

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАСОЛЕНОСТІ ҐРУНТІВ ІНГУЛЕЦЬКОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ У СИСТЕМІ УПРАВЛІНСЬКИХ ЗАХОДІВ ІЗ ХІМІЧНОЇ МЕЛІОРАЦІЇ

В.П. Ковальчук, О.П. Войтович

*Інститут водних проблем і меліорації НААН (м. Київ, Україна)  
e-mail: volokovalchuk@gmail.com; ORCID: 0000-0001-7570-1264  
e-mail: aleksvoitovych@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1513-4744*

У публікації наведено використання даних мультиспектральних космічних знімків для обґрунтування управлінських заходів із хімічної меліорації засолених ґрунтів Інгулецької зрошувальної системи. Для отримання NDVI, індексів оцінки засолення ґрунту, зокрема індекс засолення ґрунту (VSSI), Salinity index та нормалізований індекс засоленості ґрунту (NDSI) використані зображення Landsat 8 OLI. Дослідна ділянка — сільськогосподарські поля в Снігурівському р-ні Миколаївської обл. на Інгулецькій зрошувальній системі. Проведено валідацію для умов України на чорноземах південних сольових індексів (VSSI, NDSI, SI), показало найкращу придатність NDSI. За допомогою розрахованих діапазонів індексів, що характеризують градації засолення, визначено їх відсоткове співвідношення для кожного дослідного поля пілотного об'єкта. Рекомендовано загальний обсяг фосфогіпсу для хімічної меліорації. Запропоновані норми внесення гіпсу можуть слугувати агровиробникові певним орієнтиром при прийнятті управлінського рішення із проведення хімічної меліорації сільськогосподарських угідь. На основі поєднання даних супутникового моніторингу і розрахунків доз хіммеліорантів за авторським онлайн-калькулятором господарство зможе оціночно визначити доцільність й економічну ефективність проведення заходів із хімічної меліорації ґрунтів. Додаткова практична цінність методики дистанційного визначення меж та площі засолення полягає у можливості планування відбору ґрунтових проб із певних точок поля, оптимізації кількості проб ґрунту для проведення хімічного аналізу у лабораторії. Результати дослідження демонструють, що зображення Landsat 8 OLI виявляють високий потенціал просторово-часового моніторингу засоленості верхніх шарів ґрунту. Це дослідження буде корисним для планування сільськогосподарської діяльності шляхом картографування засоленості ґрунту з розрахунком доз хімічних меліорантів для зменшення економічних втрат в умовах зміни клімату. Запропонований нами метод, що оцінює солоність ґрунту за допомогою супутникових знімків та пропонує дози хіммеліорантів завдяки інформаційним технологіям, може бути потенційно корисним, як швидкий підхід для виявлення солоності ґрунту в інших регіонах України і світу за низької вартості та значної точності.

**Ключові слова:** сольові індекси, аналіз ґрунту за супутниковими знімками, NDVI, NDSI, градації засоленості, розрахунок площі засоленості ґрунту, автоматичний розрахунок дози хіммеліорантів, гіпсування фосфогіпсом.

### ВСТУП

Засолення та осолонцювання ґрунту — це взаємопов'язані динамічні явища, які можуть відбуватися природним чином (первинне засолення внаслідок підняття рівня моря, ґрунтових вод) або в результаті людської діяльності (вторинне засолення внаслідок урбанізації або зрошення) збагачення ґрунту розчиненням солі до шкідли-

вих рівнів на поверхні ґрунту або поблизу нього [1; 2], що зумовлює до модифікації біохімічних особливостей ґрунту. Вторгнення солоності відбувається, коли солі розчиняються у воді та накопичуються в ґрунті на рівні, який впливає на сільськогосподарське виробництво, навколишнє середовище. Під час початкової фази солоність впливає на метаболізм ґрунтових організмів і знижує продуктивність землі.

На наступній фазі він знищує всі рослини та інші організми, що живуть у ґрунті. Згодом відбувається входження до ґрунтового поглинального комплексу (ГПК) катіонів калію та натрію — розвивається осолонцювання ґрунту.

Отже, вторгнення засоленості є одним із чинників впливу, що спричиняє до сольової деградації земель та викликає значну загрозу для сталого землекористування. Якщо запобігти цим негативним явищам не вдається, одним із ефективних заходів поліпшення ситуації є хімічна меліорація ґрунту. Застосування цього управлінського заходу потребує здійснення великого комплексу ґрунтових обстежень і лабораторних досліджень ґрунту. Для оціночних розрахунків застосовуються методи дистанційного супутникового моніторингу. Кількісні величини управлінського заходу, дози хімічних меліорантів, можна отримати за допомогою розрахункових методів із використанням інформаційних технологій [3].

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Численні публікації результатів досліджень зі супутникового моніторингу і використання багатоспектральних супутникових знімків із метою визначення величин засоленості ґрунту показали широкі можливості картографування засоленості за допомогою даних Landsat [4–6]. Douaoui (Дуауї) та ін. (2006) [7] порівняв 11 індексів, отриманих із супутникових знімків, з роздільною здатністю 20 м, зібраних під час літньої експедиції 1997 р. Sumfleth і Duttmann (2008) [8] модифікували метод ідентифікування розташування засолених ділянок, використовуючи дані аналізу ґрунту та супутникову інформацію. Їх кореляційний аналіз показав, що розподіл вмісту солі має тісний взаємозв'язок з NDVI.

Nguyen, K.A. та ін. [9] оцінили поширення засоленості в дельті Меконгу, В'єтнам. Для отримання індексів використовувалось зображення Landsat 8 OLI, для оцінки солоності ґрунту: індекс солоності ґрунту (VSSI), ґрунтова коригуючий вегетаційний

індекс (SAVI), індекс нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI) та нормалізований індекс солоності ґрунту (NDSI). У публікації [10] узагальнили можливість і доцільність використання сольових індексів для оцінки ступеня засоленості ґрунтів із використанням мульти-спектральних індексів супутникових зображень Landsat 8 OLI. У публікації [11] запропоновано градації засоленості ґрунту, використовуючи індекси засоленості, у т.ч. NDSI. В усіх трьох зазначених публікаціях наводяться відповідні порогові значення вмісту солей у ґрунті відносно до градацій його засоленості на основі значень електропровідності. Електропровідність отримано за допомогою наземних спостережень.

В Україні наземні спостереження здійснюються з метою отримання даних, що підтверджують характерні ознаки складових довілля та його стану, а також інформації, що підтверджує дані супутникових знімків, наприклад [12; 13] та ін.

Шевченком і Власовою [14; 15] класифіковано супутникові зображення на п'ять ступенів засолення: незасолені, незасолені з підвищеним вмістом хлору, слабозасолені, середньозасолені, сильнозасолені. Авторами встановлено, що індекс NDVI є показником наявності галофітів і непрямим показником ступеня засолення ґрунту за станом сільськогосподарських культур. Однак цей показник не може використовуватись для ідентифікації засолення ґрунтів за відсутності рослинного покриву. Серед існуючих сольових індексів для умов України рекомендують індекс NDSI. На відміну від закордонних джерел, які для наземної завірки рівня засоленості ґрунту використовують електропровідність ґрунту, автори [15] порівняли карти просторового розподілу NDSI з результатами ґрунтово-сольової зйомки зрошуваних і штучно дренажних земель Каланчацької зрошувальної системи, зокрема з картами засолення ґрунтів. Результати свідчать про можливість ідентифікації засолених земель шляхом визначення NDSI, так і про найбільш точне відображення за розподілом цього індексу ступеня засолення

ґрунтів приповерхневого шару потужністю до 0,25 м.

Після дистанційного оцінювання ступеня засоленості ґрунту, обґрунтування заходів з управління сольовим режимом ґрунту може здійснюватись за допомогою інформаційної системи раніше розробленої авторами цієї статті [3].

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для цього дослідження обрано територію Інгулецької зрошувальної системи, яка розміщена на південних окраїнах Придніпровської і Волино-Подільської височин. Південніше розташована Причорноморська низовина. Автори [16] встановили, що в геологічному плані вся територія масиву перекрита потужною (до 40 м) товщею четвертинних суглинків різного гранулометричного складу. Шари більш важких ґрунтів, що трапляються завглибшки 6–10 м, створюють водотрив для просочування фільтраційних вод у глибші горизонти та зумовлюють утворення ґрунтових вод типу «верховодки».

Ґрунти території, за даними Публічної кадастрової карти (рис. 1) представлені чорноземами південними, темно-кашта-

новими ґрунтами та їх комплексами з солонцями різного гранулометричного складу від глинистого до середньосуглинкового.

Засолення зрошуваних земель на Інгулецькому зрошуваному масиві пов'язано з підтопленням, а також із тим, що поливи здійснювались водами підвищеної мінералізації (1,5–2,2 г/дм<sup>3</sup>) хлоридно-натрієвого складу [17]. Крім того, на нашу думку, важливу роль відіграє важкий гранулометричний склад ґрунтового покриву території і підстилаючих порід, який і зумовлює до процесів підтоплення.

Загальний стан засоленості ґрунтів (рис. 2), який використовувався для завіркового оцінювання і бази порівняння за даними [18].

Процеси сольової деградації ґрунту – засолення і осолонцювання проходять практично одночасно. У літературі [19] виділено засолення, осолонцювання, а також комплексний процес сольової деградації ґрунту засолення і осолонцювання. На нашу думку, ґрунти Інгулецької зрошувальної системи схильні до проявів засолення одночасно із осолонцюванням. Лише засоленість у ґрунті рекомендовано знижувати промиванням зрошувальною водою.

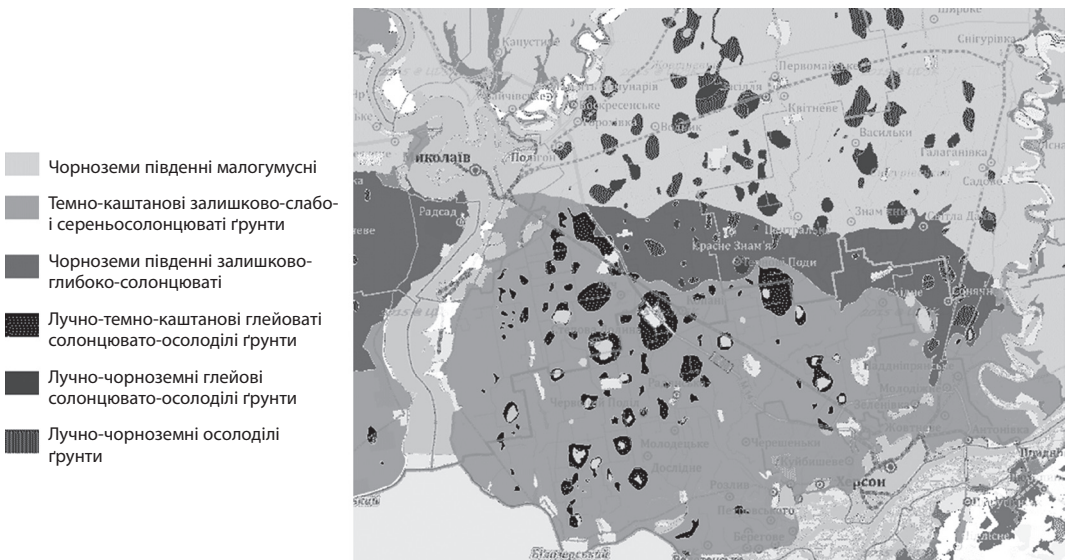
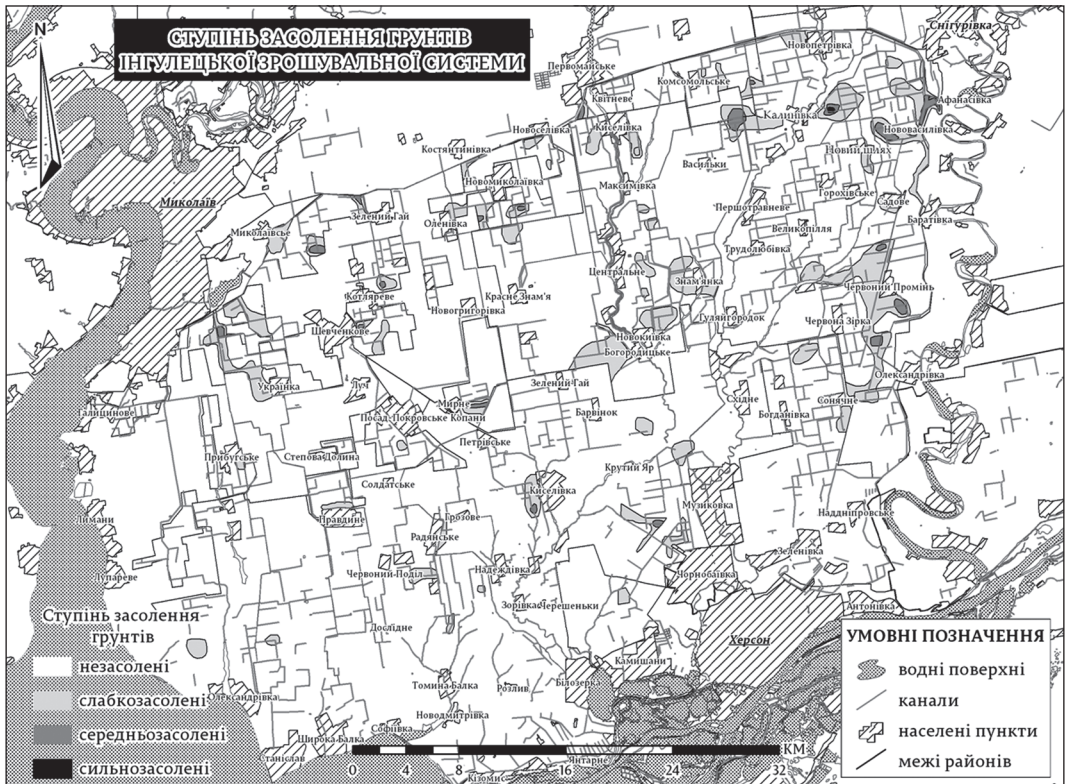


Рис. 1. Карта ґрунтового покриву (за даними Держгеокадастру України)



**Рис. 2.** Карта засолення ґрунтів Інгuleцької зрошувальної системи

Комплексні прояви сольової деградації ґрунту можливо усунути за допомогою хіммеліорації [19; 20]. Їх зовнішні прояви можливо виявити за допомогою мульти-спектральних супутникових знімків.

Використовувались мультиспектральні зображення Landsat 8 для одночасного візуального виявлення площ розповсюдження засоленості ґрунтів та математичної оцінки ступеня засоленості за спектральними характеристиками.

Робота з супутниковими знімками та розрахунок індексів проведено за допомогою ERDAS IMAGINE 2015. Кількісний аналіз пікселів, візуалізація їх за допомогою кольорового спектра здійснювалась в ArcMap 10.8.

В основу методики покладено здатність ґрунтів по-різному відбивати сонячне випромінювання залежно від їх типу [9]. Проведено аналіз супутникових знімків

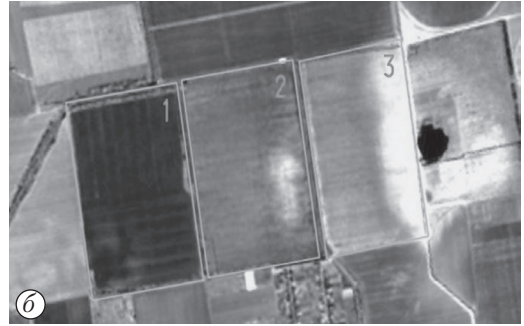
для визначення зв'язку між значеннями відбивної здатності та оцінки показників засоленості ґрунту. Різниця відбивної здатності дає змогу визначити засолені ділянки у поверхневому шарі ґрунту.

Проаналізовано декілька індексів просторової оцінки засоленості. Для співвідношення певної градації ступеня засоленості ґрунту до певного вмісту солей у ґрунті використовувався нормативний документ [21]. Для розрахунку доз внесення хімічних меліорантів, гіпсовмісних матеріалів, використовувалась інформаційна система, розроблена авторами [3].

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На основі карти засолення ґрунтів Інгuleцької зрошувальної системи [18] вибрані пілотні полігони з різним ступенем засолення (рис. 3).





**Рис. 3.** Пілотний полігон з різним ступенем засолення ґрунтів Інгулецької зрошувальної системи

Дослідна ділянка – сільськогосподарські поля в Снігурівському р-ні Миколаївської обл. між сіл Калинівка і Нововасилівка північніше села Новий Шлях. Площа ділянки 412 га, що поділена на три рівні поля площею по 136 га (див. *рис. 3*). Географічні координати: 47.00 пн.ш., 32.69 сх.д. Ґрунтовий покрив пілотної ділянки, згідно з кадастровою картою, чорнозем південний малогумусний.

На основі аналізу літературних джерел складено перелік перспективних індексів (*табл. 1*).

Попередній аналіз зазначених ділянок проведено за знімком Landsat-8 за 04.03.2020: LC08\_L1TP\_179027\_20200304\_20200314\_01\_T1. Для оцінки рослинного покриву використовували NDVI (*рис. 4, а*). Середній NDVI поля № 1 = 0,67, поля № 3 = 0,63, що свідчить про подібний рівень біомаси на полях. До того ж, візуально спостерігаються неоднорідності рослинності, що корелюють з даними сольової зйомки [18].

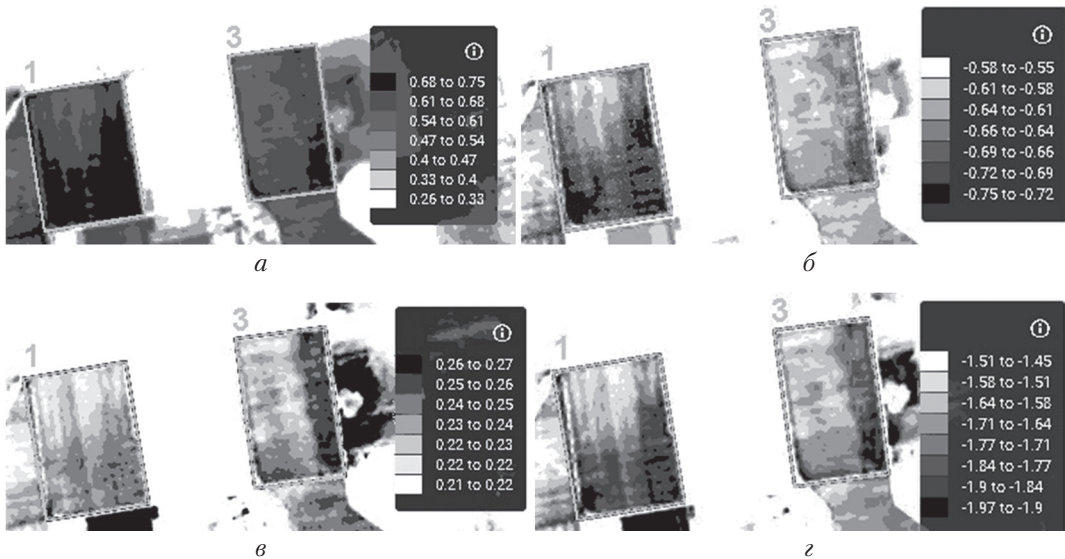
Для визначення та оцінки меж засолення використано запропоновані нами індекси засоленості ґрунту NDSI та Salinity index 1 (*рис. 4, б; 4, в*).

Збільшення засоленості ґрунту має збільшувати значення NDSI та Salinity index. Порівнюючи межі індексів на *рис. 4, б*, можна відмітити, що за густого рослинного покриву індекс NDSI характеризує межі засолених ділянок інвертовано. На відміну від Salinity index 1, значення якого добре візуалізують межі та градації ступеня засоленості. На *рис. 4, г* наведено індекс засоленості ґрунту через інтенсивність біомаси Vegetation Soil Salinity Index (VSSI), де червоний колір – голий ґрунт, червоний-жовтий – рясна зелень. На певному проміжку індексів (-1,97–1,77) спостерігаються відмінності індексів VSSI пропорційно інтенсивності засолення.

Наступним кроком є валідація індексів на зазначених дослідних полях під час відсутності на них рослин. Для розрахунку та визначення діапазону індексу NDSI на полі

**Таблиця 1. Індекси дистанційного визначення засоленості ґрунтів**

№	Назва індексу	Формула	Література
1	Normalized Difference Salinity Index (NDSI)	$NDSI = (red - NIR)/(red + NIR)$	Khan et al. (2005)
2	Salinity index – Si1	$Si1 = (red \times NIR)/green$	Abbas and Khan (2007)
3	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (NIR - red)/(red + NIR)$	J. Rouse (1973)
4	Vegetation Soil Salinity Index (VSSI)	$VSSI = 2 \times green - 5 \times (red + NIR)$	Dehni and Lounis (2012)



**Рис. 4.** Оцінка рівномірності рослинного покриву за індексами:  
*a* – NDVI; *б* – NDSI; *в* – Salinity index 1; *з* – Vegetation Soil Salinity Index (VSSI)

отримано знімок за 12.09.20 (Landsat-8) голий ґрунт, натуральні кольори наведені на *рис. 3*. Порівнюючи два поля, бажано, щоб останні були однакові за станом (одна культура, одна технологічна обробка). Так, *рис. 3* показує, що стан полів 1 і 3 різний. На першому полі ґрунт пройшов обробіток, а на третьому ще залишається стерня. На цьому рисунку індекс для поля № 3 та № 1 сягає 0,21–0,2 та 0,16–0,15 відповідно, що характеризують незасолені ділянки ґрунту. Градації індексу сягають 0,18–0,17 (поле № 3) та 0,13–0,12 (поле № 1) характеризують засолені ділянки полів. Визначаються мінімальні та максимальні значення по кожному полю.

На основі аналізу репрезентативних ділянок Інгuleцької зрошувальної системи встановлено залежність ступенів засолення чорнозему південного від його NDSI. Встановлено, що діапазон індексів NDSI, який залежить від ступеня засоленості ґрунту, сягає 0,0375 значень індексу і залишається незмінним незалежно від рівня засоленості та стану ґрунту на полі. Для оцінки ступеня засоленості окремих ділянок поля та їх площі нижче запропоновано методику визна-

чення діапазону градацій засоленості через порівняння індексів NDSI в межах поля.

**Визначення площі та ступеня засоленості кожного поля.** Використовуючи визначення меж індексів, що характеризують засоленість ґрунту, використано контрольний, нульовий ступінь засолення ґрунту (незасолені), проведено розрахунки ступеня засолення на прикладі вищенаведеної пілотної ділянки окремо для кожного поля (*рис. 5*). В зв'язку з цим представлено чотири градації ступенів засолення, а діапазон індексів, що їх характеризує збільшується до 0,05. Діапазон індексів NDSI поля № 1 сягає:  $NDSI_{max} = -0,125$ ,  $NDSI_{min} = -0,164$ . Різниця між мінімальним та максимальним індексом є меншою за 0,05. В такому випадку встановлюємо діапазон індексів в 0,05 пунктів і градацію ступенів засолення починаємо від найнижчого значення (-0,164). Подібний розрахунок є характерним для полів, які не мають на своїй площі всіх ступенів засолення.

При визначенні площі та градацій ступеня засоленості поля № 2, для розрахунку NDSI використовуємо знімок, на якому поле № 2 має найменші показни-

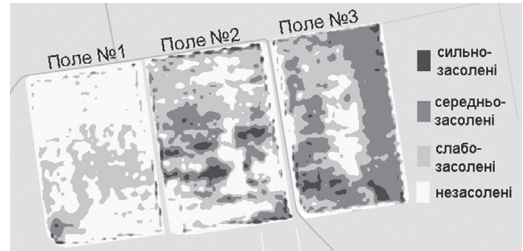
ки NDVI (0,24 – стерня): LC08\_L1TP\_179027\_20201014\_20201104. Діапазон індексів NDSI поля № 2 сягає (див. *рис. 5*):  $NDSI_{max} = -0,205$ ,  $NDSI_{min} = -0,283$ . Оскільки різниця максимального та мінімального значення індексів на полі ( $0,283 - 0,205 = 0,078$ ) є більшою за 0,05, то розрахунок градацій починаємо від найбільшого значення NDSI ( $-0,205$ ):  $-0,205 - 0,05 = -0,255$ . Такий розрахунок буде характерним для ґрунту з рештками рослинності. За цих умов збільшується діапазон спектра NDSI і визначення початкової точки градацій ступенів засолення потребує хімічного аналізу ґрунту, хоча б в одній точці. В наведеному прикладі розрахунку ми умовно позначили найменший індекс NDSI поля № 2 ( $-0,205$ ), як високий рівень засолення. Хоча порівняно з сусіднім полем № 3, поле № 2 не має ділянок такого сильного засолення.

Визначення площі та ступеня засоленості поля № 3. Діапазон індексів NDSI поля № 3 сягає:  $NDSI_{max} = -0,17$ ,  $NDSI_{min} = -0,23$ . Різниця індексів ( $0,23 - 0,17$ ) менша за 0,05, тому діапазон градацій ступенів засолення розраховується аналогічно полю № 2:  $-0,17 - 0,05 = -0,22$ .

За допомогою розрахованих діапазонів індексів, що характеризують градації засолення, визначено їх відсоткове співвідношення для кожного дослідного поля (*табл. 2*).

Як зазначено вище, процеси засолення і осолонцювання зазвичай проходять паралельно. Розчинні солі з ґрунтового розчину переходять у ґрунтовий поглинальний комплекс. Тому слід рекомендувати заходи із проведення хімічної меліорації.

Зважаючи на дані космічних знімків та дані відносно вмісту солей і обмінного



**Рис. 5.** Просторова оцінка ступеня і площі засолення дослідних полів

натрію за різних ступенів засоленості й осолонцюванні, що наведені у [22], було складено таблицю градацій вмісту солей, обмінного натрію та площ земель із різним ступенем засолення для пілотних полів. До того ж, ємність катіонного обміну для чорноземів південних отримано згідно з даними [23; 24] сягають 40 мг-екв. на 100 г ґрунту. Із використанням онлайн-калькулятора, ми провели розрахунки діапазонів можливої дози гіпсу для чорноземів південних малогумусних, що представлені на полях пілотної ділянки (*табл. 3*).

Площі різних ступенів засолення розраховуються відносно загальної площі поля, що наведено у *табл. 4*. Відповідно до визначених площ та ступенів засоленості дослідних полів проведено розрахунок дози гіпсовмісних хімічних меліорантів [3]. Використовуючи нормативний документ [21], зіставлено 4 ступені засолення ґрунтів пілотних ділянок (незасолені, слабозасолені, середньозасолені, сильнозасолені) до просторової оцінки, що складається із 4 діапазонів значень розрахованих нами індексів NDSI (див. *рис. 5*) зі знімка супутника Landsat-8 для кожного поля.

**Таблиця 2. Результати розрахунку індексів NDSI полів пілотної ділянки**

Ступінь засолення	Поле № 1		Поле № 2		Поле № 3	
	межі NDSI	%	межі NDSI	%	межі NDSI	%
Незасолені	-0,164-0,151	71,91	-0,255-0,242	24,42	-0,22-0,207	13,50
Слабозасолені	-0,151-0,139	26,66	-0,242-0,23	46,50	-0,22-0,207	33,18
Середньозасолені	-0,139-0,126	1,36	-0,23-0,217	25,12	-0,195-0,182	50,31
Сильнозасолені	-0,126-0,114	0,08	-0,217-0,205	3,97	-0,182-0,17	3,01

Таблиця 3. **Результати розрахунків рекомендованих на 1 га доз гіпсу і фосфогіпсу відповідно ступеням засоленості ґрунту і осолонцювання – чорнозему південного малогумусного**

Ступінь засолення	Вміст солей, %	Ступінь солонцюватості	Вміст обмінного натрію (Na <sup>+</sup> ) мг-екв. на 100 г, при ЄКО 40	Вміст обмінного натрію, %	Доза гіпсу на 1 га, т	Доза фосфогіпсу на 1 га, т
Незасолені	До 0,2	Несолонцюваті	До 2	До 5	0	0
Слабозасолені	0,2–0,4	Слабосолонцюваті	2–4	5–10	До 4,47	До 4,52
Середньозасолені	0,4–0,6	Середньосолонцюваті	4–6	10–15	4,47–8,94	4,52–9,03
Сильнозасолені	Понад 0,6	Сильносолонцюваті	6–8	15–20	8,94–13,42	9,03–13,53

Вищенаведені результати супутникового моніторингу площ засолення для трьох полів пілотної ділянки зведені у *табл. 4*. На основі даних про площі з різним ступенем засолення та рекомендованих на 1 га доз гіпсу й фосфогіпсу визначені мінімальні і максимальні дози фосфогіпсу, диференційовано по полю залежно від інтенсивності засолення (див. *табл. 4*).

Спостерігається незначна площа слабозасоленого, слабосолонцюватого ґрунту поля № 1, для його гіпсування рекомендовано внести фосфогіпс обсягом 74 т, якщо обрати середні значення дози внесення (див. *табл. 4*). Фосфогіпс на полях № 2 і № 3 слід вносити також диференційовано. Як показують розрахунки, якщо обрати середні значення дози внесення, то для слабозасолених, слабосолонцюватих ділянок поля № 2 бажано 136,5 т, для серед-

ньозасолених і середньосолонцюватих – 221,5, для сильнозасолених і сильносолонцюватих – 58, а для всього поля № 2 потрібно близько 416 т фосфогіпсу для хімічної меліорації. Для слабозасолених ділянок поля № 3 потрібно 90 т, для середньозасолених – 409, для сильнозасолених і сильносолонцюватих – 41, а для всього поля № 3 потрібно близько 540 т фосфогіпсу для хімічної меліорації ґрунту. Для хімічної меліорації усієї пілотної ділянки потрібно 1030 т фосфогіпсу.

Засоленість поверхнього шару ґрунту можна виявити за допомогою методів дистанційного зондування, солонцюватість є супутнім явищем. Загалом, коли рослини зазнають абіотичного стресу, включаючи солоність, їх фотосинтетична активність зменшується, викликаючи підвищену видиму відбивну здатність та знижену від-

Таблиця 4. **Результати розрахунків площ різного ступеня засоленості і диференційованих по полю доз фосфогіпсу**

Поле	Площа розрахованої засоленості та осолонцювання, га			Доза фосфогіпсу на відповідну площу певного ступеня засолення та осолонцювання, т		
	слабозасолені	середньозасолені	сильнозасолені	слабозасолені	середньозасолені	сильнозасолені
№ 1	32,79	1,67	0,10	До 148	–	–
№ 2	60,45	32,66	5,16	До 273	148–295	46,5–70
№ 3	39,82	60,37	3,61	До 180	273–545	32,5–49



биваючи здатність NIR від рослинності [25]. Наші дослідження NDVI, *рис. 5*, дали змогу підтвердити цю тезу. Спостерігається непрямий взаємозв'язок між солоністю поверхневого шару ґрунту та спектральною відбивною здатністю.

Зображення Landsat вказують на те, що засоленість ґрунту без рослинності також має зв'язок із відбивною здатністю в каналі NIR. Це узгоджується з результатами досліджень, представленими [26]. Найкращий результат аналізу засолення дає індекс NDSI, що збігається з висновками [14; 15]. Результати обробки зображень Landsat OLI 8 дали змогу отримати градації індексів засолення NDSI відповідно до градацій ступеня засолення ґрунтів, а за кількістю пікселів кожного відтінку зображення — розрахувати площу з різним ступенем засолення і осолонцювання.

У нашому дослідженні для гіпсування ділянок поля з кожним із ступенів засолення і осолонцювання встановлено варіативну дозу гіпсу — від мінімально необхідної до максимальної. Отримані результати є оціночними, оскільки розрахунки здійснено без лабораторного визначення засоленості і осолонцюваності ґрунтових проб. Запропоновані норми внесення гіпсу можуть слугувати агропробникові певним орієнтиром за прийняття управлінського рішення із проведення хімічної меліорації сільськогосподарських угідь. Результати цього дослідження є системним узагальненням, що складається із дистанційного моніторингу засоленості та осолонцювання і використання розрахункових методів доз хімічних меліорантів за прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Представлений метод є ефективним під

час проведення оцінки засоленості ґрунту, оскільки має низьку вартість та прийнятну точність.

## ВИСНОВКИ

Результати досліджень показують, що ступінь засоленості та осолонцювання ґрунту можна успішно виявити за допомогою методів дистанційного зондування Землі із використанням мультиспектральних знімків. За певних умов індекс NDSI виявляється достатньо інформативний для кількісного аналізу засолення і осолонцювання як супутнього процесу. Для завіркочних досліджень достатньо мати карту ґрунтово-сольової зйомки.

На основі поєднання даних супутникового моніторингу і розрахунків доз хімеліорантів за нашим онлайн-калькулятором господарство зможе оціночно визначити доцільність і економічну ефективність проведення заходів із хімічної меліорації ґрунтів.

Додаткова практична цінність методики дистанційного визначення меж та площі засолення полягає у можливості планування відбору ґрунтових проб із певних точок поля, оптимізації кількості проб ґрунту для проведення хімічного аналізу у лабораторії.

У майбутньому існує потреба у розширенні обсягу досліджень, заснованому на довгостроковому просторово-часовому моніторингу процесів сольової деградації ґрунту, щоб краще зрозуміти взаємодію між природними умовами та впливом людини. Ця взаємодія може спричинити забруднення і деградацію ґрунту, що можна спостерігати за допомогою спектральної відбивної здатності зображень дистанційного зондування.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Metternicht G. and Zinck A. Remote sensing of soil salinization: Impact on land management. Boca Raton, 2008. 377 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420065039>
2. Gorji T., Sertel E. and Tanik A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecological Indicators*. 2017. No 74. P. 384–391.
3. Ковальчук В.П., Войтович О.П., Лукашук В.П. Автоматизована система розрахунків хімічної меліорації ґрунтів. *Меліорація і водне господарство*. 2018. № 2. С. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg20180108-138>
4. Савин И.Ю. Выявление многолетних изменений площади засоленных почв Шаульдерского орошаемого массива по космическим снимкам Landsat. *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. 2014. № 74. С. 49–65.
5. Khan N.M., Rastoskuev V.V., Sato Y. and Shiozawa S. Assessment of hydrosaline land degradation by using

- a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*. 2005. No 77. Part 1–3. P. 96–109.
6. Dehni A. and Lounis M. Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*. 2012. No 33. P. 188–198.
  7. Nicolas H. and Walter C. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*. 2006. No 134. P. 217–230.
  8. Sumfleth K. and Duttman R. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*. 2008. No 8. Part 5. P. 485–501.
  9. Nguyen K.A. et al. Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. No 7. Part 1. P. 1–16.
  10. Ennaji W. et al. Remote sensing approach to assess salt-affected soils in the north-east part of Tadla plain, Morocco. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2018. No 2. Part 1. P. 22–28.
  11. Al-Khakani E.T., Al-Janabi W.F., Saad R.Y. and Al-Kazaali H.M. Using Landsat 8 OLI data to predict and mapping soil salinity for part of An-Najaf governorate. *Ecology, Environment and Conservation*. 2018. No 24. P. 572–578.
  12. Тараріко О.Е., Сиротенко О.В., Греков В.О., Войнов О.А. Методичні рекомендації з наземних обстежень в системі моніторингу стану посівів за даними космічного знімання. Київ, 2010. 23 с.
  13. ДСТУ 7307:2013. Дистанційне зондування Землі з космосу. Наземні дані щодо контролю стану посівів і продуктивності сільськогосподарських культур. Загальні положення. [Чинний від 2014–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2013. 14 с.
  14. Методичні рекомендації з оцінювання екологічного стану водних об'єктів та меліорованих земель за просторово розподіленими супутниковими даними. Київ, 2020. 39 с.
  15. Власова О.В., Шевченко А.М. Методика виявлення змін у засоленних ґрунтах за супутниковими даними. *Збірник наукових праць Національного наукового центру «Інститут землеробства НААН»*. 2015. № 2. С. 42–46.
  16. Ворошнов С.М., Шевчук Я.В., Юзюк О.Ю. Сучасний технічний стан каналів Інгулецької зрошувальної системи та нові конструкції облицювань із використанням геосинтетичних матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2018. № 8. С. 232–240.
  17. Козленко Є.В., Морозов О.В., Морозов В.В. Інгулецька зрошувальна система: стан, проблеми та перспективи розвитку: моногр. Херсон: Айлант, 2020. 321 с.
  18. Звіт з ґрунтово-сольової зйомки Інгулецького зрошувального масиву Херсонської області за 2012 р. / Каховська гідрогеолого-меліоративна експедиція. Таврійськ, 2014. 42 с.
  19. O'Geen, A. Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils. Drought Tip; University of California, Agriculture and Natural Resources: Richmond, CA, USA, 2015.
  20. Santos, P.D.D. et al. Saline-sodic soil treated with gypsum, organic sources and leaching for successive cultivation of sunflower and rice. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2019. № 23. P. 891–898.
  21. Балюк С.А. та ін. Інструкція з проведення ґрунтово-сольової зйомки на зрошуваних землях України. Київ, 2002. 33 с.
  22. Визначення доз меліорантів при хімічній меліорації кислих та солонцюватих ґрунтів. URL: [http://ias.pp.ua/f/doses\\_of\\_ameliorants.pdf](http://ias.pp.ua/f/doses_of_ameliorants.pdf)
  23. ДСТУ 4362:2004. Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. [Чинний від 2006–01–01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 23 с.
  24. Мінеральна частина ґрунту, її склад і значення. URL: [http://ias.pp.ua/f/mineral\\_part\\_of\\_soil.pdf](http://ias.pp.ua/f/mineral_part_of_soil.pdf)
  25. Salinity Laboratory Staff: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Hdbk*. 1954. № 60. 160 с.
  26. Elnaggar A.A. and Noller J.S. Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas. *Remote Sensing*. 2010. № 2 (1). P. 151–165.

## REFERENCES

1. Metternicht, G. & Zinck, A. (2008). Remote sensing of soil salinization: Impact on land management. Boca Raton. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420065039> [in English].
2. Gorji, T., Sertel, E. & Tanik, A. (2017). Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey. *Ecological Indicators*, 74, 384–391 [in English].
3. Kovalchuk, V.P., Voitovykh, O.P. & Lukashuk, V.P. (2018). Avtomatyzovana systema rozrakhunkiv ximichnoyi melioraciyi ґруntiv [Automated system of calculations in chemical soil reclamation]. *Melioraciya i vodne gospodarstvo — Land reclamation and water management*, 2, 37–46. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg20180108-138> [in Ukrainian].
4. Savin, I.Yu. (2014). Vyavlenie mnogoletnih izmenenij ploshadi zasolennykh pochv Shaulderskogo oroshaemogo massiva po kosmicheskim snimkam Landsat [Identification of long-term changes in the area of saline soils of the Shaulder irrigated massif based on Landsat satellite images]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchayeva — Bulletin of the Soil Science Institute V.V. Dokuchaev*, 74, 49–65 [in Russian].
5. Khan, N.M., Rastoskuev, V.V., Sato, Y. & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation

- by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77 (1–3), 96–109 [in English].
6. Dehni, A. & Lounis, M. (2012). Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*, 33, 188–198 [in English].
  7. Nicolas, H. & Walter, C. (2006). Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data. *Geoderma*, 134, 217–230 [in English].
  8. Sumfleth, K. & Duttmann, R. (2008). Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators*, 8 (5), 485–501 [in English].
  9. Nguyen, K.A. et al. (2020). Soil salinity assessment by using near-infrared channel and Vegetation Soil Salinity Index derived from Landsat 8 OLI data: a case study in the Tra Vinh Province, Mekong Delta, Vietnam. *Progress in Earth and Planetary Science*, 7 (1), 1–16 [in English].
  10. Ennaji, W. et al. (2018). Remote sensing approach to assess salt-affected soils in the north-east part of Tadla plain, Morocco. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2 (1), 22–28 [in English].
  11. Al-Khakani, E.T., Al-Janabi, W.F., Saad, R.Y. & Al-Kazaali, H.M. (2018). Using Landsat 8 OLI data to predict and mapping soil salinity for part of An-Najaf governorate. *Ecology, Environment and Conservation*, 24, 572–578 [in English].
  12. Tarariko, O.G., Syrotenko, O.V., Grekov, V.O. & Vojnov, O.A. (2010). *Metodychni rekomendacii z nazemnyx obstezhen v systemi monitoryngu stanu posiviv za danymy kosmichnogo znimannya [Methodical recommendations on ground surveys in the system of monitoring the condition of crops according to space survey data]*. Kyiv [in Ukrainian].
  13. Dystancijne zonduvannya Zemli z kosmosu. Nazemni dani shhodo kontrolyu stanu posiviv i produktyvnosti silskogospodarskyx kultur. Zagalni polozhennya [Remote sensing of the Earth from space. Ground data on crop condition control and crop productivity. Terms]. (2013). *DSTU 7307:2013 from 1st January 2014*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
  14. Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS. (2020). *Metodychni rekomendacii z ocinyvannya ekologichnogo stanu vodnyx obyektiv ta meliorovanyx zemel za prostorovo rozpodilenyi sputnykovyimi danymi [Methodical recommendations for assessing the ecological status of water bodies and reclaimed lands according to spatially distributed satellite data]*. Kyiv [in Ukrainian].
  15. Vlasova, O.V. & Shevchenko, A.M. (2015). *Metodyka vyavlennya zmin u zasolenykh gruntax za sputnykovyimi danymi [Methods for detecting changes in saline soils according to satellite data]*. Zbirnyk naukovykh prac Nacionalnogo naukovoogo centru Instytut zemlerobstva NAAN – Collection of scientific works of the National Research Center Institute of Agriculture NAAS, 2, 42–46 [in Ukrainian].
  16. Voroshnov, S.M., Shevchuk, Ya.V. & Yuzyuk, O.Yu. (2018). Suchasnyj texnichnyj stan kanaliv Inguleczkoyi zroshuvальноi systemy ta novi konstrukcii oblycyuvan iz vykorystannam geosyntetychnykh materialiv [Current technical condition of Ingulets irrigation system channels and new constructions of facings with the use of geosynthetic materials]. *Mehanizaciya ta elektrifikaciya silskogo gospodarstva – Mechanization and electrification of agriculture*, 8, 232–240 [in Ukrainian].
  17. Kozlenko, Ye.V., Morozov, O.V. & Morozov, V.V. (2020). *Inguleccka zroshuvальноi sistema: stan, problemy ta perspektivy rozvytku [Ingulets irrigation system: state, problems and prospects of development]*. Kherson: Ajlant [in Ukrainian].
  18. Kaxovska gidrogeologo-meliorativna ekspedyciya. (2014). *Zvit z gruntovo-solovoyi zjomyky Ingulecckogo zroshuvanogo masyvu Xersonskoyi oblasti za 2012 [Report on soil and salt survey of Ingulets irrigated massif of Kherson region for 2012]*. Tavrijsk [in Ukrainian].
  19. O'Geen, A. (2015). Reclaiming Saline, Sodic, and Saline-Sodic Soils. Drought Tip; University of California, Agriculture and Natural Resources: Richmond, CA, USA [in English].
  20. Santos, P.D.D. et al. (2019). Saline-sodic soil treated with gypsum, organic sources and leaching for successive cultivation of sunflower and rice. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23, 891–898 [in English].
  21. Balyuk, S.A. et al. (2002). *Instrukciya z provedennya gruntovo-solovoyi zjomyky na zroshuvanyx zemlyax Ukrayiny [Instructions for soil and salt survey on irrigated lands of Ukraine]*. Kyiv [in Ukrainian].
  22. Vyznachennya doz meliorativ pryximichnij melioraciyi kyslyx ta soloncyvatykh gruntiv [Determination of doses of ameliorants in chemical reclamation of acid and saline soils]. URL: [http://ias.pp.ua/f/doses\\_of\\_ameliorants.pdf](http://ias.pp.ua/f/doses_of_ameliorants.pdf) [in Ukrainian].
  23. Yakist gruntu. Pokaznyky rodyuchosti gruntiv [Soil quality. Indicators of soil fertility]. (2006). *DSTU 4362:2004 from 1st January 2006*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
  24. Mineralna chastyna gruntu, sklad i znachennya [Mineral part of the soil, its composition and significance]. URL: [http://ias.pp.ua/f/mineral\\_part\\_of\\_soil.pdf](http://ias.pp.ua/f/mineral_part_of_soil.pdf) [in Ukrainian].
  25. Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *USDA Hdbk*, 60, 160 [in English].
  26. Elnaggar, A.A. & Noller, J.S. (2010). Application of remote-sensing data and decision-tree analysis to mapping salt-affected soils over large areas. *Remote Sensing*, 2 (1), 151–165 [in English].

Стаття надійшла до редакції журналу 07.05.2021