УДК 528.88: 631.41
DOI DOI https://doi.org/10.32848/0135-2369.2026.86.5

МОНІТОРИНГ ЗАСОЛЕННЯ ҐРУНТІВ ІНГУЛЕЦЬКОГО ЗРОШУВАНОГО МАСИВУ ЗА АЕРОКОСМІЧНИМИ ДАНИМИ

ЛИХОВИД П.В. – доктор сільськогосподарських наук, старший дослідник
orcid.org/0000-0002-0314-7644
Інститут водних проблем і меліорації
Національної академії аграрних наук України
РЕТЬМАН М.С. – кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник
orcid.org/0000-0002-6972-2410
Інститут водних проблем і меліорації
Національної академії аграрних наук України
КАРАЩУК Г.В. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0002-4948-0952
Херсонський державний аграрно-економічний університет
ЖУЙКОВ О.Г. – доктор сільськогосподарських наук, професор
orcid.org/0000-0002-5762-7934
Інститут водних проблем і меліорації
Національної академії аграрних наук України
КАЗАНОК О.О. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0002-6817-4985
Херсонський державний аграрно-економічний університет

Постановка проблеми. Ґрунт є основою виробництва продукції рослинництва, а отже, забезпечення продовольчої безпеки. В останні роки спостерігається істотне зниження родючості ґрунтів внаслідок ірраціональної антропогенної активності та екологічних трансформацій, пов'язаних із глобальним потеплінням, як на території України, так і глобально. Деградація і зниження родючості ґрунтів є прямою загрозою продовольчій безпеці, оскільки неминуче ведуть до зниження продуктивності агроекосистем. Одним із найбільш загрозливих факторів деградації ґрунтових ресурсів є вторинне засолення – накопичення солей у профілі ґрунту, пов'язане із ірраціональною агротехнологією. Вторинне засолення призводить до порушення фізико-хімічних, структурних і механічних властивостей ґрунту, ускладнює процес засвоєння вологи та поживних речовин рослинами, а токсичні солі додатково чинять прямий згубний ефект на агрокультури. У найбільшій мірі соленакопиченню сприяє зрошення, особливо у випадку використання поливної води невідповідної якості, з високим вмістом водорозчинних солей і несприятливим катіонно-аніонним складом [16]. В умовах України, одним із найбільш уразливих до вторинного засолення є Інгулецький зрошуваний масив, ґрунти якого вже доволі тривалий час піддаються негативному впливу високомінералізованої поливної води Інгулецької зрошувальної системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До останнього часу, моніторинг засолення ґрунтів виконувався виключно у форматі польових зйомок, які включали відбирання зразків ґрунту з різних його шарів і наступний аналіз вмісту солей, їх аніонного та катіонного складу в агрохімічній лабораторії. Цей метод донині є стандартом агромеліоративних досліджень. Втім, розвиток сучасних технологій дозволяє використовувати нові, менш трудомісткі та витратні підходи до оцінки стану засолення ґрунтів, принаймні, їх верхнього (0–20 см) шару. Мова ведеться про технології дистанційного зондування Землі, які в рамках геоінформаційних систем і технологій постають як високоефективний засіб оперативного просторового моніторингу та картування динаміки процесів соленакопичення в поверхневому шарі ґрунту. Меліоративний супутниковий моніторинг бере початок з 2010-х років, і набуває бурхливого розвитку, що підтверджується кількістю нових наукових публікацій у рейтингових виданнях, починаючи з 2020-х років [15]. Основою супутникового меліоративного моніторингу, як і у випадку з більш поширеним і вживаним у науково-практичній діяльності моніторингом посівів сільськогосподарських культур, є специфічні індекси, як мультиспектральні, так і індекси видимого спектру та гіперспектральні індекси, які за рахунок урахування співвідношення випромінювання поверхнею ґрунту в різних спектральних каналах, здатні опосередковано характеризувати властивості ґрунту. В окремих випадках використовуються і методики опосередкованого екстраполювання характеристик рослинного покриву на властивості ґрунту; в таких дослідженнях меліоративні характеристики описують за вегетаційними індексами [4]. Так, наприклад, знижені відносно нормального фону величини нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) було використано для ілюстрування негативного впливу засолення ґрунтів на ріст і розвиток рослин у Бангладеші [6]. Певною мірою NDVI, зафіксований на ділянках із розрідженою або відсутньою рослинністю, здатен передавати особливості акумуляції солей у верхніх шарах ґрунту [10].

Втім, на наш погляд, такий підхід хоча і знайшов підтримку та поширення у наукових роботах, втім, має високі ризики невірної інтерпретації та грубих помилок в оцінці меліоративного стану, оскільки така опосередкована характеристика не враховує саме відбиття від самого ґрунту, а реакція різних рослин на сольовий стрес може істотно відрізнятися і спотворювати результати [9]. Крім того, велике значення має і вибір супутникових знімків, за якими виконується оцінка меліоративного стану ґрунту. Важливо, щоб не тільки просторова роздільна здатність відповідала масштабам зйомки, але і джерело даних було надійним, знімки були без атмосферних спотворень і «білих плям», пов'язаних із хмарністю або іншими метеорологічними явищами, а також спектральні зображення було знято у відповідних спектральних діапазонах, які є необхідними для розрахунку обраного меліоративного індекса. Найчастіше в сучасних роботах із дистанційної оцінки засолення ґрунтів використовують супутникові знімки Landsat, Sentinel-2 (для більш деталізованих і менш масштабних за площами досліджень), і MODIS (для великих територій) [12]. Наприклад, для оцінки засолення ґрунтів у центральній Анатолії, Туреччина, дослідники використовували спектральні знімки Landsat 5, у результаті чого було встановлено найбільш тісний кореляційний зв'язок між вмістом солей у верхньому шарі ґрунтів і спектральним каналом SWIR1 (короткохвильове інфрачервоне відбиття) [8]. У дослідженні, виконаному в умовах Узбекистану, було успішно застосовано мультиспектральні знімки сателіту Landsat 8 OLI для розрахунку нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI), використаного для оцінки засолення зрошуваних ґрунтів [14]. Поєднання дистанційного зондування із засобами машинного навчання для деталізованого встановлення зв'язків між мультиспектральними індексами та вмістом солей у ґрунтовому профілі є одним із найбільш перспективних і актуальних завдань сучасної агроекології, оскільки математичні моделі та моделі машинного навчання не тільки пояснюють, але й дозволяють оцінити сценарії майбутнього розвитку ситуації із засоленням сільськогосподарських земель [5]. Вже зараз комплексні моделі на основі алгоритмів ансамблевого навчання, машини опорних векторів і штучних нейронних мереж успішно використовуються для прогнозування засолення ґрунту на основі великих масивів супутникових даних у форматі ґрунтових індексів, таких як індекс засолення (SI), індекс яскравості (BI), ґрунтово-коригований вегетаційний індекс (SAVI), тощо [17].

Мета статті. Метою роботи було виконати динамічну оцінку засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за даними супутникового моніторингу за період 2000–2026 рр., побудувати прогностичні моделі для оцінки тренду розвитку меліоративної ситуації та виконати картування засоленості земель.

Матеріали та методика досліджень. Для оцінки багаторічної динаміки просторового розподілу та ступеня засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву було застосовано інструментарій геоінформаційного аналізу та дані дистанційного зондування Землі, доступні в рамках функціоналу хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Межі об'єкта дослідження визначено за допомогою просторового обрізання прямокутною геометрією (32.5°–33.2° E, 46.7°–47.3° N), що повністю охоплює необхідний масив зрошуваних земель, розташований у Миколаївській і Херсонській областях. Для виконання дослідження було обрано мультиспектральні супутникові знімки MODIS (продукт MOD09A1, просторова роздільна здатність 500 м, ідеальна для регіонального визначення) за 27-річний період (2000–2026 рр.). Для усунення спотворень від рослинного покриву (природного та від агроекосистем) та відбиття від водних об'єктів і забудови, період оцінки обмежено літньо-осіннім вікном (з 15 липня по 15 жовтня), коли значна частина ріллі перебуває у стані стерні або відкритого ґрунту. Для кожного року формувалася медіанна композиція відбивної здатності у короткохвильовому інфрачервоному спектральному діапазоні (короткохвильові канали SWIR1: 1628–1652 нм та SWIR2: 2105–2155 нм), що мінімізувало супутній вплив хмарності та атмосферних перешкод.

Для оцінки ступеня засоленості ґрунтів використовували нормалізований диференційний індекс засолення (Normalized Difference Salinity Index, NDSI), який розраховується як відношення різниці відбиття у спектральних каналах SWIR1 та SWIR2 до їх суми. Вибір даного індексу обґрунтований високою чутливістю комбінації спектральних каналів SWIR1 та SWIR2 до кристалічних сольових кірок і мінералізованого поверхневого шару ґрунту, що дозволяє чітко диференціювати відкриті засолені ділянки від незасолених масивів. З метою виключення змішування спектральних сигналів і хибного результату (зокрема, пов'язаного з прямим впливом відбиття русла річок Інгулець та Дніпро) застосовано просторову фільтрацію шляхом векторного маскування гідрографічних об'єктів (буферизація русел на 250 м) з наступним накладанням маски суходолу. Картування та часова динаміка аналізувалися шляхом просторового усереднення даних за трьома 9-річними часовими періодами: 2000–2008, 2009–2017 та 2018–2026 рр. Використання хмарної платформи GEE забезпечило автоматизовану потокову обробку великих обсягів супутникової інформації, єдність калібрування даних за часовим рядом та високу відтворюваність математико-картографічного моделювання. Роботу з платформою виконували шляхом написання скрипта для картування та розрахункової роботи мовою JavaScript ES6.

Напрям тренду та його статистичну значущість встановлювали за допомогою тесту Манна-Кендалла [7]. Прогнозування подальшого розвитку меліоративної ситуації на Інгулецькому зрошуваному масиві на 5 років вперед (до 2030 року включно) виконували за двома алгоритмами – за лінійним експоненційним згладжуванням за Хольтом, та ауторегресійною моделлю інтегрованого ковзного середнього (ARIMA) [1, 18]. Розрахунки виконували із використанням бібліотек pandas, numpy, statsmodels, pymannkendall у мові програмування Python 3 за $p < 0.05$.

Таблиця 1 – Величина супутникового нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI) для ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за період 2000–2026 рр.

Рік	Величина індексу			
	Мінімальна	Середня	Максимальна	±SD (CV)
2000	0,03	0,18	0,72	0,10 (55,56%)
2001	0,04	0,17	0,69	0,06 (35,29%)
2002	0,06	0,17	0,43	0,06 (35,29%)
2003	0,04	0,16	0,44	0,06 (37,50%)
2004	0,06	0,19	0,44	0,05 (26,32%)
2005	0,05	0,16	0,38	0,05 (31,25%)
2006	0,04	0,15	0,36	0,04 (26,67%)
2007	0,04	0,12	0,38	0,04 (33,33%)
2008	0,04	0,17	0,45	0,06 (35,29%)
2009	0,05	0,15	0,47	0,05 (33,33%)
2010	0,06	0,17	0,57	0,07 (41,18%)
2011	0,04	0,14	0,49	0,05 (35,71%)
2012	0,04	0,13	0,47	0,05 (38,46%)
2013	0,05	0,15	0,36	0,04 (26,67%)
2014	0,04	0,13	0,45	0,05 (38,46%)
2015	0,07	0,17	0,34	0,05 (29,41%)
2016	0,06	0,16	0,40	0,04 (25,00%)
2017	-0,12	0,14	0,39	0,05 (35,71%)
2018	0,01	0,14	0,63	0,07 (50,00%)
2019	0,05	0,14	0,50	0,05 (35,71%)
2020	0,04	0,13	0,45	0,05 (38,46%)
2021	0,05	0,17	0,51	0,06 (35,29%)
2022	0,05	0,17	0,59	0,06 (35,29%)
2023	0,05	0,17	0,46	0,05 (29,41%)
2024	0,05	0,15	0,68	0,06 (40,00%)
2025	0,04	0,15	0,38	0,05 (33,33%)
2026	0,06	0,17	0,60	0,06 (35,29%)

Результати досліджень. У результаті виконання обчислень у Google Earth Engine було сформовано вихідну базу даних щодо величини NDSI по роках досліджень із описовою статистикою (табл. 1). За роками дослідження помітно, що в рамках Інгулецького зрошуваного масиву показник мав доволі сильне варіювання (в межах 25–56%), що пояснюється високою неоднорідністю ґрунтового покриву, а також різним ступенем засоленості земель в межах масиву. Найбільша середня та максимальна величина NDSI, так само як і максимальне варіювання індексу, зафіксовано для 2000 року. Найменша середня величина зафіксована у 2007 році, у той час як найменший максимум – у 2015 році. В цілому, за весь період дослідження середня величина індексу NDSI коливалася в межах від 0,12 до 0,18, що приблизно відповідає 0,05–0,06% фізичного вмісту солей у верхньому шарі ґрунту, або низькому ступеню засолення. Втім, в окремих точках спостерігається сильне засолення ґрунтів на рівні 0,16–0,20% (величина NDSI в межах 0,60–0,75).

Оцінка тренду засолення за величиною індексу NDSI засвідчила про наявність статистично істотної тенденції до зменшення інтенсивності засолення ґрунтів усереднено по всьому Інгулецькому зрошуваному масиву за досліджуваний 27-річний період (табл. 2).

Таблиця 2 – Аналіз тренду засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за величиною супутникового нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI), методика Манн-Кендалла

Статистичний показник	Величина
S-статистика	-67
Z-статистика	-2,10
p-статистика	0,0357
Нахил Сена	-0,00083 на рік

Прогнозування подальшого розвитку меліоративної ситуації на ґрунтах Інгулецького зрошуваного масиву за методами Хольта та ауторегресійною моделлю дозволило встановити декілька можливих сценаріїв. У першу чергу, зупинимо увагу на лінійному прогнозі за Хольтом (табл. 3).

В цілому, точковий прогноз вказує, що до 2030 року середній за зрошуваним масивом NDSI може стабільно знизитися до 0,1515, що на 1,9% нижче середньої величини за період 2018–2026 рр. У той самий час, сценарії розвитку по нижній межі прогнозу свідчать про вірогідність падіння величини NDSI до 0,1136 (або на 35,9%). За найменш сприятливого сценарію прогнозу по верхній межі рівень

засолення може сягнути свого історичного максимуму у майже 0,19. Варто зазначити, що середня абсолютна похибка прогнозу становила 0,0128 або 8,31%, що свідчить про високу точність моделі [13].

Для часового ряду за критерієм інформативності Акаіке (AICc) обрано оптимальну специфікацію ARIMA(0,1,1). Точність моделі дещо поступається лінійній інтерполяції за Хольтом (середня похибка 0,0131 проти 0,0128), але тест Льюнга-Бокса на «білий шум» залишків засвідчив, що залишки моделі є невипадковими, і модель має високу адекватність (Q = 8,42, p = 0,393) [3]. Прогнозовані величини досліджуваного індексу засоленості наведено в табл. 4.

Модель ARIMA враховує локальні сплески останніх років (2022, 2023, 2026 рр., де NDSI зростав до 0,17) та коригує прогноз на користь виваженого середнього рівня (0,161) із поступовим розширенням довірчого інтервалу через невизначеність майбутніх коливань. Таким чином, сценарій прогнозований за ауторегресійною моделлю є більш песимістичний, і свідчить про вищу вірогідність збереження поточного рівня засоленості ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву з певною тенденцією до можливого погіршення ситуації.

Засобами картування Google Earth Engine нами було створено мапу досліджуваного Інгулецького зрошуваного масиву відносно території України (рис. 1), а також динамічні зображення середньозваженого по 9-річних періодах NDSI (рис. 2). Мінімальна середня величина супутникового NDSI зафіксована для періоду 2009–2017 рр. (0,149), у той час як максимальна – в початковий період 2000–2008 рр. (0,160). Варто відзначити, що мінімальна величина індексу засоленості співпадає із періодом введення в експлуатацію нового методу поліпшення якості поливної води в Інгулецькій зрошувальній системі [11]. А враховуючи, що зрошувальна вода є основним джерелом вторинного засолення і осолонцювання ґрунтів досліджуваного масиву, цілком логічно, що поліпшення якості поливної води має позитивний відгук ґрунтового покриву.



Рис. 1. Розташування Інгулецького зрошуваного масиву

Таблиця 3 – Прогнозування ступеня засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за величиною супутникового нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI), метод Хольта

Рік	Точковий прогноз	95% нижня межа	95% верхня межа
2027	0,1548	0,1240	0,1856
2028	0,1537	0,1207	0,1867
2029	0,1526	0,1172	0,1880
2030	0,1515	0,1136	0,1894

Таблиця 3 – Прогнозування ступеня засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за величиною супутникового нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI), метод ARIMA

Рік	Точковий прогноз	95% нижня межа	95% верхня межа
2027	0,1609	0,1249	0,1969
2028	0,1609	0,1211	0,2007
2029	0,1609	0,1177	0,2041
2030	0,1609	0,1146	0,2072

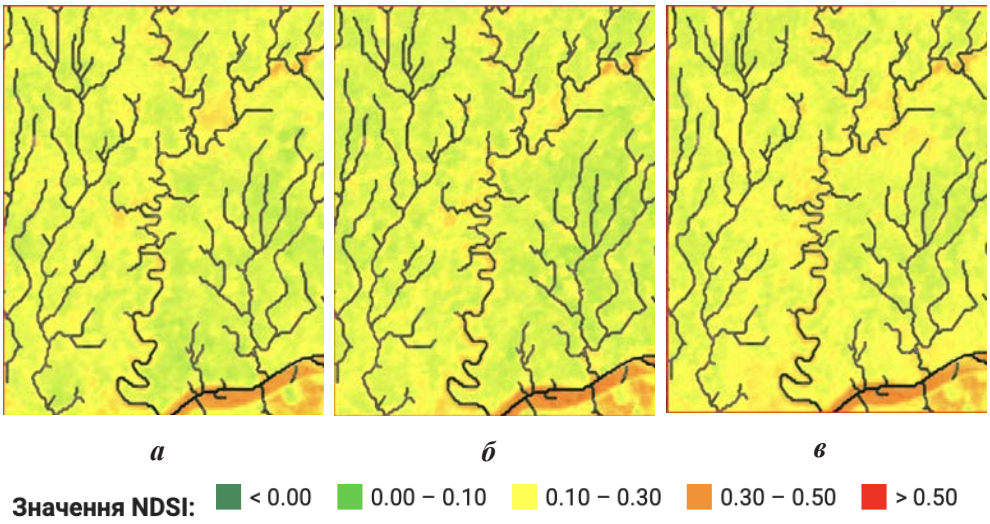


Рис. 2. Динаміка середньозваженого NDSI на ґрунтах Інгулецького зрошуваного масиву за 9-річні періоди: а) 2000–2008 рр.; б) 2009–2017 рр.; в) 2018–2026 рр.

Погіршення стану у період 2018–2026 рр. пов'язане, на нашу думку, в першу чергу зі зниженням культури землеробства та виведенням великих площ зрошуваних земель із обробітку внаслідок бойових дій. Крім того, воєнні дії могли спричинити прямий негативний вплив на сольовий режим уражених мілітарною активністю ґрунтів, оскільки встановлено, що ґрунти накопичують залишки токсичних хімічних речовин різного складу техногенного походження, які залишаються після активних бойових дій. Так, наприклад, встановлено, що артилерійські снаряди, що містять фосфор, спричиняють викиди фосфорної кислоти, яка забруднює ґрунт і викликає його підкислення та стимулює відкладення токсичних солей [2]. В цілому за досліджуваними 9-річними періодами зафіксовано мінімальне коливання величини NDSI, що помітно на картограмах – фактично, кольорова схема є незмінною, із незначними відмінностями у відтінках. Таким чином, динаміка зміни засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву відрізняється доволі повільними змінами у часовому розрізі, і фактично без змін у просторовому розподілі незасолених і засолених ґрунтів.

Висновки. Використання інструментарію Google Earth Engine та нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI) є сучасною альтернативою високовитратним і трудомістким ґрунтовим зйомкам, забезпечує високу точність та відтворюваність моніторингу засолення земель на регіональному рівні. Отримані результати свідчать про можливу поступову стабілізацію та загальну позитивну динаміку зміщення сольового режиму ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву, однак наявність локальних сплесків вимагає подальшого впровадження адаптивних засобів контролю та оптимізації зрошувальних норм і ретельного моніторингу якості поливної води та проведення відповідних еколого-меліоративних заходів із попередження деградації ґрунтів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Alfaki M. M. A., Masih S. B. Modeling and forecasting by using time series ARIMA models. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015. Vol. 4. No. 3. P. 2278–0181

2. Biyashev B., Drobitko A., Markova N., Bondar A., Pismenniy O. Chemical analysis of the state of Ukrainian soils in the combat zone. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81. No. 1. P. 199–207. DOI: https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2271754

3. Dare J., Patrick A. O., Oyewola D. O. Comparison of stationarity on Ljung box test statistics for forecasting. *Earthline Journal of Mathematical Sciences*. 2022. Vol. 8. No. 2. P. 325–336. DOI: https://doi.org/10.34198/ejms.8222.325336

4. Gojiya K. M., Rank H. D., Chauhan P. M., Patel D. V., Satasiya R. M., Prajapati G. V. Remote sensing and GIS applications in soil salinity analysis: A comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*. 2023. Vol. 13. No. 11. P. 2149–2161. DOI: https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i113377

5. Haq Y. U., Shahbaz M., Asif H. S., Al-Laith A., Alsabban W. H. Spatial mapping of soil salinity using machine learning and remote sensing in Kot Addu, Pakistan. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. No. 17. P. 12943. DOI: https://doi.org/10.3390/su151712943

6. Hossen B., Yabar H., Faruque M. J. Exploring the potential of soil salinity assessment through remote sensing and GIS: Case study in the coastal rural areas of Bangladesh. *Land*. 2022. Vol. 11. No. 10. P. 1784. DOI: https://doi.org/10.3390/land11101784

7. Hussain M., Mahmud I. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*. 2019. Vol. 4. No. 39. P. 1556. DOI: https://doi.org/10.21105/joss.01556

8. Kılıc O. M., Budak M., Gunal E., Acır N., Halbac-Cotoara-Zamfir R., Alfarraj S., Ansari M. J. Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey. *PLOS ONE*. 2022.

Vol. 17. No. 4. P. e0266915. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266915

9. Liu C., Jiang X., Yuan Z. Plant responses and adaptations to salt stress: A review. *Horticulturae*. 2024. Vol. 10. No. 11. P. 1221. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10111221

10. Lykhovyd P. V. A case study on the possibility of soil meliorative state assessment by remote sensing data. *Grail of Science*. 2023. Vol. 27. P. 226–230. DOI: https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.034

11. Lykhovyd P. V., Kozlenko Y. V. Assessment and forecast of water quality in the River Ingulets irrigation system. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 350–355. DOI: https://doi.org/10.15421/2018_221

12. Mehla M. K., Kumar A., Kumar S., Jhorar R. K. Soil salinity assessment and mapping using spectral indices and geostatistical techniques-concepts and reviews. *Remote Sensing of Soils*. Elsevier, 2024. P. 429–437. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18773-5.00019-3

13. Moreno J. J. M., Pol A. P., Abad A. S., Blasco B. C. Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*. 2013. Vol. 25. No. 4. P. 500–506. DOI: https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23

14. Oymatov R., Teshaev N., Makhsudov R., Safarov F. Analysis of soil salinity in irrigated agricultural land using remote sensing data: case study of Chinoz district in Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 401. P. 02004. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340102004

15. Sahbeni G., Ngabire M., Musyimi P. K., Székely B. Challenges and opportunities in remote sensing for soil salinization mapping and monitoring: A review. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No. 10. P. 2540. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15102540

16. Singh A. Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*. 2022. Vol. 38. No. 1. P. 39–67. DOI: https://doi.org/10.1111/sum.12772

17. Thangarasu T., Mengash H. A., Allafi R., Mahgoub H. Spatial prediction of soil salinity: Remote sensing and machine learning approach. *Journal of South American Earth Sciences*. 2025. Vol. 156. P. 105440. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105440

18. Yapar G., Capar S., Selamlar H. T., Yavuz I. Modified Holt's linear trend method. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*. 2018. Vol. 47. No. 5. P. 1394–1403. DOI: https://doi.org/10.15672/HJMS.2017.493

REFERENCES:

1. Alfaki, M. M. A., & Masih, S. B. (2015). Modeling and forecasting by using time series ARIMA models. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(3), 2278–0181

2. Biyashev, B., Drobitko, A., Markova, N., Bondar, A., & Pismenniy, O. (2024). Chemical analysis of the state of Ukrainian soils in the combat zone. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 199–207. https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2271754

3. Dare, J., Patrick, A. O., & Oyewola, D. O. (2022). Comparison of stationarity on Ljung box test statistics for forecasting. *Earthline Journal of Mathematical Sciences*, 8(2), 325–336. https://doi.org/10.34198/ejms.8222.325336

4. Gojiya, K. M., Rank, H. D., Chauhan, P. M., Patel, D. V., Satasiya, R. M., & Prajapati, G. V. (2023). Remote sensing and GIS applications in soil salinity analysis: A comprehensive review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(11), 2149–2161. https://doi.org/10.9734/IJECC/2023/v13i113377

5. Haq, Y. U., Shahbaz, M., Asif, H. S., Al-Laith, A., & Alsabban, W. H. (2023). Spatial mapping of soil salinity using machine learning and remote sensing in Kot Addu, Pakistan. *Sustainability*, 15(17), 12943. https://doi.org/10.3390/su151712943

6. Hossen, B., Yabar, H., & Faruque, M. J. (2022). Exploring the potential of soil salinity assessment through remote sensing and GIS: Case study in the coastal rural areas of Bangladesh. *Land*, 11(10), 1784. https://doi.org/10.3390/land11101784

7. Hussain, M., & Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39), 1556. https://doi.org/10.21105/joss.01556

8. Kılıc, O. M., Budak, M., Gunal, E., Acır, N., Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Alfarraj, S., & Ansari, M. J. (2022). Soil salinity assessment of a natural pasture using remote sensing techniques in central Anatolia, Turkey. *PLOS ONE*, 17(4), e0266915. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266915

9. Liu, C., Jiang, X., & Yuan, Z. (2024). Plant responses and adaptations to salt stress: A review. *Horticulturae*, 10(11), 1221. https://doi.org/10.3390/horticulturae10111221

10. Lykhovyd, P. V. (2023). A case study on the possibility of soil meliorative state assessment by remote sensing data. *Grail of Science*, 27, 226–230. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.034

11. Lykhovyd, P. V., & Kozlenko, Y. V. (2018). Assessment and forecast of water quality in the River Ingulets irrigation system. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 350–355. https://doi.org/10.15421/2018_221

12.Mehla, M. K., Kumar, A., Kumar, S., & Jhorar, R. K. (2024). Soil salinity assessment and mapping using spectral indices and geostatistical techniques-concepts and reviews. In *Remote Sensing of Soils* (pp. 429–437). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18773-5.00019-3

13. Moreno, J. J. M., Pol, A. P., Abad, A. S., & Blasco, B. C. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*, 25(4), 500–506. https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23

14. Oymatov, R., Teshaev, N., Makhsudov, R., & Safarov, F. (2023). Analysis of soil salinity in irrigated agricultural land using remote sensing data: case study of Chinoz district in Uzbekistan. *E3S Web of Conferences*, 401, 02004. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340102004

15. Sahbeni, G., Ngabire, M., Musyimi, P. K., & Székely, B. (2023). Challenges and opportunities in remote sensing for soil salinization mapping and monitoring: A review. *Remote Sensing*, 15(10), 2540. https://doi.org/10.3390/rs15102540

16. Singh, A. (2022). Soil salinity: A global threat to sustainable development. *Soil Use and Management*, 38(1), 39–67. https://doi.org/10.1111/sum.12772

17. Thangarasu, T., Mengash, H. A., Allafi, R., & Mahgoub, H. (2025). Spatial prediction of soil salinity: Remote sensing and machine learning approach. *Journal of South American Earth Sciences*, 156, 105440. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105440

18. Yapar, G., Capar, S., Selamlar, H. T., & Yavuz, I. (2018). Modified Holt's linear trend method. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 47(5), 1394–1403. https://doi.org/10.15672/HJMS.2017.493

Лиховид П.В., Ретьман М.С., Каращук Г.В., Жуйков О.Г., Казанок О.О. Моніторинг засолення ґрунтів Інгулецького зрошуваного масиву за аерокосмічними даними

Мета. Дослідження присвячено оцінці багаторічної просторово-часової динаміки засолення ґрунтів масиву Інгулецької зрошувальної системи за 2000–2026 рр. на основі даних дистанційного зондування Землі, а також математичному моделюванню та короткостроковому прогнозуванню подальших змін меліоративного стану зрошуваних земель до 2030 року.

Методи. Робота базується на аналізі мультиспектральних супутникових знімків MODIS (продукт MOD09A1, роздільна здатність 500 м) у середовищі хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Для мінімізації впливу вегетаційного покриву та варіацій зволоження використано часове вікно з 15 липня по 15 жовтня. Оцінку рівнів засолення здійснено за допомогою нормалізованого диференційного індексу засолення (NDSI). Для виключення хибних сигналів застосовано просторове векторне маскування гідрографічної мережі. Довгострокові тренди оцінено за допомогою непараметричного тесту Манн-Кендалла. Моделювання та прогнозування часового ряду (2027–2030 рр.) виконано за методами лінійного згладжування Хольта та авторегресійної моделі на основі інтегрованого ковзного середнього ARIMA(0,1,1).

Результати. Виявлено статистично значущий спадний тренд показника NDSI за 27-річний період (статистика S = -67, Z = -2,10, p < 0,05), що свідчить про поступове зниження інтенсивності засолення ґрунтів із середньою швидкістю -0,00083 на рік. Усереднені значення NDSI по 9-річних періодах склали: 0,1600 (2000–2008 рр.), 0,1489 (2009–2017 рр.) та 0,1522 (2018–2026 рр.). Побудовані моделі прогнозування продемонстрували високу точність. За моделлю Хольта очікується продовження плавної деградації індексу засоленості до 0,1515 у 2030 році, тоді як модель ARIMA(0,1,1) передбачає стабілізацію показника на рівні 0,1609 з урахуванням локальних флуктуацій останніх років. За результатами розрахунків було побудовано картограми розподілу індексу NDSI в межах Інгулецького зрошуваного масиву за досліджуваними 9-річними періодами.

Висновки. Використання інструментарію GEE та індексу NDSI забезпечує високу точність та відтворюваність моніторингу засолених земель на регіональному рівні. Отримані результати підтверджують поступову стабілізацію та загальну позитивну спрямованість зміщення сольового режиму ґрунтів Інгулецького масиву, однак наявність локальних сплесків вимагає подальшого впровадження адаптивних засобів контролю та оптимізації полівних норм.

Ключові слова: агроекологічний моніторинг, меліорація земель, MODIS, NDSI, супутниковий моніторинг.

Lykhovyd P.V., Retman M.S., Karashchuk G.V., Zhuikov O.H., Kazanok O.O. Monitoring salinity in soils of the Ingulets irrigation array using aerospace data

Purpose. The study is devoted to evaluating the long-term spatiotemporal dynamics of soil salinity within the Ingulets irrigation system array for the period of 2000–2026 based on Earth observation data, as well as mathematical modeling and short-term forecasting of further changes in the reclamation status of irrigated lands up to 2030.

Methods. The work is based on the analysis of multispectral MODIS satellite imagery (MOD09A1 product, 500 m spatial resolution) within the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. To minimize the influence of vegetation cover and soil moisture variations, a temporal window from July 15 to October 15 was utilized. Soil salinity levels were evaluated using the Normalized Difference Salinity Index (NDSI). To exclude false signals, spatial vector masking of the hydrographic network was applied. Long-term trends were assessed using the non-parametric Mann-Kendall test. Time series modeling and forecasting (2027–2030) were performed using Holt's linear exponential smoothing and an autoregressive integrated moving average model, ARIMA(0,1,1).

Results. A statistically significant downward trend in the NDSI metric was identified over the 27-year period (statistic S = -67, Z = -2.10, p < 0.05), indicating a gradual reduction in soil salinity intensity at an average rate of -0.00083 per year. The averaged NDSI values across 9-year periods were 0.1600 (2000–2008), 0.1489 (2009–2017), and 0.1522 (2018–2026). The constructed predictive models demonstrated high accuracy. According to Holt's model, a continued smooth decline in the salinity index to 0.1515 is expected by 2030, whereas the ARIMA(0,1,1) model projects stabilization at 0.1609, accounting for local fluctuations in recent years. Based on the calculation results, maps of NDSI index distribution within the Ingulets irrigation array were generated for the analyzed 9-year periods.

Conclusions. The application of GEE tools and the NDSI index provides high accuracy and reproducibility for regional monitoring of saline lands. The obtained results confirm a gradual stabilization and an overall positive shift in the soil salt regime of the Ingulets array; however, the presence of localized spikes highlights the need for adaptive monitoring techniques and optimized irrigation regimes.

Key words: agroecological monitoring, land reclamation, MODIS, NDSI, satellite monitoring.

Дата першого надходження статті до видання: 09.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0