



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.197>

УДК 528.065/.067:628.863

Методика визначення фізичних параметрів земної поверхні за результатами комплексування даних оптичного та радіолокаційного знімання

М. О. Свіденюк

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Розроблено методику комплексування багатоспектральних оптичних та двополяризаційних радарних супутникових даних для обчислення фізичних параметрів ґрунтів. Зокрема, методика включає обчислення відносної діелектричної проникності (ϵ) на основі моделі інтегрального рівняння (ІЕМ) за радіолокаційними даними з високою просторовою розрізненістю Sentinel-1 GRDH. Виконано калібрування ϵ шляхом компенсації дестабілізаційного впливу кислотності й температури ґрунту. Багатоспектральні оптичні супутникові дані високої просторової розрізненості PlanetScope використані для обчислення вегетаційних індексів та коефіцієнта теплового випромінювання. Відновлення термодинамічної температури земної поверхні виконано за тепловими супутниковими даними, отриманими системами низької – MODIS та середньої Landsat-7/8 ETM+/TIRS просторової розрізненості. Досліджено спосіб компенсації деполяризації радіолокаційного сигналу шляхом обчислення локальних девіацій сигналу та шорсткості поверхні. Неоднорідність рельєфу відновлена за допомогою цифрової моделі місцевості середньої просторової розрізненості ALOS AWD3D. Для перевірки точності моделі обчислення вологості ґрунту, побудованої на основі цієї методики, проведено наземні завіркові вимірювання. Зокрема, вони включали відбір зразків ґрунту для обчислення вологості гравіметричним методом. Крім того, проводилися вимірювання кислотності та температури ґрунту за допомогою диференціального термометра GM1312 та багатофункціонального приладу WALCOM. Параметри, обчислені за супутниковими даними, та результати наземних завіркових вимірювань використані для відновлення вологості ґрунтів на основі багатовимірної регресійної залежності. Встановлена розбіжність визначення вологості (RMSE = 4,73 %) є цілком прийнятною для кількісного моніторингу вологості земельних ресурсів природно-заповідного фонду.

Ключові слова: оптичні та радіолокаційні супутникові дані, вологість ґрунту, діелектрична проникність, шорсткість поверхні, фізична температура, коефіцієнт теплового випромінювання, підсупутникові вимірювання.

© М. О. Свіденюк. 2021

1. Вступ

1.1. Сучасна парадигма комплексування даних у дистанційному зондуванні Землі

У складних синергетичних системах інформація про один і той самий феномен (процес, об'єкт, подію) зазвичай передається по декількох каналах. Проблема полягає в тому, щоб визначити, по яких каналах передаються найбільш достовірні дані. В багатьох випадках, синтезуючи системи комплексування даних, доцільно спиратися на ступінь інформативності каналів у конкретній ситуації (дискримінатори ступенів свободи). Як результат, вся доступна інформація буде належно використана (Itti et al., 1998; Плотніков та ін., 2017; Гривачевський та ін., 2017), на противагу традиційному шляху, що передбачає відсікання менш інформативних каналів за допомогою механізму “редукторів ступенів свободи” (Гривачевський та ін., 2019).

Синергетичний принцип комплексування даних має багато спільного з ідеями математичної статистики. Якщо синергетична концепція злиття

даних застосовується для оцінки характеристик процесів (об'єктів) за наявної сукупності даних, то математична статистика вивчає методи оцінки моментів розподілу випадкових величин за наявної сукупності елементів вибірки. Спільність проблем обох теорій робить завдання дослідження синергетичних аспектів математичної статистики актуальною як для синергетики, так і для розвитку статистичних методів (Воронин, 2014).

Системи спостереження, побудовані на основі сенсорів різного типу та відповідних підходів комплексування інформації, дають змогу розв'язувати різноманітні завдання дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), моніторингу навколишнього середовища, ідентифікації та супроводження об'єктів (Kondratov et al., 2016; Lyalko et al., 2000). Штучні супутники виконують безперервне циклічне спостереження за землею поверхнею та за об'єктами на ній. Крім того, сучасні системи ДЗЗ здатні забезпечити високу розрізняльну здатність та адаптивність сенсорів до різних видів наземних покривів (Rees, 2013; Прудіус, 2008). Реалізувати точність визначення фізичних параметрів, порівнянну з точністю наземних вимірювань, не знизивши якість супутникових даних високої

E-mail: svideniuk@casre.kiev.ua

<https://orcid.org/0000-0003-2167-3522>

просторової розрізненості, можна лише шляхом комплексування різномірних, наприклад – оптичних та радарних даних (Druce et al., 2021; Фомічов та ін., 2005). На сьогодні це є основним рішенням щодо покращення інформативності зображення (Плотніков та ін., 2017).

Мета досліджень полягала у створенні методики комплексування багатосенсорних супутникових даних з метою обчислення фізичних параметрів земної поверхні. Для цього проведена цифрова обробка оптичних та радарних супутникових зображень, обчислені фізичні та топографічні параметри земної поверхні, а також здійснено наземні підсупутникові вимірювання.

1.2. Методи дистанційного визначення вологовмісту земної поверхні

Оцінювання об'ємного вологовмісту (W) ґрунтів є одним з найбільш важливих завдань ДЗЗ (United Nations, 2006) та проводиться з метою запобігання деградації земель та опустелювання, забезпечення продовольчої безпеки та оцінювання ризиків (Olsson et al., 2019; Mirzabaev et al., 2019; Mbow et al., 2019; Hurlbert et al., 2019; United Nations, 2017; Prince et al., 2018; Kostyuchenko et al., 2015). Найбільш ефективним методом вирішення цього завдання є активне зондування в мікрохвильовому діапазоні (Лялько та ін., 2003). Геопросторові дані, отримані за допомогою радарів із синтезованою апертурою (РСА) надають інформацію про просторові та часові зміни вологості та шорсткості шляхом інвертування вимірюваного зворотного розсіювання низкою емпіричних та фізичних методів (Aubert et al., 2011; Choker et al., 2017). Емпіричні методи базуються на емпірично встановлених зв'язках між сигнатурою розсіювання та параметрами ґрунту (Baghdadi et al., 2016; Zribi et al., 2019; Verhoest et al., 2016). Теоретичні основи напівемпіричних моделей полягають у тому, що вони використовують експериментальні дані для отримання спрощених інверсійних моделей (Babaeian et al., 2019; Rowlandson et al., 2018; Baghdadi et al., 2015; Jagdhuber, 2012). Моделі цього типу, найбільш відомі з яких Oh (Oh, 1992) та Dubois (Dubois et al., 1995), можна відкалібрувати на основі квазісинхронних наземних та супутникових даних (Choker et al., 2017). На відміну від емпіричних методів, фізичні не потребують калібрування для кожної окремої території дослідження (Kim, Mohanty, 2018). В них використовується модель зворотного розсіювання сигналу електромагнітного випромінювання для прогнозування зворотного розсіювання на основі робочої частоти РЛС, кута візування, шорсткості поверхні та діелектричної константи (El Hajj et al., 2017). Модель інтегрального рівняння (Integral Equation Model, IEM) (Fung, 1994) найчастіше використовується як фізична модель для інвертування радіолокаційного сигналу та оцінювання вологості та/або шорсткості ґрунту (Bousbih et al., 2019; Zribi et al., 2019; Baghdadi et al., 2019; Baghdadi et al., 2018).

Наведені методи визначення вологості ґрунтів дають змогу отримувати результати з помірно

точністю (Yahia et al., 2021; Ezzahar et al., 2020). Однак більшість моделей засновані на використанні обмеженої кількості каналів або на малій вибірці. Недоліком емпіричних моделей є те, що вони є некогерентними та описують лише підмножину наявного простору спостереження. Отже, вони не пояснюють ефект деполяризації, спричинений шорсткістю (Jagdhuber, 2012).

Модель ІЕМ неодноразово перевірялась на однорідних ґрунтових зразках в лабораторних умовах (Hsieh et al., 1997; Macelloni et al., 2000), однак під час крупномасштабних досліджень, отримати точні результати є складним завданням (Gorrah et al., 2015; Panciera et al., 2014), що обумовлюється значними розбіжностями між симульованими та експериментальними даними (El Hajj et al., 2017). Ці розбіжності пов'язані, в основному, з дестабілізаційним впливом шорсткості земної поверхні, однак їх можна усунути шляхом виконання напівемпіричного калібрування її параметрів (Baghdadi et al., 2016). Калібрування полягає в зміні очікуваного радіуса кореляції, отриманого за результатами наземних вимірювань або моделюванням, на штучно визначене за типом земної поверхні та параметрами РСА значення (Choker et al., 2017).

1.3. Сутність технічної проблеми обраної тематики

У розвинених інформаційних системах дані, що характеризують стан x кожного й того самого об'єкта (процесу) O , передаються по декількох каналах: 1, 2, ..., m . Проблема полягає у визначенні відносного ступеня достовірності даних, що надходять по кожному з n каналів у даний момент часу, і у виробленні за допомогою механізму комплексування K найбільш достовірної оцінки x^* істинної характеристики x об'єкта (процесу) за наявної сукупності даних. Оцінки параметрів розподілу ймовірностей випадкової величини визначаються на основі обробки статистичного матеріалу, що являє собою сукупність експериментальних значень досліджуваної випадкової величини (Воронин, 2014).

Тому постає завдання максимально використовувати інформацію про статистичні властивості досліджуваної випадкової величини і отримати розрахункові алгоритми для обчислення уточнених оцінок параметрів розподілу на основі статистичного матеріалу обмеженого обсягу. Через те, що результати цього дослідження можна застосовувати не тільки для підвищення інформативності каналів отримання даних у складних інформаційних системах, а й в інших випадках, то доцільно формулювати і вирішувати завдання в загальних термінах математичної статистики (Kedem et al., 2017).

У цій роботі при комплексуванні даних розглядається невідома характеристика як випадкова величина, відображенням закону розподілу якої є оптичний та радіолокаційний сигнали. Для встановлення її кількісної оцінки всі наявні дані вивчаються в сукупності і обробляються як вхідні статистичні змінні. Обробка здійснюється за правилами математичної статистики (Liu et al., 2020;

Peng et al., 2020; Nguyen et al., 2012; Zhang et al., 2010).

2. Матеріали та методи

2.1. Опис вхідних параметрів методики

У природних умовах є досить багато факторів, що впливають на сигнал РСА. Зокрема, попередні дослідження показали, що вологість ґрунту є функцією широкого спектра природних процесів (опадів, випаровування тощо), топографії місцевості, типу землекористування та структури ґрунту (Palombo et al., 2019). Тому точність вимірювання вологозапасів дистанційними методами значною мірою залежить від типу рослинного покриву, шорсткості ґрунту та температури земних покривів поверхні (Матус, 2014).

Основною електродинамічною характеристикою, яку можна визначити дистанційно, є діелектрична проникність, $\epsilon = \epsilon' + \epsilon''$, де уявна частина показує наявність дисипативних втрат у середовищі. Діелектрична проникність ґрунтів визначається насамперед діелектричними властивостями їх складових компонентів, оскільки вони мають релаксаційні властивості. Основними компонентами ґрунтів є повітря, моноліт ґрунту (кварц, польові шпати і т. д.), вода – зв'язана і вільна, і лід – у разі мерзлих ґрунтів (Беляєва та ін., 2006; Боярский, Тихонов, 2003).

Наявність рослинності ускладнює геометрію розсіювання: хвилі поширюються і взаємодіють із шаром рослинності, а потім взаємодіють з підстильною поверхнею. Отже, сигнатура зворотного розсіювання, що вимірюється сенсором, формується за рахунок декількох шарів підстильної поверхні (Hajnsek et al., 2009).

Для визначення вологості ґрунтів необхідно врахувати шорсткість відбивального покриття (Zribi et al., 2014). Шорсткість поверхні значною мірою впливає на поверхневий стік води: зменшуючи швидкість потоку, шорсткість, тим самим, сприяє процесу просочування та, як наслідок, зменшує стік за течією. Опис шорсткості базується на обчисленні функції автокореляції висоти поверхні, з якої, як правило, розраховуються два параметри. Перший – це стандартне середньоквадратичне відхилення висоти поверхні, що визначає вертикальну шкалу шорсткості. Другий відповідає довжині кореляції поверхні, визначеній як горизонтальний зсув, для якого кореляційна функція профілю зменшується до $1/e$ (Baghdadi et al., 2018).

Чутливість сигналів зворотного розсіювання в радіолокаторах із синтезованою апертурою (РСА) від підстильної поверхні суттєво змінюється, залежно від кута падіння радіохвиль θ . Відомо, що при менших θ ($10^\circ - 20^\circ$) результат обчислень є більш точними (Dobson, Ulaby, 1986), проте, як правило, при проєктуванні РСА, значення θ значно більші – для досягнення кращої просторової та часової розрізненості (Stephen et al., 2010). Навіть на оголених ґрунтах моделі σ^0 демонструють помітно різну чутливість до θ через збурення, які спричиняють шорсткість природних поверхонь

(Verhoest et al., 2016). Ця невизначеність зростає на ґрунтах, покритих рослинністю, де коливання похибки поверхневої вологості ґрунту, зі зміною θ , залежать від природних властивостей рослинного покриву, що виражається в перешкоджанні проходженню сигналу РСА або його подвійного відбиття (Crow et al., 2010; Wagner et al., 2007).

Серед фізичних характеристик ґрунтів на діелектричні властивості значною мірою впливає кислотність та температура (Лактионов, Вовна, 2014). Із погляду електрохімічного аналізу ґрунтів переносниками заряду в ґрунтового розчині є вільні іони (Шейко, Міхеєва, 2013). Про вплив температури на діелектричні властивості ґрунтів відомо з (Лактионов, Вовна, 2014; Косолапова, 2012) через відносне зменшення питомого електричного опору (ПЕО), оскільки діелектрична провідність (ϵ) є зворотною величиною до ПЕО (Боярский, Тихонов, 2003).

Особливості топографії та ландшафту також впливають на результати обчислення вологовмісту через зв'язок вологості ґрунтів та топографією водозбору (Robinson et al., 2008; Vereecken et al., 2008). Із метою компенсації дестабілізаційного ефекту ландшафтних особливостей, широко використовують цифрові моделі висот для пояснення просторової та часової дисперсії вологості ґрунту в межах водозбору (Palombo et al., 2019; Wilson et al., 2005). У місцевостях з мінімальним ухилом просторова мінливість гідрологічних процесів створює брак часової стійкості в ландшафтах, де відбувається топографічний перерозподіл (Robinson et al., 2008).

Отже, для визначення вологості ґрунту необхідно врахувати вплив зазначених дестабілізаційних факторів, серед яких фізичні характеристики ґрунтів, спектральні характеристики підстильної поверхні та особливості рельєфу місцевості. Методика комплексування багатоспектральних оптичних та двополяризаційних радарних даних має включати способи отримання даних, методи їх обробки та оцінку результатів.

2.2. Територія дослідження

Підсупутникові наземні дані з вологості ґрунтів, температури та кислотності приповерхневого ґрунтового шару були отримані на чотирьох тестових ділянках (ТД): “Поле авіамоделістів”, що безпосередньо прилягає до НПП “Голосіївський” (ТД1), на заплавах луках Дніпра поблизу оз. Млинне (ТД2) та с. Вишеньки (ТД3) Київської області (Рис. 1).

На тестових ділянках 1–3 в кожній точці було відібрано по одному зразку ґрунту в кожній точці вимірювань, розташованих з просторовим інтервалом 10–20 м. Загалом відібрано 140 зразків ґрунту: на тестовій ділянці № 1 – 109 зразків, № 2 – 20, № 3 – 12.

Вимірювання параметрів ґрунтів виконано за допомогою вологоміра Rapitest, багатофункціонального приладу WALCOM та диференціального термометра GM1312, проведено квазісинхронно з радіолокаційним супутниковим зніманням Sentinel-1 з метою усунення впливу погодних умов, змінних в часі, на характеристики ґрунтів.

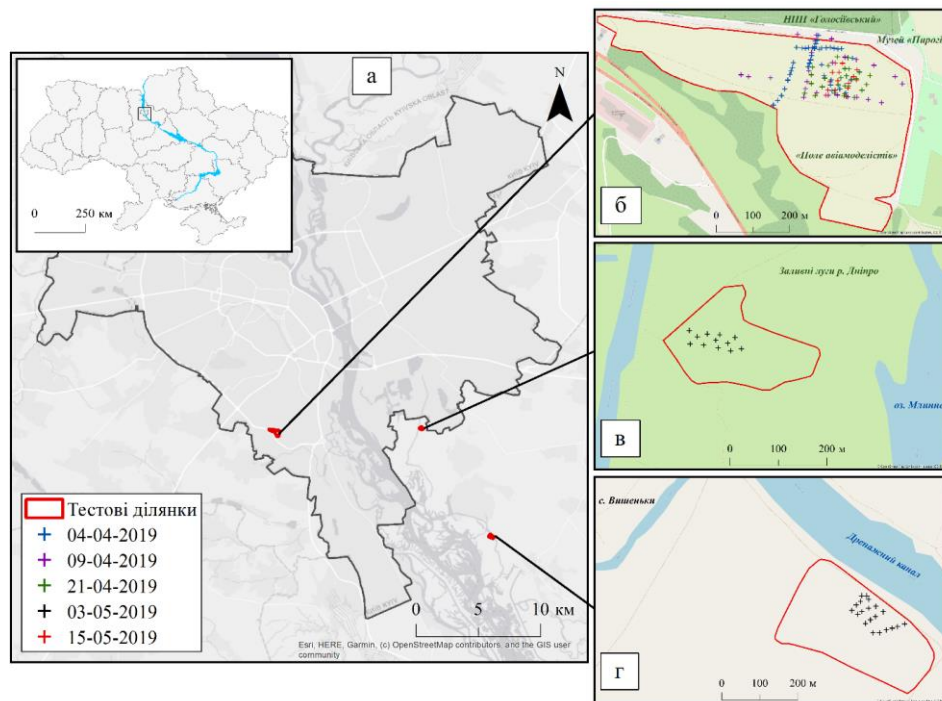


Рис. 1. Тестові ділянки для відпрацювання методики комплексування оптичних та радарних даних з метою визначення фізичних та біофізичних параметрів земного покриття: а – місцезнаходження тестових ділянок на карті Києва; б – розміщення точок вимірювань в межах тестової ділянки № 1 – “Поле авіамоделістів”; в – розміщення точок вимірювань в межах тестової ділянки № 2 – “оз. Млинне”; г – розміщення точок вимірювань в межах тестової ділянки № 3 – “с. Вишеньки”

2.3. Вхідні дані

Двополяризаційні радарні супутникові продукти першого рівня обробки Level-1 Ground Range Detected (GRD) з просторовою розрізненістю 10×10 м завантажено з веб-порталу ESA Copernicus data hub (<https://scihub.copernicus.eu>). Дані являють собою значення зворотного розсіювання, спроектовані на еліпсоїд Землі, але не містять фазової інформації (ESA, 2016). Для відповідних дат у вільному доступі надані зображення

горизонтальної (VH) та вертикальної (VV) поляризації, побудовані в режимі Interferometric Wide Swath Mode (IW) під час знімання в С-діапазоні ($\lambda = 5,56$ см) при проходженні супутником по низхідних орбітах. Зокрема, використані радіолокаційні зображення, побудовані за даними Sentinel-1A під час його проходження по відносних орбітах 36 та 138 (приблизно о 4:11 та 4:03 за Гринвічем, відповідно), для ділянки № 2 та 3 – по орбіті 36 (табл. 1).

Таблиця 1. Супутникові зображення Sentinel-1 GRD

Ім'я файлу	Орбіта	Дата зйомки
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190404T040326_20190404T040351_026635_02FCF9_2C1F	138	04/04/2019
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190409T041158_20190409T041223_026708_02FF97_5EAA	36	09/04/2019
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190421T041159_20190421T041224_026883_0305E3_D7B8	36	21/04/2019
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190503T041135_20190503T041200_027058_030C49_695F S1A_IW_GRDH_1SDV_20190503T041200_20190503T041225_027058_030C49_5900	36	03/05/2019
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190515T041200_20190515T041225_027233_031207_5164	36	15/05/2019

Цифрова модель місцевості. В рамках цього дослідження, в моделі обчислення вологовмісту приповерхневого шару ґрунтів було враховано вплив топографічних особливостей місцевості. З цією метою завантажено ЦМР AW3D (ALOS World 3D) Standard із просторовою розрізненістю ~ 30 м (комірка розміром 1 дугова секунда) (<https://www.eorc.jaxa.jp.ALOS.en.aw3d30>). Радарні дані отримані із супутника Advanced Land Observing Satellite DAICHI (ALOS) Агентства аерокосмічних досліджень Японії (Japan Aerospace Exploration

Agency, JAXA) в рамках глобальної зйомки стереопари оптичних сенсорів Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) з 2006 по 2011 роки (ALOS Team, 2020).

Багатоспектральні оптичні супутникові дані. В цьому дослідженні для обчислення фракційного рослинного покриття використано багатоспектральні оптичні супутникові дані PlanetScore в чотирьох спектральних діапазонах із просторовою розрізненістю 3 м (Planet Team, 2021) (табл. 2).

Таблиця 2. Характеристики супутникової системи PlanetScope

Параметр	Характеристика
Тип сенсора	Прилад із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) із вбудованим фільтром Баєра
Висота орбіти	450–580 км
Нахил орбіти	~98°
Спектральні діапазони	Канал 1: Синій (455–515 нм) Канал 2: Зелений (500–590 нм) Канал 3: Червоний (590–670 нм) Канал 4: Близький ІЧ (780–860 нм)
Ширина сцени	24.6 км × 16.4 км

Дані постачаються безкоштовно на веб-ресурсі Planet Lab (<https://www.planet.com>), де надані вигляди сцен – радіометрично-, атмосферно- та геометрично скоригованих продуктів, спроектованих на картографічну проекцію. Супутникові зображення підібрано відповідно до дат радарної зйомки Sentinel-1.

Теплові супутникові дані. В цьому дослідженні використано супутникові дані щільності енергетичної яскравості супутникових систем MODIS та серії Landsat, що одержані у дальньому інфрачервоному діапазоні електромагнітного випромінювання. Супутникові продукти MODIS Level 1B 1KM містять калібровані дані дистанційного зондування в дальньому інфрачервоному діапазоні. Зображення з розрядністю 16 біт, завантажені з веб-ресурсу Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System Web Interface (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) постачаються з просторовою розрізненістю ~1 км. Інфрачервоні зображення супутникових систем серії Landsat-7/Landsat-8 з розрядністю 16 біт завантажено з веб-ресурсу Геологічної служби США (United States Geological Survey, USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov>). Інфрачервоні зображення сенсора Landsat-7 ETM+ мають просторову розрізненість 60 м, а дводіапазонні зображення сенсора Landsat-8 TIRS – 100 м. У дослідженні використано теплові супутникові дані, отримані в день проведення наземних вимірювань фізичних параметрів ґрунтів (табл. 3).

Таблиця 3. Теплові супутникові дані

Сенсор	Ім'я файлу	Дата зйомки	Канал	Довжина хвилі (λ), мкм
TIR	MOD021KM.A2019094.0845.061.2019094191733	04/04/2019	31	10.78–11.28
ETM+	LE07_L1TP_181025_20190409_20190505_01_T1	09/04/2019	6	10.40–12.50
TIRS	LC08_L1TP_181025_20190503_20190508_01_T1	03/05/2019	10	10.6–11.19

2.4. Методи обчислення

При цьому вологість ґрунту визначено як кількість води в ньому, виражену в процентах до маси абсолютно сухого ґрунту. Для регресійного аналізу залежності вологості ґрунтів від фізичних параметрів, вологовміст відібраних зразків було визначено гравіметричним методом. Таким чином, після зважування, алюмінієві бюкси з ґрунтовими сумішами були завантажені в сушильну піч для випаровування вологи при температурі 300 °С протягом трьох годин. Вологість ґрунту визначено за формулою (1) (ДСТУ, 2002):

$$W = \frac{(a_1 - a_2)}{(a_2 - a_3)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де W – обчислена вологість ґрунту, %; a_1 – маса вологого ґрунту з алюмінієвою бюксою та кришкою, г; a_2 – маса висушеного ґрунту з алюмінієвою бюксою та кришкою, г; a_3 – маса порожньої алюмінієвої бюкси та кришки, г.

Проективне покриття рослинності. Відомо, що високі значення NDVI є показником наявності фотосинтетично активної біомаси (Huete et al. 1997). Таким чином, оскільки величина P_v з одного боку, обчислюється на основі NDVI, а з другого – геометрично пов'язана з характеристиками радарного відбиття земної поверхні, її можна використовувати для компенсації змін КЗР внаслідок впливу рослинності (Pasolli et al. 2015). Із цією метою в межах досліджуваної області P_v обчислено за (2) за допомогою багатоспектральних оптичних зображень PlanetScope (Carlson et al., 1997).

$$P_v = \left(\frac{N - N_0}{N_1 - N_0} \right)^2, \quad (2)$$

де N_0 – порогове значення NDVI для відкритого ґрунту, N_1 – порогове значення NDVI для стовідсоткового проективного покриття,

$$N = \frac{(\rho_{780-860 \text{ нм}} - \rho_{590-670 \text{ нм}})}{(\rho_{780-860 \text{ нм}} + \rho_{590-670 \text{ нм}})} \quad (3)$$

де $\rho_{590-670 \text{ нм}}$ – коефіцієнт відбиття в червоному спектральному діапазоні, $\rho_{780-860 \text{ нм}}$ – коефіцієнт відбиття в ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні.

Температура земної поверхні. В цьому дослідженні відновлення термодинамічної температури земної поверхні було виконано на основі багатоспектральних супутникових даних Landsat, MODIS та PlanetScope та бібліотечних значень коефіцієнтів теплового випромінювання типів земного покриття.

Супутникові дані знімання в інфрачервоному діапазоні супутників серії Landsat надаються у форматі дискретних цілочисельних значень DN_{TIR} . Вони перераховуються у формат спектральної щільності енергетичної яскравості на апертурі сенсора (L) за лінійною залежністю

$$L = A \cdot DN_{TIR} + B, \quad (4)$$

де A і B – калібрувальні коефіцієнти (константи) підсилення та зміщення, відповідно. Калібрувальні константи зображень для сенсорів ETM+ та OLI відомі з метаданих супутникових продуктів та наведені в табл. 4 (Станкевич та ін., 2017).

Таблиця 4. Калібрувальні константи зображень для сенсорів

Інфрачервоний сенсор	Робочий спектральний діапазон, мкм	Підсилення (α) Вт/(м ² ·мкм·ср)/DN	Заміщення (β) Вт/(м ² ·мкм·ср)
ETM+	10.4–12.5	0.067	–0.06709
TIRS	10.6–11.19	0.0003342	0.1

Вплив атмосфери на інфрачервоне випромінювання земної поверхні усунуто за допомогою моделі радіаційного перенесення, що має вигляд:

$$L_0 = \frac{L - L \uparrow}{\varepsilon_p(\lambda)\tau} - \frac{1 - \varepsilon_p(\lambda)}{\varepsilon_p(\lambda)} L \downarrow, \quad (5)$$

де L_0 – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні; $L \uparrow$ – спектральна щільність енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора; $L \downarrow$ – спектральна щільність енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі; τ – спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери, ε – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні (Ibarrá-Castaneda et al., 2004).

Ця модель враховує метеорологічні умови (температура та вологість повітря, атмосферний тиск) у момент проведення знімання та географічне положення даної території (широта, довгота, висота). Обчислення $L \uparrow$, $L \downarrow$ та τ виконано за допомогою спеціалізованого онлайн-калькулятора параметрів атмосфери NASA Atmospheric Correction Parameter Calculator (<https://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) (Barsi et al., 2003). Метеорологічні дані отримано з архівів Міжнародного аеропорту “Київ” ім. І. Сікорського.

Алгоритми дистанційного визначення температури засновані на законі теплового випромінювання Планка:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon_v M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon_v c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (6)$$

де $L(\lambda, T)$ – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні, ε_v – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання, $M(\lambda, T)$ – спектральна щільність енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла, $c_1 = 2hc_2 = 1.191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² і $c_2 = \frac{hc}{k} = 1.439 \cdot 10^{-2}$ м·К – перша та друга постійні закону Планка, $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка, $c = 2.998 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання (Yang et al., 2011).

Температуру земної поверхні (T) може бути обчислено за оберненою формулою Планка через спектральну щільність енергетичної яскравості $L(\lambda, T)$ (Станкевич та ін., 2011):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon_v c_1}{\lambda^5 L_0} + 1\right)}, \quad (7)$$

Оскільки залежні змінні T та ε_v є невідомими, обчислення температури за рівняннями радіаційного

перенесення у загальному випадку є формально некоректною задачею. Тому ε_v обчислювалося на основі відомої залежності від вегетаційного індексу NDVI для діапазону $[N_0 \dots N_1]$:

$$\varepsilon_{v1} = \varepsilon_{v1} P_V + \varepsilon_{v0} (1 - P_V) + \Delta \varepsilon_V, \quad (8)$$

де ε_{v0} і ε_{v1} – спектральні коефіцієнти теплового випромінювання рослинності та відкритої поверхні, відповідно; $\Delta \varepsilon_V$ – поправка, обумовлена нерівностями підстильної поверхні (Van de Griend et al., 1993).

Решта області значень NDVI заміщується бібліотечними коефіцієнтами теплового випромінювання відповідних поверхонь, завантажених з онлайн спектральної бібліотеки ECOSTRESS (<https://speclib.jpl.nasa.gov/library>). Температура земної поверхні через спектральну щільність енергетичної яскравості обчислюється за формулою (3), адаптованою до конкретної інфрачервоної знімальної апаратури:

$$T_{\text{дист}} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_0} + 1\right)}, \quad (9)$$

де K_1 , K_2 – апаратні калібрувальні константи відповідного сенсора (табл. 5).

Таблиця 5. Калібрувальні апаратні константи

Константи сенсора	Landsat 7 ETM+ Band 6	Landsat 8 TIRS Band 10	Terra MODIS Band 31*
K_1	666.09	774.89	733.38
K_2	1282.71	1321.08	1305.79
*коефіцієнти обчислено на основі технічних характеристик знімальної апаратури			

K_1 та K_2 для каналу 31 супутникової системи Terra MODIS обчислено за формулами (Oguro et al., 2011):

$$K_1 = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot 10^{-6}}, \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{hc}{k\lambda}, \quad (11)$$

де $\bar{\lambda} = 11.018$ – центральна ефективна довжина хвилі електромагнітного випромінювання, мкм.

Для обчислення $\bar{\lambda}$ для каналу 31 супутникової системи Terra MODIS завантажено дані відносної спектральної чутливості (relative spectral response, RSR) з веб-сайту підтримки MODIS Characterization Support Team (MCST, <https://mcst.gsfc.nasa.gov>). $\bar{\lambda}$ обчислено за формулою (Barnes et al., 2016):

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{n=2}^{n_{\max}} [\lambda(n) \cdot RSR(n) + \lambda(n-1) \cdot RSR(n-1)]}{\sum_{n=2}^{n_{\max}} [RSR(n) + RSR(n-1)]}, \quad (12)$$

де $\lambda(n)$ – довжина хвилі при n -му вимірюванні, $RSR(n)$ – спектральна чутливість при n -му вимірюванні.

Карта теплових аномалій, що отримана цим методом, включає дані про температуру земної поверхні в час, що не збігається з часом відбору проб ґрунтів та наземних вимірювань температури. Значення $T_{\text{дист}}$ приведені до значень T_n за виразом:

$$T_m = \frac{\bar{T}_n \cdot T_{\text{дист}}}{\bar{T}_{\text{дист}}}, \quad (13)$$

де \bar{T}_n – середня температура ґрунту за результатами наземних вимірювань, $\bar{T}_{\text{дист}}$ – середня температура земних покривів на дату, що відповідає даті відбору проб ґрунтів.

Таким чином, в експерименті використано два типи даних про температуру: 1) температура ґрунту в час відбору ґрунтової проби T_n , що використана для відновлення регресійної залежності, та 2) температура земної поверхні, перемасштабована до значень на час відбору проби, отриманих за результатами обробки теплових супутникових даних.

Попередня обробка радарних даних. Двополяризаційні радарні супутникові продукти Sentinel-1 GRDH були попередньо оброблені в програмному середовищі обробки супутникових даних Sentinel Application Platform (SNAP) Європейського космічного агентства, в якому реалізовано набір радарних інструментів Sentinel-1 Toolbox. Вхідні дані продукту GRDH являють собою величину зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу з вертикальною (VV) та горизонтальною (VH) поляризаціями у форматі дискретного числа DN . Перш за все, метадані продуктів були оновлені шляхом автоматичного завантаження актуальних орбітальних даних. Зокрема, оновлення передбачає отримання дійсних даних про висоту орбіти та швидкість супутника на момент спостереження DN_{SAR} .

Дискретні значення DN_{SAR} конвертовано у радіометрично калібровані значення коефіцієнта зворотного розсіювання (КЗР, σ_0) за рівнянням:

$$\sigma_0 = \frac{DN_{SAR}^2}{A_{DN_{SAR}}^2} \cdot \sin(\vartheta), \quad (14)$$

де $A_{DN_{SAR}}$ – ефективна площа розсіювання, ϑ – спроектований на еліпсоїд локальний кут візування (ESA, 2015).

У результаті геометричної корекції методом далекомірної ортокорекції Допплера (Small, Schubert, 2019) в систему координат універсальної поперечної проєкції Меркатора (Universal Transverse Mercator, UTM), додатково згенеровано растрові зображення кута візування PCA (ϑ) та кута між нормаллю земної поверхні і $\vartheta()$, що додатково спроектований на топографію місцевості зондування (Schreier, 1993).

Обчислення діелектричної проникності. В рамках методу малих збурень, σ_0 для хвилі з хвильовим числом k , що падає під кутом θ на середовище з діелектричною проникністю ε та шорсткою межею із середньоквадратичним відхиленням нерівностей s та радіусом кореляції l , мають вигляд (15) (Дагуров та ін., 2016; Ulaby1982 et al., 1982):

$$\sigma_0 = 8k^4 s^2 \cos^4 \theta |\alpha_p|^2 W(2k \sin \theta, 0), \quad (15)$$

де $W(2k \sin \theta, 0) = \frac{1}{2} l e^{-(kl \sin \theta)^2}$ – спектр нерівностей

шорсткої поверхні, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число,

$\lambda \approx 5.54$ см – робоча довжина хвилі C-SAR Sentinel-1, p – індекс, що описує поляризацію хвилі: $p = H$ при горизонтальній поляризації, $p = V$ при вертикальній поляризації. Значення α_h та α_v визначаються відношеннями:

$$\alpha_h = \frac{\varepsilon - 1}{\left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \right)^2}, \quad (16)$$

$$\alpha_v = (\varepsilon - 1) \frac{(\varepsilon - 1) \sin^2 \theta + \varepsilon}{\left(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \right)^2}. \quad (17)$$

Таким чином, нерівність набирає вигляду:

$$\frac{\sqrt{\sigma_h}}{2k^2 s \cos^2 \theta \sqrt{l e^{-(kl \sin \theta)^2}}} = \frac{\varepsilon - 1}{\left(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \right)^2}, \quad (18)$$

$$\frac{\sqrt{\sigma_v}}{2k^2 s \cos^2 \theta \sqrt{l e^{-(kl \sin \theta)^2}}} = (\varepsilon - 1) \frac{(\varepsilon - 1) \sin^2 \theta + \varepsilon}{\left(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta} \right)^2} \quad (19)$$

Оскільки значення ε для окремого елемента земної поверхні повинні збігатися, якщо вимірювати різними пристроями, то результати моделювання мають задовольняти рівності $\varepsilon_h \approx \varepsilon_v$, а загальна модель (14) перетворюється як

$$\sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_h}} \cong \left(\frac{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}}{\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}} \right)^2 ((\varepsilon - 1) \sin^2 \theta + \varepsilon), \quad (20)$$

Після вираження ε з рівняння (15), модель (14) для обчислення ε_h набирає вигляду:

$$\varepsilon_h = 1 + \cos \theta \frac{4\alpha_h}{(\alpha_h - 1)^2}. \quad (21)$$

При визначенні ε_v на основі моделі (15), рівняння (17) має три корені: $\alpha_v = -1$ при $\varepsilon_v = \sin^2 \theta$, $\alpha_v = 0$ при $\varepsilon_v = \theta$, $\alpha_v \rightarrow \frac{1 + \sin^2 \theta}{\cos^2 \theta}$ при $\varepsilon_v \rightarrow \infty$, тому вирішується за формулою Кардано.

Таким чином, ε можна отримати за рівнянням (20). У межах визначеного прийнятного діапазону $\varepsilon = [1 \dots 10]$ (Боярский, Тихонов, 2003), величина,

$\sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_h}}$ як правило, лежить в межах $[1 \dots 2.27]$.

У цій методиці використано співвідношення (20), покращене застосуванням корегувального члена, що залежить від радіуса кореляції поляризацій (Baghdadi et al., 2016):

$$\sqrt{\frac{l_h e^{-(kl_h \sin \theta)^2}}{l_v e^{-(kl_v \sin \theta)^2}}} = \sqrt{\frac{l_h}{l_v} e^{(k \sin \theta)^2 (l_v^2 - l_h^2)}}. \quad (22)$$

Зазвичай, радіус кореляції l_h , l_v виражається шорсткістю земної поверхні s . У дослідженні шорсткість поверхні виражено за гранулярністю, зв'язок з якою виражається за радіусом кореляції у формі степеневі залежності (Ezzahar et al., 2020; Zhang et al., 2020):

$$\begin{aligned} I_h &= \alpha_h s^{\beta_h} = \delta_h (\sin \theta)^\gamma s^{\eta\theta + \xi_h} \\ I_v &= \alpha_v s^{\beta_v} = \delta_v (\sin \theta)^\gamma s^{\eta\theta + \xi_v} \end{aligned} \quad (23)$$

де α , β – параметри, залежні від поляризації, які можуть бути розділені на залежні δ , ξ та незалежні γ , η від поляризації компонент; $s = [0.1...2.27]$, см – шорсткість земних покривів, значення якої не перевищує половини довжини хвилі сенсора C-SAR Sentinel-1 ($\lambda = 5.54$ см) (Álvarez-Mozos et al., 2008).

Фільтрація аномальних значень діелектричної проникності. З метою виявлення випадків, коли

значення ε не потрапляє в робочий діапазон, було використано створений емпіричний критерій κ :

$$\kappa = \frac{\sigma_v}{\sigma_h \sin \theta}. \quad (24)$$

Крім того, критерій κ дає змогу виявити випадки, коли умова $\varepsilon_h \neq \varepsilon_v$ не може бути виконана. Наприклад, на Рис. 2 наведено два випадки, коли $\varepsilon_h \approx \varepsilon_v$ в діапазоні від (Рис. 2а), та випадок, коли криві не перетинаються або перетинаються в діапазоні $\varepsilon > 10$ (Рис. 2б).

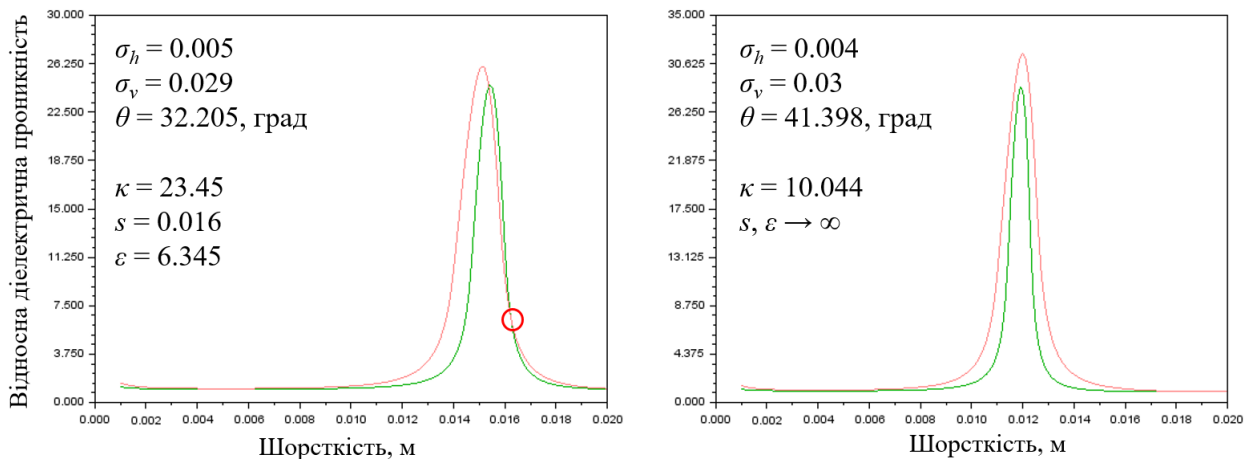


Рис. 2. Залежність відносної діелектричної проникності від обраного середньоквадратичного відхилення нерівностей відбивальної поверхні:

а – криві перетинаються в точці $s = 1.6$ см, $\varepsilon = 6.345$; б – криві не перетинаються

Значення ε фільтруються шляхом встановлення порога надлишковості сплайн-інтерполяції $\varepsilon = 10$. Значення ε , що не потрапляють в діапазон $1 < \varepsilon < 10$, не приймаються в статистичну вибірку. Застосувавши цей інструмент, наступним кроком стає можливим визначення ε в програмному середовищі чисельного моделювання SciLab (www.scilab.org).

Кислотність та температура ґрунту. В основі способу зменшення додаткової похибки визначення вологості закладено залежність ε ґрунту та, як наслідок, вологості від солесмісту (pH) та вологості від температури (T). Таким чином, поставлена задача розв'язується шляхом введення апаратної надмірності та наступної функціональної корекції результатів вимірювання за рахунок використання допоміжних засобів вимірювання pH та температури (Лактионов, Вовна, 2014а). Дестабілізаційний вплив pH враховано на основі експериментального аналізу регресійних залежностей між ПЕО та солесмістом для різних типів ґрунтів (Поздняков та ін., 2004). Встановлено, що ці регресійні залежності є лінійними (Лактионов, Вовна, 2014б). Оскільки ε є зворотною величиною до ПЕО, цей взаємозв'язок враховано в зазначеній моделі. Модель калібрування ε на основі температури та кислотності надано у виразі:

$$\varepsilon_\kappa = \varepsilon \cdot [1 - \delta_{pH} \cdot (pH_7 - pH)] \cdot [1 + \delta_T \cdot (20 - T)], \quad (25)$$

де $pH_7 = 7$ – нормальне значення кислотності ґрунту (нейтральне середовище); δ_{pH} – коефіцієнт

апроксимації функції залежності ε від pH , величина якого становить 0,2; δ_T – коефіцієнт апроксимації функції залежності ε від T , величина якого становить 0,029, pH – кислотність ґрунту, T – температура ґрунту.

Висота рельєфу та топографічні особливості. З метою врахування топографічних особливостей місцевості, для обчислення вологовмісту приповерхневого шару ґрунтів використано ЦММ ALOS AW3D. Як морфометричні ознаки обрано ухил (ψ), кривизну (ζ) та експозицію (ξ) елементу рельєфу (Evans, 1980; Wood, 1996).

Ухил земної поверхні ψ є кутом нахилу в точці перетину між горизонтальною площиною і площиною, дотичної до земної поверхні. Цей параметр характеризує інтенсивність перепаду висот (градієнт) між двома заданими точками. Ухил визначається як зміна висоти рельєфу (dz) на певній відстані у горизонтальному (dx) або вертикальному (dy) напрямку (27) геопросторового зображення ЦММ:

$$\psi = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}, \quad (26)$$

Кривизна ζ є першою похідною від ψ та характеризує швидкість зміни ψ на певній відстані у горизонтальному (dx) або вертикальному (dy) напрямку дискретизації ЦММ. Параметр ζ обчислюється за формулою:

$$\zeta = \frac{\left(\frac{dz}{dy}\right)^2 \frac{d^2 z}{dx^2} - 2 \frac{dz}{dx} \frac{dz}{dy} \frac{d^2 z}{dx dy} + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 \frac{d^2 z}{dy^2}}{\sqrt{\left(\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right)^3}}. \quad (27)$$

На основі ζ побудовано карту ортогональної увігнутості рельєфу (Ψ), що дає змогу виявити локальні осередки надлишкової вологи у

$$\varphi = \begin{cases} \text{якщо } \Psi = 1 \rightarrow \varphi_1 = h_1 - h_1^{\min} - 1, & \text{якщо } \Psi = 0 \rightarrow \varphi_1 = h_1^{\max} \\ \text{якщо } \Psi = 1 \rightarrow \varphi_2 = h_2 - h_2^{\min} - 1, & \text{якщо } \Psi = 0 \rightarrow \varphi_2 = h_2^{\max} \\ \text{якщо } \Psi = 1 \rightarrow \varphi_3 = h_3 - h_3^{\min} - 1, & \text{якщо } \Psi = 0 \rightarrow \varphi_3 = h_3^{\max} \end{cases}, \quad (28)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – нормувальні множники для кластерів h_1, h_2, h_3 , відповідно.

Експозиція поверхні ξ є кутом, за годинниковою стрілкою, між направленням у північному напрямку та проекцією ухилу на горизонтальну площину. Цей параметр використано для визначення напрямку (азимута) максимального ухилу (градієнта) земної поверхні і визначається за формулою:

$$\xi = -\tan^{-1} \left(\frac{dz/dx}{dz/dy} \right). \quad (29)$$

Локальні девіації радіолокаційного відбиття. Вплив локальних девіацій радіолокаційного відбиття пропонується враховувати параметром g , що характеризує неоднорідність підстильної поверхні при зніманні в горизонтальній та вертикальній поляризації під кутом візування, спроектованого на елемент рельєфу. Вираз для обчислення параметра g має вигляд:

$$g = \operatorname{tg} \theta - \frac{\sigma_h}{\sigma_v}. \quad (30)$$

Посилення статистичного зв'язку радарних даних та W виконано шляхом введення допоміжної функції $f(\gamma, \theta, \psi, \xi)$, що описує взаємну орієнтацію напрямку спостереження PCA та лінії нормалі земної поверхні (Stankevich et al, 2017):

$$f(\gamma, \theta, \psi, \xi) = \cos \theta \cdot \sin \psi \cdot \cos(\xi - \gamma) + \sin \theta \cdot \cos \psi, \quad (31)$$

де γ – курсовий кут супутника, відомий з метаданих супутникового продукту, θ – спроектований локальний кут падіння електромагнітної хвилі, ψ – нахил елементу рельєфу, ξ – аспект елемента рельєфу.

Класифікація супутникового зображення. Для побудови карти обрано дату проведення наземних квазісинхронних вимірювань – 3 квітня 2019 року. У методиці передбачається, що картування вологості буде здійснено для відкритих природних земних покривів відкритих ґрунтів або ґрунтів з помірною кількістю рослинного покриву. З метою маскування нецільових класів (деревної рослинності та штучних поверхонь), здійснено класифікацію супутникового зображення PlanetScope за 3 квітня 2019 року методом опорних векторів (Support Vector Machine) (Vapnik et al., 1997).

приповерхневому шарі ґрунту шляхом обчислення топографічної неоднорідності земної поверхні. З цієї метою ЦММ було розділено на три кластери: $h_1 = h < 60$ м, $h_2 = 60 \text{ м} < h < 120$ м та $h_3 = h > 120$ м. У кожному кластері локальні топографічні особливості нормувалися за мінімальною висотою рельєфу. В результаті одержано порівняльний опис топографічної неоднорідності земної поверхні (φ) за формулою (28):

Зв'язок між усіма вищенаведеними факторами та вологістю ґрунту відновлювався багатовимірною регресійною залежністю з мінімізацією абсолютних відхилень (Тюрін, 2010). Суттєву нелінійність моделі було враховано, застосовуючи емпірично визначені нелінійні перетворення більшості регресорів.

2.5. Методика комплексування

Потоки обробки даних для обчислення фізичних, біофізичних та топографічних параметрів, використаних в описаних підходах та методах, відображені на схемі Рис. 3.

Вхідні радарні дані C-SAR Sentinel-1 з розрядністю 12 біт у форматі дискретних цілочисельних значень (DN_{SAR}) завантажувалися в програмне середовище SNAP, де було виконано операції попередньої обробки продукту GRDH. Зокрема, оновлено метадані для відновлення актуальної інформації про положення та швидкість супутника, а також положення Сонця. Наступний крок, значення DN_{SAR} були перетворені на коефіцієнти зворотного розсіювання для горизонтальної (σ_h) та вертикальної (σ_v) поляризацій за (14). У результаті геометричної корекції методом далекомірної ортокорекції Доплера було додатково згенеровано растрові зображення, спроектовано на топографію місцевості (θ) та спроектовано на еліпсоїд (ϑ) локальні кути падіння електромагнітної хвилі.

Відносна діелектрична проникність ε у точці відбору ґрунтових проб обчислювалася за формулою (21). При цьому обиралися такі значення гранулярності (s) та радіуса кореляції (l), за яких значення вертикальної (ε_v) та горизонтальної (ε_h) задовольняли умову $\varepsilon_h \approx \varepsilon_v$ (Рис. 2). Карти ε та гранулярності (s) побудовано на основі результатів апроксимації обчислення ε матричним методом. З цієї метою побудовано матрицю $[\sigma_h(\theta), \sigma_v(\theta)]$ розміром 12×12 відліків. Почергово обчисливши ε та s , отримано вибірку 232 вимірювань, яка була використана для побудови карт ε та s .

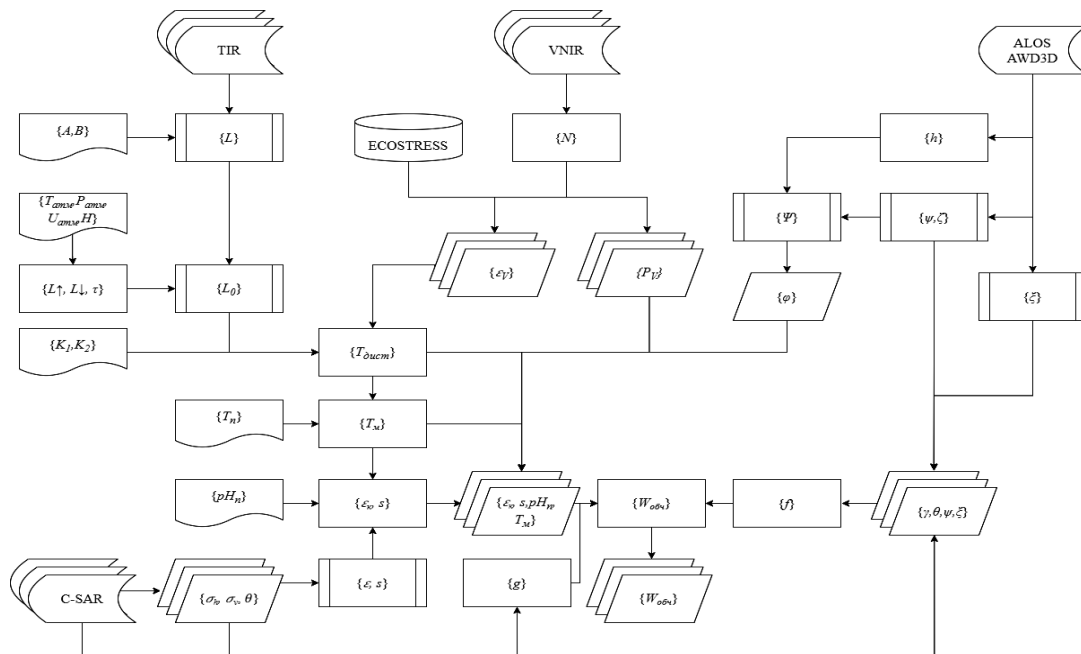


Рис. 3. Схема операцій методики комплексування радіолокаційних та оптичних даних для визначення вологості ґрунту

Наступним кроком величина ε була калібрована шляхом врахування кислотності та температури ґрунтів. З метою відновлення регресійної залежності між вимірюваною (W) та обчисленою ($W_{обч}$) вологістю ґрунтів, використано результати наземних вимірювань кислотності (pH_n) та температури (T_n), отриманих методом контактних вимірювань на місцевості, для калібрування ε за формулою (25). Для побудови карти вологості використано карту кислотності, отриману шляхом інтерполяції даних pH_n та карту температури земних покривів $T_{дист}$, побудовану за багатоспектральними оптичними даними у видимому діапазоні PlanetScore та тепловому діапазоні MODIS. Кислотність ґрунту на ділянках, кислотність яких невідома, встановлена на рівні нейтрального середовища: $pH = 7$.

Температура визначається у 2 потоки: група зображень VNIR містить зональні коефіцієнти відбиття земної поверхні c_i у кожному спектральному каналі PlanetScore. Вони використовуються для обчислення NDVI (N) за (3), а за ним відповідно до (2) – проективне покриття рослинності P_V . Для визначення коефіцієнтів теплового випромінювання ε_V за формулою (8), окремо для рослинних та нерослинних покривів, виконується попередня класифікація зображення за пороговими значеннями N_0 та N_1 з формули (2). Обчислення ε_V проводиться в діапазоні значень $N_0 > NDVI > N_1$. Значення ε_V в комірках зображення N в діапазонах $NDVI \leq N_0$ (нерослинні поверхні) та $N_1 \geq NDVI$ (виключно рослинні поверхні) обираються зі спектральної бібліотеки (ECOSTRESS).

У другому потоці даних, спочатку зображення TIR із зареєстрованих цифрових кодів (DN_{TIR}) за калібрувальними коефіцієнтами (A, B) переобчислюються в спектральну щільність енергетичної яскравості на апертурі сенсора L (4), а далі – в спектральну щільність енергетичної яскравості на земній поверхні по L_0 (5). Необхідні для L_0 атмосферні

функції L_{\uparrow} , L_{\downarrow} і τ контролюються метеорологічними ($T_{атм}$, $P_{атм}$, $U_{атм}$) та топографічними (h) умовами ТД та її географічним положенням. Зокрема, показники $T_{атм}$, $P_{атм}$ та $U_{атм}$ можна отримати шляхом прямих наземних вимірювань із сайту прогнозу погоди Розклад погоди (gr5.ua). В результаті проведення операції в двох потоках даних, значення ε_V та L_0 використовуються для обчислення температури земної поверхні $T_{дист}$, відповідно до (9). Калібрувальні коефіцієнти K_1 та K_2 можна отримати з метаданих супутникових продуктів (Landsat 7, Landsat 8) або обчислити за формулами (10) та (11) відповідно (для сенсора MODIS). Оскільки оптичні сенсори, що постачають теплові дані, виконують зйомку в час, що не збігається з часом роботи C-SAR, значення $T_{дист}$ було масштабовано до температур під час квазісинхронних наземних вимірювань за формулою (13).

Топографічна неоднорідність (ϕ) визначалася за даними ЦММ ALOS AWD3D. На основі карти висоти рельєфу обчислено ухил ψ та кривизну ζ елементу рельєфу за формулами (26) та (27), відповідно, а потім – ортогональну увігнутість рельєфу (Ψ) у програмному середовищі ENVI. Нормувальні множники ϕ обчислено шляхом знаходження максимального значення висоти рельєфу (h) в кожному із трьох кластерів за формулою (28).

Для врахування особливостей елементу рельєфу, що відображається на сигналі на сенсорі C-SAR, обчислено два параметри. Параметр g обчислено за даними. Функція уточнення статистичної правдоподібності $f(\gamma, \theta, \psi, \xi)$ обчислена за формулою (31) за зображеннями ψ та експозицією елементу рельєфу ξ (29), за зображенням спроектованого локального кута візування θ радарного сенсору Sentinel-1 C-SAR, а також курсовим кутом супутника γ , отриманого з метаданих продукту GRDH.

Внаслідок комплексної обробки радіолокаційних та оптичних даних за схемою (Рис. 3) одержується результуюча карта вологості ґрунтів. Карту може використати користувач для вирішення тематичних природоохоронних, управлінських та освітніх завдань.

3. Результати

3.1. Картування параметрів земних покривів

Із проведених досліджень отримано параметри, для обчислення $W_{обч}$ на основі багатоспектральних оптичних та двополяризаційних радарних супутникових даних, ЦММ, архівних метеорологічних даних та результатів наземних вимірювань. Дані використані у форматі двовимірних геопросторових тематичних зображень. Зокрема, для обчислення ϵ та s побудовано карти σ_h , σ_v та θ (Рис. 4).

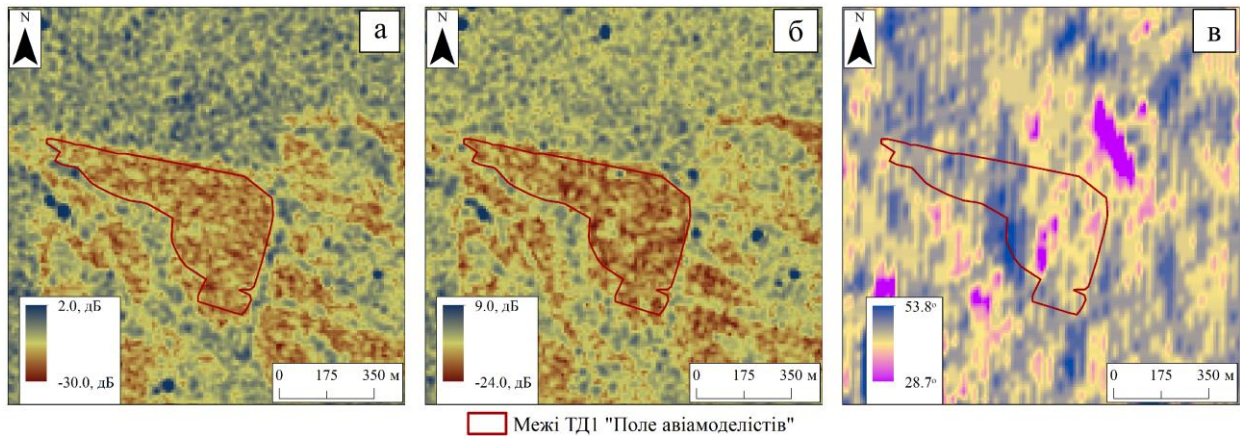


Рис. 4. Карти вхідних параметрів, використаних для обчислення діелектричної проникності та гранулярності земних покривів: *а* – коефіцієнт зворотного розсіювання, вимірюного в горизонтальній поляризації (σ_h , дБ); *б* – коефіцієнт зворотного розсіювання, вимірюного у вертикальній поляризації (σ_v , дБ); *в* – спрескований на топографію місцевості локальний кут падіння електромагнітної хвилі (θ , град.)

На Рис. 5а та 5б значення σ_h та σ_v характеризують відбивальну здатність поверхні. Таким чином, відносно гладкі поверхні, такі як штучні покриття (асфальт, бруківка, бетонні плити та ін.), відкритий ґрунт (піщані поверхні, рілля або незоране поле та ін.) або поверхні з незначною трав'янистою рослинністю (газон, пустирище, клумби) характеризуються низькими значеннями КЗР. На противагу, об'єкти складної форми (будівлі, кутові відбивачі, мости) характеризуються високими значеннями КЗР, оскільки поляризація сигналів, відбитих від таких поверхонь не збігається з

поляризацію зондувального сигналу. Отримані просторові розподіли σ_h , σ_v та θ використані для обчислення ϵ та s та отримання карт відповідних параметрів (Рис. 5).

На Рис. 5а закартовано параметр ϵ_k , який являє собою ϵ з урахуванням впливу дестабілізаційних факторів, а саме температури та кислотності приповерхневого ґрунтового шару. Шорсткість земної поверхні на тестовій ділянці, розподіл якої показано на Рис. 5б, описує неоднорідність земного покриву, що може бути зафіксована радаром з урахуванням його поляризаційних властивостей.

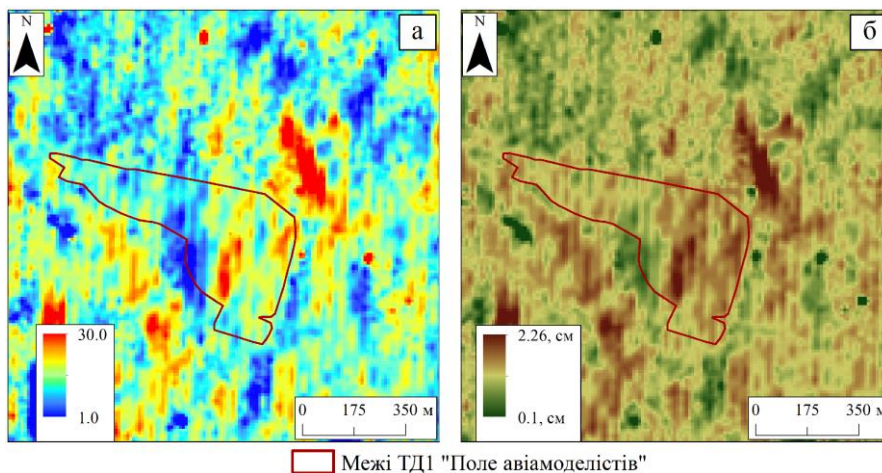


Рис. 5. Карти результатів обчислення діелектричної проникності: *а* – відносна діелектрична проникність калібрована за даними наземних вимірювань кислотності й температури ґрунтів (ϵ_k); *б* – карта шорсткості (s , см)

Результати обчислення проєктивного рослинного покриву P_v на основі багатоспектральних супутникових даних PlanetScope, наведено на Рис. 6а. Це зображення використано на двох стадіях експерименту: 1) обчислення температури земних

покривів T_m (Рис. 6б) та 2) безпосередньо в регресійній моделі з метою відновлення вологості ґрунтів. Карта кислотності ґрунтів, що побудована шляхом інтерполяції даних наземних вимірювань та використана для калібрування ϵ , наведена на Рис. 6в.

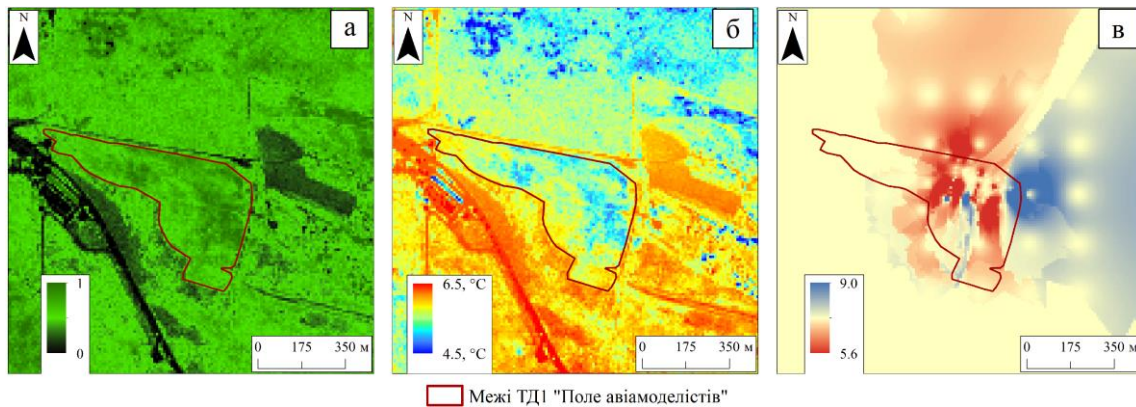


Рис. 6. Зображення рослинного покриву та фізичні характеристики тестової ділянки: а – проєктивне покриття рослинності (P_v), б – температура земних покривів за даними PlanetScope (3 квітня 2019 року) та MODIS Terra (4 квітня 2019 року), масштабовані до температури квазісинхронних наземних підсупутникових вимірювань (T_m , °C), в – кислотність ґрунтів за даними наземних виходів (pH_n)

Як було зазначено, крім фізичних характеристик ґрунтів, для відновлення вологості обчислені параметри, що характеризують морфологічні особливості місцевості та враховують неоднорідність рельєфу території дослідження. Зокрема, локальний кут візування, спроектований на еліпсоїд (Рис. 7а) використаний для обчислення параметра врахування

напрямку спостереження радара та лінії нормалі земної поверхні елементу місцевості (f) (Рис. 7б). Картування локальних девіацій відбиття електромагнітної хвилі обчислено за σ_h , σ_v та θ (Рис. 7в). На основі даних ЦММ ALOS AW3D отримано геопросторове зображення топографічної неоднорідності земної поверхні (ϕ) (Рис. 7г).

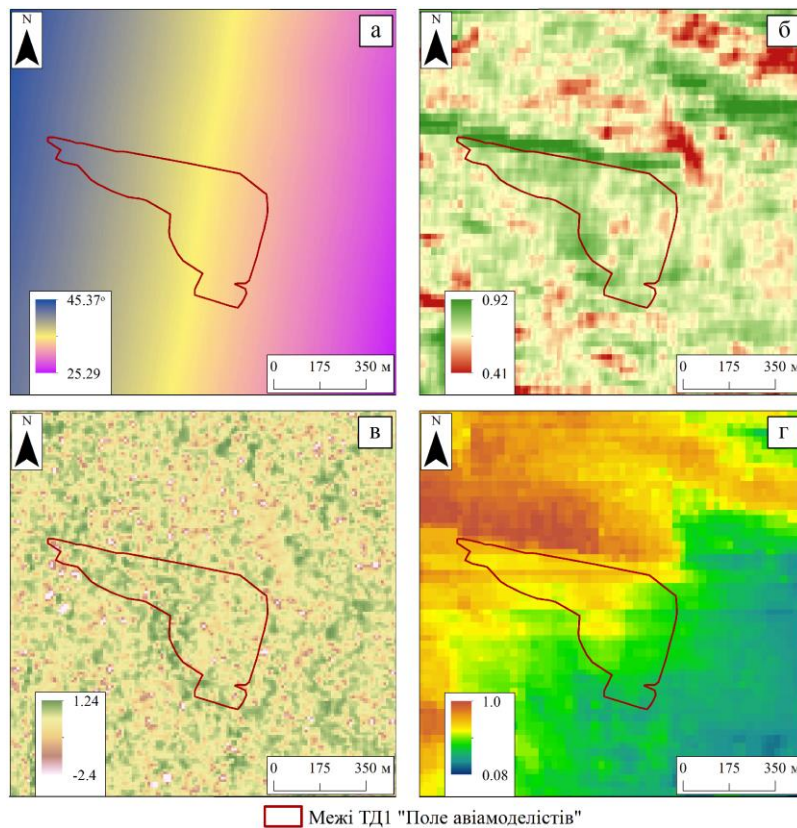


Рис. 7. Топографічні параметри: а – спроектований на еліпсоїд локальний кут падіння електромагнітної хвилі (θ , град.), б – параметр врахування напрямку спостереження радара та лінії нормалі земної поверхні елементу місцевості (f), в – параметр локальних девіацій радіолокаційного відбиття (g), г – параметр топографічної неоднорідності земної поверхні (ϕ)

З метою забезпечення сумісності усі зображення приведено до просторової розрізненості 10 м.

3.2. Результати регресійного аналізу

Згідно з проведеними дослідженнями математична модель розглянутого процесу надається як оцінка параметра розподілу ймовірностей випадкової величини на основі вибірки обмеженого обсягу. Після проведення фільтрації за критерієм κ (24) для задоволення умови $\varepsilon_h \approx \varepsilon_v = [1...10]$, було відібрано 46 відліків для відтворення багатовимірної

регресії. Аналіз стандартного відхилення кожної точки показав, що зв'язок між еталонними та обчисленими даними значно посилюється після усунення 4 точок з вибірки. Таким чином, регресійну модель відтворено за 42 відліками (Рис. 8). Для виявлення впливу температури, регресійну залежність було відновлено для двох випадків: 1) урахування температури ґрунтів, виміряної під час наземних квазісинхронних вимірювань (T_n) (Рис. 8а), та 2) без урахування T_n (Рис. 8б).

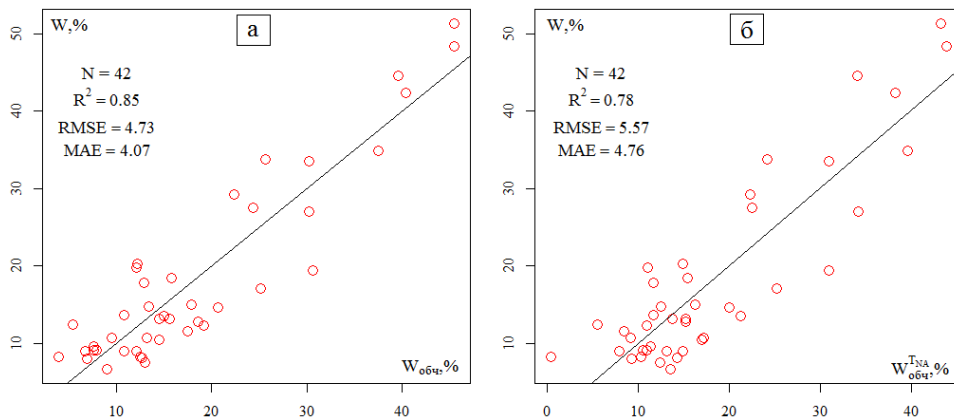


Рис. 8. Графіки одновимірної регресійної залежності між виміряною та обчисленою вологістю ґрунту: а – залежність між виміряною (W) та обчисленою ($W_{обч}$) вологістю ґрунтів; б – залежність між виміряною (W) вологістю, та вологістю, обчисленою без температури земних покривів ($W_{обч}^{T_{на}}$)

Отже, спостерігається сильний зв'язок моделі ($W_{обч}$) з наземними даними вологості (W). Зокрема, коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,85$, середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error, RMSE) становить 4,73 %, а середня абсолютна похибка (Mean Absolute Error) – 4,07 %. Зв'язок W від вологості, обчисленої без урахування температури також встановлено: $R^2 = 0,78$, $RMSE = 4,73$ %, $MAE = 4,07$ %. Тому, оскільки точність регресійної моделі залежить від температури, для побудови карти вологості використано обчислену температуру земного покриву $T_{дист}$ за формулою (9). З цією метою завантажено та оброблено три теплових

спутникових зображення, отримані супутниковими системами 4 квітня (Terra MODIS), 9 квітня (Landsat-7 ETM+) та 3 травня (Landsat-8 TIRS) 2019 року (табл. 2). При цьому значення $T_{дист}$ для кожної дати окремо, масштабовано до значень T_n на час проведення наземних вимірювань T_m за формулою (13). Оскільки теплові супутникові дані доступні лише для обмеженої кількості дат, статистична вибірка є скороченою до 32 відліків ($n = 32$). Регресійні моделі залежності вологості ґрунту від вологості, обчисленої за тепловими супутниковими даними, наведено на Рис. 9.

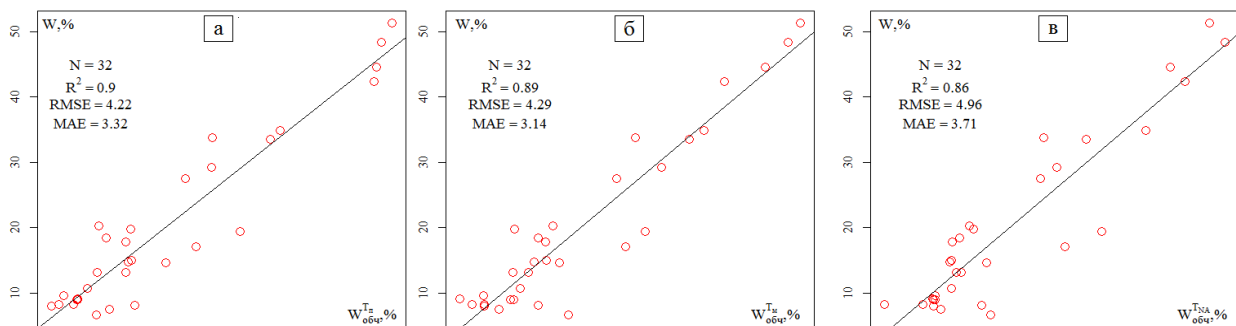


Рис. 9. Графіки одновимірної регресійної залежності між виміряною та обчисленою вологістю ґрунту для обмеженої вибірки: а – залежність між виміряною (W) та обчисленою ($W_{обч}^{T_n}$) вологістю ґрунтів, за T_n ; б – залежність між виміряною вологістю (W) та вологістю ($W_{обч}^{T_m}$), обчисленою за тепловими супутниковими даними, масштабованими до температур квазісинхронних наземних вимірювань (T_m); г – залежність між виміряною вологістю (W) та вологістю ($W_{обч}^{T_{на}}$), обчисленою без врахування теплових даних

До результуючої моделі комплексування даних $W_{\text{обч}}$, графічне зображення та точність якої наведено на Рис. 8а, входять фізичні та біофізичні характеристики земної поверхні, що отримані на основі багатоспектральної оптичної та двополяризаційної супутникової зйомки, а також польових підсупутникових вимірювань. Підвищення точності регресійної моделі досягається шляхом здійснення нелінійних перетворень більшості регресорів. Повний лінійний вираз багатовимірної регресійної моделі має вигляд:

$$W_{\text{обч}} = 2922020,6 \cdot \sigma_h^3 + \frac{32,33}{\sqrt[4]{\sigma_v}} + \frac{0,969 \cdot \sigma_h}{\sigma_v} + 60,766 \cdot \cos \vartheta^3 - \frac{4,693}{\sin \vartheta^3} + 476,687 \cdot f \sqrt[4]{P_v} + \frac{6,066}{f^5} + 26,68 \cdot g^2 - 1,115 \cdot \sqrt{\varepsilon_k} - 389,827 \cdot s + 11,391 \cdot \varphi + 178,873 \cdot \sqrt[4]{P_v} - \frac{14483,929}{\sqrt{\ln(T_n + 273,15)}} + 82,078 \cdot \sqrt{\ln(pH_n)} + 8648,096, \quad (32)$$

де σ_h – коефіцієнт зворотного розсіювання, виміряного в горизонтальній поляризації; σ_v – коефіцієнт зворотного розсіювання, виміряного у вертикальній поляризації, ϑ – спроектований на еліпсоїд локальний кут падіння електромагнітної

хвилі, рад; θ – спроектований на топографію місцевості локальний кут падіння електромагнітної хвилі, рад; f – параметр врахування напрямку спостереження радар та лінії нормалі земної поверхні елемента місцевості; P_v – проєктивне покриття рослинності; g – показник локальних девіацій радіолокаційного відбиття; ε_k – відносна діелектрична проникність, калібрована за даними наземних вимірювань кислотності й температури ґрунтів; s – гранулярність; φ – параметр топографічної неоднорідності земної поверхні; T_n – температура ґрунту, виміряна контактним методом, °C; pH_n – кислотність ґрунту, виміряна контактним методом.

3.3. Побудова карти вологості

Рівняння (32) використано для обчислення вологості та побудови тематичної карти. Для маскування нецільових класів (штучні поверхні, поверхні з деревною рослинністю) виконано класифікацію супутникового зображення PlanetScore, за 3 квітня 2019 року, методом Support Vector Machine (Рис. 10а). Оскільки для моделі необхідно мати температуру земних покривів, параметр T_n був замінений на T_m (13). Результати обчислення $W_{\text{обч}}$ наведені на карті вологості ґрунту ТП “Поле авіамоделістів” на Рис. 10б.

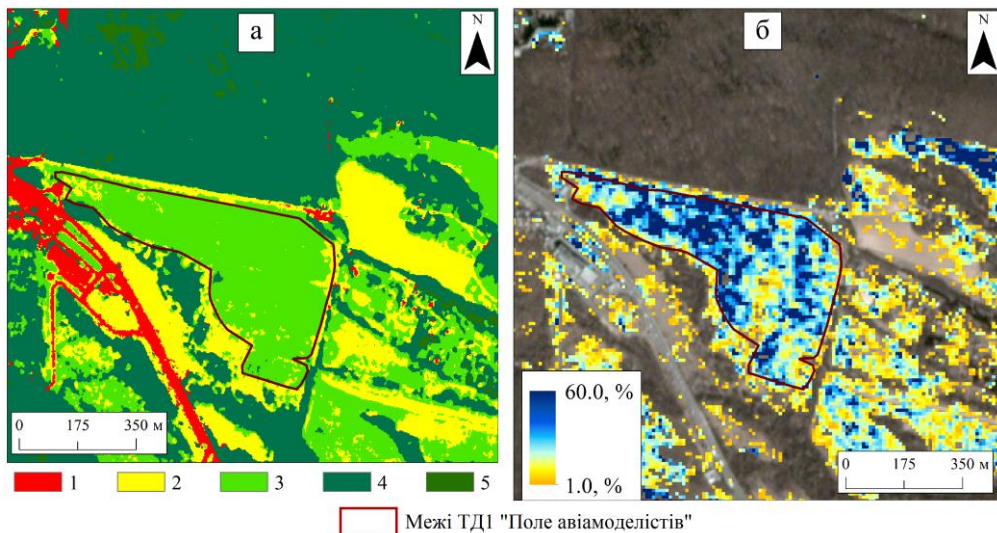


Рис. 10. Результати класифікації супутникового зображення та обчислення вологості ґрунтів:
а – карта земних покривів за результатами класифікації оптичних супутникових зображень PlanetScore (дата зйомки – 3 квітня 2019 року): 1 – штучні поверхні, 2 – відкриті ґрунти, 3 – трав’яна рослинність, 4 – розріджений лісовий покрив, 5 – густий лісовий покрив; б – ортофотокарта вологості ґрунту

4. Обговорення результатів

Аналізуючи карти просторового розподілу θ (Рис. 4в), ε_k та s , (Рис 5а, 5б), можна зробити висновок про тісний зв’язок цих трьох фізичних характеристик земного покриву. Зокрема, низькі значення θ відображають поверхні із сильним ухилом, оскільки цей кут є кутом між нормаллю елемента рельєфу та кутом візування РСА (9). Отже, на карті шорсткості s можна ідентифікувати осередки аномальної шорсткості або складні об’єкти,

геометрія яких прямо впливає на ступінь деполаризації зондувального сигналу. Як наслідок, такі елементи рельєфу відрізняються аномально високими значеннями ε_k . У межах ТДІ “Поле авіамоделістів”, осередки аномально високих значень ε_k узгоджені локальними неоднорідностями рельєфу, відображеними на картах топографічної неоднорідності (Рис. 7г).

Узгодження просторового розподілу теплових аномалій на карті T_m (Рис. 6б) з просторовим розподілом проєктивного покриття рослинності

(Рис. 6а) пояснюється прямим зв'язком між типом поверхні та його випромінювальною здатністю. На карті теплових аномалій мінімальні температури відповідають областям зі значним рослинним покривом (Рис. 9а), а максимальні температури – штучним покривам. Такий підхід щодо використання теплових даних зумовлений відсутністю теплових супутникових продуктів на час проведення радіолокаційної зйомки. Відновлення регресійної залежності (Рис. 8) стало можливим завдяки результатам підсупутникових квазісинхронних вимірювань.

За результатами обробки супутникових даних за схемою на Рис. 3, отримані параметри використані для відтворення регресійної залежності між обчисленою ($W_{\text{обч}}$) та виміряною (W) вологістю ґрунту (Рис. 8) на основі 42 спостережень. При цьому, точність моделі описується за $R^2 = 0,85$, $\text{RMSE} = 4,73\%$ та $\text{MAE} = 4,07\%$. У межах статистичної вибірки значення W коливаються в діапазоні 6,65–51,2 %, тоді як $W_{\text{обч}}$ – в діапазоні 8,94–45,48 %, причому середня вологість для обох наборів вологості становить 18,23 %. Обчислення здійснено для статистичної вибірки, яка на 50 % складається зі спостережень на ділянках, де значення NDVI перевищує 0,51.

Результати регресійного аналізу зв'язку між W та обчисленими вологістю ґрунтів для обмеженої статистичної вибірки (Рис. 9) дає змогу зробити висновок, що для означених природних умов температура земного покриву відіграє значну роль. А саме, на Рис. 9а, використавши T_n і проаналізувавши залежність W від $W_{\text{обч}}^{T_n}$, дійшли висновку, що точність регресійної моделі становила $R^2 = 0,9$, $\text{RMSE} = 4,22\%$, а похибка $\text{MAE} = 3,32\%$. Модель, побудована на такій залежності є точнішою за модель на основі залежності Рис. 8а. Тим не менш, такий результат досягнуто лише за умови скорочення вибірки і його надано виключно для демонстрації важливості використання теплових даних. Зокрема, на Рис. 9б наведено графік залежності W від $W_{\text{обч}}^{T_m}$, точність моделі якої становить $R^2 = 0,89$, $\text{RMSE} = 4,29\%$, а $\text{MAE} = 4,07\%$. Однак, у разі неврахування температури, точність моделі погіршується до $R^2 = 0,86$, $\text{RMSE} = 4,96\%$, а $\text{MAE} = 3,71\%$. Таким чином, заміна T_n на T_m значною мірою не вплинула на результат регресійного аналізу. Точність є нижчою, але подібною до точності регресійної залежності W від $W_{\text{обч}}^{T_n}$. Неврахування теплових даних з регресійної моделі призводить до зниження точності, що також показано на прикладі залежності W від $W_{\text{обч}}^{T_n}$ (на основі вибірки $n = 42$), графічно відтвореній на Рис. 8б.

Висновки

Під час дослідження розроблено необхідні моделі і відповідну цілісну методику комплексування багатоспектральних оптичних та двополяризаційних супутникових даних з метою обчислення фізичних та

біофізичних параметрів земних покривів. Обчислено діелектричну проникність земної поверхні на основі методу малих збурень коефіцієнта зворотного розсіювання радіолокаційного сигналу. Цей параметр було калібровано за температурою та кислотністю ґрунту. Основою методики є відновлена багатовимірна регресійна залежність над набором нелінійно перетворених регресорів, що враховують як поляризаційні характеристики радіолокаційного відбиття, так і фізичні / біофізичні параметри земної поверхні.

Розроблену методику перевірено на статистично значущій вибірці результатів підсупутникових вимірювань вологості проб ґрунту, обчисленої термостатно-ваговим методом, та всіх необхідних фізичних / біофізичних параметрів земної поверхні. Одержано карту вологості ґрунту для території дослідження, яка забезпечує прийнятну точність її відновлення. Тому розроблену методику можна рекомендувати для практичного застосування в поточному геокліматичному регіоні України.

Подальші дослідження слід спрямувати на широкомасштабне тестування розробленої методики в інших регіонах України на незалежних тестових ділянках, на удосконалення застосованої напівемпіричної моделі калібрування радарних даних задля задоволення природних обмежень на значення діелектричної проникності земної поверхні, на більш достовірне визначення допоміжних регресорів моделі.

Важливою передумовою практичного використання розробленої методики є наскрізна автоматизація її процедур, починаючи з отримання необхідних дистанційних та метеорологічних даних і закінчуючи раціональною візуалізацією одержуваних карт вологості ґрунту. Для цього рекомендується використовувати наявні геоінформаційні платформи, які створено в рамках Європейської ініціативи Copernicus, та передові вітчизняні розробки в цій галузі.

Література

- Беляева Т. А., Бобров П. П., Кондратьева О. В. Изменение диэлектрических свойств связанной воды в почвах при увеличении ее количества. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2013. 5(51). 92–95.
- Воронин А. Н. Методы комплексирования данных. *Кибернетика и системный анализ*. 40(5). 2014. С. 78–84.
- Гривачевський А. П. Аналіз методів комплексування сигналів парціальних спектральних каналів в системах моніторингу об'єктів та сцен. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2020. 818. С. 55–61.
- Гривачевський А. П., Фабіровський С. Є. Суміщення зображень сформованих сенсорами різної фізичної природи в процесі комплексування сигналів в мультиспектральних системах моніторингу. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. 2017. 874. С. 73–80.
- Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Захаров А. И., Чимитдоржиев Т. Н. Радиолокационная интерферометрия сезонных деформация почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с

- шероватими границями. *Оптика атмосфери и океана*. 2016. 29(7). 585–591. doi:10.15372/AOO20160709.
- ДСТУ ISO 11465-2001. Якість ґрунту. Визначання сухої речовини та вологості за масою. Гравіметричний метод (ISO 11465:1993, IDT). 2002. 13 с.
- Косолапова Л. Г. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости влажных почв. Эксперименты и моделирование. Материалы XVI Международной научной конференции “Решетневские чтения”. Красноярск: СибГАУ, 2012. С. 214–215.
- Лактионов И. С., Вовна А. В. Способ уменьшения дополнительной погрешности измерителя влажности почвы оранжерей ботанического сада. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2014а. 27(2). 183–191. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_ota_2014_2_24.
- Лактионов И. С., Вовна А. В. Метод повышения эффективности измерителя влажности почвы. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2014б. 24(4). 81–87.
- Лялько В. И., Вульфсон Л. Д., Когляр А. Л., Рябоконенко А. Д., Фрейдликер В. Д. Подповерхностное зондирование в Р-диапазоне с целью определения влажности почвы в различных ландшафтно-климатических условиях. *Науки про Землю та космос – суспільству: Праці І наукової конференції* (25–27 червня 2007). С. 15–18.
- Матус С. К. Інформаційно-вимірвальна система збору даних і контролю за вологозапасами ґрунту. *Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць*. Рівне. 2014. 2(66). с. 198–208. URL: <https://nuwm.edu.ua/naukova-dijalnistj/vidannja-universitetu/visnik-nuwm/tekhichni-nauki/2014/visnik2>.
- Плотніков О. М., Микитенко В. І. Метод комплексування даних з попереднім знаходженням інформативної області сцени. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. 1. С. 196–201. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2017_1_39.
- Поздняков А. И., Гюлялыев Ч. Г. Электрофизические свойства некоторых почв. Москва-Баку: Адильголы, 2004. 240 с.
- Прудис І. Н., Лазько Л. В., Семенов С. О. Багаторівневе комплексування графічної інформації в системах дистанційного зондування. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. 2008. 618. С. 3–10. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/33957>.
- Станкевич С. А., Пилипчук В. В., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання. *Космічна наука і технологія*. 2016. 22(4). С. 19–28. URL: <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2016-22/knit-2016-22-4-02-Stankevich.pdf>.
- Тюрин Ю. Н. Многомерный статистический анализ: геометрическая теория. *Теория вероятностей и ее применения*. 2010. 55(1). С. 36–58. doi:10.4213/tvp4175.
- Фомичёв А. А., Успенский В. Б., Счастливцев К. Ю., Пугачёв Р. В. Комплексирование информации в интегрированной навигационной системе при неполном созвездии навигационных спутников. *Системы обработки информации*. 2005. 8(48). С. 284–290.
- Шейко С. Г., Міхєєва М. П.. Електрохімія : навч. посіб. для студ. ВТНЗ. Донецьк: “Ноулідж”, 2013, 226 с. ISBN 978-617-579-231-5.
- Álvarez-Mozos, J., González-Audicana, M., Casali J., & Larrañaga A. (2008). Effective versus measured correlation length for radar-based surface soil moisture retrieval. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17–18), 5397–5408. doi:10.1080/01431160802036367.
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57, 530–616. doi:10.1029/2018RG000618.
- Baghdadi, N., Zribi, M., Paloscia, S., Verhoest, N. E., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2015). Semi-empirical calibration of the integral equation model for co-polarized L-band backscattering. *Remote Sensing*, 7(10), 13626–13640. doi:10.3390/rs71013626.
- Baghdadi, N., Choker, M., Zribi, M., Hajj, M.E., Paloscia, S., Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016). A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces. *Remote Sensing*, 8(11), 920. doi:10.3390/rs8110920.
- Baghdadi, N., El Hajj, M., Choker, M., Zribi, M., Bazzi, H., Vaudour, E., Gilliot, J.-M., & Ebengo, D.M. (2018). Potential of Sentinel-1 Images for estimating the soil roughness over bare agricultural soils. *Water*, 10, 131. doi:10.3390/w10020131.
- Baghdadi, N., El Hajj, M. E., & Zribi, M. (2019). An Operational High Resolution Soil Moisture Retrieval Algorithm Using Sentinel-1 Images. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). doi:10.1109/piers-spring46901.2019.9017477.
- Barnes, R., Brown, S., Lykke, K., Guenther, B., Butler, J., Schwarting, T., Turpie, K., Moyer, D., DeLuccia, F., & Moeller, C. (2015). Comparison of two methodologies for calibrating satellite instruments in the visible and near-infrared. *Applied Optics*, 54(35), 10376. doi:10.1364/ao.54.010376.
- Barsi, J. A., Barker, J. L., & Schott, J. R. (n.d.). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477). doi:10.1109/igarss.2003.1294665.
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Chabaane, Z. L., Fanise, P., & Boulet, G. (2019). Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture and Irrigation Mapping Over Semi-Arid Region. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. doi:10.1109/igarss.2019.8897883.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. doi:10.1016/s0034-4257(97)00104-1.
- Choker, M., Baghdadi, N., Zribi, M., El Hajj, M., Paloscia, S., Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Mattia, F. (2017). Evaluation of the Oh, Dubois and IEM Backscatter Models Using a Large Dataset of SAR Data and Experimental Soil Measurements. *Water*, 9(1), 38. doi:10.3390/w9010038.
- Crow, W. T., Wagner, W., & Naeimi, V. (2010). The Impact of Radar Incidence Angle on Soil-Moisture-Retrieval Skill. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(3), 501–505. doi:10.1109/lgrs.2010.2040134.
- Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1986). Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-24(1), 23–26. doi:10.1109/tgrs.1986.289585.
- Druce, D., Tong, X., Lei, X., Guo, T., Kittel, C.M.M., Grogan, K., & Tottrup, C. (2021). An optical and SAR based fusion approach for mapping surface water dynamics over Mainland China. *Remote Sensing*, 13(9), 1663 p. DOI: 10.3390/rs13091663
- Dubois, P. C., van Zyl, J., & Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915–926. doi:10.1109/36.406677.
- Earth Observation Research Center Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA EORC). (2020, May). ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver. 3.1 Product Description. Retrieved

- from https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v31_product_e_a.pdf.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., & Bazzi, H. (2017). Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for operational soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural areas. *Remote Sensing*, 9, 1292. <https://doi.org/10.3390/rs9121292>.
- European Space Agency. Sentinel-1: Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. Technical Note (ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002, May 2015). Nuno Miranda, P.J., Eds. Meadows. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu>.
- European Space Agency. (2020, February). Sentinel-1 Product Specification (S1-RS-MDA-52-7441). 3(7), 197. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Specification.pdf/49c514c3-1574-4d94-aae2-d8061a3baebd?t=1584020315000>.
- Evans, I. (1980). An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement-Band*, 36, 274–295.
- Ezzahar, J., Ouadi, N., Zribi, M., Elfarkh, J., Aouade, G., Khabba, S., ... Jarlan, L. (2019). Evaluation of Backscattering Models and Support Vector Machine for the Retrieval of Bare Soil Moisture from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12(1), 72. doi:10.3390/rs12010072.
- Fung, A.K. (1994). *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Artech House, Incorporated, 594. ISBN: 9780890065235.
- Gorab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Mougenot, B., Fanise, P., Chabaane, Z.L. (2015). Retrieval of both soil moisture and texture using TerraSAR-X images. *Remote Sensing*, 7(8), 10098–10116. doi:10.3390/rs70810098.
- Hajsek, I., Jagdhuber, T., Schon, H., & Papathanassiou, K. P. (2009). Potential of Estimating Soil Moisture Under Vegetation Cover by Means of PolSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2), 442–454. doi:10.1109/tgrs.2008.2009642.
- Hsieh, C., Fung, A., Nesi, G., & Coppo, P. (1997). A Further Study of the IEM Surface Scattering Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 901–909. doi: 10.1109/36.60253.
- Hurlbert M., Krishnaswamy J., Davin E., Johnson F.X., Mena C.F., Morton J., Myeong S., Viner D., Warner K., Wreford A., Zakieddeen S., Zommers Z.. (2019). Risk Management and Decision making in Relation to Sustainable Development. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi & J. Malley (Eds.). In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/10_Chapter-7_V2.pdf.
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440–451. doi:10.1016/s0034-4257(96)00112-5.
- Ibarra-Castaneda, C., González, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S., & Maldague, X. (2004). Infrared image processing and data analysis. *Infrared Phys. and Technol.*, 46(1–2), 75–83. doi:10.1016/j.infrared.2004.03.01.
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. A model of saliency based visual attention for rapid scene analysis. (1998). *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11), 1254–1259. doi:10.1109/34.730558.
- Jagdhuber, T. (2012). *Soil Parameter Retrieval under Vegetation Cover Using SAR Polarimetry*. University of Potsdam, Germany, 270.
- Kedem, B., Victor De Oliveira V., & Sverchkov M. (2017). *Statistical Data Fusion*. Singapore: World Scientific Publishing, 200. doi:10.1142/10282.
- Kim, J., & Mohanty, B.P. (2017). A physically based hydrological connectivity algorithm for describing spatial patterns of soil moisture in the unsaturated zone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(4), 2096–2114. doi:10.1002/2016jd025591.
- Kondratov, P., Ohanesyan, A., Tkachenko, V., Pradyus, I., Lazko, L., & Hryvachevskiy, A. (2016). Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). doi:10.1109/tcset.2016.7452030.
- Kostyuchenko, Y., Movchan, D., Kopachevsky, I., & Bilous Y. (2015, November). Robust algorithm of multi-source data analysis for evaluation of social vulnerability in risk assessment tasks. *Proc. of SAI Intelligent Systems Conference 10-11, IEEE, London, UK*, 944–949. doi:978-1-4673-7606-8/15.
- Liu, M., Liu, X., Dong, X., Zhao, B., Zou, X., Wu, L., & Wei, H. (2020). An Improved Spatiotemporal Data Fusion Method Using Surface Heterogeneity Information Based on ESTARFM. *Remote Sensing*, 12(21), 3673. doi:10.3390/rs12213673.
- Lyalko, V.I., Vulfson, L.D., Kotlyar, A.L., Shevchenko, V.N., Ryabokononko, A.D., Blumberg, D.G., & Freilikher, V. (2000). Soil Moisture (Water-Content) Assessment by an Airborne Scatterometer: The Chernobyl Disaster Area and the Negev Desert. *Remote Sensing of Environment*, 71(3), 309–319. doi:10.1016/s0034-4257(99)00087-5.
- Macelloni, G., Nesi, G., Pampaloni, P., Sigismondi, S., Tarchi, D., & Lolli, S. (2000). Experimental validation of surface scattering and emission models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1), 459–469. doi:10.1109/36.823941.
- Nguyen, H., Cressie, N., & Braverman, A. (2012). Spatial statistical data fusion for remote sensing applications. *Jour. American Statistical Association*, 107(499), 1004–1018. doi:10.1080/01621459.2012.694717.
- Oguro, Y., Ito, S., & Tsuchiya, K. (2011). Comparisons of Brightness Temperatures of Landsat-7/ETM+ and Terra/MODIS around Hotien Oasis in the Taklimakan Desert. *Applied and Environmental Soil Science*, 1–11. doi:10.1155/2011/948135.
- Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F.T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 370–381. doi:10.1109/36.134086.
- Oh, Y. (2004). Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness From Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3), 596–601. doi:10.1109/tgrs.2003.821065.
- Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Renteria, D., Hermans, K., Jobbagy, E., Kurz, W., Li, D., Sonwa, D.J., & Stringer, L. (2019). *Land Degradation. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, & J. Malley (Eds.).

- In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/07_Chapter-4.pdf.
- Palombo, A., Pascucci, S., Loperte, A., Lettino, A., Castaldi, F., Muolo, M. R., & Santini, F. (2019). Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data, WorldView 2 Satellite Data and Field Measurements: Petacciato Case Study. *Sensors*, 19(7), 1515. doi:10.3390/s19071515.
- Panciera R., Tanase M.A., Lowell K., & Walker J.P. (2014). Evaluation of IEM, Dubois, and Oh radar backscatter models using airborne L-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 52(8), 4966–4979. doi:10.1109/tgrs.2013.2286203.
- Pathe, C., Wagner, W., Sabel D., Bartsch A., Kunzer C., & Scipal, K. (2007, July). Experimental I km soil moisture products from Envisat ASAR for Southern Africa. *Proceedings of ENVISAT Symposium*, ESA SP-636, 6.
- Pasolli, L., Notarnicola, C., Bertoldi, G., Bruzzone, L., Remelgado, R., Greifeneder, F., Niedrist, G., Chiesa, S.D., Tappeiner, U., & Zebisch, M. (2015). Estimation of Soil Moisture in Mountain Areas Using SVR Technique Applied to Multiscale Active Radar Images at C-Band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), 262–283. doi:10.1109/jstars.2014.2378795.
- Peng, M., Zhang, L., Sun, X., Cen, Y., & Zhao, X.A. (2020). Fast Three-Dimensional Convolutional Neural Network-Based Spatiotemporal Fusion Method (STF3DCNN) Using a Spatial-Temporal-Spectral Dataset. *Remote Sensing*, 12(23), 3888. <https://doi.org/10.3390/rs12233888>.
- Planet Labs. (2021, February). Planet Imagery Product Specifications. 100. Retrieved from <https://www.planet.com/products>.
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., Liwenga E., Pradhan P., Rivera-Ferre M.G., Sapkota T., Tubiello F.N., Xu Y. (2019). Food Security. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi & J. Malley (Eds.)]. In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/08_Chapter-5_3.pdf.
- Mirzabaev, A., Wu, J., Evans, J., García-Oliva, F., Hussein, I.A.G., Iqbal, M. H., Kimutai, J., Knowles, T., Meza, F., Nedjraoui, D., Tena, F., Türkeş, M., Vázquez, R.J., & Weltz M. (2019). Desertification. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (Eds.). In press. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/06_Chapter-3.pdf.
- Rees, G. (2013). *Physical principles of remote sensing*. New York: Cambridge University Press, 492. ISBN: 9781107004733
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., & Wendroth, O. (2008). Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358. doi:10.2136/vzj2007.0143.
- Rowlandson, T.L., Berg, A.A., Bullock, P.R., Hanis-Gervais, K., Ojo, E.R., Cosh, M.H., Powers, J., & McNairn, H. (2018). Temporal transferability of soil moisture calibration equations. *Journal of Hydrology*, 556, 349–358. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.023.
- Schreier, G. (1993). *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, 435.
- Small, D., & Schubert, A. (2019, March). Guide to S-1 Geocoding, UZH-S1-GC-AD, 1.10, 42. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/documents/247904/0/Guide-to-Sentinel-1-Geocoding.pdf/e0450150-b4e9-4b2d-9b32-dadf989d3bd3>.
- Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Piestova, I. O., & Lubyski, M. S. (2017). Leaf area index estimation of forest using sentinel-1 C-band SAR data. 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). doi:10.1109/mrrs.2017.8075075.
- Stephen H., Ahmad S., Piechota T. C., & Tang C. (2010). Relating surface backscatter response from TRMM precipitation radar to soil moisture: results over a semi-arid region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 193–204. doi:10.5194/hess-14-193-2010.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1986). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Vol. 2. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Ch. 12, Artech House Publishers, Norwood, 962–966.
- United Nations General Assembly. (1986). *Principles Relating to Remote Sensing of the Earth from Space*, accessed on April 10, 2006, 2. Retrieved from <https://digitallibrary.un.org/record/126423?ln=en>.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, Geneva, Switzerland, 472 p. Retrieved from https://gar.undrr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf.
- Van de Griend, A. A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1119–1131. doi:10.1080/01431169308904400.
- Vapnik, V., Golowich, S., & Smola, A. J. (1997). Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *Adv. Neural Info. Processing Systems*, 9, 281–287.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44(4). doi:10.1029/2008wr006829.
- Verhoest, N., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016). A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces. *Remote Sensing*, 8(11), 920, doi:10.3390/rs8110920.
- Wilson, D. J., Western, A. W., & Grayson, R. B. (2005). A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture. *Advances in Water Resources*, 28(1), 43–54. doi:10.1016/j.advwatres.2004.09.007.
- Wood, J. (1996, March). *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Ph.D. Thesis, University of Leicester, Department of Geography, Leicester, 466.
- Yahia, O., Guida, R., Iervolino, P. (2021). Novel Weight-Based Approach for Soil Moisture Content Estimation via Synthetic Aperture Radar, Multispectral and Thermal Infrared Data Fusion. *Sensors*, 21(10), 3457. doi:10.3390/s21103457.
- Yang, H., Zhang, L.F., Zhang, X., Fang, H., & Tong, X. (2011). Algorithm of emissivity spectrum and temperature

- separation based on TASI data. *Journal of remote sensing*, 15(6), 1242–1254. doi:10.11834/jrs.20110380.
- Zhang, L., Li, H., & Xue, Z. (2020). Calibrated Integral Equation Model for Bare Soil Moisture Retrieval of Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Linze County. *Applied Sciences*, 10(21), 7921. doi:10.3390/app10217921.
- Zhang, J. (2010). Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1(1), 5–24. doi:10.1080/19479830903561035.
- Zribi, M., Muddu, S., Bousbih, S., Al Bitar, A., Tomer, S. K., Baghdadi, N., & Bandyopadhyay, S. (2019). Analysis of L-Band SAR Data for Soil Moisture Estimations over Agricultural Areas in the Tropics. *Remote Sensing*, 11(9), 1122. doi:10.3390/rs11091122.
- Zribi, M., Gorraeb, A., & Baghdadi, N. (2014). A new soil roughness parameter for the modelling of radar backscattering over bare soil. *Remote Sensing of Environment*, 152, 62–73. doi:10.1016/j.rse.2014.05.009.
- ## References
- Álvarez-Mozos, J., González-Audicana, M., Casali J., & Larrañaga A. (2008). Effective versus measured correlation length for radar-based surface soil moisture retrieval. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17–18), 5397–5408. doi:10.1080/01431160802036367.
- Babaeian, E., Sadeghi, M., Jones, S. B., Montzka, C., Vereecken, H., & Tuller, M. (2019). Ground, proximal, and satellite remote sensing of soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 57, 530–616. doi:10.1029/2018RG000618.
- Baghdadi, N., Choker, M., Zribi, M., Hajj, M.E., Paloscia, S., Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016). A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces. *Remote Sensing*, 8(11), 920. doi:10.3390/rs8110920.
- Baghdadi, N., El Hajj, M. E., & Zribi, M. (2019). An Operational High Resolution Soil Moisture Retrieval Algorithm Using Sentinel-1 Images. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium. Spring (PIERS-Spring). doi:10.1109/piers-spring46901.2019.9017477.
- Baghdadi, N., El Hajj, M., Choker, M., Zribi, M., Bazzi, H., Vaudour, E., Gilliot, J.-M., & Ebengo, D.M. (2018). Potential of Sentinel-1 Images for estimating the soil roughness over bare agricultural soils. *Water*, 10, 131. doi:10.3390/w10020131.
- Baghdadi, N., Zribi, M., Paloscia, S., Verhoest, N. E., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2015). Semi-empirical calibration of the integral equation model for co-polarized L-band backscattering. *Remote Sensing*, 7(10), 13626–13640. doi:10.3390/rs71013626.
- Barnes, R., Brown, S., Lykke, K., Guenther, B., Butler, J., Schwarting, T., Turpie, K., Moyer, D., DeLuccia, F., & Moeller, C. (2015). Comparison of two methodologies for calibrating satellite instruments in the visible and near-infrared. *Applied Optics*, 54(35), 10376. doi:10.1364/ao.54.010376.
- Barsi, J. A., Barker, J. L., & Schott, J. R. (n.d.). An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*. doi:10.1109/igarss.2003.1294665.
- Belyaeva, T. A., Bobrov, P. P., & Kondratieva, O. V. (2013). The changes of soils dielectric properties caused by the increasing of bound water concentration. *Siberian Aerospace Journal*. 5(51), 92–95. (In Russian)
- Bousbih, S., Zribi, M., El Hajj, M., Baghdadi, N., Chabaane, Z. L., Fanise, P., & Boulet, G. (2019). Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture and Irrigation Mapping Over Semi-Arid Region. *IGARSS 2019. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. doi:10.1109/igarss.2019.8897883.
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. doi:10.1016/s0034-4257(97)00104-1.
- Choker, M., Baghdadi, N., Zribi, M., El Hajj, M., Paloscia, S., Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Mattia, F. (2017). Evaluation of the Oh, Dubois and IEM Backscatter Models Using a Large Dataset of SAR Data and Experimental Soil Measurements. *Water*, 9(1), 38. doi:10.3390/w9010038.
- Crow, W. T., Wagner, W., & Naeimi, V. (2010). The Impact of Radar Incidence Angle on Soil-Moisture-Retrieval Skill. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 7(3), 501–505. doi:10.1109/lgrs.2010.2040134.
- Dagurov, P. N., Dobrynin, S. I., Dmitriev, A. V., Chimitdorzhiev, N. N. (2016). Phase model of the scattering of microwaves by layer with rough boundaries. *Optika Atmosfery i Okeana*. 29(7), 585–591. doi:10.15372/AOO20160709. (In Russian)
- Dobson, M. C., & Ulaby, F. T. (1986). Active microwave soil moisture research. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-24(1), 23–26. doi:10.1109/tgrs.1986.289585.
- Druce, D., Tong, X., Lei, X., Guo, T., Kittel, C.M.M., Grogan, K., & Tottrup, C. (2021). An optical and SAR based fusion approach for mapping surface water dynamics over Mainland China. *Remote Sensing*, 13(9), 1663 p. DOI: 10.3390/rs13091663
- DSTU ISO 11465-2001. Soil quality. Determination of dry matter and moisture content. Gravimetric method. ISO 11465:1993, IDT), 2002, 13. (In Ukrainian).
- Dubois, P. C., van Zyl, J., & Engman, T. (1995). Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4), 915–926. doi:10.1109/36.406677.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., & Bazzi, H. (2017). Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for operational soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural areas. *Remote Sensing*, 9, 1292. doi:10.3390/rs9121292.
- Earth Observation Research Center Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA EORC). (2020, May). ALOS Global Digital Surface Model (DSM) “ALOS World 3D-30 m” (AW3D30) Ver. 3.1 Product Description. Retrieved from https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/aw3d30v31_product_e_a.pdf.
- European Space Agency. (2020, February). Sentinel-1 Product Specification (S1-RS-MDA-52-7441). 3(7), 197. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/1877131/Sentinel-1-Product-Specification.pdf/49c514c3-1574-4d94-aae2-d8061a3baebd?t=1584020315000>.
- European Space Agency. Sentinel-1: Radiometric Calibration of S-1 Level-1 Products Generated by the S-1 IPF. Technical Note (ESA-EOPG-CSCOP-TN-0002, May 2015). Nuno Miranda, P.J., Eds. Meadows. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu>.
- Evans, I. (1980). An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplement-Band*, 36, 274–295.
- Ezzahar, J., Ouadi, N., Zribi, M., Elfarkh, J., Aouade, G., Khabba, S., Er-Raki, S., Chehbouni, A., & Jarlan, L. (2019). Evaluation of Backscattering Models and Support Vector Machine for the Retrieval of Bare Soil Moisture from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 12(1), 72. doi:10.3390/rs12010072.
- Fomichev, A. A., Uspensky, V. B., Rushman, K. Yu., Pugachev, R. V. (2005). Information fusion in an integrated navigation system with the incomplete constellation of navigation satellites. *Information Processing Systems*. 8(48), 284–290. (In Russian)

- Fung, A.K. (1994). *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications*. Artech House, Incorporated, 594. ISBN: 9780890065235.
- Gorab, A., Zribi, M., Baghdadi, N., Mougenot, B., Fanise, P., Chabaane, Z.L. (2015). Retrieval of both soil moisture and texture using TerraSAR-X images. *Remote Sensing*, 7(8), 10098–10116. doi:10.3390/rs70810098.
- Hajsek, I., Jagdhuber, T., Schon, H., & Papathanassiou, K. P. (2009). Potential of Estimating Soil Moisture Under Vegetation Cover by Means of PolSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(2), 442–454. doi:10.1109/tgrs.2008.2009642.
- Hryvachevskiy, A. P., & Fabisovskyy, S. E. (2017). Matching up of images which formed by sensors of different physical nature in the process of signal fusion in multispectral monitoring systems. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. 874, 73–80. (In Ukrainian).
- Hryvachevskiy, A. P. (2020). Analysis of the methods of signal data fusion of partial spectral channels in the monitoring systems of objects and scenes. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University*. 818, 55–61. (In Ukrainian).
- Hsieh, C., Fung, A., Nesti, G., & Coppo, P. (1997). A Further Study of the IEM Surface Scattering Model.. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(4), 901–909. doi: 10.1109/36.60253.
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440–451. doi:10.1016/s0034-4257(96)00112-5.
- Hurlbert M., Krishnaswamy J., Davin E., Johnson F.X., Mena C.F., Morton J., Myeong S., Viner D., Warner K., Wreford A., Zakieldeen S., Zommers Z.. (2019). Risk Management and Decision making in Relation to Sustainable Development. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi & J. Malley (Eds.). In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/10_Chapter-7_V2.pdf.
- Ibarra-Castanedo, C., González, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S., & Maldague, X. (2004). Infrared image processing and data analysis. *Infrared Phys. and Technol.*, 46(1-2), 75–83. doi:10.1016/j.infrared.2004.03.01.
- Itti, L., Koch, C., & Niebur, E. A model of saliency based visual attention for rapid scene analysis. (1998). *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(11), 1254–1259. doi:10.1109/34.730558.
- Jagdhuber, T. (2012). *Soil Parameter Retrieval under Vegetation Cover Using SAR Polarimetry*. University of Potsdam: Potsdam, Germany, 270.
- Kedem, B., Victor De Oliveira V., & Sverchkov M. (2017). *Statistical Data Fusion*. Singapore: World Scientific Publishing, 200. doi:10.1142/10282.
- Kim, J., & Mohanty, B.P. (2017). A physically based hydrological connectivity algorithm for describing spatial patterns of soil moisture in the unsaturated zone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(4), 2096–2114. doi:10.1002/2016jd025591.
- Kondratov, P., Ohanesyan, A., Tkachenko, V., Pradyus, I., Lazko, L., & Hryvachevskiy, A. (2016). Detection and allotment of the objects based on multispectral monitoring. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET). doi:10.1109/tcset.2016.7452030.
- Kosolapova, L. G.. Temperature dependences of moist soils dielectric permittivity. Experiments and modeling. XVth International Scientific Conference Reshetnyvsky Readings. Krasnoyarsk, SibGau, 2012, 214–215. (In Russian)
- Kostyuchenko, Y., Movchan, D., Kopachevsky, I., & Bilous Y. (2015, November). Robust algorithm of multi-source data analysis for evaluation of social vulnerability in risk assessment tasks. *Proc. of SAI Intelligent Systems Conference 10–11, IEEE, London, UK*, 944–949. doi:978-1-4673-7606-8/15.
- Laktionov, I. S., & Vovna, A. V. (2014b). Method for the efficiency improving of the soil moisture meter. *Scientific Efforts of Donetsk National Technical University*. 24(4), 81–87. (In Russian)
- Laktionov, I. S., & Vovna, A. V. (2014a). Method of reducing the soil moisture meter additional error for the botanical garden greenhouses. *Scientific Efforts of Donetsk National Technical University*. 27(2), 183–191. Available online: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npdntu_ota_2014_2_24. (In Russian)
- Liu, M., Liu, X., Dong, X., Zhao, B., Zou, X., Wu, L., & Wei, H. (2020). An Improved Spatiotemporal Data Fusion Method Using Surface Heterogeneity Information Based on ESTARFM. *Remote Sensing*, 12(21), 3673. doi:10.3390/rs12213673.
- Lyalko, V. I., Wulfson, L. D., Kotlar, A. L., Ryabokonenko, A. D., & Freilicher, V. D. Subsurface remote sensing in the P-band for the determination of soil water content in different landscape and climatic conditions. *Proceedings of the I Scientific Conference “Earth and space sciences for society”*, 25–27 June 2007, p. 15–18. (In Russian)
- Lyalko, V.I., Vulfson, L.D., Kotlyar, A.L., Shevchenko, V.N., Ryabokonenko, A.D., Blumberg, D.G., & Freilikher, V. (2000). Soil Moisture (Water-Content) Assessment by an Airborne Scatterometer: The Chernobyl Disaster Area and the Negev Desert. *Remote Sensing of Environment*, 71(3), 309–319. doi:10.1016/s0034-4257(99)00087-5.
- Macelloni, G., Nesti, G., Pampaloni, P., Sigismondi, S., Tarchi, D., & Lolli, S. (2000). Experimental validation of surface scattering and emission models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(1), 459–469. doi:10.1109/36.823941.
- Matus, S. K. (2014). Information-measuring system of data acquisition and control of soil moisture reserves. *Herald of the National University of Water and Environmental Engineering, Technical sciences*, 2(66), 198–208. Retrieved from <http://ep3.nuwm.edu.ua/2349/1/Vt6626.pdf>. (In Ukrainian)
- Mbow C., Rosenzweig C., Barioni L.G., Benton T.G., Herrero M., Krishnapillai M., Liwenga E., Pradhan P., Rivera-Ferre M.G., Sapkota T., Tubiello F.N., Xu Y. (2019). Food Security. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi & J. Malley (Eds.). In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2021/02/08_Chapter-5_3.pdf.
- Mirzabaev, A., Wu, J., Evans, J., García-Oliva, F., Hussein, I.A.G., Iqbal, M. H., Kimutai, J., Knowles, T., Meza, F., Nedjraoui, D., Tena, F., Türkeş, M., Vázquez, R.J., & Weltz M. (2019). Desertification. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change,*

- desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (Eds.). In press. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/06_Chapter-3.pdf.
- Nguyen, H., Cressie, N., & Braverman, A. (2012). Spatial statistical data fusion for remote sensing applications. *Jour. American Statistical Association*, 107(499), 1004–1018. doi:10.1080/01621459.2012.694717.
- Oguro, Y., Ito, S., & Tsuchiya, K. (2011). Comparisons of Brightness Temperatures of Landsat-7/ETM+ and Terra/MODIS around Hotien Oasis in the Taklimakan Desert. *Applied and Environmental Soil Science*, 1–11. doi:10.1155/2011/948135.
- Oh, Y. (2004). Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness From Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(3), 596–601. doi:10.1109/tgrs.2003.821065.
- Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F.T. (1992). An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 30(2), 370–381. doi:10.1109/36.134086.
- Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Renteria, D., Hermans, K., Jobbagy, E., Kurz, W., Li, D., Sonwa, D.J., & Stringer, L. (2019). Land Degradation. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, & J. Malley (Eds.). In press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2019/11/07_Chapter-4.pdf.
- Palombo, A., Pascucci, S., Loperte, A., Lettino, A., Castaldi, F., Muolo, M. R., & Santini, F. (2019). Soil Moisture Retrieval by Integrating TASI-600 Airborne Thermal Data, WorldView 2 Satellite Data and Field Measurements: Petacciato Case Study. *Sensors*, 19(7), 1515. doi:10.3390/s19071515.
- Panciera R., Tanase M.A., Lowell K., & Walker J.P. (2014). Evaluation of IEM, Dubois, and Oh radar backscatter models using airborne L-band SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 52(8), 4966–4979. doi:10.1109/tgrs.2013.2286203.
- Pasolli, L., Notarnicola, C., Bertoldi, G., Bruzzone, L., Remelgado, R., Greifeneder, F., Niedrist, G., Chiesa, S.D., Tappeiner, U., & Zebisch, M. (2015). Estimation of Soil Moisture in Mountain Areas Using SVR Technique Applied to Multiscale Active Radar Images at C-Band. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1), 262–283. doi:10.1109/jstars.2014.2378795.
- Pathe, C., Wagner, W., Sabel D., Bartsch A., Kunzer C., & Scipal, K. (2007, July). Experimental I km soil moisture products from Envisat ASAR for Southern Africa. *Proceedings of ENVISAT Symposium, ESA SP-636*, 6.
- Peng, M., Zhang, L., Sun, X., Cen, Y., & Zhao, X.A. (2020). Fast Three-Dimensional Convolutional Neural Network-Based Spatiotemporal Fusion Method (STF3DCNN) Using a Spatial-Temporal-Spectral Dataset. *Remote Sensing*, 12(23), 3888. doi:10.3390/rs12233888.
- Planet Labs. (2021, February). Planet Imagery Product Specifications. 100. Retrieved from <https://www.planet.com/products>.
- Plotnikov, O. M., & Mikitenko, V. I. (2017). Data fusion method with the previous finding informative area on scene. *Herald of Khmelnytskyi National University, Technical sciences*. 1, 196–201. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2017_1_39. (In Ukrainian)
- Pozdnyakov, A. I., Gulalyev, Ch. G. (2004). Electrophysical properties of some soils. *Moscow-Baku, Adilogolu*, 240. (In Russian)
- Prince, S., Von Maltitz, G., Zhang, F., Byrne, K., Driscoll, C., Eshel, G., Kust, G., Martínez-Garza, C., Metzger, J. P., Midgley, G., Moreno-Mateos, D., Sghaier, M., & Thwin, S. (2018). Chapter 4: Status and trends of land degradation and restoration and associated changes in biodiversity and ecosystem functions. In *IPBES: The IPBES assessment report on land degradation and restoration*. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (Eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem services, Bonn, Germany, 183. Retrieved from https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers19-02/010075051.pdf.
- Prudius, I. N., Lazen, L. V., Semenov, S. O. (2008). Multilevel fusion of images in remote sensing systems. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University*. 618, 3–10. Retrieved from <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/ntb/33957>. (In Ukrainian)
- Rees, G. (2013). *Physical principles of remote sensing*. New York: Cambridge University Press, 492. ISBN: 9781107004733.
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., & Wendroth, O. (2008). Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358. doi:10.2136/vzj2007.0143.
- Rowlandson, T.L., Berg, A.A., Bullock, P.R., Hanis-Gervais, K., Ojo, E.R., Cosh, M.H., Powers, J., & McNairn, H. (2018). Temporal transferability of soil moisture calibration equations. *Journal of Hydrology*, 556, 349–358. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.11.023.
- Schreier, G. (1993). *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, 435.
- Shaiko, S. G., & Micheeva, M. P. (2013). *Electrochemistry: Study guide for students of higher technical educational institutions*. Donetsk National Technical University: Noulage, 226. ISBN 978-617-579-231-5.
- Small, D., & Schubert, A. (2019, March). Guide to S-1 Geocoding, UZH-S1-GC-AD, 1.10, 42. Retrieved from <https://sentinel.esa.int/documents/247904/0/Guide-to-Sentinel-1-Geocoding.pdf/e0450150-b4e9-4b2d-9b32-dad989d3bd3>.
- Stankevich, S. A., Pylypchuk, V. V., Lubskeyi, M. S., Krylova, H. B. (2016). Accuracy assessment of the temperature of artificial and natural Earth's surfaces determining by infrared satellite imagery. *Space Science and Technology*. 22(4), 19–28. Retrieved from <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2016-22/knit-2016-22-4-02-Stankevich.pdf>. (In Ukrainian)
- Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Piestova, I. O., & Lubskeyi, M. S. (2017). Leaf area index estimation of forest using sentinel-1 C-band SAR data. 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS). doi:10.1109/mrrs.2017.8075075.
- Stephen H., Ahmad S., Piechota T. C., & Tang C. (2010). Relating surface backscatter response from TRMM precipitation radar to soil moisture: results over a semi-arid

- region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 193–204. doi:10.5194/hess-14-193-2010.
- Tyurin, Yu. N. (2010). Multidimensional statistical analysis: geometric theory. *Teor. Veroyatnost. i Primenen.*, 55(1), 36–58. doi:10.4213/typ4175. (In Russian)
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., & Fung, A.K. (1986). *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. Vol. 2. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Ch. 12, Artech House Publishers, Norwood, 962–966.
- United Nations General Assembly. (1986). Principles Relating to Remote Sensing of the Earth from Space, accessed on April 10, 2006, 2. Retrieved from <https://digitallibrary.un.org/record/126423?ln=en>.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, Geneva, Switzerland, 472 p. Retrieved from https://gar.undrr.org/sites/default/files/reports/2019-05/full_gar_report.pdf.
- Van de Griend, A. A., & Owe, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14(6), 1119–1131. doi:10.1080/01431169308904400.
- Vapnik, V., Golowich, S., & Smola, A. J. (1997). Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing. *Adv. Neural Info. Processing Systems*, 9, 281–287.
- Vereecken, H., Huisman, J. A., Bogaen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J. A., & Hopmans, J. W. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44(4). doi:10.1029/2008wr006829.
- Verhoest, N., Lievens, H., Baup, F., & Mattia, F. (2016). A new empirical model for radar scattering from bare soil surfaces. *Remote Sensing*, 8(11), 920. doi:10.3390/rs8110920.
- Voronin A. N. (2014). Data fusion methods. *Cybernetics and system analysis*. 78–84.
- Wilson, D. J., Western, A. W., & Grayson, R. B. (2005). A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture. *Advances in Water Resources*, 28(1), 43–54. doi:10.1016/j.advwatres.2004.09.007.
- Wood, J. (1996, March). *The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models*, Ph.D. Thesis, University of Leicester, Department of Geography, Leicester, 466.
- Yahia, O., Guida, R., Iervolino, P. (2021). Novel Weight-Based Approach for Soil Moisture Content Estimation via Synthetic Aperture Radar, Multispectral and Thermal Infrared Data Fusion. *Sensors*, 21(10), 3457. doi:10.3390/s21103457.
- Yang, H., Zhang, L.F., Zhang, X., Fang, H., & Tong, X. (2011). Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data. *Journal of remote sensing*, 15(6), 1242–1254. doi:10.11834/jrs.20110380.
- Zhang, J. (2010). Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*, 1(1), 5–24. doi:10.1080/19479830903561035.
- Zhang, L., Li, H., & Xue, Z. (2020). Calibrated Integral Equation Model for Bare Soil Moisture Retrieval of Synthetic Aperture Radar: A Case Study in Linze County. *Applied Sciences*, 10(21), 7921. doi:10.3390/app10217921.
- Zribi, M., Gorraeb, A., & Baghdadi, N. (2014). A new soil roughness parameter for the modelling of radar backscattering over bare soil. *Remote Sensing of Environment*, 152, 62–73. doi:10.1016/j.rse.2014.05.009.
- Zribi, M., Muddu, S., Bousbih, S., Al Bitar, A., Tomer, S. K., Baghdadi, N., & Bandyopadhyay, S. (2019). Analysis of L-Band SAR Data for Soil Moisture Estimations over Agricultural Areas in the Tropics. *Remote Sensing*, 11(9), 1122. doi:10.3390/rs11091122.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ И РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

М. О. Свиденюк

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины” 0154, ул. Олеса Гончара, 55-Б, Киев, Украина

Разработана методика комплексирования многоспектральных оптических и двухполяризационных радарных спутниковых данных для расчёта физических параметров почв. В частности, методика включает расчёт относительной диэлектрической проницаемости (ϵ) на основе модели интегрального уравнения (ИЕМ) с использованием радиолокационных данных с высоким пространственным разрешением Sentinel-1 GRDH. Выполнено калибрование ϵ путём компенсации дестабилизирующего влияния кислотности и температуры почвы. Многоспектральные оптические спутниковые данные высокого пространственного разрешения PlanetScope использованы для расчёта вегетационных индексов и коэффициента теплового излучения. Восстановление термодинамической температуры земной поверхности выполнены с использованием тепловых спутниковых данных, полученных системами низкого – MODIS и среднего – Landsat-7/8 ETM+/TIRS пространственного разрешения. Исследован способ компенсации деполяризации радиолокационного сигнала путём вычисления локальных девиаций сигнала и шероховатости поверхности. Неоднородность рельефа восстановлена с помощью цифровой модели местности среднего пространственного разрешения ALOS AWD3D. Для проверки точности модели расчёта влажности почвы, построенной на основе этой методики, были проведены наземные заверочные измерения. В частности, они включали отбор образцов почвы для расчёта влажности гравиметрическим методом. Кроме того, проводились измерения кислотности и температуры почвы дифференциальным термометром GM1312 и многофункциональным прибором WALCOM. Параметры, рассчитанные по спутниковым данным, и результаты наземных заверочных измерений использованы для восстановления влажности почв на основе многомерной регрессионной зависимости. Установленное расхождение определения влажности (RMSE = 4,73 %) вполне приемлемо для количественного мониторинга земельных ресурсов природно-заповедного фонда.

Ключевые слова: оптические и радиолокационные данные, влажность грунта, диэлектрическая проницаемость, шероховатость поверхности, физическая температура, коэффициент теплового излучения, подспутниковые измерения.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE PHYSICAL PARAMETERS OF GROUND PLANE BY THE RESULTS OF THE OPTICAL AND RADAR SATELLITE DATA FUSION

M. O. Svideniuk

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55-B, Oles Gonchar str., Kyiv 01054, Ukraine

The methodology of multispectral optical and dual-polarized radar satellite data fusion for soils physical parameters estimation is developed. In particular, the methodology comprises relative permittivity estimation (ϵ) based on the Integral Equation Model (IEM) by using high resolution Sentinel-1 GRDH radar data. The calibration of ϵ was provided based on the compensation of soil acidity and temperature destabilizing effects. PlanetScope high-resolution multispectral images were used for vegetation indices and thermal emissivity estimation. Both, low-resolution MODIS and medium resolution Landsat-7/8 ETM+/TIRS thermal infrared images were processed in order to estimate ground plane thermodynamic temperature. An investigated approach for the radar signal depolarization compensation is based on local signal deviations and surface roughness estimation. The relief heterogeneity is restored based on the medium-resolution digital terrain elevation model ALOS AWD3D. Aiming to evaluate the accuracy of a soil moisture estimation model designed based on the presented methodology, ground truth measurements were carried out. They also included soil samples retrieving for the gravimetric soil moisture. In addition, the soil acidity and temperature were measured by using the GM1312 differential thermometer and WALCOM multifunction device. The estimated parameters and ground truth data were used in order to retrieve the soil moisture based on the multivariate regression dependence. Root mean square error of soil moisture retrieving was estimated as 4,73 %. Such accuracy is completely acceptable for the soil moisture monitoring of natural-reserved fund territories

Key words: optical and radar data, soil moisture, permittivity, surface roughness, physical temperature, thermal emissivity, supreme measurements, ground truth.

Рукoпис статті отримано 17.09.2021