

УДК 528.8.04:633+504.5:665.7

## Дослідження нафтозабрудненого ґрунту і рослинного покриву, вирощеного на ньому, методом гіперспектрального дистанційного зондування із застосуванням спектрорадіометра ASD FieldSpec®3FR

Г. М. Жолобак, С. С. Дугін \*, О. М. Сибірцева, Є. М. Дорофей

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна

Розвиток нафтовидобувної і нафтопереробної галузей промисловості спричиняє забруднення навколишнього середовища, передусім водних та наземних екосистем. Серед компонентів наземних екосистем забруднення нафтою насамперед зазнають рослини та ґрунти. Проведено дослідження нафтозабрудненого ґрунту і рослинного покриву в лабораторних умовах методом гіперспектрального дистанційного зондування спектрорадіометром ASD FieldSpec®3FR. Рослинний покрив формували шляхом вирощування в ємностях з ґрунтом ярих зернових культур (пшениці, ячменю і кукурудзи). Гіперспектральні вегетаційні індекси із залученням коефіцієнтів відбиття в зоні червоного краю спектра (TCI, GrNDVI та REP) є вищими за величиною для кукурудзи, у порівнянні з іншими ярими дрібнозерновими культурами. Внесення додаткової дози нафти до нафтозабрудненого ґрунту біля свердловини Старосамбірського нафтового родовища призводить в кінцевому підсумку до зниження значень описаних вегетаційних індексів кожної дослідженої ярої культури. Накопичені значення GrNDVI для кукурудзи та TCI для кукурудзи й ярого ячменю є тотожними до лабораторно визначеного вмісту хлорофілу в цих культурах (за співвідношенням між субстратами вирощування). Для подальшого розвитку дистанційного вивчення нафтозабруднених ґрунтів та їх впливу на рослинність доцільно удосконалити методику проведення спектрометрування з залученням даних космічної зйомки.

**Ключові слова:** вегетаційні індекси, забруднення нафтою, ярі культури

© Г. М. Жолобак, С. С. Дугін, О. М. Сибірцева, Є. М. Дорофей. 2018

### Вступ

Розвиток нафтовидобувної і нафтопереробної галузей промисловості спричиняє забруднення навколишнього середовища, передусім водних та наземних екосистем. Серед компонентів наземних екосистем забруднення нафтою насамперед зазнають рослини та ґрунти, які при цьому змінюють свої фізико-хімічні та спектральні властивості.

Ґрунт є визначальним багатофакторним середовищем життя рослин. Екологічна багатозначність ґрунтів у біогеоценозах визначена так [9]:

- 1) зосередження (депо) організмів, їхніх зачатків, вологи, енергії, хімічних елементів;
- 2) життєвий простір, притулок або тимчасове житло;
- 3) сорбент речовин;
- 4) стимулятор або гальмувач життєвих процесів;
- 5) дзеркало ландшафту, що відображає його екологічну сутність, історію;
- 6) субстрат і механічна опора для наземних організмів;
- 7) сигнальний фактор багатьох екологічних явищ і процесів.

Ґрунти відіграють істотну роль в акумуляції та трансформації речовин і енергії, у регуляції складу,

будови, зв'язків між організмами, в ініціації явищ суцесій біогеоценозів.

Забруднення ґрунтів має цілу низку важливих специфічних особливостей. По-перше, ґрунт — це найбільш малорухоме природне середовище порівняно з атмосферою або поверхневими водами. Міграція забруднювальних речовин у ґрунті відбувається в залежності як від їх щільності, так і від твердості ґрунту. Коли щільність забруднювальних речовин велика, а ґрунти тверді, то рівні забруднення ґрунтів стають високими, а речовини локалізуються в місцях їхнього викиду в зовнішнє середовище. При цьому спостерігається поступова зміна хімічного складу ґрунтів, порушення єдності геохімічного середовища та живих організмів. Таким чином, зміна спектральних характеристик як ґрунтів, так і рослин, є індикатором оцінки стану їх забруднення нафтопродуктами.

Відповідно до ГОСТу 17.1.4.01-80 [1], нафтопродукти — це сума неполярних і малополярних вуглеводнів (аліфатичних, ароматичних, ациклічних). Вони складають головну та найбільш характерну частину нафтопродуктів — 70–90% від усіх речовин, що наявні у них.

На підставі аналізу діючих на території України нормативних документів було показано, що для оцінки рівня забрудненості ґрунтів нафтопродуктами використовується орієнтовно-допустима концентра-

\* E-mail: Dstas2389333D@i.ua

ція (ОДК) нафти у ґрунті, яка становить 4 000 мг/кг. На основі цього для чорноземної зони України пропонується встановити такі градації забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами [3]:

- незабруднені — менше 400 мг/кг;
- слабо забруднені — 3 000–6 000 мг/кг;
- середньо забруднені — 6 000–12 000 мг/кг;
- сильно забруднені — 12 000–25 000 мг/кг;
- дуже сильно забруднені — понад 25 000 мг/кг.

Токсичну активність нафтозабрудненого ґрунту важко прогнозувати через багатофакторний характер дії нафти і нафтопродуктів на ґрунтове середовище, при якому окремі компоненти, внаслідок взаємодії між собою та складниками ґрунту можуть активуватись або пригнічуватись різноманітними додатковими та зовнішніми чинниками.

Вплив нафтового забруднення на рослинні організми відбувається двома шляхами [6]: а) безпосередньо — внаслідок проникнення компонентів нафти через кореневу систему або продири листків і включення їх у метаболізм; б) опосередковано — через зміни фізико-хімічного складу ґрунту чи трансформацію його мікробіотичних угруповань. Переважно саме другий спосіб впливу призводить до зміни таких рослинних показників, як біомаса, розміри надземної частини рослин, анатомічна структура асиміляційних органів, вміст хлорофілів *a* і *b* в листках, кількість каротинів, швидкість окремих біохімічних процесів [2]. Реакція фотосинтетичних пігментів проявляється на спектрах відбиття світла рослинами. На тих ділянках, які відповідають максимумам поглинання відповідних пігментів, відбиття мінімальне і навпаки. Це дає можливість їх дистанційного вивчення за наявності відповідних спектральних приладів.

З розвитком масштабів видобування нафти і розростанням інфраструктури для її транспортування та переробки ймовірність забруднення нафтопродуктами ґрунтів та рослинного покриву збільшується. Це зумовлює актуальність дослідження ґрунтів та реакції їх рослинного покриву на токсичну дію нафти.

### Мета роботи

Обчислити та проаналізувати вуглеводневі та вегетаційні індекси, отримані з застосуванням спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR, відповідно, для нафтозабрудненого ґрунтового середовища та рослин, вирощених на ньому в лабораторних умовах.

### Об'єкт та методи досліджень

Об'єкт досліджень — нафтозабруднений ґрунт Старосамбірського нафтового родовища розташованого у Старосамбірському районі Львівської області. Видобування нафти на території цього родовища було розпочато у грудні 1969 р. Ґрунти тут пе-

реважно глинисті, відрізняються більшою теплоємністю, у вологому стані навесні повільніше нагріваються, а восени довше тримають тепло. Внаслідок інтенсивного і довготривалого нафтовидобування та різних видів будівництва природний рельєф родовища зазнав сильної антропогенної трансформації, виникли екологічні проблеми в екосистемах, зокрема в їхніх найважливіших компонентах — ґрунтах і рослинному покриві [4].

Подібні дослідження впливу нафтового забруднення ґрунту на рослини в природних умовах проводили зарубіжні вчені [12]. Вони вивчали низовинні вічнозелені вторинні ліси басейну Амазонки провінції Сакумбіос (Еквадор), які зростали на покинутому нафтовому родовищі. Свої результати вони порівнювали з ділянками лісів з двох незабруднених ділянок. За допомогою космічного супутникового дистанційного зондування були виявлені біохімічні зміни листків у тропічних лісах, викликані забрудненням нафтою. В результаті найефективнішими для їх виділення було визнано три індекси, серед яких *NDVI* та *NDVI<sub>705</sub>*.

Для характеристики деградації ґрунтів, забруднених нафтопродуктами, використовують методи аналітичної хімії, принципи біотестування та біоіндикації [7, 8]. Існує також метод гіперспектрального дистанційного зондування нафтозабрудненого ґрунту і рослинності, що на ньому зростає [22, 29], який поки що мало розроблений в Україні через відсутність як відповідних приладів, так і досвіду роботи з такими об'єктами. Цей метод ґрунтується на аналізі відповідних вуглеводневих чи вегетаційних індексів, які розраховуються на підставі отриманих спектрів відбиття.

### Методика проведення дослідів

Дослідження нафтозабрудненого ґрунту і вирощеного на ньому в лабораторних умовах рослинного покриву методом гіперспектрального дистанційного зондування спектрорадіометром ASD FieldSpec® 3FR проведено з 22 березня до 17 травня 2018 р. Рослинний покрив формували шляхом вирощування в ємностях з ґрунтом ярих зернових культур (пшениці, ячменю і кукурудзи). Схема дослідів представлена в табл. 1.

Перші п'ять варіантів розглядалися як контрольні, а решта — як дослідні (табл. 1). Ґрунт для розсади (без нафти) використали від виробника — фірми Terra+ (м. Дніпро). Ґрунт свердловини був відібраний біля нафтової свердловини № 76 Старосамбірського родовища — рівень токсичності вище середнього (6–8% нафти) і висушений до повітряно-сухого стану. Рослини вирощували в поліетиленових горщиках висотою 130 мм і діаметром 97 мм. В кожен ємність для вирощування вносили по 1 кг ґрунту. Повітряно-сухий ґрунт попередньо змочували відстояною водопровідною водою, додаючи її по

**Таблиця 1.**

Схема дослідів дистанційного вивчення реагування фотосинтетичного апарату ярих зернових культур (пшениці, ячменю і кукурудзи) на вплив нафтового забруднення

№ варіанта	Субстрат вирощування	Рослини
1	Грунт біля свердловини	без рослин
2	Грунт для розсади	Пшениця яра
3	Те ж	Ячмінь ярий
4	Те ж	Кукурудза
5	Грунт біля свердловини	Без рослин
	просікнаний нафтою	
2.2	Грунт біля свердловини	Пшениця яра
2.3	Те ж	Ячмінь ярий
2.4	Те ж	Кукурудза
3.2	Те ж	Пшениця яра
3.3	Грунт біля свердловини	Ячмінь ярий
	просікнаний нафтою	
3.4	Те ж	Кукурудза

200 мл на 1 кг ґрунту, та вимішували до відносно однорідної маси. У варіантах 3.2–3.4 та 5 до ґрунту біля свердловини додавали ще по 10 г/кг сирової нафти, яку вносили, імітуючи свіжий розлив нафти, “сіточкою” на поверхню, не розпушуючи. Внесення нафти здійснювали 22 березня 2018 р. Після внесення нафти для випаровування її найбільш токсичних фракцій ємності залишили на 10 днів при кімнатній температурі, впродовж яких поверхня ґрунту знову підсушилась, і на ній утворилась темніша нафтова плівка. 2 квітня 2018 р. перед висіванням виконали спектрометрування поверхні варіантів 2.2–3.4, після чого провели посів насіння ярих культур, попередньо зволоживши ґрунт та злегка його розпушивши. В кожен ємність відповідного варіанту вносили по 5 г зерна пшениці чи ячменю і по 10 г зерен кукурудзи. Станом на 10 квітня 2018 р. рослини ярих пшениці та ячменю сформували проективне покриття, достатнє для спектрометрування. На цей час зернівки кукурудзи лише розпочали проростання (*колеоптиле* — перший листок). Вологість ґрунту підтримували на рівні 60% повної вологоємності, поливаючи рослини відстояною водопровідною водою.

#### *Коротка характеристика сортів використаних ярих культур*

Пшениця тверда яра Діана. У Реєстрі сортів рослин України з 2015 р. Автори В. С. Кочмарський, В. Й. Солона, В. А. Власенко, С. О. Хоменко, С. М. Маринка, В. П. Кавунець, Г. В. Федченко. Сорт високоврожайний, середньостиглий, низькорослий (75–85 см). Стійкий до вилягання, посухи та обсіпання. Стійкий до борошнистої роси, бурої іржі, септоріозу та фузаріозу колосу. Апробаційні ознаки. Різновидність леукурум. Колос пірамідальний, короткий (6.0–7.5 см), щільний (25 колосків на 10 см довжини стрижня). Ості довгі (14–15 см), еластичні, сильно зазублені, у середній частині розходяться під ку-

том 20°. Колоскова луска середня, видовжена, із сильно виявленою нервацією. Зернівка видовжена, середня, борозенка вузька, мілка. Маса 1 000 зерен — 43.5 г. Рекомендований для вирощування в Лісостепу та на Поліссі [<http://mip.com.ua/page/104-pshenytsya-tverda-yara-diana>].

Ярий ячмінь сорт Карат. Заявник — Волинський інститут агропромислового виробництва Української академії аграрних наук. Власник — Волинська державна сільськогосподарська дослідна станція Інституту. У Реєстрі сортів рослин України з 1998 р. Сорт середньостиглий. Напрямок використання зерновий, фуражний.

Кукурудза сорт Достаток. Оригінація: Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, Черкаський інститут агропромислового виробництва НААН України. Занесений до державного реєстру сортів України з 2013 р. і рекомендований для вирощування на зерно і силос в зонах Лісостепу і Степу. За біологічними ознаками гібрид Достаток середньостиглий (ФАО 300). Вегетаційний період від сходів до повної стиглості в зонах Степу — 120, Лісостепу — 125 днів. Висота рослин 250–270 см, високорослий, стійкий до вилягання і ламкості стебла, нараховується на головному стеблі 12–13 надземних вузлів, а листків — 17–18.

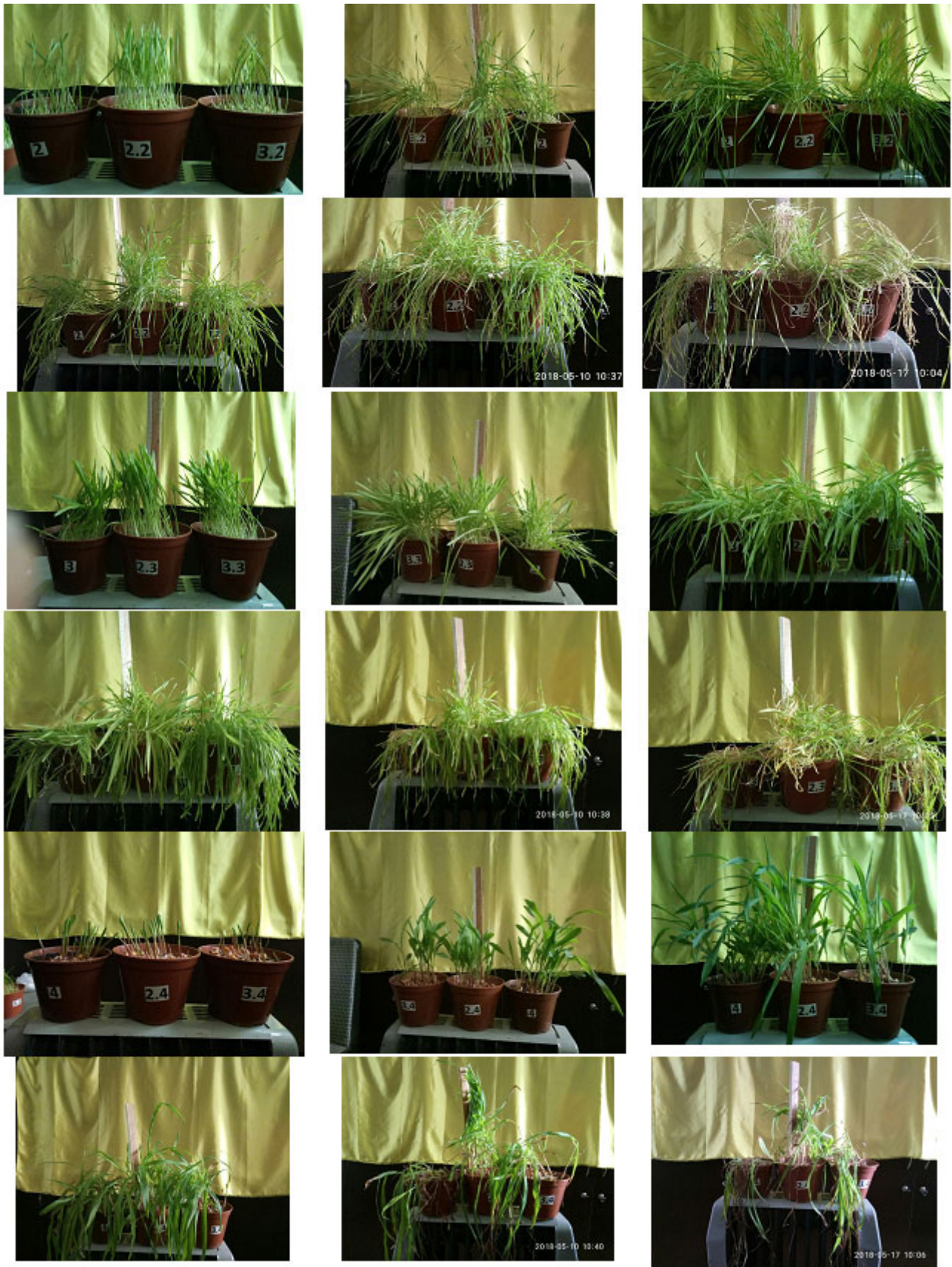
Качан циліндричної форми, довжиною 21–23 см, формується на висоті 80–90 см, маса 280–300 г, рядів зерен 16–18, верхівка качана добре озернена, качан повністю вкритий обгортками, стрижень червоний. Зерно зубоподібне, світло-помаранчового кольору, вихід зерна 82%. Маса 1 000 зерен — 280–300 г. Вміст білка в зерні 12.0%, 74.5% крохмалю, 3.0–4.0% жиру. Сорт ремонтантний. Стійкий до пухирчатої і летючої сажок, гельмінтоспориозу, фузаріозу стебла, кореневих гнилей. Адаптований до згущення посівів. Посухо- і холодостійкість хороші. При вирощуванні на зерно рекомендована густота рослин — 70, на силос — 90 тис./га. Добре реагує на внесення мінеральних добрив. За господарськими ознаками цей гібрид високоврожайний та екологічно пластичний. За продуктивністю зерна і силосної маси є одним з найкращих у групі середньостиглих гібридів [<https://agrobiz.net/kukurudza-dostatok-3-mv-f1-405578.html>]. Щотижневий розвиток рослин відображено на фото (рис. 1).

#### *Методика спектрометрування*

Спектрометрування нафто забрудненого ґрунту і рослинного покриття Старосамбірського нафтового родовища здійснено спектро радіометром FieldSpec®3 FR.

Основні технічні характеристики спектро радіометра FieldSpec®3 FR такі:

ASD FieldSpec® 3FR — польовий портативний переносний спектро радіометр, який охоплює діапазон реєстрації від 350 до 2500 нм. Весь спектр 350–2500 нм



**Рис. 1.** Розвиток ярої пшениці (варіант 2.2 і 3.2), ярого ячменю (варіант 2.3 і 3.3), кукурудзи (варіант 2.4 і 3.4), на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади (варіант 2), (варіант 3), (варіант 4).  
Дати фотографування: вгорі зліва-направо — 10, 17 і 24 квітня 2018 р., внизу — 03, 10 і 17 травня 2018 р.



відображається в реальному часі на дисплеї. Деякі інші характеристики спектрорадіометра наведено нижче: інтервал відліку — 1.4 нм у діапазоні довжин хвиль 350–1000 нм і 2.0 нм у діапазоні довжин хвиль 1000–2500 нм, спектральна розрізненість (повна ширина на половині максимуму) — 3.0 нм при 700 нм та 10 нм при 1400 нм і 2100 нм, яскравість, еквівалентна шуму (NeDL), для стандартного волоконно-оптичного кабеля довжиною 1.5 м становить:  $1.4 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при довжині хвилі 700 нм;  $2.4 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при 1 100 нм і  $8.8 \cdot 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>·нм — середнє значення при 2 100 нм. З іншими технічними параметрами приладу можна ознайомитись на сайті: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-3-portable-spectroradiometer>.

У нашому дослідженні кут огляду застосованого об'єктива — 1°. Тримач пістолетного типу з оптичною насадкою закріплювався на стандартному штативі з висотою над поверхнею ґрунту — 1.3 м, віддаль від об'єктива до ділянки спектрометрування посіву — 1 м, величина площі посіву, яка потрапляє в поле зору — 2.5 см<sup>2</sup>, кут нахилу оптичної осі об'єктива до вимірюваної площі — 90° (в надир). Освітлення ємностей під час зняття показників відбиття забезпечувалось галогеновою лампою OSRAM потужністю 500 Вт і світловим потоком 6 000 лм у корпусі з алюмінієвим відбивачем. Калібрування до білого проводилось перед кожним вимірюванням ємності з ґрунтом чи рослинами. Дані 30 спектрів (повторів вимірювання одного місця поверхні посіву кожного варіанту) зберігалися у програмі ASD FieldSpec 3FR (RS 3) та усереднювались та оброблялись програмою обробки спектрів приладу ViewSpec Pro 6.0. Отримані дані використовувались для обчислення вегетаційних індексів.

## Результати та їх обговорення

### Особливості зростання ярих культур впродовж квітня-травня 2018 р.

Через 8 днів після висівання найвища енергія проростання була властива всім варіантам з ярим ячменем (рис. 2, варіанти 3, 2.3, 3.3). Ярий ячмінь сформував найвище проективне покриття у варіанті на ґрунті з-під свердловини (варіант 2.3). На цьому ж ґрунті добре зійшла і яра пшениця (варіант 2.2). Кукурудза перебувала у фазі “сходи”, причому максимальна їх кількість спостерігалась на ґрунті для розсади (варіант 4).

Приріст біомаси всіх трьох культур тривав впродовж квітня. Зважування рослинного матеріалу не було передбачене, оскільки рослини вирощувались для безконтактного спектрометрування. В травні розпочалось пожовтіння листків, і на 17 травня в ємностях для вирощування на ґрунті для розсади рослини практично майже всі засохли (кукурудзи залишилось 3 шт., ячменю — 5, а пшениці — 19 шт.

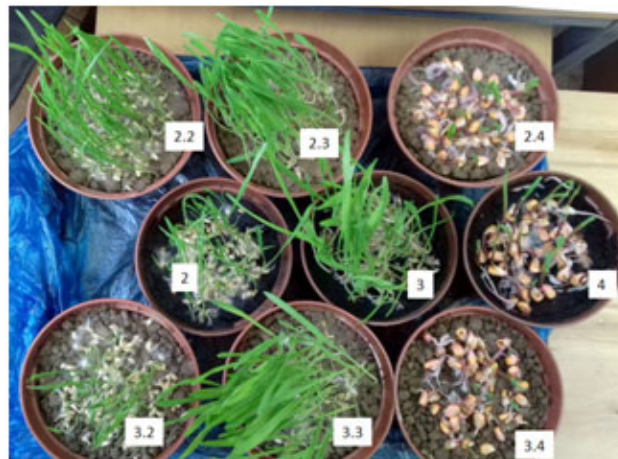


Рис. 2. Рослини ярих культур станом на 10 квітня 2018 р.

зелених пагонів). Вірогідною причиною незадовільного росту рослин на цьому ґрунті є те, що він виявився добрим субстратом для росту ґрунтової мікробіоти, зокрема, цвілевих грибів родів *Mucor*, *Penicillium* та ін., які певним чином пригнічують ріст культурних рослин. Доза нафтопродуктів у ґрунті свердловини пригальмовує ріст цієї мікробіоти, тому досліджувані ярі культури розвиваються тут добре. Крім того цей ґрунт краще утримує вологу, ніж пухкий ґрунт для розсади. Додаткове ж внесення нафти, загалом, не сприяє росту ані вищих, ані нижчих рослин (за винятком варіанту 3.2 — яра пшениця, де наприкінці квітня окремі не пророслі зернівки вкрились голубою цвіллю *Penicillium*).

Несприятливий вплив додаткового внесення нафти відображається на значеннях висоти надземної частини рослин кукурудзи у квітні (табл. 2). Слід зазначити, що наприкінці квітня у варіанті “ґрунт біля свердловини” їх висота починає випереджувати інші два варіанти.

Таблиця 2.

Висота надземної частини рослин кукурудзи, см

Варіант, дата	10 квітня 2018 р.	17 квітня 2018 р.	24 квітня 2018 р.
4 (ґрунт для розсади)	8.2 ± 0.9	23.4 ± 3.9	31.6 ± 4.2
2.4 (ґрунт біля свердловини)	7.3 ± 1.2	17.0 ± 1.6	33.2 ± 2.9
3.4 (ґрунт біля свердловини)	6.1 ± 0.7	15.2 ± 2.6	26.3 ± 2.7
просіянутий нафтою)			

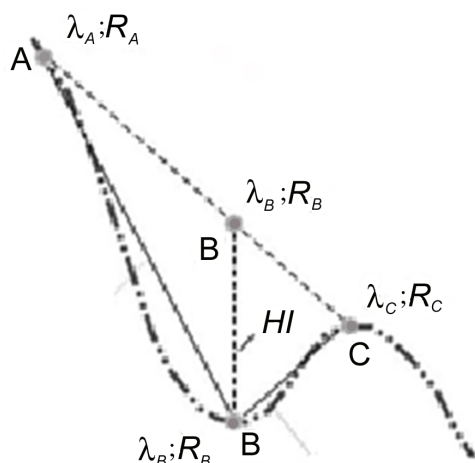
На ґрунті біля свердловини ярий ячмінь від початку вимірювань (10 квітня) сформував найвищі пагони (в середньому 15.5 см проти 14 см на інших субстратах), а на 17 квітня: 22 см проти 17–20 см.

Яра пшениця на ґрунті біля свердловини за висотою випереджала інші варіанти, починаючи з 17 квітня (в середньому 23 см проти 17–19 см).

В цілому, можна констатувати, що взятий нами ґрунт для розсади виявився під кінець дослідів не оптимальним субстратом вирощування, тому що ріст та розвиток рослин на ґрунті біля свердловини Старосамбірського родовища відбувається більш сприятливо як за показниками енергії проростання, так і за висотою пагонів та кількістю хлорофіловмісних органів.

#### Вивчення вуглеводневих індексів нафтовмісних ґрунтів Старосамбірського родовища

Характерною властивістю нафтовмісних ґрунтів є особлива форма спектрів відбиття у вигляді локальних мінімумів у зонах абсорбції нафти довжин хвиль 1 730 і 2 300 нм [21, 22, 27]. Зокрема, відповідні фрагменти спектрів відбиття нафтонасичених ґрунтів дещо нагадують форму букви V (рис. 3).



**Рис. 3.** Схематичне зображення частини спектра відбиття нафтовмісних матеріалів поблизу довжини хвилі  $\lambda_B = 1\,730$  нм для виявлення точок (A, B, C) для розрахунку вуглеводневого індексу (за K hn et al., 2004). По осі ординат — коефіцієнт відбиття, а по осі абсцис — довжина хвилі [ 21]

На основі прогину у спектра відбиття, в роботі F. K hn et al., 2004 [21] запропоновано так званий вуглеводневий індекс *HI* (*Hydrocarbon Index*) для визначення нафтовмісних та забруднених нафтопродуктами ґрунтів, який визначається за формулою:

$$HI = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B, \quad (1)$$

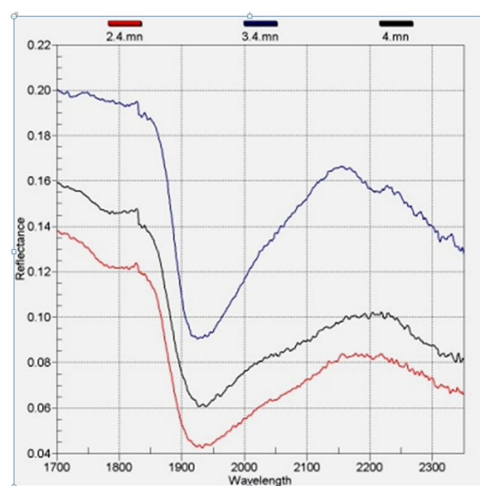
де  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  — величини коефіцієнтів відбиття для відповідних довжин хвиль, а довжини хвиль  $\lambda$  мають такі значення:  $\lambda_A = 1\,705$  нм,  $\lambda_B = 1\,729$  нм і  $\lambda_C = 1\,741$  нм. Локальний мінімум спектра на довжині хвилі  $\lambda_B = 1\,729$  нм повинен задовольнити умовам:

$$R_B < R_A \text{ та } R_B < R_C. \quad (2)$$

Якщо значення  $HI > 0$  і виконуються умови (2), то це є показником наявності нафти у ґрунті.

В залежності від субстрату (кальцієвий гравій, пісок, вапняк та ін.), на який наносились зразки вуглеводнів, та власне від різновидів нафти чи нафтопродуктів, ці специфічні прогини у спектрі відбиття можуть коливатись в незначному діапазоні поблизу зазначених довжин хвиль, про що свідчить публікація С. S. Allen, M. P. S. Krekeler [10].

Другою ознакою нафтозабруднених ґрунтів є вуглеводневий індекс *HD* (*Hydrocarbon Detection*), запропонований в роботах [22, 27] для локальних мінімумів спектрів відбиття в околі довжини хвилі 2 310 нм. Його значення має перевищувати одиницю. Співвідношення суми двох значень коефіцієнтів відбиття по обидва боки від даного локального мінімуму поглинання, поділене на подвійне його значення для довжини хвилі спектральної кривої в найнижчій точці цього проміжку, визначає величину індексу *HD* (рис. 4).



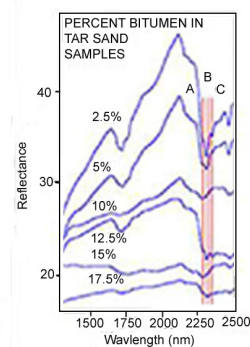
#### Hydrocarbon Detection

##### Three-Channel Spectral Ratio

A: Band 115 (2.297  $\mu$ m)  
B: Band 116 (2.313  $\mu$ m)  
C: Band 117 (2.329  $\mu$ m)

$$R = \frac{(A + C)}{2B}$$

$R > 1$  indicates potential hydrocarbons



**Рис. 4.** Схематичне зображення, яке демонструє приклад обчислення індексу *HD* [26]

$$HD = \frac{R_A + R_C}{2R_B}, \quad (3)$$

де  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$  — величини коефіцієнтів відбиття для відповідних довжин хвиль локального мінімуму поглинання в області поблизу 2 310 нм (рис. 4).

При цьому мають виконуватися умови:

$$R_B < R_C \text{ та } R_B < R_A. \quad (4)$$

Індекс  $HD$  дозволяє виявляти вуглеводні у досліджуваних субстратах. Для нафтонасиченого або забрудненого нафтою ґрунту значення  $HD > 1$ . Якщо ж  $HD \leq 1$  або  $HD > 1$ , але умова (4) не виконується, то ґрунт не містить нафтопродуктів.

Відомо, що адсорбційні характеристики вуглеводневих сполук з С-Н зв'язками проявляються в основному на довжинах хвиль 1 720–1 750 нм, 2 310–2 350 нм [13, 29]. Поглинання сильніше в діапазоні хвиль 2 310–2 350 нм, але тут існує перекриття з поглинанням інших мінералів (наприклад, кальциту). Як зазначає Q. Tian [29], наявність у спектрі відбиття двох піків поглинання — близько 1 748 і 2 330 нм — є діагностичною ознакою того, чи містить ґрунт нафтові вуглеводні.

Виходячи з вказаного, при аналізі спектрів відбиття нафтозабрудненого ґрунту біля Старосамбірського родовища, для двох вказаних діапазонів хвиль 1 720–1 750 та 2 310–2 350 нм, ми виявили локальні мінімуми поглинання, за якими далі розраховували вуглеводневі індекси  $HI$  та  $HD$ .

Спектрометрування ґрунту для обчислення вуглеводневих індексів  $HI$  та  $HD$  здійснювали 02 квітня 2018 р. через 10 днів після внесення сирової нафти на поверхню ґрунту біля свердловини у варіанти 3.2, 3.3 і 3.4. Зовнішній вигляд ємностей з ґрунтом після внесення сирової нафти подано на рис. 5. Через 10 днів вони дещо підсохли і їх поверхня посвітліла. Отримані результати спектрометрування наведено у табл. 3.

З табл. 3 випливає що для додатково забрудненого нафтою ґрунту ми одержали в середньому у 1.76

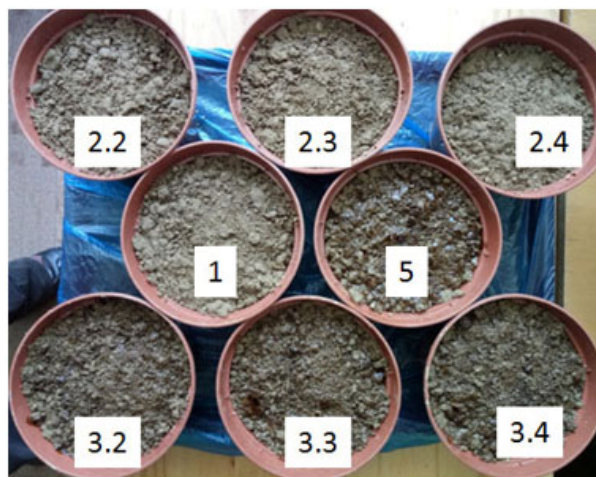


Рис. 5. Ємності з ґрунтом після внесення сирової нафти (22 березня 2018 р.)

Таблиця 3.

Значення гіперспектральних вуглеводневих індексів та необхідних для їх обчислення спектрометричних даних від 02.04.2018 р.

Параметри та значення вуглеводневих індексів	Варіанти з ґрунтом свердловини			Варіанти з ґрунтом свердловини та додатковим внесенням нафти		
	2.2	2.3	2.4	3.2	3.3	3.4.
Спектральний проміжок для визначення $HI$ (нм)	[1 741–1 756] $\lambda_A = 1 741$ нм $\lambda_C = 1 756$ нм	[1 745–1 751] $\lambda_A = 1 745$ нм $\lambda_C = 1 751$ нм	[1 737–1 751] $\lambda_A = 1 737$ нм $\lambda_C = 1 751$ нм	[1 715–1 742] $\lambda_A = 1 715$ нм $\lambda_C = 1 742$ нм	[1 718–1 745] $\lambda_A = 1 718$ нм $\lambda_C = 1 745$ нм	[1 721–1 746] $\lambda_A = 1 721$ нм $\lambda_C = 1 746$ нм
Довжина хвилі макс. значення абсорбції	1 747 нм $\lambda_B = 1 747$ нм	1 747 нм $\lambda_B = 1 747$ нм	1 747 нм $\lambda_B = 1 747$ нм	1 729 нм $\lambda_B = 1 729$ нм	1 730 нм $\lambda_B = 1 730$ нм	1 731 нм $\lambda_B = 1 731$ нм
Значення коефіцієнтів відбиття на довжинах $\lambda_A$ , $\lambda_B$ , $\lambda_C$	$R_A = 0.415608$ $R_B = 0.414847$ $R_C = 0.415586$	$R_A = 0.406427$ $R_B = 0.406010$ $R_C = 0.406192$	$R_A = 0.437815$ $R_B = 0.437088$ $R_C = 0.437392$	$R_A = 0.330838$ $R_B = 0.326835$ $R_C = 0.330148$	$R_A = 0.261178$ $R_B = 0.257825$ $R_C = 0.261370$	$R_A = 0.337523$ $R_B = 0.335186$ $R_C = 0.340315$
Значення $HI$	0.0008	0.0003	0.0004	0.004	0.004	0.0035
Середнє $HI \pm sd$	$0.5 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$			$3.8 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$		
Спектральний проміжок для визначення $HD$ (нм)	[2 328–2 342] $\lambda_A = 2 328$ нм $\lambda_C = 2 342$ нм	[2 330–2 343] $\lambda_A = 2 330$ нм $\lambda_C = 2 343$ нм	[2 328–2 343] $\lambda_A = 2 328$ нм $\lambda_C = 2 343$ нм	[2 330–2 342] $\lambda_A = 2 330$ нм $\lambda_C = 2 342$ нм	[2 325–2 339] $\lambda_A = 2 325$ нм $\lambda_C = 2 339$ нм	[2 332–2 341] $\lambda_A = 2 332$ нм $\lambda_C = 2 341$ нм
Довжина хвилі макс. значення абсорбції	2 338 нм $\lambda_B = 2 338$ нм	2 339 нм $\lambda_B = 2 339$ нм	2 339 нм $\lambda_B = 2 339$ нм	2 338 нм $\lambda_B = 2 338$ нм	2 337 нм $\lambda_B = 2 337$ нм	2 337 нм $\lambda_B = 2 337$ нм
Значення спектр. коеф. відбиття на довжинах $\lambda_A$ , $\lambda_B$ , $\lambda_C$	$R_A = 0.375392$ $R_B = 0.366728$ $R_C = 0.370119$	$R_A = 0.370327$ $R_B = 0.363609$ $R_C = 0.364911$	$R_A = 0.397291$ $R_B = 0.389156$ $R_C = 0.392323$	$R_A = 0.274383$ $R_B = 0.269225$ $R_C = 0.271190$	$R_A = 0.205362$ $R_B = 0.197229$ $R_C = 0.198907$	$R_A = 0.286477$ $R_B = 0.280989$ $R_C = 0.281499$
Значення $HD$	1.016	1.012	1.014	1.013	1.025	1.011
Середнє $HD \pm sd$	$1.014 \pm 0.0016$			$1.016 \pm 0.0062$		

разів ширші проміжки зон абсорбції нафти при вирахуванні індексу  $HI$  (26 нм для варіантів 3.2–3.4 проти 15 нм для варіантів 2.2–2.4). Водночас ширина спектрального проміжку для обчислення індексу  $HD$  майже не змінювалась (фіксуємо лише незначне зменшення в середньому близько 2 нм для варіантів 3.2–3.4), незважаючи на додаткову присутність на поверхні горщиків 3.2–3.4 нафтової плівки.

Середнє значення локальних мінімумів спектрів відбиття у діапазоні хвиль 1 720–1 750 нм у варіантах 2.2–2.4 з ґрунтом біля свердловини має значення  $\lambda_B = 1\,747$  нм, а для варіантів з додатковим внесенням нафти становить  $\lambda_B = 1\,730$  нм, тобто чітко відповідає значенню адсорбції вуглеводневих сполук [11, 13]. Отже, значення  $HI$  для ємностей 3.2–3.4 на порядок вищі, ніж для ємностей 2.2–2.4, хоча за абсолютними значеннями вони дуже незначні. Для нас важливо, що всі отримані значення індексу  $HI > 0$ , а також виконується умова (2), що свідчить про наявність нафтового забруднення в усіх досліджених ємностях.

На відміну від індексу  $HI$ , індекс  $HD$  близький за значеннями у всіх проаналізованих субстратах незалежно від додаткового внесення сирої нафти. Значення локального мінімуму при його розрахунку теж мало відрізнялись: для ґрунту свердловини становили 2 339 нм, а для ґрунту з додаванням нафти — 2 337 нм. Оскільки для кожного варіанту індекс  $> 1$  і умова (4) виконується, то і за цим індексом спектрометричне дослідження ґрунтів дозволило виявити в ґрунтах присутність нафтопродуктів.

Цією роботою ми підтвердили, що вуглеводневі індекси, отримані в лабораторних умовах, на підставі спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR нафтовмісних ґрунтів Старосамбірського родовища, набувають значень  $HI > 0$  і  $HD > 1$ , з дотриманням умов наявності локальних мінімумів на довжинах хвиль 1 720–1 750 нм, 2 310–2 350 нм у спектрах відбиття ґрунтового середовища і можуть слугувати індикаторами нафтовмісних та забруднених нафтою ґрунтів без рослинного покриття.

#### *Вивчення вегетаційних індексів ярих зернових культур, вирощених на нафтовмісному ґрунті Старосамбірського родовища*

Вегетаційні індекси (BI) — це комбінації вимірювань коефіцієнтів відбиття світла у різних спектральних діапазонах, чутливі до комбінованого впливу концентрації хлорофілу в листках, площі поверхні листків, їх скупчення (агрегації) та архітекtonіки рослинного покриття [14–17, 23, 26, 28,]. Підбір довжин хвиль при розрахунках BI здійснюється таким чином, щоб забезпечити показники загальної кількості та якості фотосинтетичного матеріалу в рослинах, що є необхідним для оцінки стану рослинності. Для обчислення 7 коефіцієнтів відбиття

отримано за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR Центру колективного користування спектрометричними приладами ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”.

Основним припущенням для розробки і використання BI для дослідження надземної частини рослин є те, що алгебраїчні поєднання дистанційно-зареєстрованих коефіцієнтів відбиття у різних спектральних смугах можуть виявити цінну інформацію. Зокрема, інформацію про структуру рослинного покриття, стан рослинності, фотосинтетичний потенціал, щільність листків і вміст в них води, реакцію на зміни рівнів мінерального живлення, ураження збудниками хвороб або пошкодження їх шкідниками чи несприятливими кліматичними умовами [19]. Найбільш відомим BI є нормалізований різницевий вегетаційний індекс рослинності  $NDVI$  (*Normalized Difference Vegetation Index*). Даний індекс розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}. \quad (5)$$

Найперше повідомлення про використання  $NDVI$  було зроблене ще у 1973 році у спільній роботі директора Центру дистанційного зондування при Техаському університеті Джона Роуза та його співробітників Дональда Діринга, Роберта Хааса та математика Джона Шелла, які досліджували Великі Рівнини США за допомогою спектральних сигналів супутника Earth Resources Technology Satellite, згодом перейменованого в Landsat-1 [26].

З того часу, незважаючи на величезну кількість запропонованих інших BI (наприклад, див. базу даних понад 500 BI на сайті <http://www.indexdatabase.de>),  $NDVI$  є найуспішнішим для простого і швидкого визначення ділянок, вкритих рослинністю завдяки різному їх відображенню в червоному і ближньому інфрачервоному (БІЧ) каналах. Переважно цей індекс розраховується з використанням коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль червоного діапазону — від 620 до 700 нм (близько 670 нм) і БІЧ (близько 800 нм).

Індекс рослинності з корекцією на ґрунт (*Soil-Adjusted Vegetation Index, SAVI*) — це аналогічний до  $NDVI$  вегетаційний індекс, який мінімізує вплив відбиття ґрунтового субстрату за допомогою коефіцієнта корекції яскравості ґрунту [18]. Він часто використовується там, де наявне рослинне покриття трав'янисте або взагалі розріджене, а не представлене чагарниковою чи деревною рослинністю.

$$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L). \quad (6)$$

Щоб охопити частину червоного краю кривої відбиття більшість з BI використовують інтен-



сивність відбиття у діапазонах червоного та БІЧ випромінювання. Червоний край спектра (між 690 та 780 нм) застосовується для опису круто-похилої частини кривої відбиття світла рослинністю, що зумовлена переходом від поглинання хлорофілу до розсіювання листками БІЧ випромінювання (рис. 6). Використання БІЧ вимірювання, яке має значно більшу глибину проникнення крізь покрив, ніж червоні довжини хвиль, дозволяє оцінити загальну кількість хлорофіловмісного рослинного матеріалу.

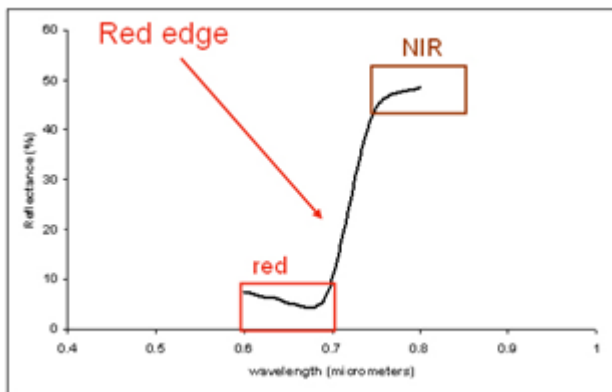


Рис. 6. Місце “червоного краю” в спектрі відбиття рослинності. [http://www.eumetrain.org/data/3/36/flash/36.jpg]

В зоні червоного краю спектри відбиття рослин характеризуються високими значеннями коефіцієнтів відбиття та різкою швидкістю зростання цих показників [14]. Величина швидкості зміни різна і залежить від типу та стану рослинного покриву [20, 30]. Особливо важлива тут довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектра максимальна. Ця точка називається позицією червоного краю — надалі *REP* (*Red Edge Position*) — і належить до вегетаційних індексів червоного краю, які можна визначати за гіперспектральними даними дистанційного зондування [17]. Цей індекс залежить від сумарного вмісту хлорофілу, який є показником функціонального стану рослин.

$$REP = 701 + 41 \frac{(\bar{R} - R(701))}{(R(742) - R(701))}, \quad \bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2} \quad (7)$$

Підвищена концентрація хлорофілу переміщує позицію червоного краю до довших довжин хвиль.

Другим індексом, що характеризує вміст хлорофілу в рослинному покриві, є *TCI* (*terrestrial chlorophyll index*), який вперше визначено англійськими вченими [14] для даних сенсора MERIS як мерісівський наземний хлорофільний індекс *MTCI* (*MERIS terrestrial chlorophyll index*).

$$TCI = \frac{R(754) - R(708)}{R(708) - R(681)} \quad (8)$$

Крім зони червоного краю для розрахунку ВІ залучають й відбиття в зеленій області спектру, яка є чутливою до змін листового індексу [16]. Запропонований А. Gitelson et al. [15] так званий зелений *NDVI* (*green NDVI*, *GrNDVI*) має ширший динамічний діапазон, ніж класичний *NDVI*, і майже в 5 разів чутливіший до концентрації хлорофілу в рослинному покриві. Відбиття рослинності в зеленій області спектра використали С. J. Strong et al. [28] для обчислення п'яти різних ВІ та порівняння їх з найпоширенішим *NDVI* на матеріалі, отриманому з мультиспектральної камери безпілотної літальної апаратури при вивченні пасовищ південно-східної Англії. В їх дослідженні вдосконалений індекс нормованої різниці, який розраховується із застосуванням трьох спектральних смуг (БІЧ, зеленої та синьої), був найефективнішим показником при диференціації трьох типів пасовищ.

У нашому випадку при розрахунку індексу *GrNDVI* замість БІЧ діапазону було використано відбиття в зоні червоного краю, а також замінено відбиття в червоній частині спектра на його зелений діапазон. Спосіб розрахунку аналогічний відомому *NDVI*.

$$GrNDVI = \frac{R(740) - R(560)}{R(740) + R(560)} \quad (9)$$

За отриманими даними спектрометрування було розраховано значення цих індексів та наведено їх короткий опис в залежності від типу субстрату та вирощуваної культури.

Нами виконано спектрометрування для п'яти дат вирощування рослин. Але через відсутність даних про вміст хлорофілу на ранніх етапах розвитку рослин далі подаються графіки зміни індексів за чотирма датами (17 і 24 квітня, коли спостерігався інтенсивний приріст біомаси; 03 травня, коли її темпи сповільнились; 17 травня, коли ріст рослин припинився).

В проведеному дослідженні величина *NDVI* коливається впродовж періоду вирощування для кукурудзи між 0.5–0.9 умовних одиниць, 0.4–0.8 умовних одиниць — для ярої пшениці та 0.2–0.8 умовних одиниць — для ярого ячменю (рис. 7). Отже, значних відмінностей між зерновими за цим показником немає. Виняток становить лише різке падіння у ярого ячменю наприкінці досліджу.

Закономірне його зростання за перші два тижні вирощування спостерігалось для всіх варіантів субстрату лише у ярої пшениці. Ячмінь та кукурудза демонструють це у варіантах з ґрунтом свердловини, в тому числі й додатково забрудненому нафтою. Цим культурам на незабрудненому ґрунті властиве падіння *NDVI* впродовж часу проведення досліджу. Більш яскраво падіння *NDVI* виражене у ячменю (від 0.7 до 0.2 умовних одиниць).

В нашому досліді величина індексу *SAVI* (6) коливалась від 0.3–0.4 до 0.6 умовних одиниць для всіх

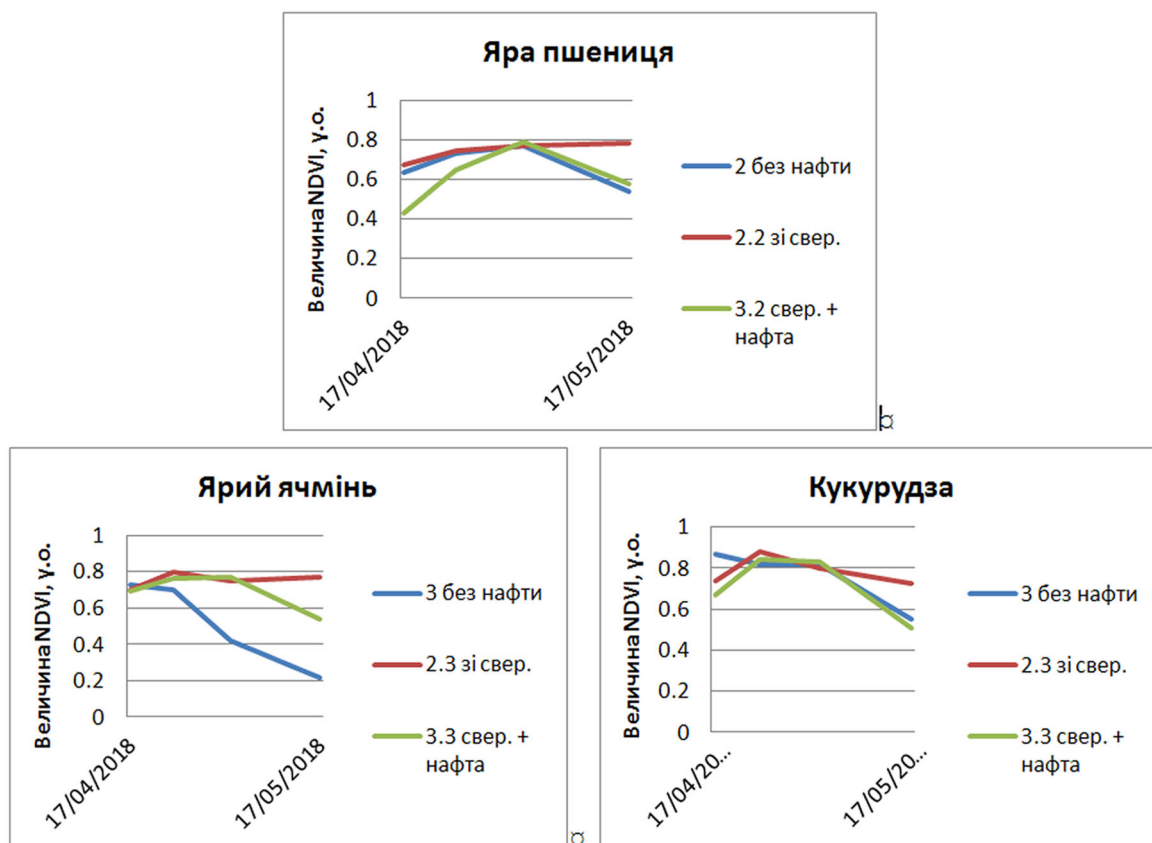


Рис. 7. Динаміка зміни індексу NDVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади

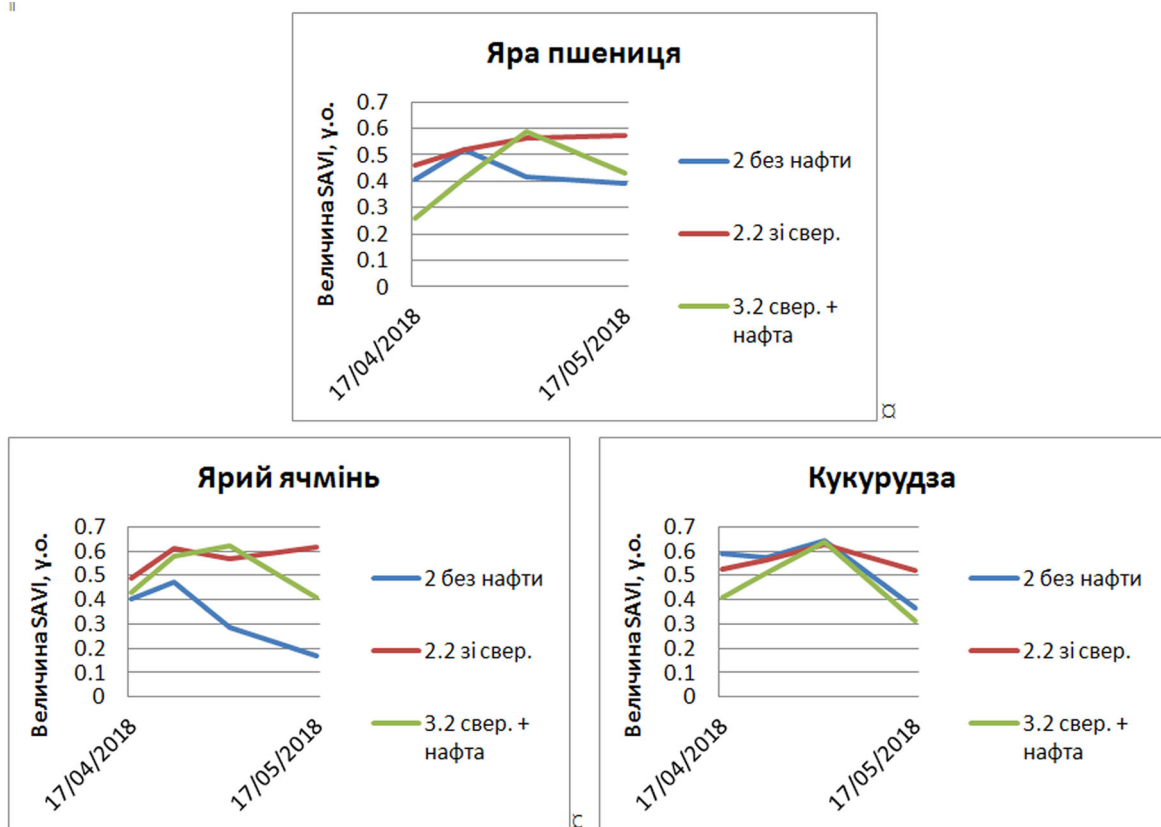


Рис. 8. Динаміка зміни індексу SAVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади

видів зернових (рис. 8). Лише у ячменю на субстраті без нафти (17 травня) *SAVI* знизився до рівня 0.17 умовних одиниць. Приріст цього індексу за перші тижні вирощування спостерігався для всіх варіантів субстрату не лише у ярої пшениці, а й для кукурудзи у двох варіантах на свердловинному ґрунті (з нафтою і без нафти) та ячменю на ґрунті з-під свердловини з додатковим внесенням нафти. Додаткове внесення нафти несприятливо діє на досліджені культури, про що свідчать (у порівнянні з іншими субстратами) найнижчі величини цього індексу впродовж усього періоду вирощування. Виняток становить лише значення індексу *SAVI* для ярого ячменю від 03 травня. Ячмінь за цей період демонструє найнижчі значення індексу *SAVI* на ґрунті для розсади.

При зіставленні значень індексу *TCI* для різних видів рослин видно (рис. 9), що його значення впродовж квітня—початку травня у кукурудзи майже вдвічі вище, ніж у ячменю та пшениці (відповідно 2.2 проти 0.9 чи 1.2 умовних одиниць). Це, вірогідно, спричинене різним вмістом хлорофілу в листках досліджених культур або різною кількістю хлорофілних шарів, які потрапляли в поле зору об'єктива під час спектрометрування.

У динаміці індекс *TCI* проявляє характерне підвищення через тиждень після вирощування для пшениці та кукурудзи на всіх субстратах, а для ячменю —

лише для ґрунту біля свердловини. В нашому досліді зафіксоване постійне падіння індексу *TCI* ярого ячменю на ґрунті для розсади, і максимальне значення (1.14 умовних одиниць) цього індексу на субстраті з додатковим внесенням нафти (3 травня). В наступні два тижні травня значення індексу *TCI* для більшості варіантів закономірно падало, за винятком ячменю на ґрунті свердловини. Додаткове внесення нафти формувало найнижчі показники *TCI* для кукурудзи та ярої пшениці, а у випадку ячменю найнижчі значення індексу *TCI* виявлено на ґрунті для розсади.

Так само як і індекс *TCI*, індекс *GrNDVI* засвідчує вищі (на 0.2 умовних одиниць) значення для кукурудзи, у порівнянні з пшеницею та ячменем, упродовж усього періоду вирощування (рис. 10). Цей індекс не демонструє значних часових коливань в залежності від субстрату для кожного виду рослин. За перший тиждень вирощування зростають на 0.13 умовних одиниць показники індексу *GrNDVI* кукурудзи на ґрунті свердловини. Через два тижні на субстраті з додатковим внесенням нафти спостерігається ріст індексу (на 0.07 умовних одиниць) у ярого ячменю. В травні відбувається зниження значень *GrNDVI* майже для всіх варіантів за винятком ярого ячменю на ґрунті свердловини.

У перший тиждень вегетації індекс *REP* зростає для трьох досліджених культур лише на ґрунті свер-

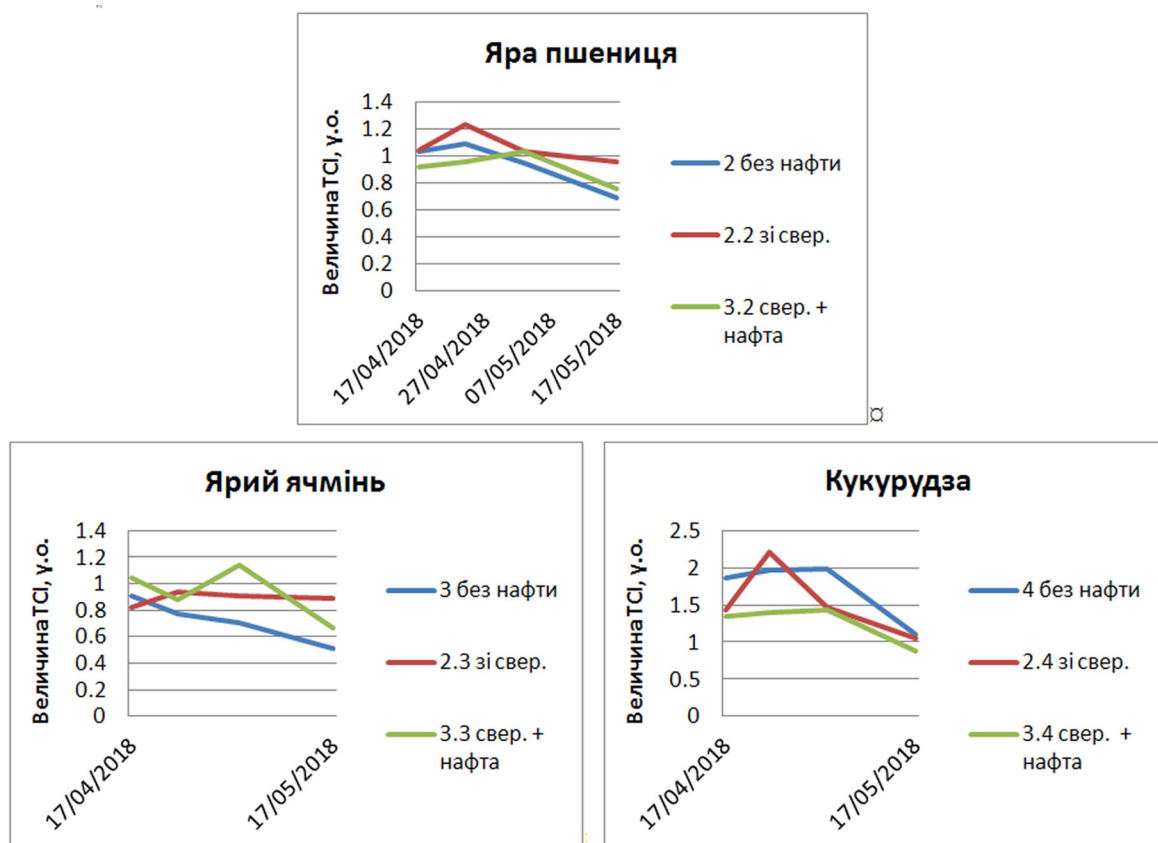
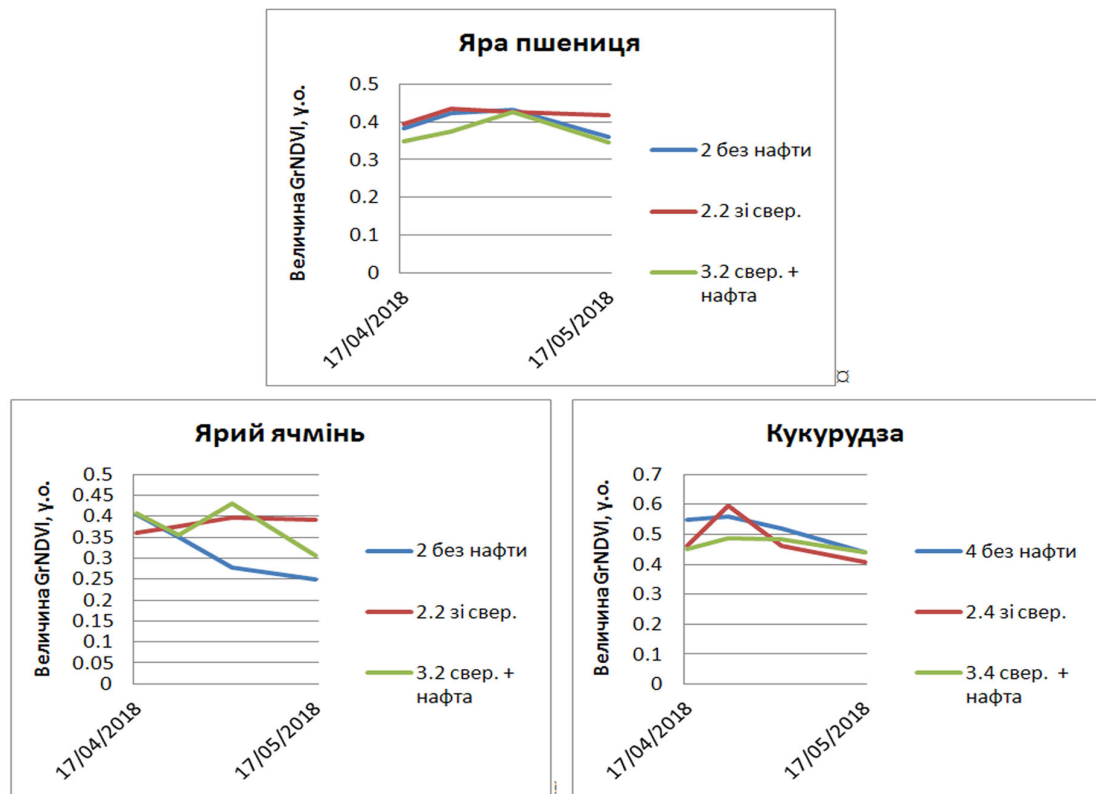


Рис. 9. Динаміка зміни величини *TCI* ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади



**Рис. 10.** Динаміка зміни величини GrNDVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади

дловини, причому найбільш помітно (на 4 нм) для рослин кукурудзи у варіанті 2.4 (рис. 11). Це може бути викликане передусім вищим вмістом хлорофілу в листках цієї культури, які потрапили в поле зору об'єктива. В цілому, значення індексу *REP* на початку дослідження у кукурудзи вищі (714–717 нм), ніж такі і у ячменю (709–711 нм) та пшениці (711–712 нм). Найстрімкіше зниження властиве ячменю на ґрунті для розсади (до 696 нм) і менш стрімке на ґрунті біля свердловини із внесенням нафти. В період між 24.04 та 17.05. 2018 ячмінь та пшениця мали найвищі значення цього індексу у варіанті “ґрунт біля свердловини”. Наприкінці дослідження варіант субстрату з внесенням нафти здебільшого мав нижчі значення *REP* у порівнянні з ґрунтом біля свердловини для всіх видів рослин, тобто ґрунт свердловини, незважаючи на свій рівень токсичності, у нашому дослідженні виявився придатним субстратом для вирощування рослин.

#### Накопичені значення VI

Як відомо, накопичені значення індексу *NDVI* здавна використовуються для опису поведінки посівів упродовж певного часу з метою прогнозу їх урожайності або у рівняннях для оцінки первинної продуктивності рослинного покриву [24, 25]. Для цього підсумовуються значення *NDVI*, отримані з дистанційних джерел, за певний проміжок часу, що

відповідає або міжфазним періодам, або важливим для агротехніки конкретної культури інтервалам між строками внесення добрив, поливами тощо. На підставі цього нами були розраховані накопичені значення отриманих VI індексів, які вимірюються в умовних одиницях за період від 17 квітня до 17 травня 2018 р. (рис. 12–15). На рис. 12, 13 видно, що акумульовані за період вирощування індекси *NDVI* та *SAVI* для всіх трьох культур найвищих значень набувають для ґрунту свердловини. Така ж закономірність спостерігається для індексу *GrNDVI* дрібно зернових культур та індексу *TCI* ярої пшениці. Накопичені значення індексів *TCI* та *GrNDVI* кукурудзи свідчать про несприятливий вплив додаткових доз нафти на ці культури, який опосередковано проявляється у реакції зниження вмісту хлорофілу в рослинах. Це було виявлено в біохімічній лабораторії Львівського національного університету імені Івана Франка. Так само співвідношення між нагромадженим індексом *TCI* ярого ячменю на різних варіантах субстратів узгоджується з лабораторно визначеною концентрацією сумарного вмісту хлорофілів *a* і *b*. Але на протигагу ярої пшениці та кукурудзи додаткове внесення нафти не чинить негативного впливу на накопичений індекс *TCI* ярого ячменю.

Загалом, яра пшениця за умов зростання на ґрунті свердловини демонструє найвищі значення всіх VI впродовж періоду вирощування. Додаткове внесен-



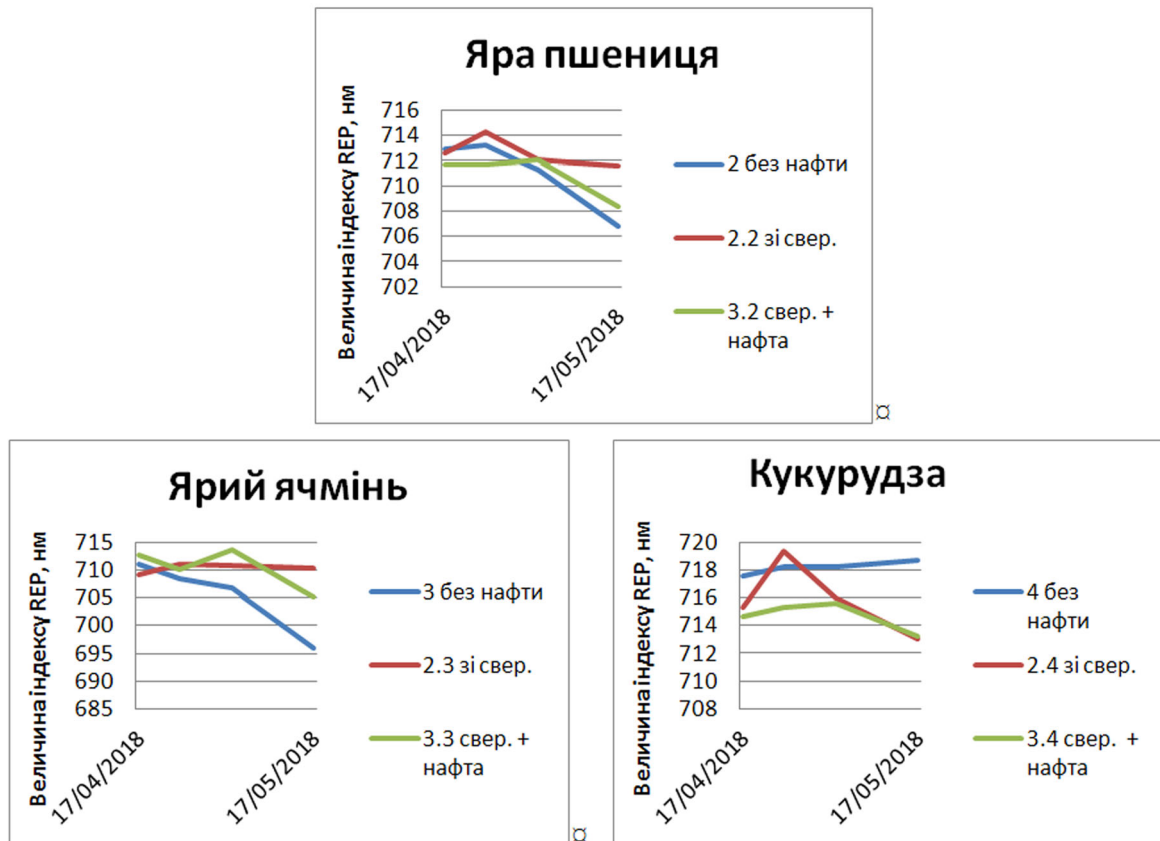


Рис. 11. Динаміка зміни індексу REP ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади

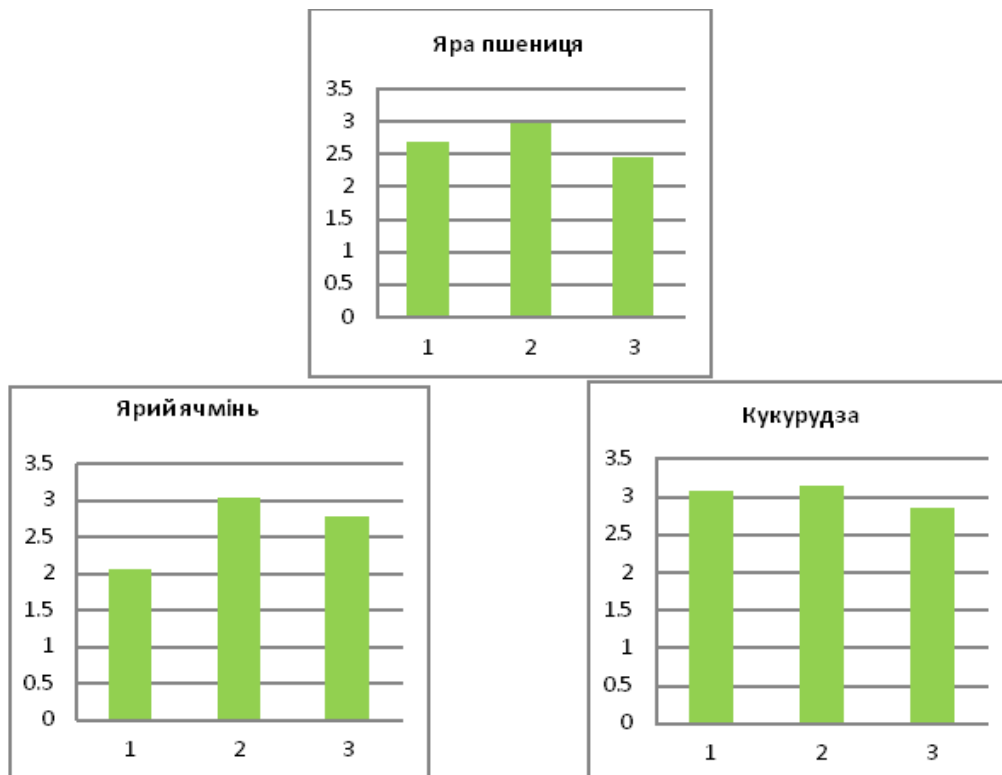
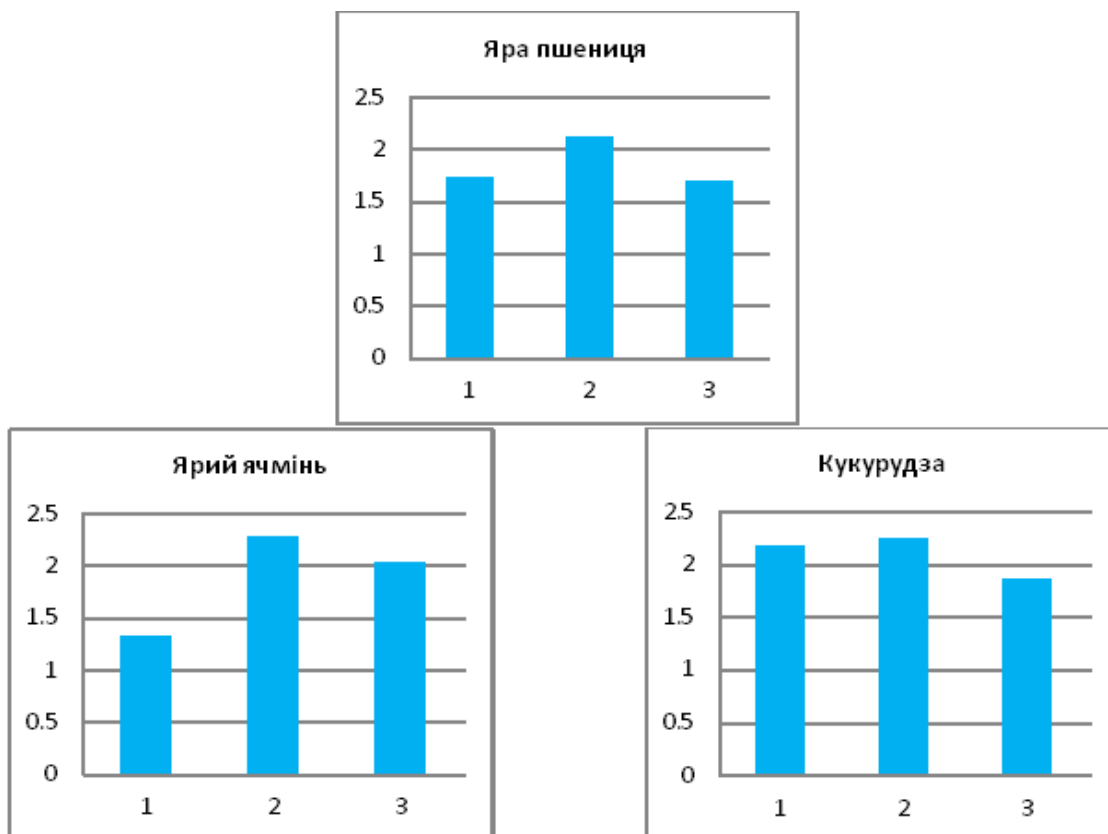
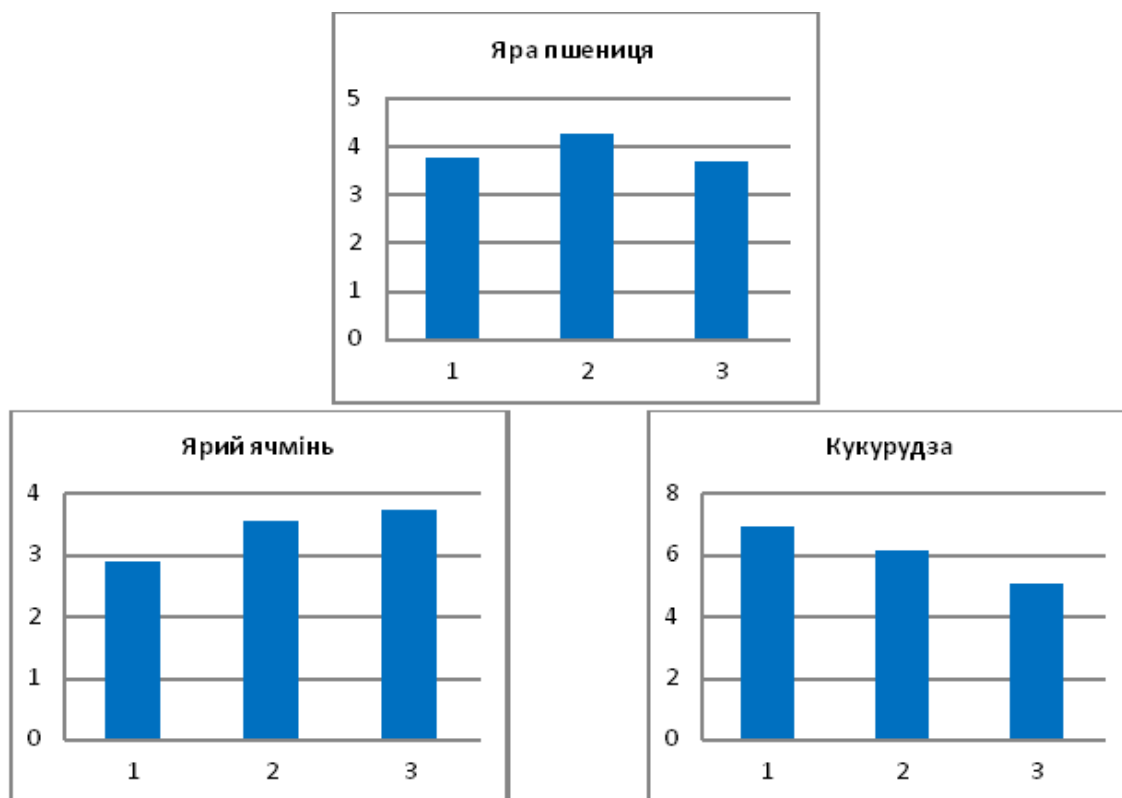


Рис. 12. Діаграма накопичених значень індексу NDVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади (від 17 квітня до 17 травня 2018 р.)

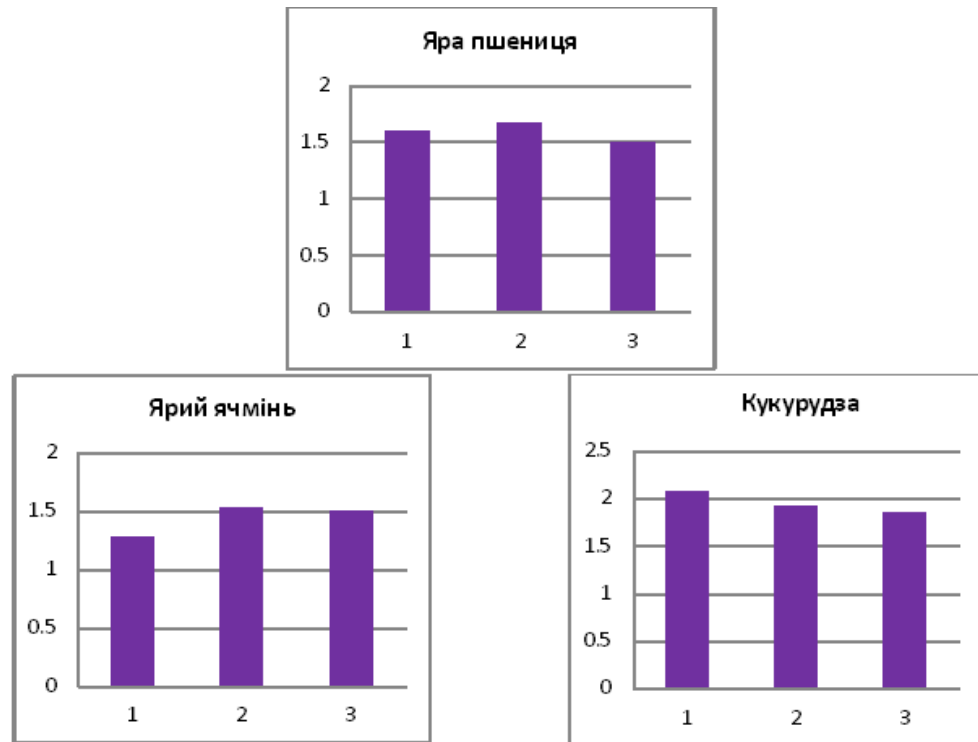
Тут і на рис. 13–15: 1 — ґрунт без нафти, 2 — ґрунт біля свердловини, 3 — ґрунт біля свердловини + нафта



**Рис.13.** Діаграма накопичених значень індексу SAVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади (від 17 квітня до 17 травня 2018 р.)



**Рис.14.** Діаграма накопичених значень індексу TCI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади (від 17 квітня до 17 травня 2018 р.)



**Рис.15.** Діаграма накопичених значень індексу GrNDVI ярих культур на нафтозабрудненому ґрунті і ґрунті для розсади (від 17 квітня до 17 травня 2018 р.)

ня нафти знижує значення ВІ у порівнянні з ґрунтом біля свердловини. Вирощування ярої пшениці на субстраті без нафти призводить до найнижчих значень ВІ у травні, коли відбуваються процеси сповільнення росту рослин.

Для ярого ячменю на ґрунті для розсади властиве падіння значень ВІ впродовж періоду вирощування. Особливо це стосується індексів, одержаних за коефіцієнтами відбиття в області червоного краю спектру. Зростання ячменю на ґрунті свердловини не супроводжується значними змінами ВІ, а додаткове внесення нафти знижує їх показники, особливо у травні.

Кукурудза на ґрунті для розсади має найвищі значення всіх ВІ на початку дослідів, а наприкінці дослідів найвищі значення досягаються для тих індексів, які обчислювались за коефіцієнтами відбиття в області червоного краю спектра. Їх значення досить різко підвищуються 24 квітня (наприклад, *REP* на 4 нм), але згодом (через тиждень) повертаються до значень, зафіксованих на початку дослідів. Додаткове внесення нафти знижує показники ВІ впродовж періоду вирощування, за винятком значень індексів *GrNDVI* в травні наприкінці дослідів.

Таким чином, наше дослідження дало можливість виявити відмінності у величині індексів (*TCI*, *GrNDVI* та *REP*) для кукурудзи та інших ярих дрібнозернових культур. Одержані результати підтвердили несприятливий вплив надлишкової дози нафти (10 г/кг) на всі досліджені зернові, що відобразилось у зниженні показників вегетаційних індексів.

## Висновки

1. Вуглеводневі індекси, отримані в лабораторних умовах на підставі спектрометрування приладом ASD FieldSpec® 3FR нафтовмісних ґрунтів Старосамбірського нафтового родовища, набувають значень  $HI > 0$  та  $HD > 1$  з дотриманням умов наявності локальних мінімумів на довжинах хвиль 1 720–1 750 нм, 2 310–2 350 нм у спектрах відбиття ґрунтового середовища і можуть слугувати індикаторами нафтовмісних та забруднених нафтою ґрунтів без рослинного покриття.
2. Гіперспектральні ВІ із залученням коефіцієнтів відбиття в зоні червоного краю спектра (*TCI*, *GrNDVI* та *REP*) є вищими за значенням для кукурудзи, у порівнянні з такими ж інших ярих дрібнозернових культур.
3. Внесення додаткової дози нафти до нафтозабрудненого ґрунту біля свердловини Старосамбірського нафтового родовища призводить в кінцевому підсумку до зниження величин описаних ВІ кожної дослідженої ярої культури.
4. Накопичені значення *GrNDVI* для кукурудзи та *TCI* для кукурудзи й ярого ячменю є тотожними до лабораторно визначеного вмісту хлорофілу в цих культурах (за співвідношенням між субстратами вирощування).
5. Для подальшого розвитку дистанційного вивчення нафтозабруднених ґрунтів та їх впливу на рослинність доцільно удосконалити методику проведення спектрометрування, локалізуювши на по-

верхні субстрату ділянки, які знімаються регулярно впродовж часу дослідження, і збільшити періодичність знімання для кожної ємності з рослинами.

## Література

- ГОСТ 17.1.4.01-80. Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах. Москва, 1983. 2 с.
- Джура Н., Цвілінюк О., Терек О. Реакції осоки шершавої на нафтове забруднення. *Вісн. Львів. Уні-ту. Сер. біол.* 2006. Вип. 42. С. 142–146.
- Джура Н. М. Можливості використання рослинних тест-систем для біомоніторингу нафтозабруднених ґрунтів. *Біологічні Студії (Studia Biologica)*. 2011. Т. 5. № 3. С. 183–196.
- Джура Н., Подан І. Екологічні наслідки довготривалого нафтовидобутку на Старосамбірському родовищі Львівської області. *Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол.* 2017. Вип. 76. С. 120–127.
- Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М., Дугін С. С. Гіперспектральні індекси для розрізнення нафтонасичених ґрунтів за даними дистанційного спектрометрування. *Геол. журн.* 2015. № 4. С. 105–112 (353).
- Назаров А. В. Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения. *Вест. Перм. ун-та. Биол.* 2007. Вип. 5 (10). С. 134–141.
- Петросян А. Г., Дятлов С. Є., Тарасенко А. О., Дятлова О. С. Біотестування як метод експрес-оцінки токсичності ґрунтів. *Вісник Одеського національного університету*. 2002. Вип. 7. № 1. С. 139–145.
- Терек О. І. Ріст рослин: навч. посібник. Львів: Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2007. 247 с.
- Шанда В. І., Шанда Л. В. Ґрунт як середовище взаємодії рослин. *Ґрунтознавство*. 2009. Т. 10 (1–2). С. 14–22.
- Allen C. S., Krekeler M. P. S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. *Proc. SPIE 7687, Active and Passive Signatures, 76870L* (4 May 2010). URL: <https://doi.org/10.1117/12.852200>
- Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., Tarchi D. Hyperspectral Analysis of Oil and Oil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes, ISSN 1018-5593, EU Commission Directorate-General JRC Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2007, Italy . URL: [https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI\\_for\\_Oil\\_and\\_Spills-2007.pdf](https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf).
- Arellano P., Tansey K., Balzter H., Boyd D. S. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 205. P. 225–239. DOI:10.1016/j.envpol.2015.05.041.
- Cloutis E. A. Spectral Reflectance Properties of Hydrocarbons: Remote-Sensing Implications. *Science*. 1989. Vol. 245. №. 4914. P. 165–168.
- Dash J., Curran P. J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. P. 5403–5413. URL: <http://www.informaworld.com/smpp/>.
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, № 3. P. 289–298.
- Herrmann I., Pimstein A. A., Karnieli Y., Cohen V., Alchanatis D., Bonfil J. LAI assessment of wheat and potato crops by VENUS and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. № 8. P. 2141–2151.
- Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. Journal of Remote Sensing*. 1983. Vol. 4. P. 273–288.
- Huete A. R. A modified soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25. №1. P. 295–309.
- Jensen J. R. Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective: 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 2007. 592 p.
- Kiang N. Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R. E. Spectral signatures of photosynthesis. I. *Review of Earth organisms. Astrobiology*. 2007. Vol. 7. № 1. P. 222–251.
- Khn F., Oppermann K., Hrig B. Hydrocarbon index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *Int. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25. № 12. P. 2467–2473.
- Li L., Ustin S. L., Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico. *Remote Sens. Environ.* 2005. V 94. № 1. P. 1–16.
- Noomen M. F., van der Meer F. D., Skidmore A. K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. *Global monitoring for sustainability and security: Proc. of the 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment (Saint-Petersburg, 20–24 June 2005)*. Saint-Petersburg, 2005. P. 4.
- Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Int. J. Remote Sensing*. 1991. Vol. 6. No. 7. P. 1313–1330.
- Rasmussen, M. S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter annual variability. *Int. J. Remote Sensing*. 1996. Vol. 18. No. 5. P. 1059–1077.
- Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC* 1978-1, 1973. 93 p.
- Short N. M., Bolton J. NASA Remote Sensing Tutorial, 2006. URL: [http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect5/Sect5\\_5.html](http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect5/Sect5_5.html).
- Strong C. J., Burnside N. G., Llewellyn D. The potential of small-Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index. *PLoS ONE*. 2017. № 12 (10). P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186193>.
- Tian Q. Study on Oil-Gas Reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing // XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. Vol. XXXIX-B7. P. 157–162. URL: <https://www.int->



arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B7/157/2012/isprsarchives-XXXIX-B7-157-2012.pdf.

30. Ustin S. L., Gitelson A. A., Jacquemoud S., Schaepman M., Asner G. P., Gamon J.A., Zarco-Tejada P. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113, Supplement 1 (Imaging Spectroscopy Special Issue). P. S67–S77.

## References

1. GOST 17.1.4.01-80 (1983). General requirements for methods for the determination of petroleum products in natural and waste waters. Moscow. (in Russian).
2. Jura N., Tsvilinuk O., Terek O. (2006) Reactions of sedge rough to oil pollution. *Visn. Ljviv. Uni-tu. Ser. biol.*, no. 42, pp. 142–146. (in Ukrainian).
3. Jura N. M. (2011). Possibilities of using plant test systems for biomonitoring of oil-contaminated soils. *Biologichni Studiji (Studia Biologica)*, vol. 5, no. 3, pp. 183–196. (in Ukrainian).
4. Jura N., Podan I. (2017). Environmental Impacts of Long-Term Oil Production on the Starosambirskoye Field of Lviv Oblast. *Visn. Ljviv. Uni-tu. Ser. biol.*, vol. 76, pp. 120–127. (in Ukrainian).
5. Lyalko V. I., Shportuk Z. M., Sibirtseva O. M., Dugin S. S. (2015). Hyperspectral indices for differentiation of oil-saturated soils according to the data of remote spectrometry. *Geol. zburn.*, no. 4 (353), pp. 105–112. (in Ukrainian).
6. Nazarov A.V. (2007). Influence of oil pollution of soil on plants. *Vest. Perm. un-ta. Biol.*, no. 5 (10), pp. 134–141. (in Russian).
7. Petrosyan A. G., Dyatlov S. E., Tarasenko A. O., Dyatlova O. S. (2002). Bioteasing as a method for express evaluation of soil toxicity. *Visnyk Odeskogo nacionalnoho universytetu*, vol. 7, no. 1, pp. 139–145. (in Ukrainian).
8. Terek O. I. (2007) Plant growth: teach. manual. Lviv: View. Center of LNU Ivan Franko, 247 p. (in Ukrainian).
9. Shanda V. I., Shanda L. V. (2009). Soil as an environment for plant interactions. *Gruntoznavstvo*, vol. 10 (1–2), pp. 14–22.
10. Allen C. S., Krekeler M. P. S. Reflectance spectra of crude oils and refined petroleum products on a variety of common substrates. *Proc. SPIE 7687, Active and Passive Signatures, 76870L*, (4 May 2010). URL: <https://doi.org/10.1117/12.852200>.
11. Andreoli G., Bulgarelli B., Hosgood B., Tarchi D. Hyperspectral Analysis of Oil and Oil-Impacted Soils for Remote Sensing Purposes, ISSN 1018-5593, EU Commission Directorate-General JRC Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2007, Italy . URL: [https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI\\_for\\_Oil\\_and\\_Spills-2007.pdf](https://www.ugpti.org/smartse/research/citations/downloads/Andreoli-HSI_for_Oil_and_Spills-2007.pdf).
12. Arellano P., Tansey K., Balzter H. Boyd D.S. Detecting the effects of hydrocarbon pollution in the Amazon forest using hyperspectral satellite images. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 205. pp. 225–239. DOI:10.1016/j.envpol.2015.05.041.
13. Cloutis E. A. Spectral Reflectance Properties of Hydrocarbons: Remote-Sensing Implications. *Science*. 1989. Vol. 245, no 4914. pp. 165–168.
14. Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2004. Vol. 25. pp. 5403–5413. URL: <http://www.informaworld.com/smpp/>.
15. Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 1996. Vol. 58, no. 3. pp. 289–298.
16. Herrmann I., Pimstein A. A., Karnieli Y., Cohen V., Alchanatis D., Bonfil J. LAI assessment of wheat and potato crops by VENUS and Sentinel-2 bands. *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115, no 8. pp. 2141–2151.
17. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. Journal of Remote Sensing*. 1983. Vol. 4. pp. 273–288.
18. Huete A. R. A modified soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25, no. 1. pp. 295–309.
19. Jensen J. R. Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective: 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, Inc., 2007. 592 p.
20. Kiang N. Y., Siefert J., Govindjee, Blankenship R. E. Spectral signatures of photosynthesis. I. Review of Earth organisms. *Astrobiology*. 2007. Vol. 7, no. 1. pp. 222–251.
21. K hn F., Oppermann K., H rig B. Hydrocarbon index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. *Int. J. Remote Sensing*. 2004. V. 25, no. 12. pp. 2467–2473.
22. Li L., Ustin S. L., Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico. *Remote Sens. Environ.* 2005. V 94, no. 1. pp. 1–16.
23. Noomen M. F., van der Meer F. D., Skidmore A. K. Hyperspectral remote sensing for detecting the effects of three hydrocarbon gases on maize reflectance. *Global monitoring for sustainability and security: Proc. of the 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment (Saint-Petersburg, 20–24 June 2005)*. Saint-Petersburg, 2005. pp. 4.
24. Prince S. D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *Int. J. Remote Sensing*. 1991. Vol. 6, no. 7. pp. 1313–1330.
25. Rasmussen, M. S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter annual variability. *Int. J. Remote Sensing*. 1996. Vol. 18, no. 5. pp. 1059–1077.
26. Rouse J. W., Jr., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC* 1978-1, 1973. 93 p.
27. Short N. M., Bolton J. NASA Remote Sensing Tutorial, 2006. URL: <http://rst.gsfc.nasa.gov/Sect5/Sect5.5.html>.
28. Strong C. J., Burnside N. G., Llewellyn D. The potential of small-Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index. *PLoS ONE*. 2017. № 12

- (10). pp. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186193>.
29. Tian Q. Study on Oil-Gas Reservoir detecting methods using hyperspectral remote sensing // XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012.Vol. XXXIX-B7. pp. 157–162. URL: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B7/157/2012/isprsarchives-XXXIX-B7-157-2012.pdf>.
30. Ustin S. L., Gitelson A. A., Jacquemoud S., Schaepman M., Asner G. P., Gamon J. Element 1 (Imaging Spectroscopy Special Issue). pp. S67–S77.

# ИССЛЕДОВАНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЁННОЙ ПОЧВЫ И ВЫРАЩЕННОГО НА НЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА МЕТОДОМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ASD FIELDSPec® 3FR

Г. М. Жолобак, С. С. Дугин, О. Н. Сибирцева, Е. Н. Дорофей

Развитие нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности вызывает загрязнение окружающей среды, прежде всего водных и наземных экосистем. Среди компонентов наземных экосистем загрязнения нефтью, прежде всего, испытывают растения и почвы. Выполнено исследование загрязнённой нефтью почвы и выращенного на ней в лабораторных условиях растительного покрова методом гиперспектрального дистанционного зондирования с использованием спектрорадиометра ASD FieldSpec® 3FR. Растительный покров формировали путём выращивания в ёмкостях с почвой яровых зерновых культур (пшеницы, ячменя и кукурузы). Гиперспектральные вегетационные индексы с привлечением коэффициентов отражения в зоне красного края спектра (TCI, GrNDVI и REP) оказались более высокими по значениям. Для кукурузы по сравнению с другими яровыми мелкозерновыми культурами. Внесение дополнительной дозы нефти в загрязнённую нефтью почву возле скважины Старосамборского нефтяного месторождения приводит в результате к снижению значений описанных вегетационных индексов для каждой исследуемой яровой культуры. Накопленные значения GrNDVI для кукурузы и TCI для кукурузы и ярового ячменя тождественны к лабораторно определенным содержаниям хлорофилла в этих культурах (по соотношению между субстратами выращивания). Для дальнейшего развития дистанционного изучения загрязнённых нефтью почв и их влияния на растительность целесообразно усовершенствовать методику проведения спектрометрирования с привлечением данных космической съемки.

**Ключевые слова:** вегетационные индексы, загрязнение нефтью, яровые культуры

# RESEARCH OF OIL POLLUTED SOIL AND VEGETATION COVER GROWN IN LABORATORY BY HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING METHOD USING THE ASD FIELDSPec® 3FR SPECTRORADIOMETER

H. M. Zholobak, S. S. Dugin, O. M. Sybirtseva, Ye. M. Dorofey

The development of oil extraction and refining industry causes the environment pollution primarily the aquatic and terrestrial ecosystems. The vegetation and soils as the components of terrestrial ecosystems expose to oil pollution especially. The research of oil-polluted soil and vegetation cover grown in laboratory by hyperspectral remote sensing method using the ASD FieldSpec® 3FR spectroradiometer is performed. The vegetation cover of spring cereals (wheat, barley, and corn) is formed by the growing in the containers with soil. The hyperspectral vegetation indices together with the reflectance in the red edge of spectrum (TCI, GrNDVI and REP) are the higher values for corn cover in comparison with the different spring small grain cereals. The additional dose of oil applied in the polluted soils from the Saryi Sambir oil deposit induces the reduction in the values of above-mentioned vegetation indices for the every spring crop of interest. The research of oil-polluted soil and vegetation cover grown in laboratory by hyperspectral remote sensing method using the ASD FieldSpec® 3FR spectroradiometer is performed. The vegetation cover of spring cereals (wheat, barley, and corn) is formed by the growing in the containers with the different soils. The hyperspectral vegetation indices together with the reflectance in the red edge of spectrum (TCI, GrNDVI and REP) are the higher values for corn cover in comparison with the different spring small grain cereals. The additional dose of oil applied in the polluted soils from the Saryi Sambir oil deposit induces the reduction in the values of above-mentioned vegetation indices for the every spring crop of interest. Accumulated GrNDVI values for the corn and TCI for the corn and spring barley are similar to the laboratory chlorophyll content in these crops (according to the ratio of cultivation substrates). The further remote study of oil polluted soils and their influence on vegetation demands to improve the spectral measurements using satellite image data.

**Key words:** vegetation indices, oil pollution, spring crops