Вся ця інформація є досить надійним науково-методичним підґрунтям щодо прогнозування розвитку аграрного виробництва, коригування систем землеко-

ристування і агротехнологій, а також ухвалення досконаліших довгострокових та оперативних управлінських рішень на глобальному, регіональному та локальному рівнях.

Література до розділу 7

1. *Вожегова Р.А.* Адаптація землеробства степової зони до умов підвищення посушливості клімату. 2012. URL: <http://unt.org.ua/adaptats-ya-zemlerobstva-stepovo-zoni-do-umov-p-dvishchennya-posushlivost-kl-matu>
2. *Пачаури Р.К., Райзингер А. и др.* Изменение климата. 2007: обобщающий доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата. Женева, Швейцария: МГЭИК, 2007. 104 с.
3. *Кононова Н.К.* Флуктуации циркуляции атмосферы Северного полушария за 1899–2002 гг. Экстремальные периоды. *Материалы Всемирной конференции по изменению климата.* Москва. 2002. С. 411.
4. *Тараріко О. Г. та ін.* Космічний моніторинг посушливих явищ. *Вісник аграрної науки.* 2012. № 10. С. 16–19.
5. *Відділ агрометеорології Українського гідрометцентру.* 2019. URL: https://meteo.gov.ua/ua/33345/agrometeorology/agro_about_department
6. *Польовий А.М. та ін.* Моделювання впливу зміни клімату на агрокліматичні умови вирощування та фотосинтетичну продуктивність озимої пшениці в Україні. *Укр. гідрометеорол. журн.* 2007. № 2. С. 76–91.
7. *Друге Національне повідомлення України з питань зміни клімату.* Київ: Інтерпрес ЛТД, 2006. 80. URL: http://climategroup.org.ua/upl/2-e_Nac_povid_po_zmini_klimatu_ukr.pdf
8. *STAR NESDIS NOAA,* 2019. URL: <http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH>
9. *FAO.* 2019. URL: <http://www.fao.org/gIEWS/earthobservation/country/index.jsp?lang=ru&type=11112&code=UKR>
10. *Струтинська В.М.* Вплив змін клімату на термічний та льодовий режими річок басейну Дніпра (в межах України) з другої

- половини XX ст.: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.07. Київ. нац. ун-т ім. Т.Шевченка. Київ, 2008. 20 с.
11. *AVHRR Level 1b Product Guide Ref.: EUM/OPS-EPS/* MAN/04/0029 Issue: v3A Date: 21 Jan 2011. URL: <http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/eps-pg/AVHRR/AVHRR-PG-6ProdForm-Dis.htm>
 12. *Kogan F.N.* (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78: 621–636.
 13. *Kogan F.N.* (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Adv. Space Res.* 15 (11): 91–100.
 14. *Basharin D., Polonsky A., Stankunavichus G.* (2016). Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs. *Journal of Water and Climate Change*:103–113. URL: <http://gs.elaba.lt/object/elaba:15536634/15536634.pdf>
 15. *SMAP* (2019). URL: <https://smap.jpl.nasa.gov/observatory/overview/>
 16. *Kuchma T.* (2017). Soil moisture mapping using SMAP and Sentinel-1 data. 10th International Workshop on «Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR» (FRINGE 2017). Helsinki, Finland, 5–9 June 2017. URL: https://figshare.com/articles/Soil_moisture_mapping_using_SMAP_and_Sentinel-1_data/5518774
 17. *Вишківваркова О.В.* Екстремальні опади та їх кліматичні особливості на території України: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Морський гідрофізичний інститут. Севастополь, 2014. 15 с.
 18. *Петриченко В.Ф. та ін.* Нова стратегія виробництва зернових та олійних культур в Україні. Київ: Аграр. наука, 2012. 48 с.
 19. *Тараріко О.Г., Москаленко В.М.* Каталог заходів з оптимізації структури агроландшафтів та захисту земель від ерозії. Київ: Фітосоціоцентр, 2002. 69 с.
 20. *Методика* оцінки придатності деградованих та малопродуктивних земель для створення лісомеліоративних насаджень (Методичні рекомендації). Київ, 2006. 28 с.



Концептуальні засади супутникового моніторингу агросфери України

Нині у навколоземному космосі працюють понад 120 супутників, які забезпечують користувачів різноманітною дистанційною інформацією. Протягом останнього десятиріччя значна частина супутникових даних з просторовим розрізненням від 10 м, що є достатнім для моніторингу об'єктів агросфери, доступна для користування безкоштовно через мережу Інтернет.

Тенденцією сучасного етапу розвитку засобів дистанційного знімання є реалізація проектів створення орбітальних угруповань з «малих» супутників та мікросупутників. Зокрема, американською компанією TerraBella створюється орбітальне угруповання SKYSAT з 24 низькоорбітальних супутників ДЗЗ. Бортова апаратура супутників здатна проводити зйомку земної поверхні з просторовим розрізненням 0,9 м у панхроматичному та 2,0 м у багатоспектральному режимах, а також виконувати відеознімання під різними кутами із просторовим розрізненням 1,1 м. Іншою американською компанією PlanetLabs вже створено орбітальне угруповання мікросупутників DOVE, на кожному з яких стоїть оптичний сенсор з просторовим розрізненням 5,0 м. Станом на кінець 2016 р. на орбіті функціонує кілька десятків КА DOVE, а в 2018 р. кількість супутників в угрупованні доведено до 120, що дає змогу щоденно повністю поновлювати супутникову інформацію про всю поверхню земної кулі.

Це відкриває нові цікаві можливості для практичного використання супутникової інформації у розв'язанні актуальних проблем агросфери, удосконалення систем моніторингу, боротьбі зі зміною клімату, деградацією та опустелюванням земель.

Так, у США – NASA (National Aeronautics and Space Administration), зосереджує зараз свою діяльність на темах: Carbon Cycle

and Ecosystems (вуглецевий цикл і екосистеми), Water and Energy Cycle (вода і енергетичний цикл), Climate Variability and Change (мінливість і зміни клімату), Atmospheric Composition (склад атмосфери), Weather (погода) та Earth Surface and Interior (Земля, її покрив і надра).

В Європі за спільною ініціативою Європейської Комісії (ЕС) та Європейського космічного агентства (ESA), втілюється програма GMES (Global Monitoring for Environmental Security), метою якої є створення європейської системи космічного моніторингу континенту, оперативне оцінювання стану довкілля та рівня його безпеки. Зараз програма GMES отримала назву Copernicus. В рамках програми створено орбітальний сегмент, який складається з угруповання супутників Sentinel та наземної інфраструктури. Базовими елементами програми є інформаційно-операційні сервіси моніторингу екологічної деградації природного середовища, виявів стихійних лих та розв'язання інших важливих проблем країн ЄС, зокрема безпечного природокористування та сільського господарства. Зараз структура GMES/Copernicus продовжує розвиватися та удосконалюватися в рамках дослідницько-інноваційної програми Horizon 2020, яка підтримується всіма європейськими країнами.

Починаючи з 2016 р. реалізується новий етап проекту GEOSS заведення якого перелічено в плані GEOSS Strategic Plan 2016–2025 pp. і спрямоване на досягнення таких стратегічних цілей:

- забезпечити користувачів необхідними даними ДЗЗ у повному обсязі й у відкритому режимі;
- забезпечити рівноправне партнерство країн за розв'язання глобальних і регіональних проблем;
- відкрити користувачам нові економічні можливості за рахунок інновацій та інвестицій.

Досвід, одержаний в процесі виконання GEOSS та GMES/Copernicus, свідчить, що залучення інноваційних досягнень космічної галузі в управлінську і виробничу діяльність сільського господарства забезпечує удосконалення систем агроєкологічного моніторингу та раціонального використання природного ресурсного потенціалу і формування сталого розвитку агросфери. Тому важливою стратегією GEOSS є вільний, відкритий і максимально оперативний режим розповсюдження продуктів дистанційного зондування, сервісів та знань. В Україні також є актуальним створення відповідної інфра-

структури розповсюдження супутникових даних, результатів їх оброблення й аналізу, підготовки рекомендацій і прогнозних оцінок та використання їх у процесі удосконалення агроекологічного моніторингу, управлінської і виробничої діяльності у сфері аграрного виробництва та безпечного природокористування.

Нині структура GMES/Copernicus продовжує розвиватися та удосконалюватися в рамках дослідницько-інноваційної програми Horizon 2020, яка підтримуються всіма європейськими країнами.

Ініціативи та фундаментальні завдання розкриваються в робочій програмі GEO (GEO Work Programme – GWP). Зокрема, на 2017–2019 рр. основними ініціативами GEO є створення мережі спостереження біорізноманіття (GEO Biodiversity Observation Network GEOBON), системи глобального агромоніторингу (GEO Global Agricultural Monitoring GEOGLAM) та ініціатива з глобального спостереження лісів (Global Forest Observation Initiative GFOI). Актуальними завданнями є створення системи отримання калібрувальних даних або наземних підсупутникових спостережень (GEOSS in-situ Earth Observation Resources) та формування мережі оперативного розповсюдження даних GEOSS (GEO Net Cast Development and Operations) через створення інтернет-павів. Україна має відповідні науково-методичні доробки у формуванні національної мережі наземних полігонів у системі агроекологічного супутникового моніторингу, що є особливо важливим для аграрного виробництва та природоохоронної діяльності.

Національною академією наук України в 2017 р. започаткована національна програма наукових досліджень «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки як національний сегмент проекту Горизонт – 2020 ERAPLANET». Одним із завдань проекту є формування наукових засад моніторингу природних ресурсів, зокрема визначення індикаторів екологічного стану ландшафтів, систем землекористування, ґрунтового покриття, посівів та прогнозування урожаю.

Дуже важливим в цьому плані є проект GEOJECAM (Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring – Спільний експеримент з моніторингу та оцінки сільськогосподарських культур), метою якого є розробка протоколів моніторингу та звітування, найкращих практик для різних глобальних сільськогосподарських систем. Ініціатива JECAM розроблена в рамках Глобального моніторингу

сільського господарства (завдання GEOSS AG0703a) та управління сільськогосподарськими ризиками (завдання GEOSS AG0703b). У цьому міжнародному проєкті беруть участь країни Північної Америки (Канада, США – штати Айова, Мічиган), Південної Америки (Аргентина, Бразилія, Уругвай, Парагвай), Європи (Бельгія, Франція, Італія, Німеччина, Іспанія, Україна, Росія), Азії (Бангладеш, Китай, Саудівська Аравія, Тайвань та 8 країн Африки).

Викладене вище свідчить, що в багатьох країнах світу зростає науковий і технологічний рівень використання супутникових даних у системах моніторингу земної поверхні для оцінювання впливу господарської діяльності на екосистеми, визначення ризиків, пов'язаних з глобальними змінами клімату, процесами опустелювання, втратою ландшафтного і біотичного різноманіття. Супутникова інформація стає важливим чинником інформаційного забезпечення безпечного природокористування і формування на цій основі конкурентоспроможного національного агропромислового комплексу. В умовах України для забезпечення належного рівня використання матеріалів дистанційного зондування в агросфері нагальною стає потреба в інтенсифікації наукових розробок і сучасних оперативних технологій їх оброблення і створення відповідної інфраструктури з їх аналізу на основі міжвідомчої координації та кооперації.

8.1. АКТУАЛЬНІСТЬ СУПУТНИКОВОГО АГРОЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ В АГРОСФЕРІ УКРАЇНИ

Ефективність супутникової інформації в системі інформаційного забезпечення агроекологічного моніторингу визначається можливостями використання її за вирішення таких завдань:

- удосконалення систем природокористування та створення високопродуктивних ресурсо- та енергоощадних зональних моделей агроекосистем;
- підвищення оперативності та ефективності ухвалення рішень завдяки своєчасному отриманню достовірної інформації про стан агресурсів та сільських територій;
- зменшення витрат на виконання моніторингу агроландшафтів, систем землекористування, посівів сільськогосподарських культур, виявів посушливих явищ, умов зволоження та ерозії ґрунтів;

- аналіз і прогнозування змін в структурі сільськогосподарських угідь в умовах зростаючого агротехногенного навантаження на екосистеми;
- забезпечення зростання продуктивності агроєкосистем завдяки моніторингу та ранньому запобіганню прояву деградації агро-ресурсів;
- своєчасного вжиття заходів щодо збереження ландшафтного та біологічного різноманіття;
- удосконалення агротехнологій з використанням космічних інноваційних технологій та запровадження їх у виробничу та управлінську сільськогосподарську діяльність;
- прогнозування впливу глобальних змін клімату на стан земельних, водних та біологічних ресурсів агросфери;
- своєчасна адаптації агроєкосистем до змін клімату та мінімізації можливих збитків, зменшення ризиків вияву процесів опустелювання та деградації земель;
- прогнозування кризових посушливих явищ та зниження ризиків їх негативної дії на агроєкосистеми;
- розробка стратегій та програм інтеграції національного моніторингу агросфери в міжнародні глобальні структури та програми науково-технічної співпраці.

Незважаючи на очевидну ефективність супутникової інформації, наявний інформаційний ресурс в науковій, виробничій та моніторинговій діяльності в агросфері України використовується недостатньо.

Значний обсяг виконаних досліджень наукових установ різного підпорядкування та їх результати залишаються розділеними, точковими, малопов'язаними між собою і не доведеними до технологічного системного застосування в аграрному виробництві, зокрема в системі агроєкологічного моніторингу (див.розд.1). Відсутня також єдина галузева стратегія аналізу та використання супутникових даних у науковій, сільськогосподарській виробничій та природоохоронній діяльності.

Актуальною стає розробка та реалізація міжвідомчої науково-технічної програми «Наукові засади супутникового агроєкологічного моніторингу, управління агоресурсами та прогнозування», удосконалення координації науково-дослідних робіт із зазначених питань в рамках Національної академії наук, Національної академії

аграрних наук, Мінагрополітики України та Державного космічного агентства, Міносвіти та науки – аграрні університети.

Важливим структурним елементом активного використання супутникових даних в управлінській, природоохоронній та виробничій діяльності національного агропромислового виробництва є створення міжвідомчого науково-аналітичного центру (НАЦ) «Агрокосмос». Складовою частиною його інформаційного забезпечення має бути мережа тестових наземних аграрних полігонів, узгоджена із системою GEOGLAM, яку найдоцільніше створити в системі дослідних господарств Національної академії аграрних наук. Необхідним є формування інформаційної бази даних, яка складатиметься з картографічного та тематичного забезпечення мережі, матеріалів дистанційного знімання різноманітних систем, матеріалів наземних спостережень та результатів аналітичних досліджень і рекомендацій.

Постійними користувачами результатів супутникового агроєкологічного моніторингу мають бути центральні та регіональні органи державного управління сільськогосподарським виробництвом та природокористування, безпосередньо виробничі структури різних форм організації, сільські територіальні громади.

8.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТА РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ НА ОСНОВІ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ

Можливі три варіанти розв'язання проблеми.

Перший варіант – збереження сучасної ситуації, пов'язаної з невирішеним питанням міжвідомчої консолідації та координації. При такому варіанті можна не очікувати підвищення ефективності щодо запровадження інноваційних космічних технологій у природоохоронну, управлінську та виробничу сільськогосподарську діяльність, а також інтеграції до міжнародних проектів у цій сфері.

Другий варіант, пов'язаний з частковою консолідацією та координацією між науковими установами НААН, НАН України та ДКА, також не є оптимальним з огляду на відсутність координації з головним користувачем тематичної інформації, яку отримують за даними супутникових знімків – міністерством аграрної політики та продовольства, а також аграрними університетами.

Третій варіант – затвердження Концепції галузевої стратегії використання і аналізу даних дистанційного зондування у науковій та виробничій діяльності АПК (далі Концепція) через створення міжвідомчого науково-аналітичного центру «Агрокосмос» та розробка і створення в його складі наземної тестової моніторингової мережі з оцінки структури і стану посівів та сівозмін. Спрямувати наявний науково-технічний потенціал у цій сфері на реалізацію державної політики у сфері змін клімату на період до 2030 р. (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2017 р. № 878 р.) та Національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 грудня 2017 р. № 878 р.).

Для забезпечення бажаного результату щодо впровадження даних дистанційного зондування в наукову, управлінську та виробничу діяльність агросфери України рекомендується третій варіант.

8.3. МЕТА І ТЕРМІНИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ

Метою Концепції має бути підвищення ефективності реалізації державної політики щодо використання супутникової інформації у сільськогосподарському виробництві та природокористуванні для визначення пріоритетних завдань, посилення інноваційного потенціалу й поліпшення координації діяльності уповноважених центральних органів управління спрямованої на реалізацію державної політики у сфері впливу на аграрне виробництво та продовольчу безпеку. Реалізація Концепції передбачається впродовж 2020–2022 рр.

8.4. СПОСОБИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ В СИСТЕМУ АГРОМОНІТОРИНГУ

Основними способами впровадження даних дистанційного зондування в систему агромоніторингу мають бути:

- створення міжвідомчої науково-технічної програми «Наукові засади аерокосмічного моніторингу агросфери України («Агрокосмос»);
- розробка програми міжвідомчої координації виконання науково-технічної програми «Агрокосмос» та функціонування інформаційно-аналітичного центру «Агрокосмос»;

- створення міжвідомчого наукового-аналітичного центру «Агро-космос»;
- розробка науково-методичних засад формування та підтримання функціонування екомережі в межах сільськогосподарських угідь з використанням супутникових даних;
- удосконалення системи агроекологічного моніторингу, спрямованого на реалізацію державної політики у сфері змін клімату на період до 2030 р., та національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням як складової частини державної системи моніторингу довкілля;
- удосконалення та забезпечення належного функціонування системи раннього оповіщення та моніторингу кризових явищ в агросфері за супутниковими даними;
- підготовка кадрів зі створення бази даних аналізу і прогнозування за супутниковими даними та функціонування наземної тестової мережі;
- створення наземної моніторингової мережі полів і сівозмін (мережі тестових аграрних полігонів) ;
- створення бази даних дистанційного знімання та наземних тестових полігонів;
- запровадження інтегрованого управління земельними, водними, лісовими і біологічними ресурсами агросфери на засадах супутникової інформації.

Важливим за впровадження матеріалів дистанційного зондування в систему агромоніторингу є також:

- вдосконалення рамок політики, включаючи нормативно-правове забезпечення;
- розвиток та реалізація науково-технічних знань у сфері використання супутникової інформації в управлінській та виробничій сільськогосподарській діяльності;
- розширення інформаційної та просвітницької діяльності з питань ефективності застосування даних ДЗЗ у безпечному використанні агроресурсів, боротьбі зі змінами клімату, опустелювання та деградації земель, а також збереження ландшафтного різноманіття агросфери України;
- забезпечення умов для мобілізації належних фінансових ресурсів.

Перелік конкретних завдань, терміни їх реалізації, відповідних виконавців, а також перелік індикаторів для оцінювання стану до-

сягнення поставленої мети та цілей передбачається визначити у затверджених відповідно до концепції планах Центральних органів управління (Мінагрополітики України, НААН, НАН України, (за згодою) та ДКА (за згодою).

8.5. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Затвердження і впровадження Концепції галузевої стратегії використання і аналізу даних дистанційного зондування у науковій та виробничій діяльності АПК спрямовано на підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва, безпечного природо-користування та інтегрованого управління земельними, водними, лісовими і біологічними ресурсами, а також реалізацію державної політики у сфері змін клімату та національного плану дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням і орієнтовано на досягнення таких стратегічних цілей:

- вдосконалення структури і методів агроекологічного моніторингу як складової частини державної системи моніторингу довкілля;
- генерування глобальних вигод через поліпшення систем управління АПК та природокористування, збереження і відновлення ландшафтного і біотичного різноманіття агросфери, адаптацію агроєкосистем до змін клімату, охорони земель сільськогосподарського призначення від деградації та опустелювання;
- мобілізацію додаткових ресурсів через ефективне міжнародне партнерство, обмін інформацією та підготовку кадрів;
- зростання економічної ефективності національного АПК завдяки оперативному науково-інформаційному забезпеченню та прогнозуванню;
- своєчасне ухвалення управлінських рішень та коригування систем землекористування і агротехнологій, спрямованих на раціональне використання земель сільськогосподарського призначення і охорону ґрунтів від деградації;
- визначення стану посівів, підготовку рекомендацій з коригування агротехнологій, прогнозування урожайності, валових зборів зернових культур.

Післямова

Бурхливий розвиток систем дистанційного зондування поверхні Землі, геоінформаційних систем і навігаторних приладів забезпечили перехід від дискретних (точкових) даних про стан екосистем і агроландшафтів до континуальних, тобто неперервних у просторі. У результаті виявились основні переваги отримання дистанційної інформації в різноманітних системах моніторингу, зокрема визначення структури агроландшафтів і систем землекористування, стану рослинності, посівів, водних і лісових ресурсів, вияву різноманітних деградаційних процесів у результаті господарської діяльності, а також природних явищ. Нині важко собі уявити виконання моніторингу довкілля без використання супутникових даних, зокрема кліматичних змін, їх впливу на процеси опустелювання та деградацію ґрунтів, продуктивність агроекосистем, а також біотичного і ландшафтного різноманіття довкілля.

Поєднання космічних та інформаційних технологій створило умови для удосконалення системи моніторингу природного середовища та визначення впливу на нього господарської діяльності людини.

Актуальність використання методів ДЗЗ в Україні зумовлена доволі великою площею її території, а також досить обмеженими можливостями виконання традиційної системи моніторингу, просторові можливості якої є обмеженими.

Розвиток супутникових систем спостереження, геоінформаційних систем, а також навігаційних приладів створили умови для переходу від дискретних даних до неперервних у просторі. У результаті створено високої точності різноманітні цифрові карти і діаграми. Отже, супутникові методи спостережень земної поверхні мають безперечні переваги перед традиційними наземними.

Водночас у системі супутникового моніторингу важливе значення мають тестові наземні вимірювання, які описують взаємозв'язок наземних та дистанційних даних. У результаті забезпечується якісніше дешифрування супутникової інформації, точність та достовірність супутникових даних.

Нині в Україні є кілька галузових систем моніторингу, які функціонують за різними методами і методиками. У результаті ускладнюється їх системне удосконалення, порівняння та аналіз. Відсутня єдина узгоджена система екологічного стану агросфери України, вивчення перебігу процесів, які відбуваються в сучасних агроєко-системах через зміну клімату, результатів господарської діяльності та їх вплив на поширення деградаційних процесів.

Тому особливо важливим є ширше використання переваг сучасних супутникових даних у системі агроєкологічного моніторингу. Цінною з цього погляду є супутникова інформація щодо структури агроландшафтів і систем землекористування, стану поверхневих вод, місцевих ресурсів, посівів, поширення різноманітних деградаційних процесів та критичних явищ, прогнозування розвитку агропромислового виробництва через зміну клімату та збільшення ризиків опустелювання агроландшафтів.

Запровадження у сільськогосподарську практику даних оперативного супутникового агроєкологічного моніторингу дасть можливість удосконалити оцінку наявного агроресурсного потенціалу та забезпечити інтегроване управління земельними, водними, лісовими та агроресурсами, що створить умови для сталого розвитку агросфери України.

Рис. 1. Спектр електромагнітного випромінювання (<https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Spectre.svg>)

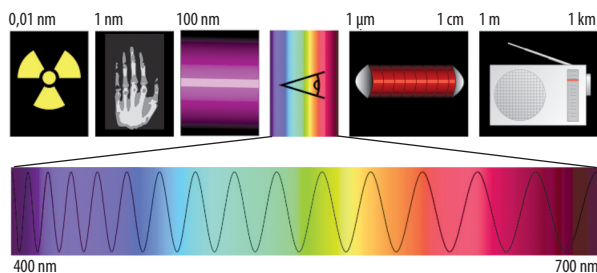


Рис. 2. Результат класифікації об'єктів «маска посівів» за етапами:

а – рівень «p100 Var»;
б – рівень «p500 Var»;
в – рівень «p350»
підпроцеса «Етап 2: Побудова маски»

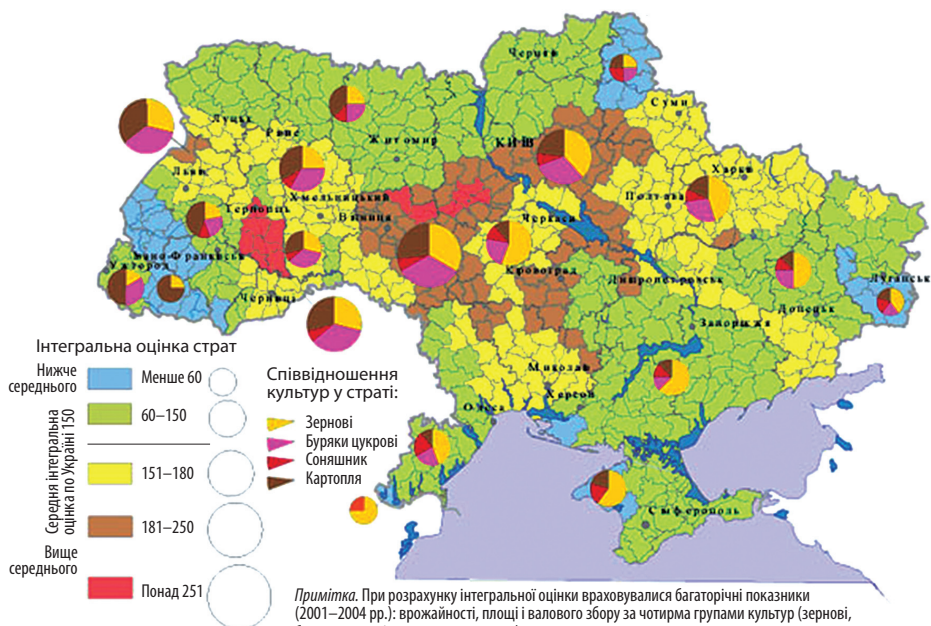
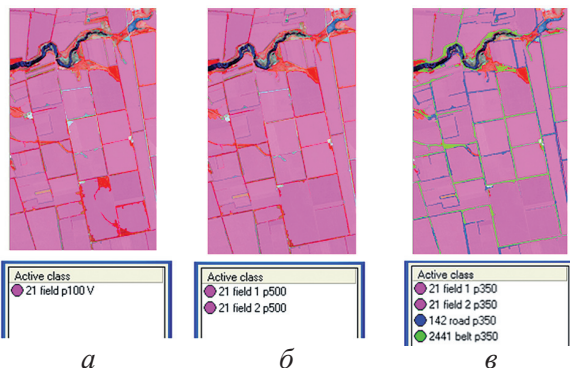


Рис. 3. Карта стратифікації сільськогосподарських культур

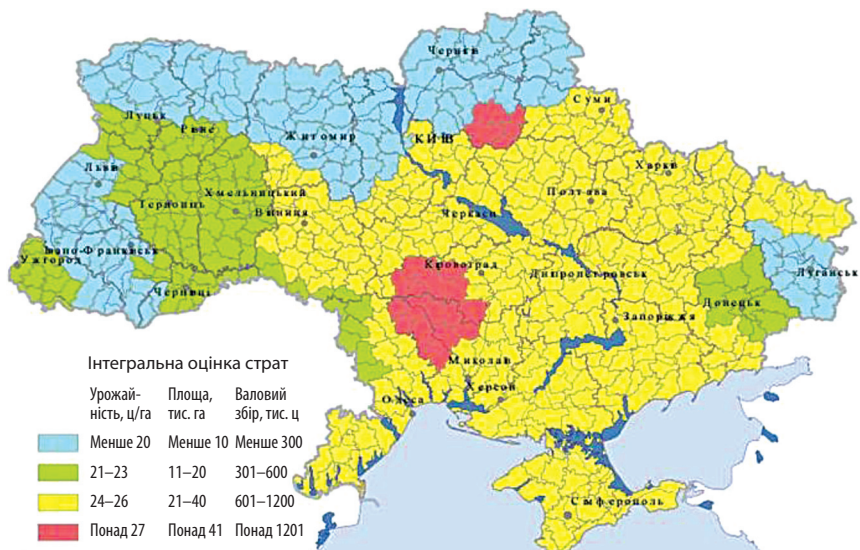


Рис. 4. Карта стратифікації (районування) зернових колосових культур

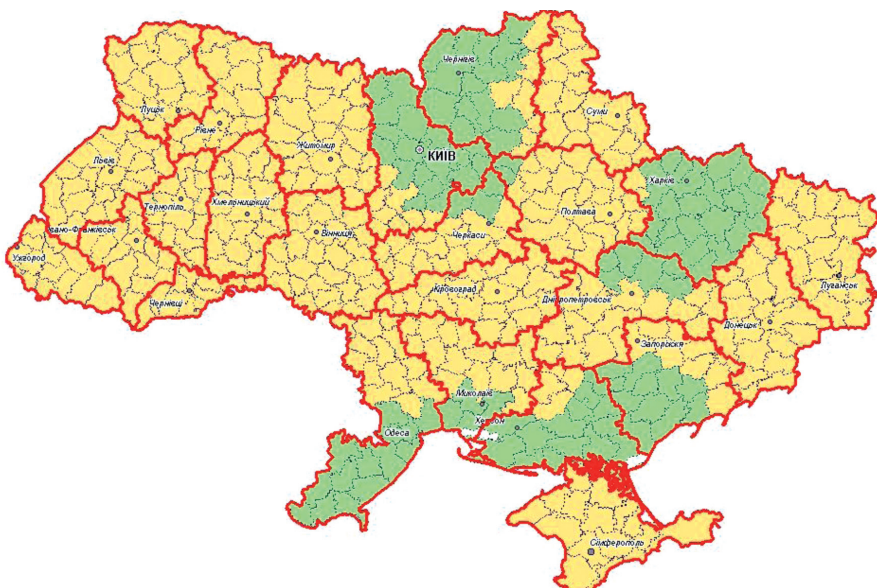


Рис. 5. Розподілення розмірів тестових аграрних полігонів на території України (зелений колір – розмір тестової ділянки 4,5×4,5 км, колір вохри – 5×5 км) [26]

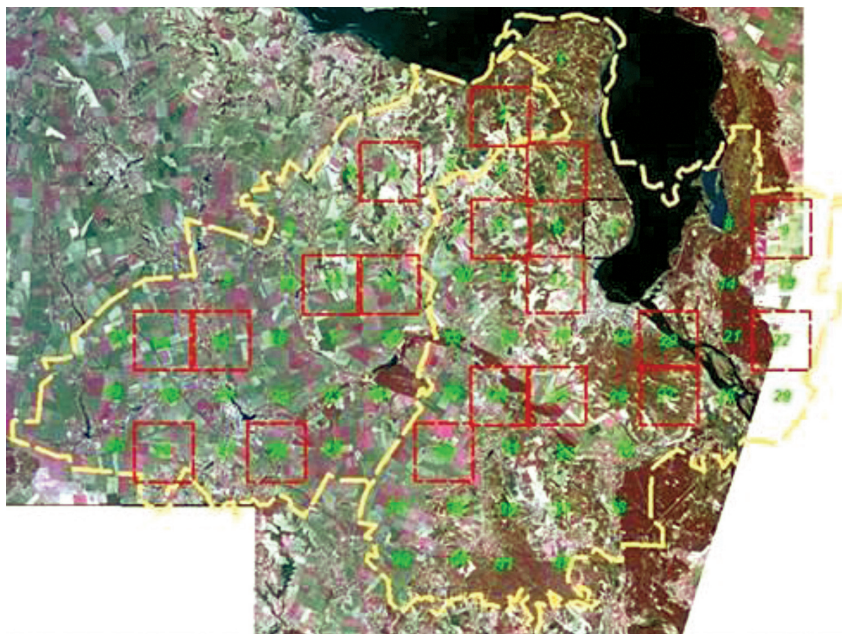


Рис. 6. Вибіркова мережа тестових аграрних полігонів на території Миронівського р-ну Київської обл. і Канівського р-ну Черкаської обл.

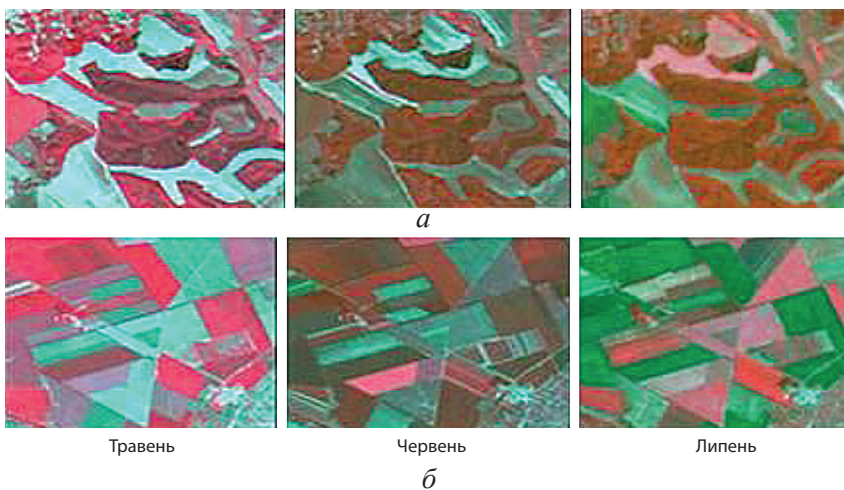


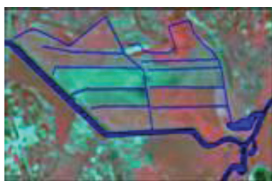
Рис. 7. Зображення орних земель на синтезованому космічному знімку – спектральний аспект (знімок багатозонального сканера HRV ШСЗ SPOT):

a – на вузьких звивистих вододілах яружно-балкового рельєфу;

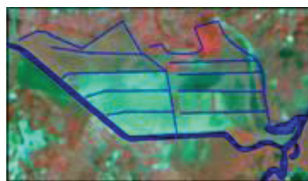
б – на пласких вододільних плато



Травень



Червень

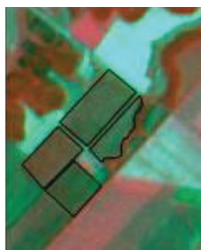
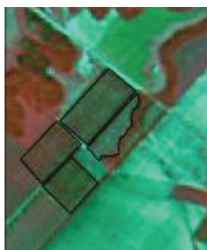


Липень

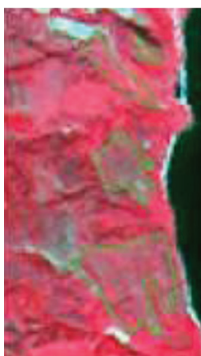
Рис. 8. Осушені орні землі



Рис. 9.
Зображення
зрошуваних
земель на
синтезованому
космічному
знімку –
спектральний
аспект (знімок
багатозонального
сканера TM ШСЗ
Landsat, 2001 р.)



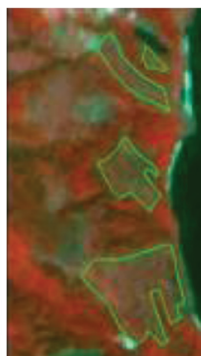
а



Травень



Червень



Липень

б

Рис. 10.
Зображення
садів на
синтезованому
космічному
знімку (знімок
багатозонального
сканера HRV
ШСЗ SPOT,
2001 р.):

а – на вододілах;
б – на схилах

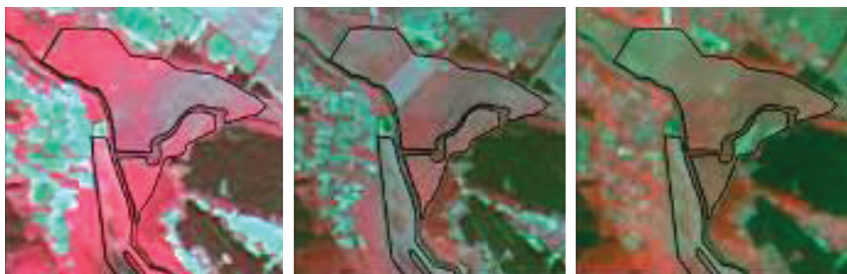


Рис. 11. **Зображення пасовищ, розташованих на прирічкових територіях на синтезованому космічному знімку – спектральний аспект** (знімок багатозонального сканера HRV ШСЗ SPOT)



Рис. 12. **Зображення пасовищ, розташованих на схилах вододілів на синтезованому космічному знімку – спектральний аспект** (знімок багатозонального сканера HRV ШСЗ SPOT)

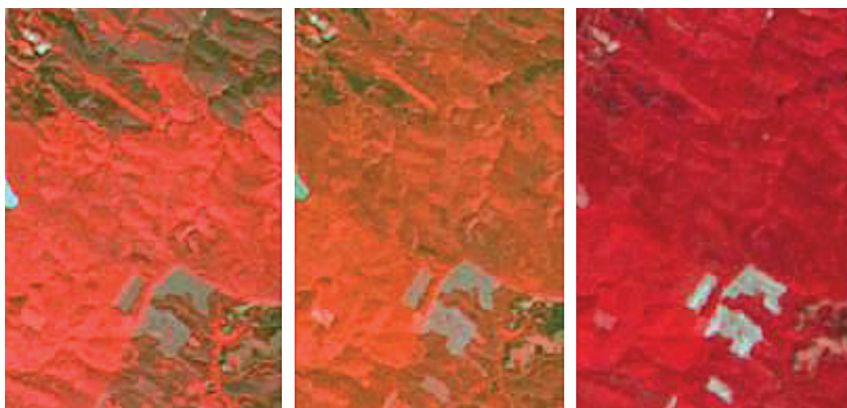


Рис. 13. **Лісові масиви на синтезованому космічному знімку – спектральний аспект** (знімок багатозонального сканера HRV ШСЗ SPOT)

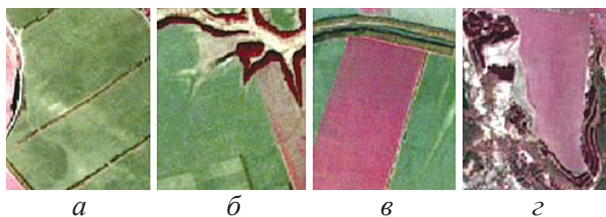
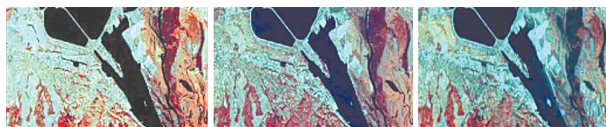


Рис. 14. Об'єкти агролісоводства:

a – полезахисні лісові смуги; *б* – водорегулюючі (стокорегулюючі) лісові смуги; *в* – захисні насадження на залізницях; *г* – прияржні лісові смуги розташовані по бровках балок у комбінації з масивами захисних насаджень на схилах балок (знімок ШСЗ RapidEye, квітень)

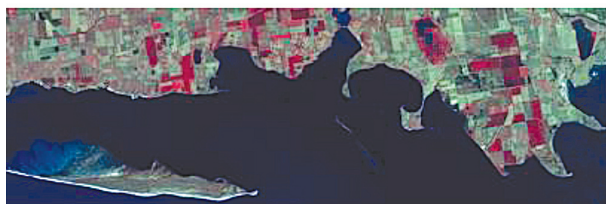


Травень

Червень

Липень

a



б

Рис. 15. Зображення водної поверхні і прибережної зони на синтезованому космічному знімку:

a – річки і водосховища (спектральний аспект) (знімок багатозонального сканера HRV ШСЗ SPOT, 2001 р.); *б* – море (знімок багатозонального сканера TM ШСЗ Landsat, 2000 р.)

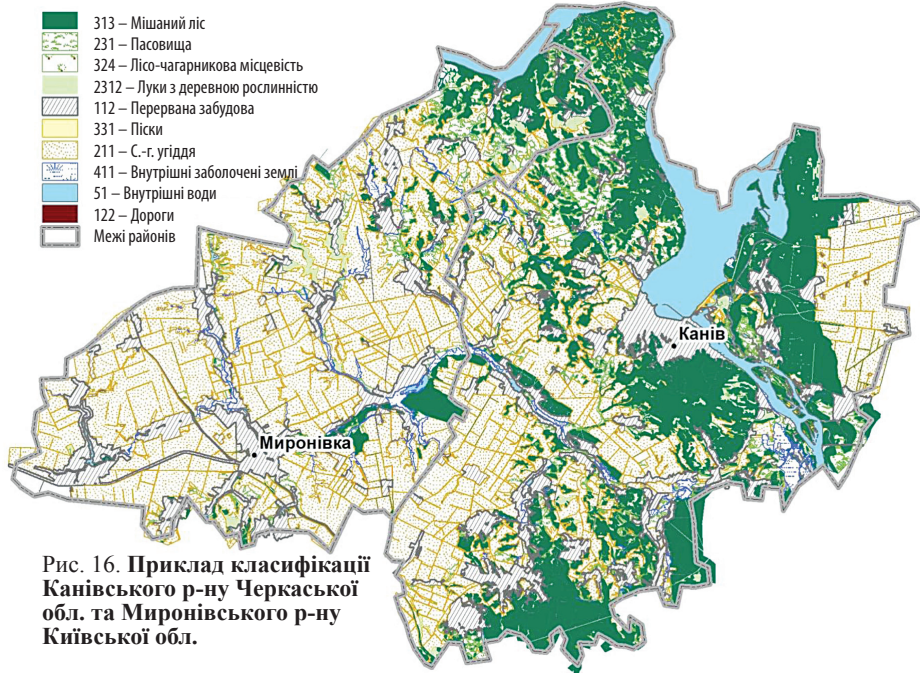


Рис. 16. Приклад класифікації Канівського р-ну Черкаської обл. та Миронівського р-ну Київської обл.

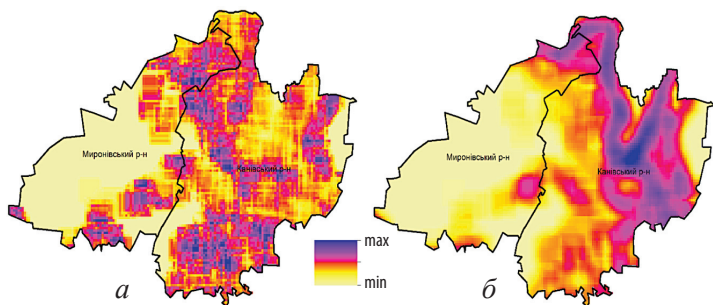


Рис. 17. Характеристика території Миронівського і Канівського р-нів за індексами ландшафтного різноманіття:

a – фрактальної розмірності; *б* – різноманіття Шеннона

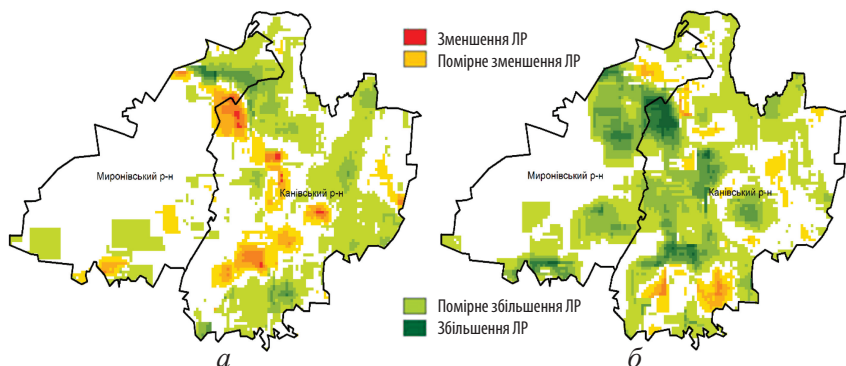


Рис. 18. Різниця значень індексу SIEI:

a – за 2008–2009 рр.; *б* – 2011–2012 рр.

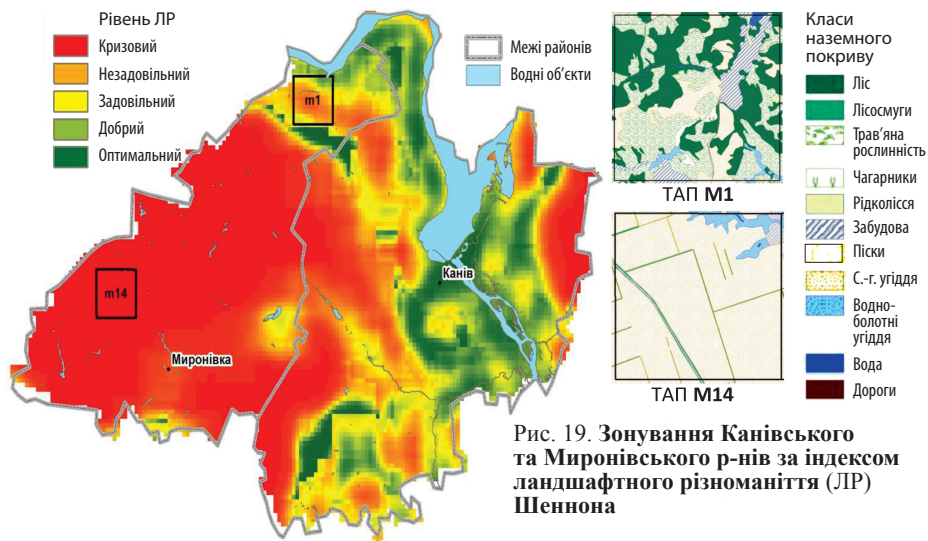


Рис. 19. Зонування Канівського та Миронівського р-нів за індексом ландшафтного різноманіття (ЛР) Шеннона

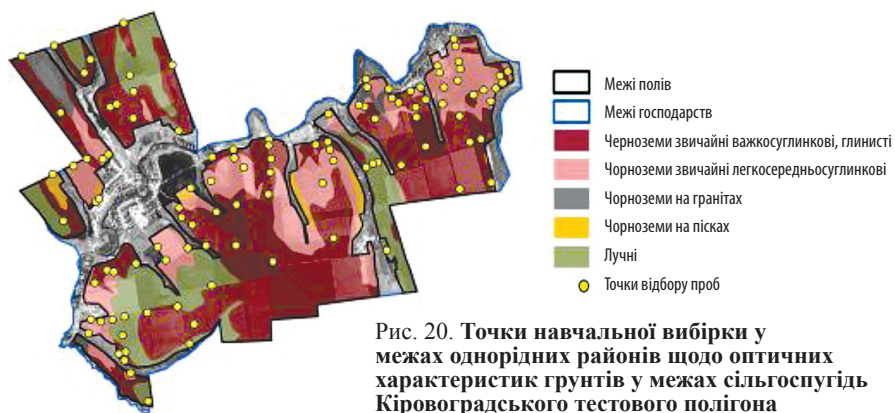


Рис. 20. Точки навчальної вибірки у межах однорідних районів щодо оптичних характеристик ґрунтів у межах сільгоспугідь Кіровоградського тестового полігона

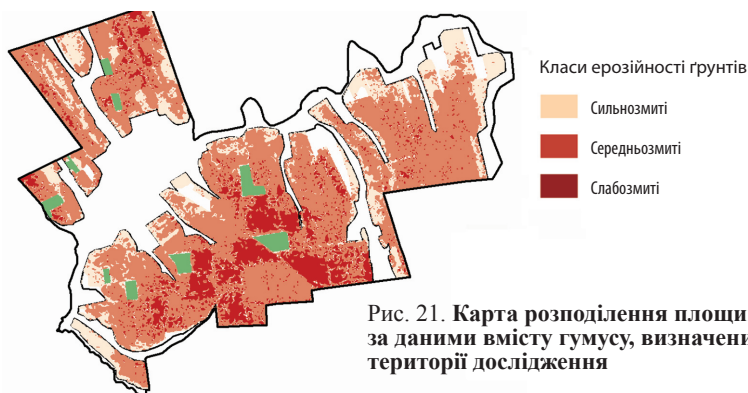


Рис. 21. Карта розподілення площинної ерозії за даними вмісту гумусу, визначеними в межах території дослідження

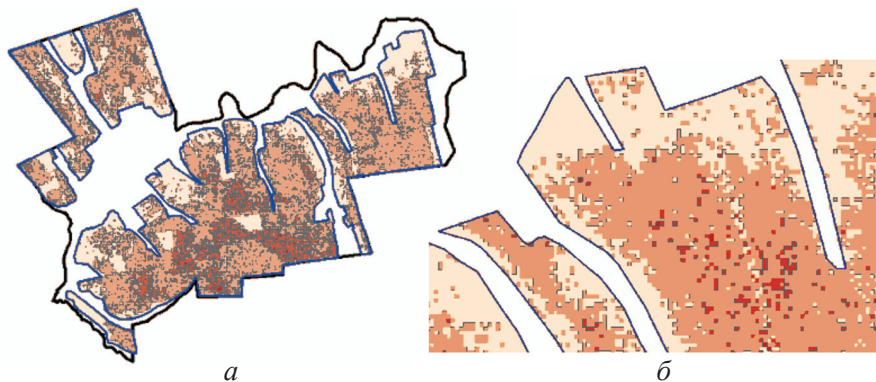
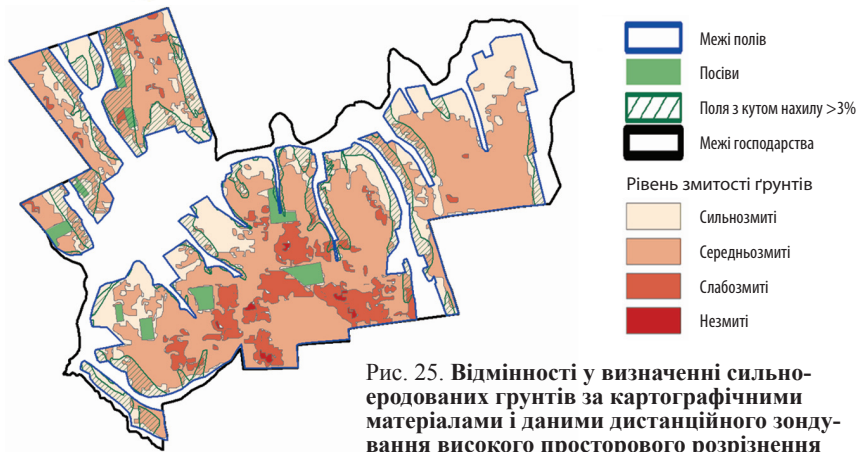
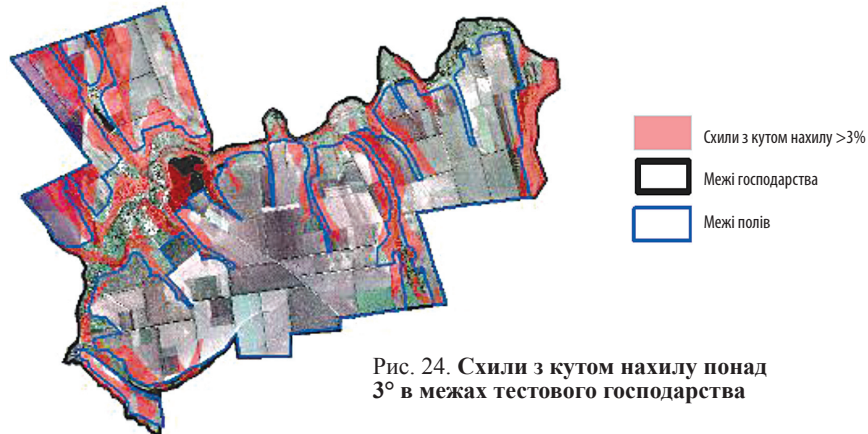
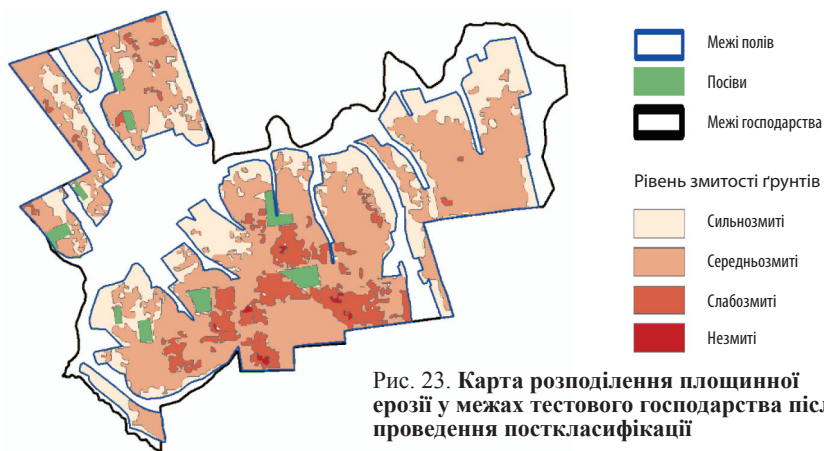
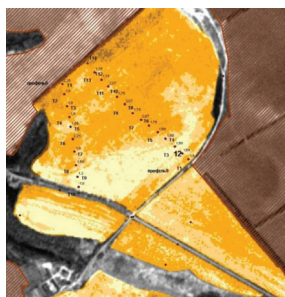


Рис. 22. Результат автоматизованої векторизації растрового зображення результатів класифікації:

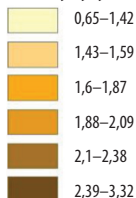
а – у масштабі господарства; б – у масштабі окремих полів





a

Вміст гумусу:



б

Рис. 26. Карта просторового розподілу вмісту гумусу за поліноміальною регресією у межах маски посівів озимих культур (ШСЗ RapidEye, квітень 2009 р.):

a – тестова ділянка; *б* – тестовий аграрний полігон



Рівень змитості ґрунтів:

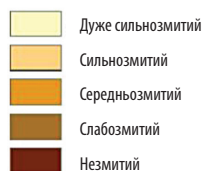


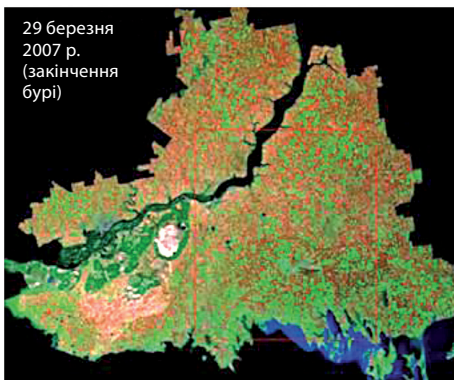
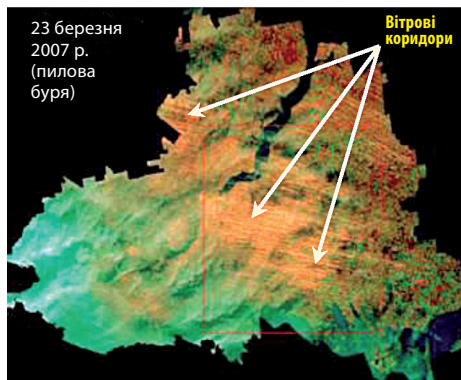
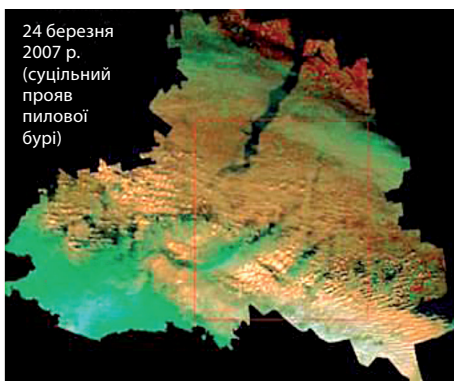
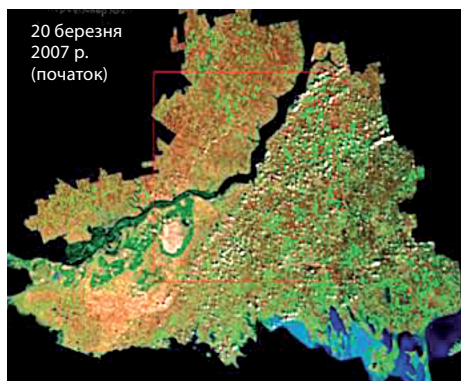
Рис. 27. Карта розподілення площинної ерозії у межах тестового аграрного полігона Канівського р-ну

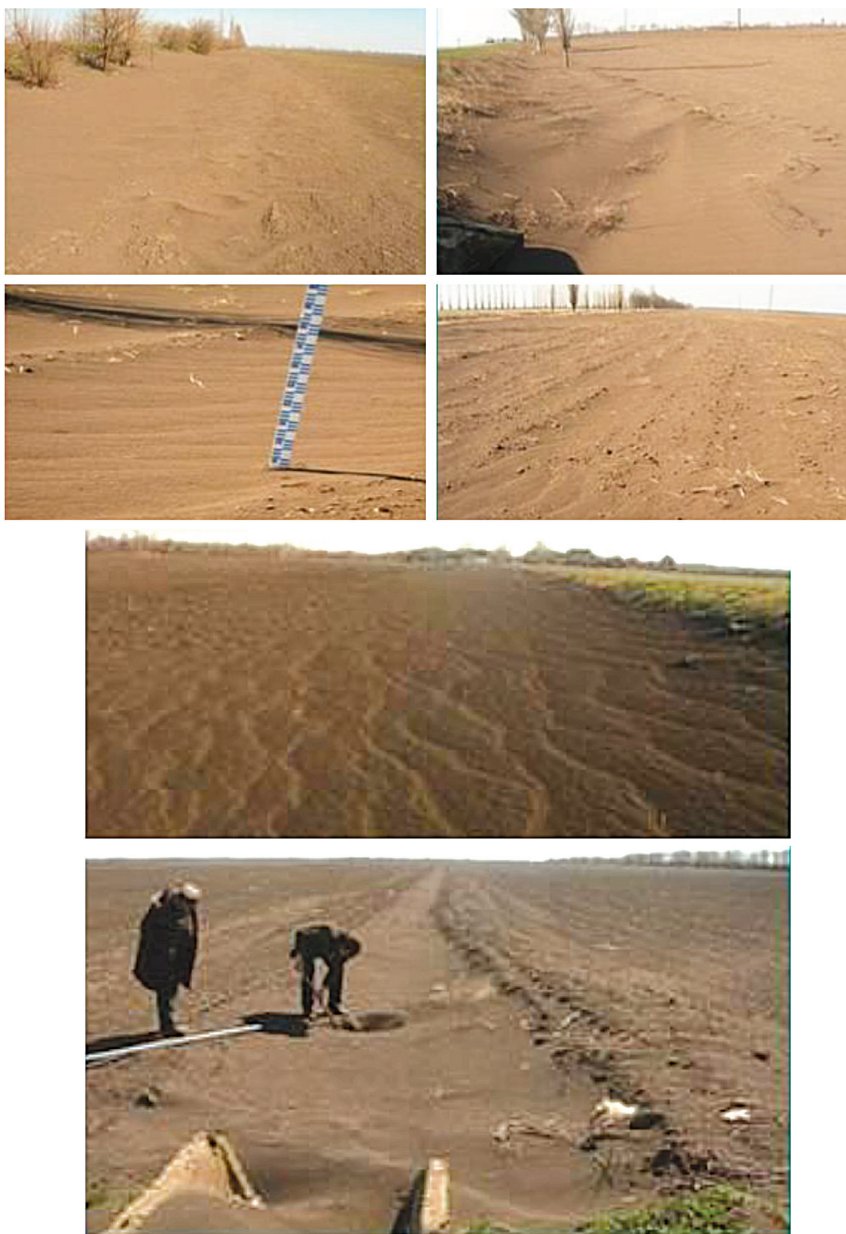
**Рис. 28. Прояви
ярусної ерозії на
матеріалах висо-
кого просторового
розрізнення:**

- 1 – промоїни;
- 2 – врізання
вершиною;
- 3, 4 – мікроулоговинна
ерозія; 5 – площинна
ерозія (ШСЗ SPOT,
просторове
розрізнення 5 м,
квітень 2013 р.)



**Рис. 29. Прояв
пилової бурі
на території
Херсонської
обл.**





**Рис. 30. Наслідки пилової бурі.
Поверхня еродованих полів нагадує пустельний ландшафт**

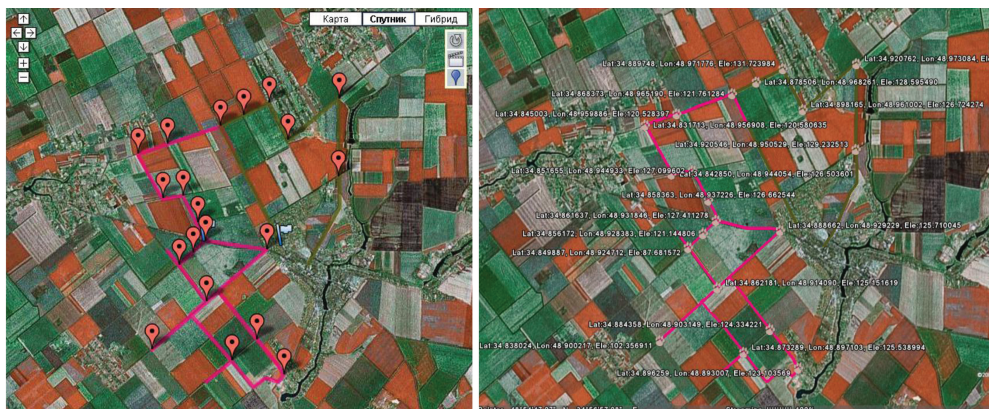
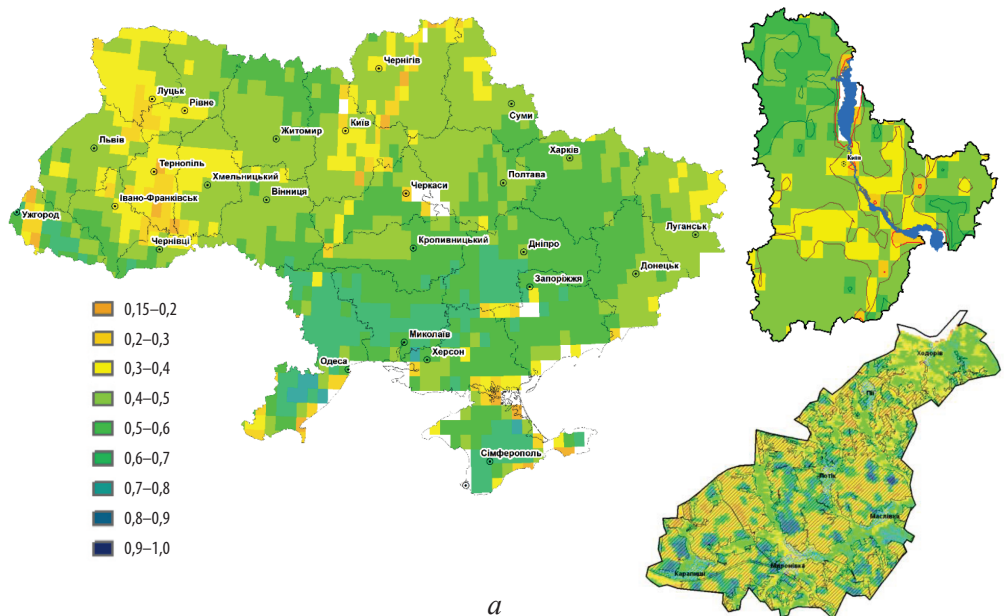


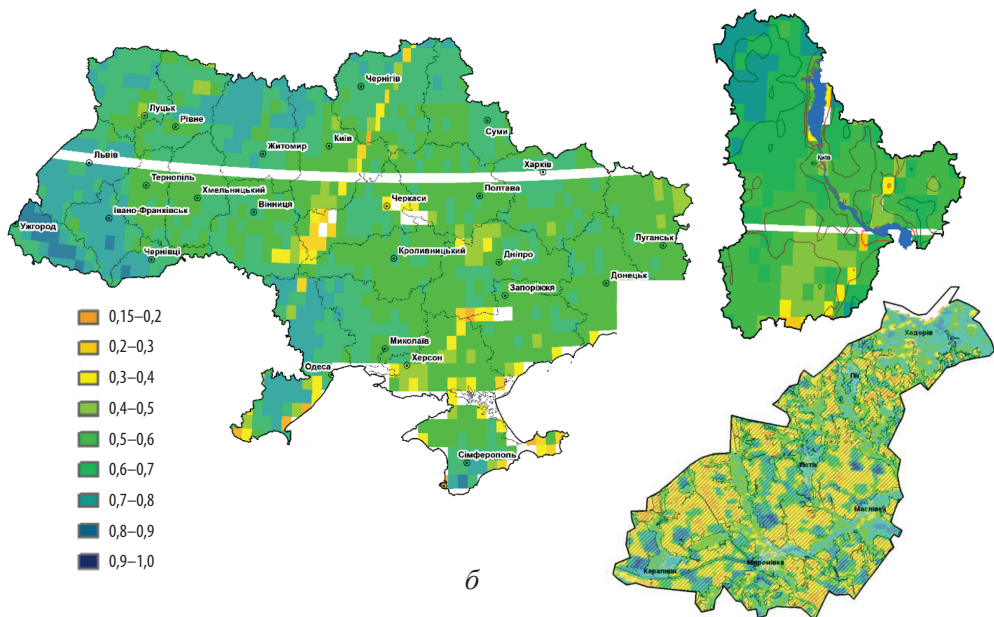
Рис. 31. Наземні обстеження з фіксацією тестових ділянок в координатній системі приладами GPS в Магдалинівському р-ні



Рис. 32. Класифікація посівів озимих культур і їх стану в період відновлення вегетації (Знімок з ШСЗ RapidEye, 01.04.2009, Миронівський р-н)



a



б

Рис. 33. Динаміка індексу вегетації NDVI на рівнях країна (прилад AVHRR ШСЗ NOAA), область і район (прилад MODIS ШСЗ Terra):
а – зйомка 24 квітня 2013 р.; б – зйомка 11 травня 2013 р.

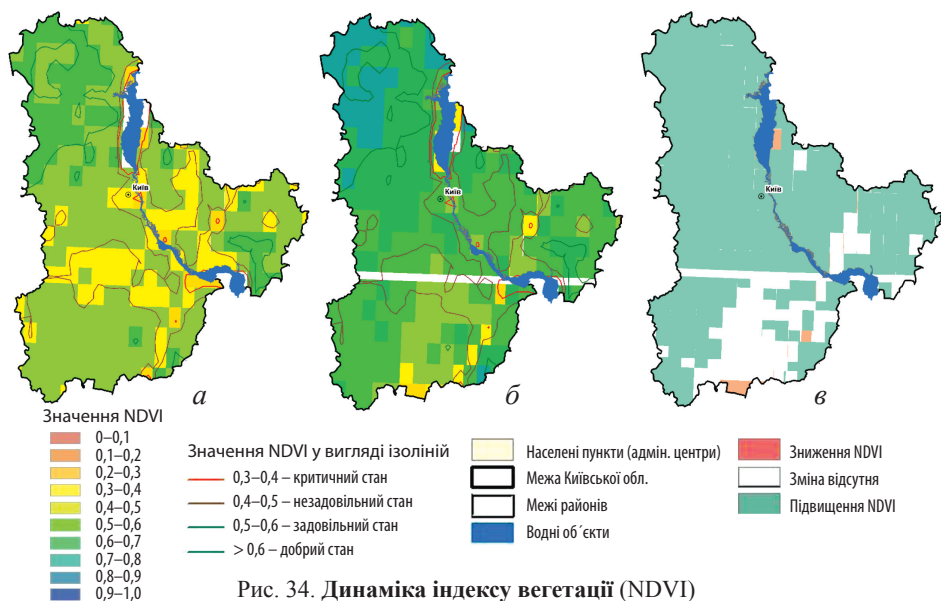


Рис. 34. Динаміка індексу вегетації (NDVI) за даними приладу MODIS IIIС3 Terra:

a – зйомка 24 квітня 2013 р.; *б* – зйомка 10 травня; *в* – 16-денна різниця NDVI (24.04–10.05)

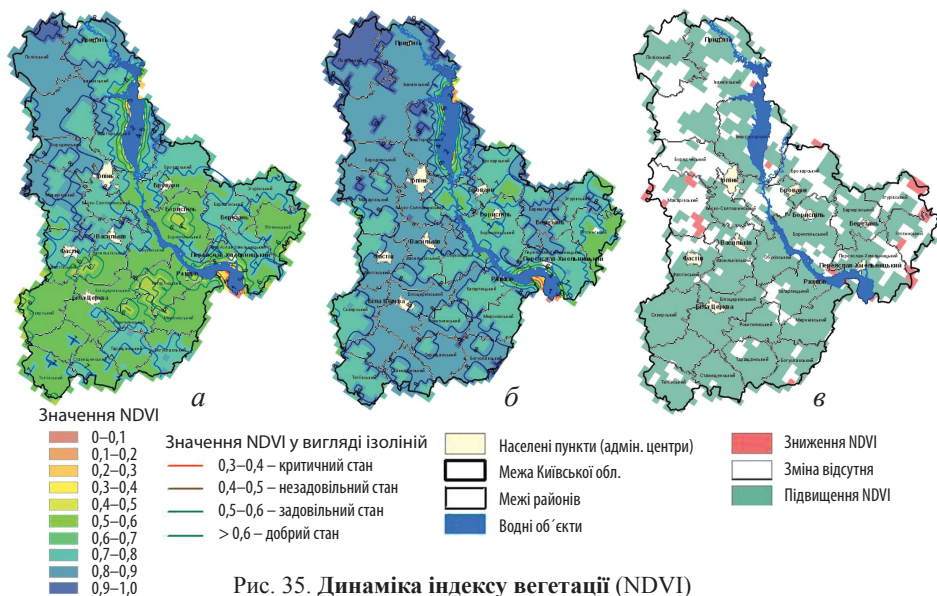


Рис. 35. Динаміка індексу вегетації (NDVI) за даними приладу MODIS IIIС3 Terra:

a – зйомка 10 травня 2013 р.; *б* – зйомка 26 травня; *в* – 16-денна різниця NDVI (10.05–26.05)

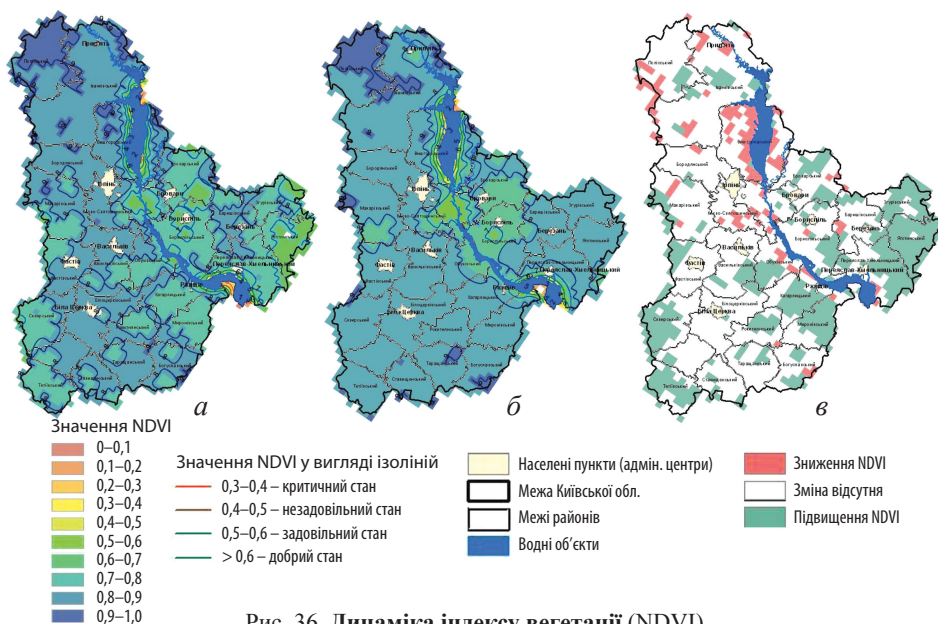


Рис. 36. Динаміка індексу вегетації (NDVI) за даними приладу MODIS ІСЗ Terra:

а – зйомка 26 травня 2013 р.; б – зйомка 11 червня; в – 16-денна різниця NDVI (26.05–11.06)

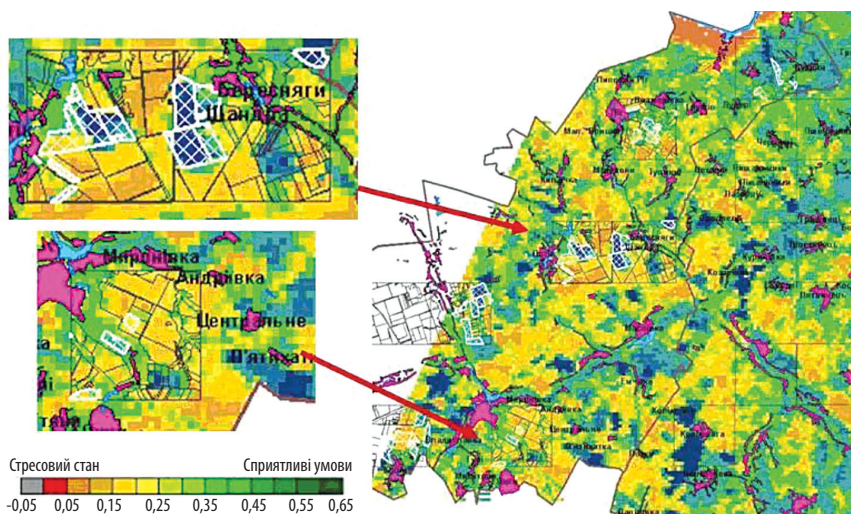


Рис. 37. Показники вегетаційного індексу NDVI на 30.10.2012 р. у межах Миронівського р-ну і тестових аграрних полігонів (MODIS ІСЗ Terra).

Біла штриховка позначає посіви озимих культур у межах тестових аграрних полігонів

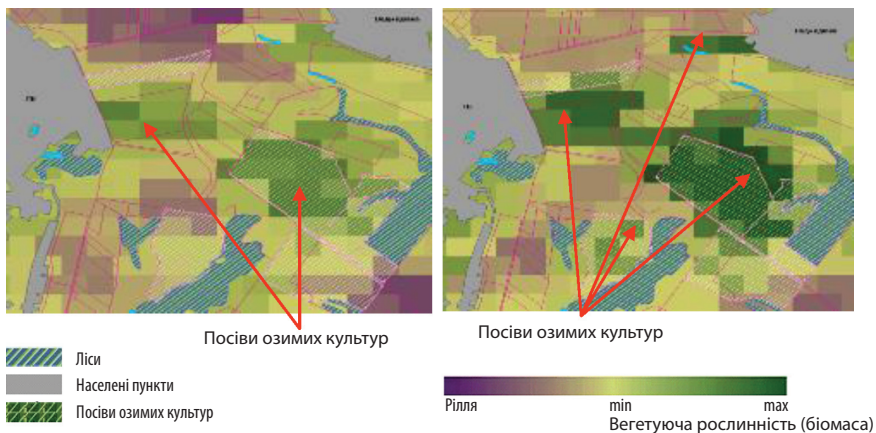


Рис. 38. Динаміка змін показника NDVI з 23 жовтня по 13 листопада 2012 р. в межах тестового аграрного полігону за даними MODIS ШСЗ Terra (с. Пії Миронівського р-ну). З розвитком посівів озимих культур зростають показники NDVI

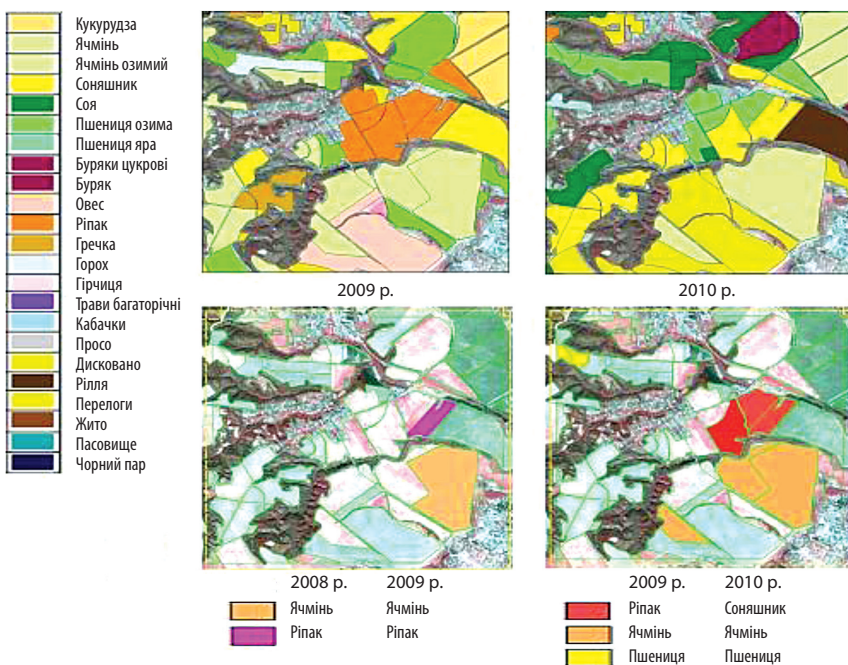


Рис. 39. Контроль сівозмін в межах тестового аграрного полігону Канівського р-ну за даними космічного знімання високого просторового розрізнення (ШСЗ RapidEye, просторове розрізнення 5 м)

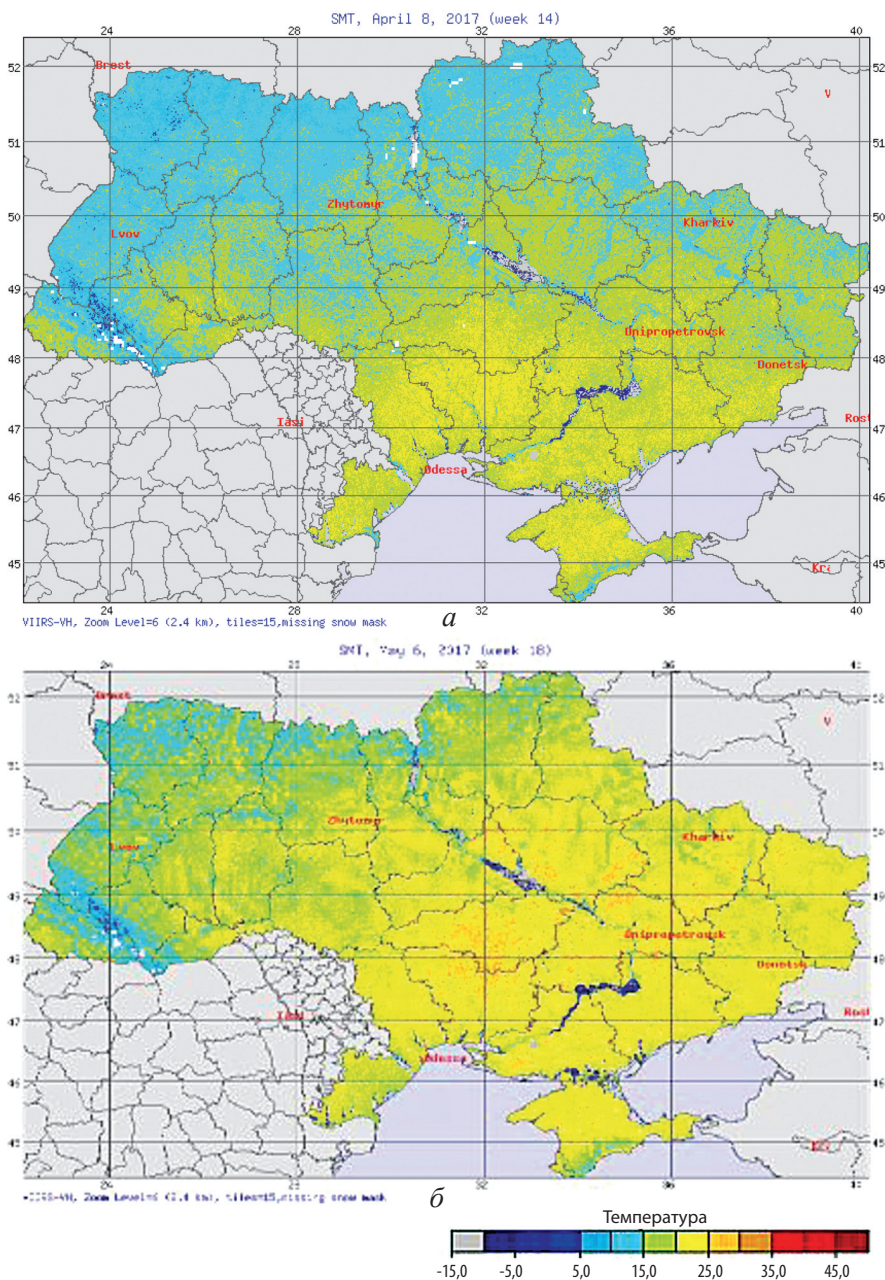


Рис. 40. Температура випромінювання земної поверхні усереднена за тиждень (за даними AVHRR/NOAA):
a – на 8 квітня; *б* – на 6 травня 2017 р.

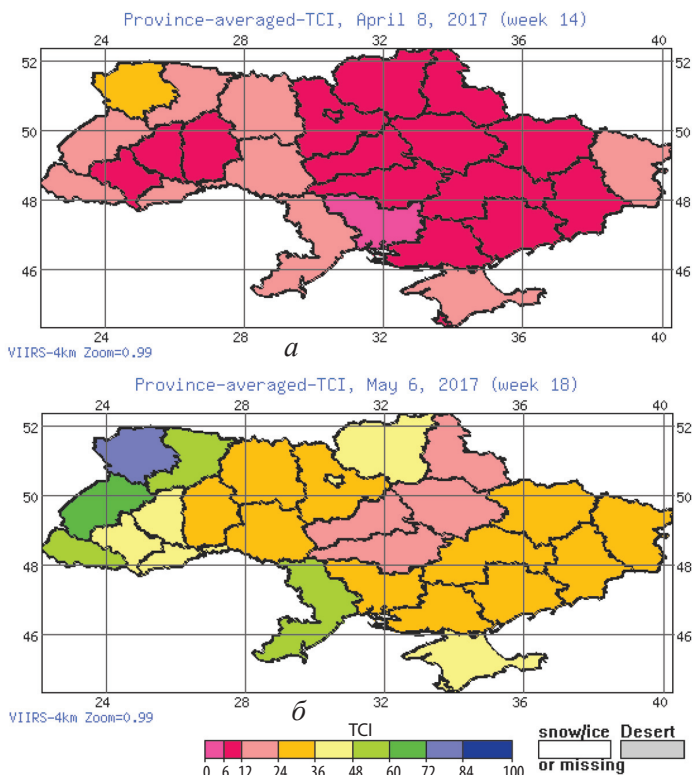
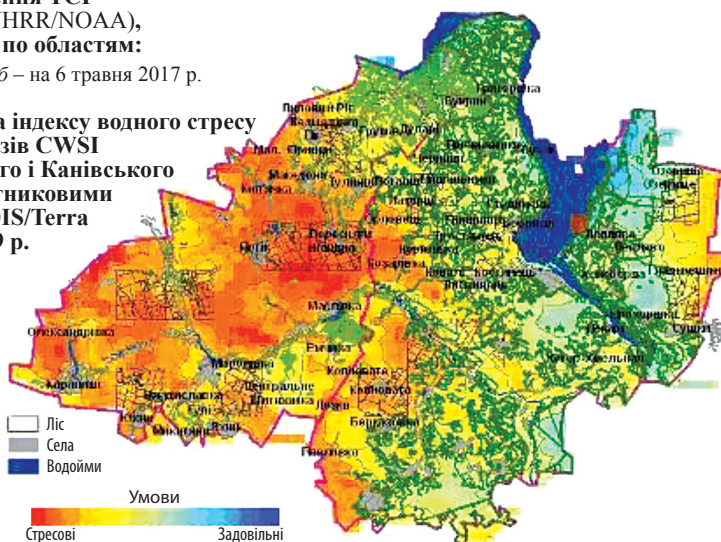


Рис. 41. Значення TCI
(за даними AVHRR/NOAA),
усередненого по областям:

a – на 8 квітня; *б* – на 6 травня 2017 р.

Рис. 42. Карта індексу водного стресу
агрофітоценозів CWSI
Миронівського і Канівського
р-нів за супутниковими
даними MODIS/Terra
7 травня 2009 р.



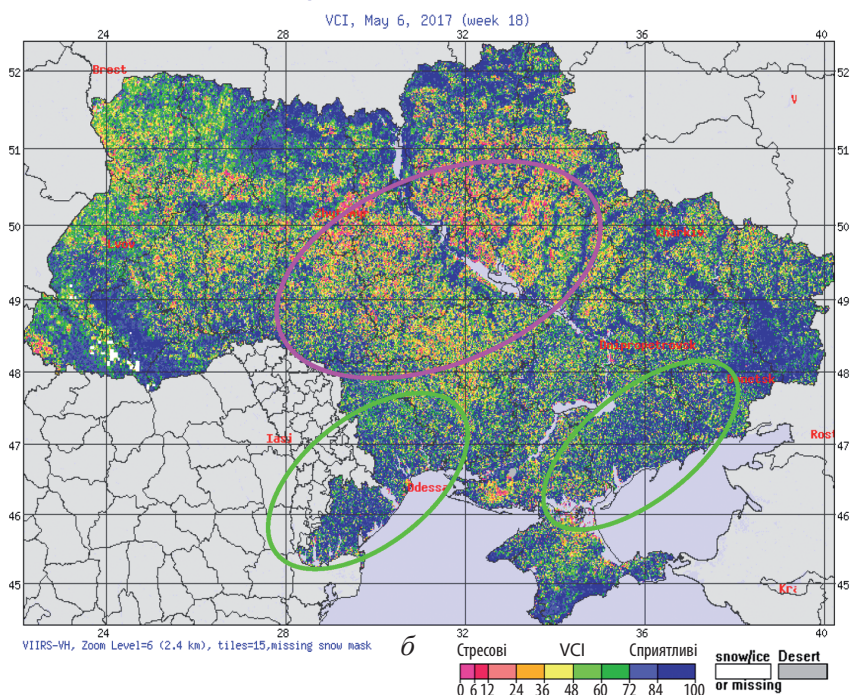
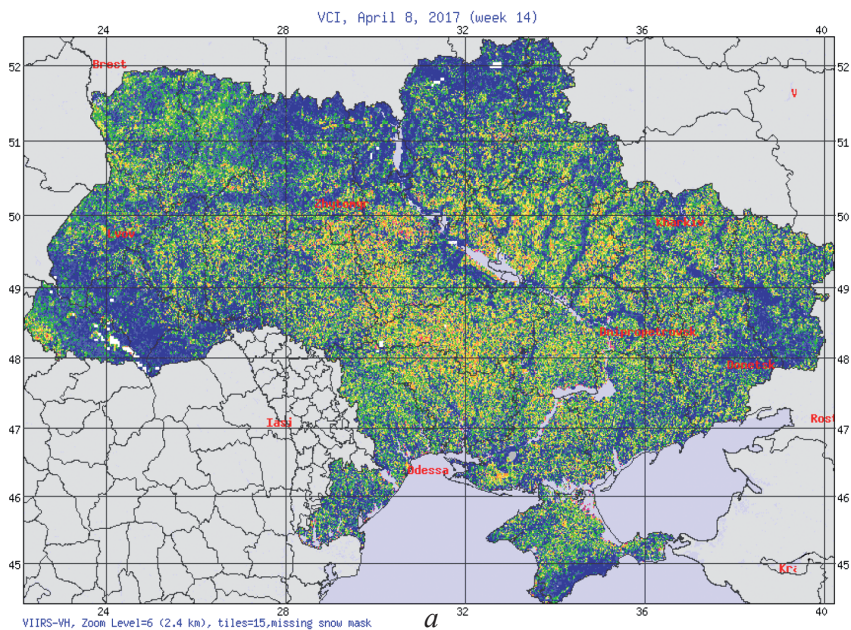


Рис. 43. Карти просторового розподілу індексу VCI:

a – 8 квітня; *б* – 6 травня 2017 р.

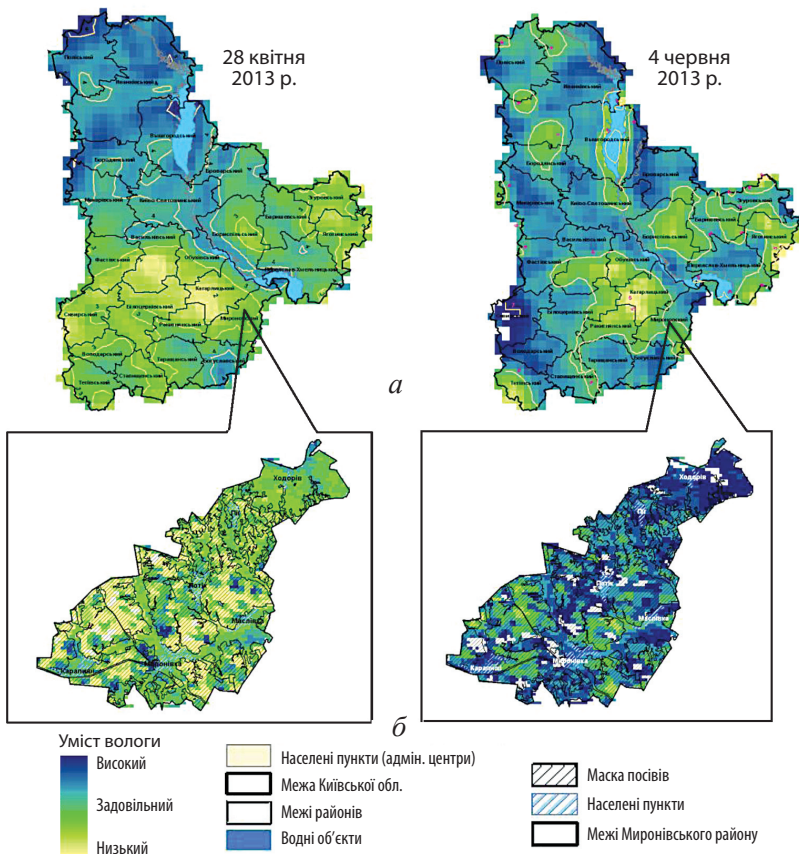
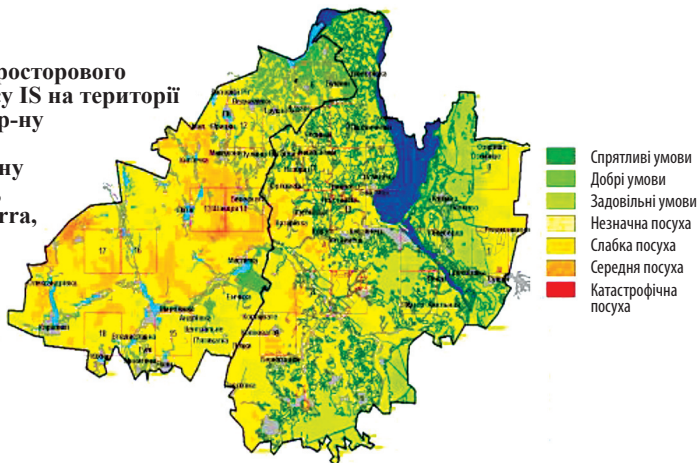


Рис. 44. Динаміка вмісту вологи в рослинах за водним індексом (NDWI) за даними супутника MODIS на території Київської обл. (а) та Миронівського р-ну (б)

Рис. 45. Карта просторового розподілу індексу IS на території Миронівського р-ну Київської обл. і Канівського р-ну Черкаської обл., MODIS ШСЗ Terra, 7 квітня 2009 р.



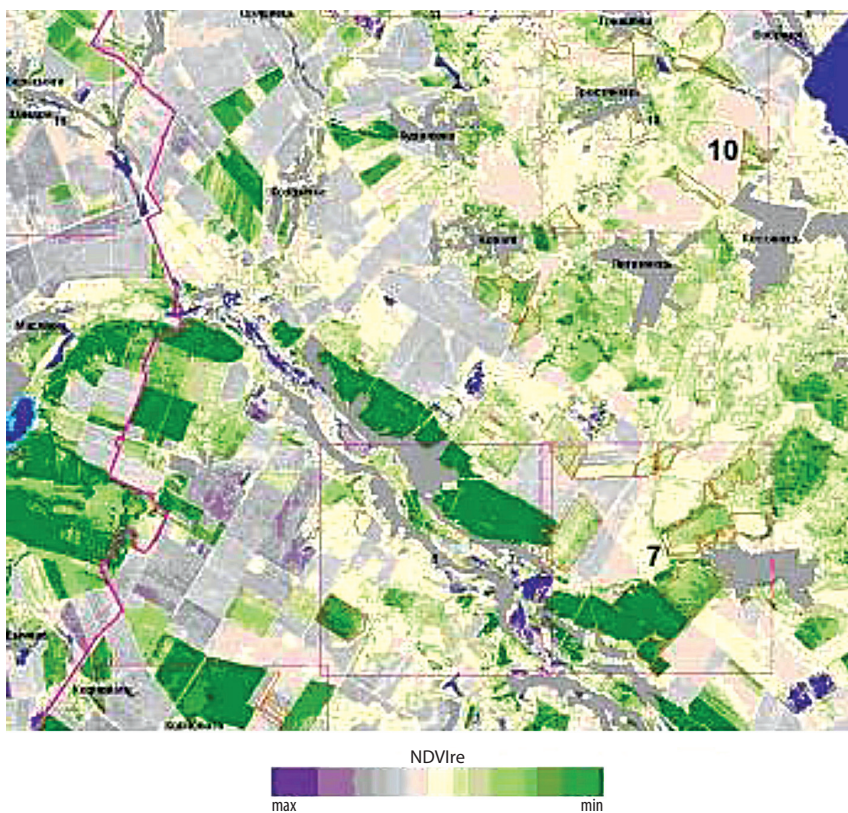


Рис. 46. Карта просторового розподілу індексу NDVIre по тестовим полігонам, 21 квітня 2009 р., супутник RapidEye

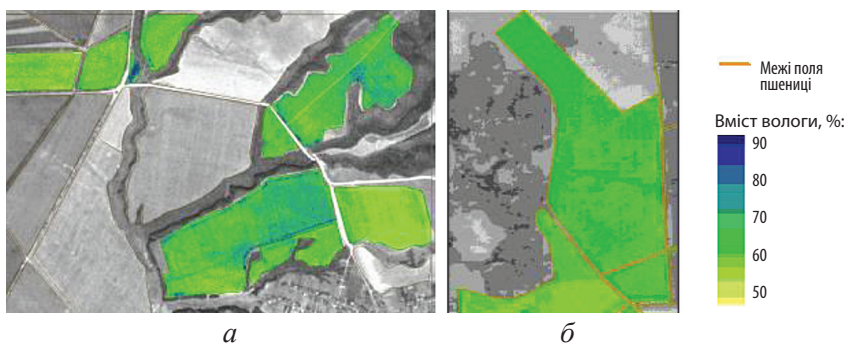


Рис. 47. Карта вмісту води в рослинах пшениці озимої, змодельована за даними супутника:

а – RapidEye, 11 квітня 2009 р.; б – СІЧ-2, 5 травня 2012 р.

23–25 вересня 2016 р.

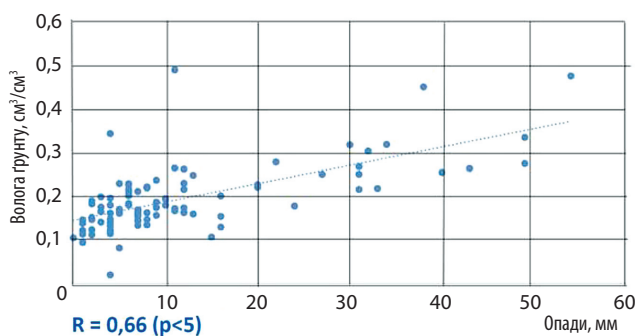
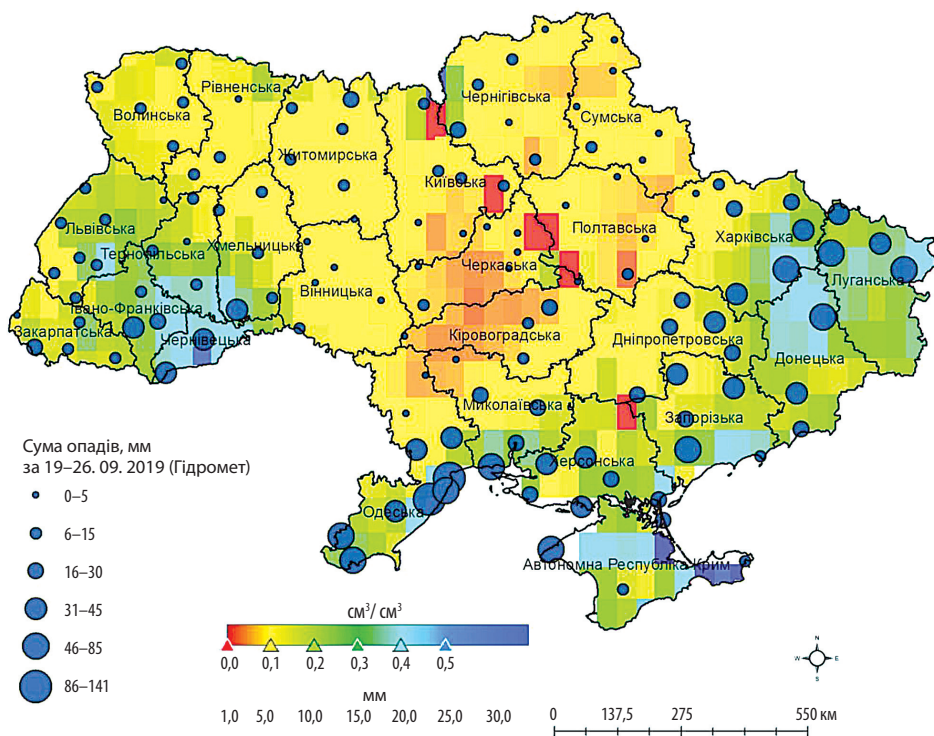
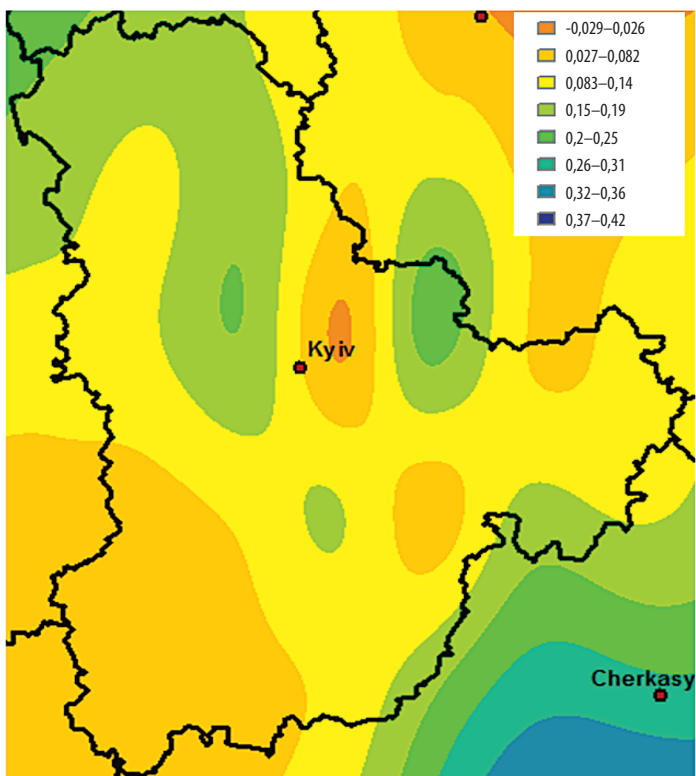
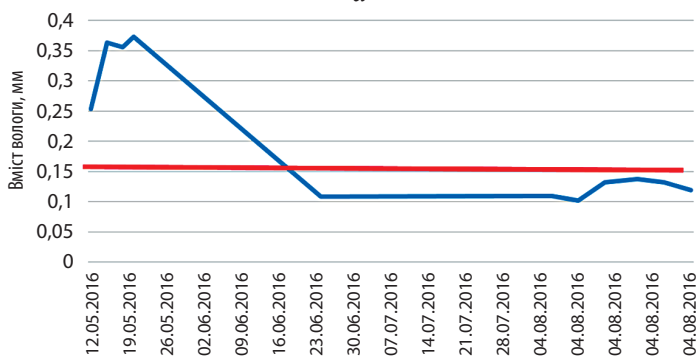


Рис. 48. Порівняння даних SMAP про вміст вологи у ґрунті та даних про кількість опадів



a



б

Рис. 49. Динаміка вмісту вологи у ґрунті за даними SMAP на території Київський обл.:

a – карта усереднених значень за сезон вегетації;

б – графік динаміки щодаєчних значень за період травень–вересень 2016 р.

ТАРАРІКО
Олександр Григорович

СИРОТЕНКО
Олександр Васильович

ІЛЬЄНКО
Тетяна Володимирівна

КУЧМА
Тетяна Леонідівна

**Агро-
екологічний
супутниковий
моніторинг**

AGROECOLOGICAL
EARTH
OBSERVATION

Редактори:
Т.В. Пономарьова, І.М. Баланчук
Комп'ютерна верстка та художнє оформлення
І.Г. Хорошого
Коректори:
Т.В. Пономарьова, А.О. Гмир

Підписано до друку 05.06.2019 р. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Папір офс. Гарнітура «Таймс». Друк офс.
Ум. друк. арк. 11,86+1,4 вкл. Обл.-вид. арк. 13,77+2 вкл.
Наклад 300 пр. Зам. № 299.

Державне видавництво «Аграрна наука» НААН
Свідоцтво про державну реєстрацію № 4116 від 21.07.2011 р.
вул. Васильківська, 37, Київ, 03022
Тел. (044) 257-85-27
e-mail: agrananauka@ukr.net

Віддруковано у друкарні «Видавництво «Логос»
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 201 від 27.09.2000 р.
вул. Богдана Хмельницького, 10, Київ, 01030
Тел. (044) 235-60-03