

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Боднарчук Владислав Михайлович

УДК 631.416 :551 .577
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок
інтенсивних опадів

⌚
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища
(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне
джерело:**

Здобувач освітнього ступеня _____ Боднарчук Владислав Михайлович
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник _____ Лопушняк Василь Іванович, д. с. г. н., професор
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту
Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ
2026**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут нафтогазової інженерії
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці
ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую

Зав. кафедри ТЗБП

Галина ГРИЦУЛЯК _____
(ім'я та прізвище) (підпис)

“ ____ ” _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Боднарчук Владислав Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок інтенсивних опадів»
керівник роботи Лопушняк Василь Іванович, д. с.г. н., професор
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від “ ____ ” _____ 20__ р. №

2 Термін здачі закінченої роботи “ ____ ” _____ 2026 р.

3 Вихідні дані до роботи

Вихідними даними до бакалаврської роботи є матеріали наукової, навчальної та нормативно-методичної літератури з ґрунтознавства, агрохімії, охорони ґрунтів і раціонального землекористування; відомості про основні поживні елементи ґрунту, їхні форми перебування, рухомість і значення для росту рослин; дані щодо впливу інтенсивних атмосферних опадів на водний режим ґрунту, інфільтрацію, поверхневий стік, ерозійні процеси та міграцію поживних речовин у ґрунтовому профілі. У роботі необхідно врахувати природні та антропогенні чинники, що посилюють вимивання поживних елементів, зокрема гранулометричний склад ґрунту, вміст гумусу, кислотність, структуру ґрунту, рослинний покрив, систему удобрення, інтенсивність опадів та особливості обробітку ґрунту.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки

Охарактеризувати ґрунт як природну систему та середовище накопичення поживних речовин. Розглянути основні поживні елементи ґрунту — азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірку та мікроелементи — і визначити їх значення для росту й розвитку рослин.

Проаналізувати поняття вимивання поживних елементів із ґрунту та механізми міграції речовин у ґрунтовому профілі. Визначити вплив інтенсивних атмосферних опадів на водний режим ґрунту, інфільтрацію, поверхневий стік і ерозійні процеси. Охарактеризувати основні чинники, що впливають на інтенсивність вимивання поживних речовин. Оцінити екологічні наслідки втрат поживних елементів із ґрунту, зокрема зниження родючості та ризик забруднення підземних і поверхневих вод. Обґрунтувати методичні підходи до оцінювання процесів вимивання поживних речовин після інтенсивних опадів. Запропонувати заходи щодо зменшення втрат поживних елементів і збереження родючості ґрунтів.

5. Орієнтовний перелік текстового та графічного матеріалу в презентації

Тема, мета, об'єкт і предмет дослідження. Схема ґрунту як природної системи.

Таблиця основних поживних елементів ґрунту та їх значення для рослин.

Схема механізму вимивання поживних речовин у ґрунтовому профілі.

Діаграма впливу інтенсивних опадів на водний режим ґрунту. Характеристика чинників, що посилюють вимивання поживних елементів.

Схема екологічних наслідків втрат азоту, фосфору, калію, кальцію та магнію.

Заходи щодо зменшення вимивання поживних речовин із ґрунту.

Основні висновки роботи.

Календарний план виконання бакалаврської роботи

№	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання	Примітка
1	<u>ВСТУП</u>		
2	<u>Розділ 1. Теоретичні основи процесів вимивання поживних елементів із ґрунту</u>		
3	<u>Розділ 2. Методичні підходи до оцінювання процесів вимивання поживних речовин</u>		
4	<u>Розділ 3. Оцінка впливу інтенсивних опадів на вимивання поживних елементів із ґрунту</u>		
5	<u>Розділ 4. Заходи щодо зменшення втрат поживних елементів і збереження родючості ґрунтів</u>		
6	ВИСНОВКИ		
7	ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА		

Студентка

Боднарчук Владислав Михайлович

(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник

Лопушняк Василь Іванович, д. с. г. н., професор

(підпис) (ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота на тему «Дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок інтенсивних опадів» присвячена вивченню актуальної екологічної та агрономічної проблеми, пов'язаної зі збереженням родючості ґрунтів в умовах зростання інтенсивності атмосферних опадів, зміни клімату, посилення ерозійних процесів і нераціонального використання земельних ресурсів.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку використаних джерел. У роботі розглянуто теоретичні основи функціонування ґрунту як природної системи, охарактеризовано основні поживні елементи ґрунту, проаналізовано механізми їх міграції у ґрунтового профілі, визначено вплив інтенсивних опадів на водний режим ґрунту, а також запропоновано заходи щодо зменшення втрат поживних речовин і збереження родючості ґрунтів.

Об'єктом дослідження є ґрунт як природна біокосна система, у якій відбуваються процеси накопичення, трансформації, утримання та переміщення поживних речовин.

Предметом дослідження є процеси вимивання поживних елементів із ґрунту під впливом інтенсивних атмосферних опадів.

Метою бакалаврської роботи є дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок інтенсивних опадів та обґрунтування заходів щодо зменшення втрат елементів живлення і збереження родючості ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі завдання: охарактеризовано ґрунт як природну систему та середовище накопичення поживних речовин; розглянуто основні поживні елементи ґрунту та їх значення для росту й розвитку рослин; проаналізовано поняття вимивання поживних елементів і механізми міграції речовин у ґрунтового профілі; визначено вплив інтенсивних опадів на водний режим ґрунту;

охарактеризовано природні й антропогенні чинники, що впливають на інтенсивність вимивання; оцінено екологічні наслідки втрат поживних речовин; запропоновано практичні заходи щодо зменшення вимивання поживних елементів із ґрунту.

У першому розділі роботи розкрито теоретичні основи процесів вимивання поживних елементів із ґрунту. Встановлено, що ґрунт є складною багатокомпонентною системою, яка складається з твердої, рідкої, газоподібної та живої фаз. Саме у ґрунті відбуваються накопичення, трансформація та переміщення поживних речовин, необхідних для росту рослин. Особливе значення мають азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірка та мікроелементи. Їх доступність залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту, зокрема вмісту гумусу, кислотності, вологості, гранулометричного складу, ємності катіонного обміну та біологічної активності.

У роботі зазначено, що найбільш уразливими до вимивання є рухомі форми азоту, насамперед нітрати. Нітратний азот добре розчиняється у воді та слабо утримується ґрунтовим вбирним комплексом, тому легко переміщується в нижні горизонти ґрунтового профілю разом із фільтраційними водами. Фосфор є менш рухомих елементом, оскільки здатний зв'язуватися з частинками ґрунту, однак може втрачатися через поверхневий стік і ерозійне винесення. Калій, кальцій і магній мають середню рухомість, а їх вимивання залежить від типу ґрунту, водного режиму, вмісту гумусу та ємності катіонного обміну.

У другому розділі охарактеризовано методичні підходи до оцінювання процесів вимивання поживних речовин. Визначено, що для дослідження цього процесу доцільно враховувати вміст основних елементів живлення у верхніх і нижніх шарах ґрунту, показники вологості, реакцію ґрунтового середовища, вміст гумусу, гранулометричний склад і стан рослинного покриву. Особливе значення має порівняння стану ґрунту до та після інтенсивних опадів, що дає змогу оцінити напрям і масштаби переміщення поживних речовин у ґрунтовому профілі.

У третьому розділі проаналізовано вплив інтенсивних опадів на процеси вимивання поживних елементів. Встановлено, що за умов надмірного зволоження вода проникає в нижні горизонти ґрунту та переносить із собою розчинені сполуки азоту, калію, кальцію, магнію та інших елементів. Найбільший ризик втрат поживних речовин виникає на легких піщаних і супіщаних ґрунтах, які мають високу водопроникність і низьку здатність утримувати поживні елементи. На ущільнених ґрунтах та схилах інтенсивні опади можуть спричиняти поверхневий стік, руйнування ґрунтової структури, ерозію та винесення гумусу й фосфору разом із частинками ґрунту.

Окрему увагу в роботі приділено чинникам, що посилюють вимивання поживних речовин. До них належать велика кількість опадів, висока інтенсивність дощу, низький вміст гумусу, легкий гранулометричний склад ґрунту, відсутність рослинного покриву, неправильне внесення мінеральних добрив, надмірне зрошення, ущільнення ґрунту, порушення його структури та недостатнє застосування протиерозійних заходів. Встановлено, що особливо небезпечним є випадання сильних опадів після внесення добрив, коли поживні речовини ще не засвоєні рослинами та не закріплені у ґрунтовому вбирному комплексі.

У роботі також розглянуто екологічні наслідки вимивання поживних елементів. Втрата азоту, фосфору, калію, кальцію та магнію призводить до зниження родючості ґрунту, погіршення умов мінерального живлення рослин, зменшення ефективності використання добрив і порушення балансу поживних речовин. Крім того, вимиті нітрати й фосфати можуть потрапляти у підземні та поверхневі води, спричиняючи погіршення їх якості. Надмірне надходження сполук азоту й фосфору у водойми може призводити до евтрофікації, надмірного розвитку водоростей, зниження вмісту кисню у воді та погіршення умов існування водних організмів.

У четвертому розділі запропоновано комплекс заходів щодо зменшення втрат поживних елементів із ґрунту. До основних заходів належать раціональне внесення мінеральних і органічних добрив, урахування прогнозу

погоди під час планування удобрення, застосування покривних культур, мульчування, мінімальний обробіток ґрунту, збереження рослинних решток, підвищення вмісту органічної речовини, поліпшення структури ґрунту, запобігання ущільненню, впровадження протиерозійних заходів і систематичний моніторинг поживного режиму ґрунтів.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропоновані заходи можуть бути використані для збереження родючості ґрунтів, підвищення ефективності застосування добрив, запобігання деградаційним процесам і зменшення ризику забруднення водних ресурсів. Результати роботи можуть бути корисними для фахівців у сфері охорони ґрунтів, агроєкології, раціонального землекористування та технологій захисту навколишнього середовища.

У бакалаврській роботі доведено, що інтенсивні опади є важливим чинником втрат поживних елементів із ґрунту. Найбільш уразливими до вимивання є рухомі форми азоту, тоді як фосфор частіше втрачається через поверхневий стік та ерозію. Зменшення втрат поживних речовин можливе за умови раціонального удобрення, підтримання доброї структури ґрунту, збереження рослинного покриву, підвищення вмісту гумусу та впровадження природоохоронних агротехнічних заходів.

Ключові слова: ґрунт, поживні елементи, вимивання, інтенсивні опади, азот, фосфор, калій, гумус, родючість ґрунту, водний режим, поверхневий стік, ерозія, евтрофікація, екологічні ризики.

ABSTRACT

The bachelor's thesis on the topic "Investigation of the processes of leaching of nutrients from the soil due to intense precipitation" is devoted to the study of the current ecological and agronomic problem related to the preservation of soil fertility in the conditions of increasing intensity of atmospheric precipitation, climate change, strengthening of erosion processes and irrational use of land resources.

The work consists of an introduction, four chapters, conclusions and a list of sources used. The paper examines the theoretical foundations of soil functioning as a natural system, characterizes the main nutrient elements of the soil, analyzes the mechanisms of their migration in the soil profile, determines the impact of intense precipitation on the water regime of the soil, and also proposes measures to reduce nutrient losses and preserve soil fertility.

The object of research is the soil as a natural biological system in which the processes of accumulation, transformation, retention and movement of nutrients take place.

The subject of the study is the process of leaching of nutrients from the soil under the influence of intense atmospheric precipitation.

The aim of the bachelor's thesis is to study the processes of nutrient leaching from the soil as a result of intense rainfall and to justify measures to reduce the loss of nutrients and preserve soil fertility.

In order to achieve the set goal, the following tasks were solved in the work: the soil was characterized as a natural system and environment for the accumulation of nutrients; the main nutrient elements of the soil and their importance for the growth and development of plants are considered; the concept of leaching of nutrients and the mechanisms of migration of substances in the soil profile are analyzed; the impact of intense precipitation on the water regime of the soil is determined; natural and anthropogenic factors affecting the intensity of leaching are characterized; assessed the ecological consequences of nutrient losses; practical measures to reduce leaching of nutrients from the soil are proposed.

In the first chapter of the work, the theoretical foundations of the processes of nutrient leaching from the soil are revealed. It was established that the soil is a complex multicomponent system consisting of solid, liquid, gaseous and living phases. It is in the soil that accumulation, transformation and movement of nutrients necessary for plant growth take place. Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur and trace elements are of particular importance. Their availability depends on the physical and chemical properties of the soil, in particular the content of humus, acidity, humidity, grain size composition, cation exchange capacity and biological activity.

The work states that mobile forms of nitrogen, primarily nitrates, are the most vulnerable to leaching. Nitrate nitrogen dissolves well in water and is poorly retained by the soil absorption complex, so it easily moves to the lower horizons of the soil profile together with the filtration waters. Phosphorus is a less mobile element because it can bind to soil particles, but can be lost through surface runoff and erosion. Potassium, calcium, and magnesium have average mobility, and their leaching depends on the soil type, water regime, humus content, and cation exchange capacity.

The second chapter describes methodical approaches to the assessment of nutrient leaching processes. It was determined that for the study of this process, it is advisable to take into account the content of the main nutrients in the upper and lower layers of the soil, moisture indicators, the reaction of the soil environment, the content of humus, the granulometric composition and the state of the plant cover. Of particular importance is the comparison of the condition of the soil before and after intense rainfall, which makes it possible to assess the direction and scale of movement of nutrients in the soil profile.

In the third section, the impact of intense precipitation on nutrient leaching processes is analyzed. It has been established that under conditions of excessive moisture, water penetrates into the lower horizons of the soil and carries with it dissolved compounds of nitrogen, potassium, calcium, magnesium and other elements. The greatest risk of nutrient loss occurs on light sandy and loamy soils,

which have high water permeability and low ability to retain nutrients. On compacted soils and slopes, heavy precipitation can cause surface runoff, destruction of soil structure, erosion, and removal of humus and phosphorus along with soil particles.

Special attention is paid in the work to factors that increase the leaching of nutrients. These include a large amount of precipitation, high intensity of rain, low humus content, light granulometric composition of the soil, lack of vegetation cover, improper application of mineral fertilizers, excessive irrigation, compaction of the soil, violation of its structure, and insufficient application of anti-erosion measures. It has been established that heavy rainfall after the application of fertilizers, when nutrients have not yet been assimilated by plants and not fixed in the soil absorption complex, is particularly dangerous.

The paper also considers the ecological consequences of nutrient leaching. The loss of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium leads to a decrease in soil fertility, a deterioration in the conditions of mineral nutrition of plants, a decrease in the efficiency of the use of fertilizers and a violation of the balance of nutrients. In addition, leached nitrates and phosphates can enter groundwater and surface water, causing deterioration of their quality. Excessive input of nitrogen and phosphorus compounds into reservoirs can lead to eutrophication, excessive growth of algae, reduction of oxygen content in water, and deterioration of the conditions for the existence of aquatic organisms.

The fourth chapter proposes a set of measures to reduce the loss of nutrients from the soil. The main measures include the rational introduction of mineral and organic fertilizers, taking into account the weather forecast during fertilization planning, the use of cover crops, mulching, minimal tillage, preservation of plant residues, increasing the content of organic matter, improving the soil structure, preventing compaction, implementing anti-erosion measures and systematic monitoring of the nutrient regime of soils.

The practical significance of the work is that the proposed measures can be used to preserve soil fertility, improve the efficiency of fertilizer application, prevent

degradation processes, and reduce the risk of water pollution. The results of the work can be useful for specialists in the field of soil protection, agroecology, rational land use and environmental protection technologies.

In the bachelor's thesis, it was proved that intense precipitation is an important factor in the loss of nutrients from the soil. Most vulnerable to leaching are mobile forms of nitrogen, while phosphorus is more likely to be lost through surface runoff and erosion. Reducing the loss of nutrients is possible under the condition of rational fertilization, maintenance of good soil structure, preservation of plant cover, increase of humus content and implementation of environmental agrotechnical measures.

Key words: soil, nutrients, leaching, intensive precipitation, nitrogen, phosphorus, potassium, humus, soil fertility, water regime, surface runoff, erosion, eutrophication, ecological risks.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи процесів вимивання поживних елементів із ґрунту.....	13
1.1. Ґрунт як природна система та середовище накопичення поживних речовин.....	13
1.2. Основні поживні елементи ґрунту та їх значення для рослин.....	15
1.3. Поняття вимивання поживних елементів із ґрунту.....	18
1.4. Вплив інтенсивних опадів на водний режим ґрунту.....	22
1.5. Фактори, що впливають на інтенсивність вимивання поживних елементів.....	26
1.6. Екологічні наслідки вимивання поживних елементів.....	31
РОЗДІЛ 2. Умови та методика дослідження процесів вимивання поживних елементів.....	35
2.1. Характеристика території дослідження.....	35
2.2. Характеристика ґрунтового покриву досліджуваної ділянки.....	37
2.3. Вибір показників для оцінки вимивання поживних елементів.....	40
2.4. Методи відбору ґрунтових зразків.....	44
2.5. Методи лабораторного аналізу поживних елементів у ґрунті.....	48
2.6. Методика оцінювання впливу інтенсивних опадів на втрати поживних речовин.....	52
РОЗДІЛ 3. Оцінка впливу інтенсивних опадів на вимивання поживних елементів із ґрунту.....	58
3.1. Аналіз метеорологічних умов у період дослідження.....	58
3.2. Динаміка вологості ґрунту після інтенсивних опадів.....	59
3.3. Зміна вмісту азотних сполук у ґрунті після опадів.....	63
3.4. Зміна вмісту фосфору та калію в ґрунті.....	64
3.5. Порівняння вмісту поживних елементів до та після інтенсивних опадів.....	66

3.6. Оцінка глибини міграції поживних речовин у ґрунтовому профілі.....	73
3.7. Визначення основних чинників, що посилюють вимивання поживних елементів.....	78
РОЗДІЛ 4. Заходи щодо зменшення втрат поживних елементів із ґрунту.....	82
4.1. Агротехнічні заходи зменшення вимивання поживних речовин.....	82
4.2. Раціональне внесення мінеральних і органічних добрив.....	86
4.3. Використання рослинного покриву для зменшення поверхневого стоку.....	90
4.4. Поліпшення структури ґрунту та підвищення вмісту органічної речовини.....	94
4.5. Природоохоронні заходи для запобігання забрудненню водних об'єктів.....	97
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	110

ВСТУП

Ґрунт є одним із найважливіших природних ресурсів, який забезпечує функціонування наземних екосистем, продуктивність сільськогосподарського виробництва та підтримання екологічної рівноваги. Він виконує роль середовища росту рослин, акумулятора органічної речовини, регулятора водного режиму та основного резервуара поживних елементів. Саме у ґрунті відбуваються процеси накопичення, трансформації, утримання та переміщення азоту, фосфору, калію, кальцію, магнію, сірки й мікроелементів, необхідних для нормального росту та розвитку рослин.

У сучасних умовах проблема збереження родючості ґрунтів набуває особливої актуальності. Інтенсивне землеробство, нераціональне внесення мінеральних добрив, зменшення вмісту органічної речовини, ущільнення ґрунту, ерозійні процеси та зміни клімату призводять до порушення природного балансу поживних речовин. Одним із важливих чинників, що посилює втрати елементів живлення, є інтенсивні опади. За умов надмірного зволоження вода проникає в нижні горизонти ґрунтового профілю та переносить із собою розчинені форми поживних речовин, насамперед нітратний азот, частково калій, кальцій, магній та інші рухомі сполуки.

Вимивання поживних елементів із ґрунту є складним фізико-хімічним і біогеохімічним процесом, який залежить від кількості й інтенсивності опадів, гранулометричного складу ґрунту, його структури, вмісту гумусу, кислотності, ємності катіонного обміну, рослинного покриву, системи удобрення та способу обробітку. Найбільш уразливими до вимивання є рухомі форми азоту, зокрема нітрати, які добре розчиняються у воді та слабо утримуються ґрунтовим вбирним комплексом. Фосфор, на відміну від азоту, має меншу рухомість, проте може втрачатися через поверхневий стік та ерозійне винесення частинок ґрунту.

Актуальність теми полягає в тому, що вимивання поживних елементів знижує родючість ґрунту, погіршує умови мінерального живлення рослин,

зменшує ефективність використання добрив і може спричиняти забруднення підземних та поверхневих вод. Надходження сполук азоту й фосфору у водні об'єкти підвищує ризик евтрофікації, погіршення якості води та порушення екологічної рівноваги водних екосистем. Тому дослідження процесів вимивання поживних елементів під впливом інтенсивних опадів є важливим як для агроекології, так і для раціонального природокористування.

Метою бакалаврської роботи є дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок інтенсивних опадів та обґрунтування заходів щодо зменшення втрат елементів живлення і збереження родючості ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- охарактеризувати ґрунт як природну систему та середовище накопичення поживних речовин;
- розглянути основні поживні елементи ґрунту та їх значення для росту й розвитку рослин;
- проаналізувати механізми вимивання поживних елементів у ґрунтовому профілі;
- визначити вплив інтенсивних опадів на водний режим ґрунту;
- охарактеризувати чинники, що впливають на інтенсивність вимивання поживних речовин;
- оцінити екологічні наслідки втрат поживних елементів із ґрунту;
- обґрунтувати методичні підходи до оцінювання вимивання поживних речовин після інтенсивних опадів;
- запропонувати заходи щодо зменшення втрат поживних елементів і збереження родючості ґрунтів.

Об'єктом дослідження є ґрунт як природна система, у якій відбуваються процеси накопичення, трансформації та переміщення поживних речовин.

Предметом дослідження є процеси вимивання поживних елементів із ґрунту під впливом інтенсивних атмосферних опадів.

Методи дослідження включають аналіз наукової літератури з питань

грунтознавства, агрохімії та охорони ґрунтів; порівняльний аналіз чинників, що впливають на вимивання поживних речовин; узагальнення теоретичних і практичних даних щодо міграції азоту, фосфору, калію та інших елементів у ґрунтовому профілі; оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних із втратою поживних речовин і можливим забрудненням водних ресурсів.

Науково-практичне значення роботи полягає в узагальненні чинників, що визначають інтенсивність вимивання поживних елементів із ґрунту, а також у розробленні рекомендацій щодо зменшення втрат елементів живлення. Запропоновані заходи можуть бути використані для підвищення ефективності удобрення, підтримання родючості ґрунтів, запобігання ерозійним процесам і зменшення ризику забруднення водних об'єктів.

Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і переліку використаних джерел. У першому розділі розглянуто теоретичні основи процесів вимивання поживних елементів із ґрунту. У другому розділі охарактеризовано методичні підходи до оцінювання впливу інтенсивних опадів на втрати поживних речовин. У третьому розділі проаналізовано результати оцінки вимивання поживних елементів та основні чинники, що посилюють цей процес. У четвертому розділі запропоновано заходи щодо зменшення втрат поживних елементів і збереження родючості ґрунті

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ВИМИВАННЯ ПОЖИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ҐРУНТУ

1.1. Ґрунт як природна система та середовище накопичення поживних речовин

Ґрунт є складною природною біокосною системою, що формується внаслідок тривалої взаємодії мінеральної основи, органічної речовини, води, повітря, живих організмів і кліматичних чинників. Він виконує низку важливих екологічних, біологічних і господарських функцій, серед яких особливе значення має забезпечення рослин поживними речовинами. Саме ґрунт є основним середовищем, у якому відбувається накопичення, трансформація, утримання та переміщення елементів живлення, необхідних для росту й розвитку рослин [1, 6].

Як природна система ґрунт характеризується багатокomпонентністю та динамічністю. Його склад включає тверду, рідку, газоподібну та живу фази. Тверда фаза представлена мінеральними частинками різного гранулометричного складу та органічною речовиною. Рідка фаза, або ґрунтовий розчин, містить розчинені мінеральні та органічні сполуки, які безпосередньо доступні для поглинання кореневою системою рослин. Газоподібна фаза забезпечує аерацію ґрунту, необхідну для життєдіяльності коренів і ґрунтових мікроорганізмів. Жива фаза охоплює бактерії, гриби, водорості, найпростіші, безхребетних тварин і кореневі системи рослин, які беруть участь у процесах розкладу органічних решток, мінералізації, гумусоутворення та кругообігу поживних елементів [6, 22].

Поживні речовини в ґрунті можуть перебувати в різних формах: мінеральній, органічній, розчинній, обмінній або важкодоступній. Найважливішими елементами живлення для рослин є азот, фосфор, калій, кальцій, магній, сірка, а також мікроелементи - залізо, марганець, цинк, мідь, бор, молібден та інші. Їхня доступність залежить не лише від загального вмісту в ґрунті, а й від фізико-хімічних властивостей ґрунтового середовища: кислотності, вологості, температури, вмісту гумусу, ємності катіонного

обміну, гранулометричного складу та біологічної активності [31, 35].

Особливу роль у накопиченні поживних речовин відіграє гумус. Він є основним резервуаром органічного вуглецю та джерелом поступового вивільнення елементів живлення внаслідок мінералізації органічної речовини. Гумусові сполуки здатні утримувати катіони кальцію, магнію, калію, амонію та інших елементів, зменшуючи їх втрати з ґрунтового профілю. Крім того, гумус покращує структуру ґрунту, підвищує його водоутримувальну здатність, сприяє розвитку корисної мікрофлори та стабілізує поживний режим [22, 32].

Важливим механізмом утримання поживних елементів у ґрунті є вбирна здатність. Ґрунтовий вбирний комплекс, до складу якого входять глинисті мінерали, гумусові речовини та колоїдні частинки, здатний поглинати й утримувати іони поживних речовин. Завдяки цьому елементи живлення не одразу вимиваються атмосферними опадами чи зрошувальними водами, а можуть поступово переходити у ґрунтовий розчин і використовуватися рослинами. Найкраще утримуються позитивно заряджені іони, зокрема калій, кальцій, магній і амоній. Натомість нітратні форми азоту, які мають високу розчинність і слабо зв'язуються ґрунтовими частинками, є більш рухомими та схильними до вимивання [24, 32].

Здатність ґрунту накопичувати поживні речовини значною мірою залежить від його гранулометричного складу. Глинисті та суглинкові ґрунти мають вищу вбирну здатність, краще утримують воду й елементи живлення, тому втрати поживних речовин у них зазвичай нижчі. Піщані ґрунти, навпаки, характеризуються високою водопроникністю, низьким вмістом гумусу та слабкою здатністю до утримання іонів, що підвищує ризик вимивання поживних елементів у нижні горизонти ґрунту або ґрунтові води [15, 23].

Отже, ґрунт є не лише механічною опорою для рослин, а й активним середовищем накопичення, перетворення та регулювання доступності поживних речовин. Його здатність забезпечувати рослини елементами живлення визначається сукупністю фізичних, хімічних і біологічних

властивостей. Водночас порушення природної рівноваги ґрунтової системи внаслідок інтенсивного землеробства, надмірного зрошення, неправильного внесення добрив або деградаційних процесів може призводити до зменшення запасів поживних елементів і посилення їх вимивання. Саме тому вивчення ґрунту як природної системи є необхідною передумовою для розуміння процесів міграції та втрат поживних речовин [16, 22].

1.2. Основні поживні елементи ґрунту та їх значення для рослин

Азот, фосфор, калій, кальцій, магній та мікроелементи.

Поживні елементи ґрунту є необхідною умовою нормального росту, розвитку та продуктивності рослин. Вони беруть участь у формуванні клітин, перебігу фізіологічних і біохімічних процесів, синтезі органічних речовин, регуляції водного режиму, фотосинтезі, диханні та стійкості рослин до несприятливих чинників довкілля. За кількістю, необхідною для рослинного організму, елементи живлення поділяють на макроелементи та мікроелементи. До основних макроелементів належать азот, фосфор, калій, кальцій, магній і сірка. Мікроелементи потрібні рослинам у значно менших кількостях, однак їх роль є не менш важливою [4, 16].

Одним із найважливіших елементів живлення є азот. Він входить до складу білків, амінокислот, нуклеїнових кислот, ферментів і хлорофілу. Саме тому азот безпосередньо впливає на ріст вегетативної маси рослин, інтенсивність фотосинтезу та загальну продуктивність культур. За достатнього забезпечення азотом рослини мають добре розвинену листову поверхню, насичене зелене забарвлення та активний ріст. Нестача азоту проявляється у сповільненні росту, пожовтінні листків, зменшенні розмірів рослин і зниженні врожайності [9, 12].

У ґрунті азот перебуває переважно в органічній формі, а також у вигляді мінеральних сполук - амонійних і нітратних іонів. Органічні форми азоту стають доступними для рослин після процесів мінералізації, які здійснюються

грунтовими мікроорганізмами. Нітратна форма азоту є дуже рухомою, добре розчиняється у воді та слабо утримується ґрунтовим вбирним комплексом. Через це азот, особливо у формі нітратів, найбільше схильний до вимивання з ґрунтового профілю [7, 9].

Важливе значення для рослин має фосфор. Він входить до складу нуклеїнових кислот, фосфоліпідів, ферментів та енергетичних сполук, зокрема аденозинтрифосфату. Фосфор бере участь у процесах енергетичного обміну, поділу клітин, формування кореневої системи, цвітіння, плодоношення та досягання насіння. Особливо важливим він є на початкових етапах розвитку рослин, коли формується коренева система [3, 7].

За нестачі фосфору рослини повільніше ростуть, утворюють слабку кореневу систему, затримується цвітіння та досягання плодів. Листки можуть набувати темно-зеленого, синюватого або фіолетового відтінку. На відміну від азоту, фосфор у ґрунті має меншу рухомість, оскільки легко переходить у важкорозчинні сполуки з кальцієм, залізом або алюмінієм. Тому загальний вміст фосфору в ґрунті не завжди свідчить про його доступність для рослин [12, 19].

Калій є одним із головних елементів, що регулює водний режим рослин. Він не входить безпосередньо до складу органічних сполук, однак активує роботу багатьох ферментів, впливає на фотосинтез, синтез вуглеводів, білків і переміщення продуктів фотосинтезу в рослинному організмі. Калій підвищує стійкість рослин до посухи, низьких температур, хвороб і несприятливих умов середовища [13, 16].

За достатнього забезпечення калієм рослини краще використовують воду, формують міцні тканини, мають вищу стійкість до вилягання та кращу якість урожаю. Нестача калію проявляється у підсиханні країв листків, появі бурих плям, ослабленні стебел і зниженні стійкості до стресових чинників. У ґрунті калій може перебувати у водорозчинній, обмінній, необмінній і мінеральній формах. Найбільш доступними для рослин є водорозчинна та обмінна форми калію [11, 16].

Важливим елементом для рослин і ґрунтової системи є кальцій. Він бере участь у формуванні клітинних стінок, регулює проникність клітинних мембран, сприяє розвитку кореневої системи та впливає на активність ферментів. Крім того, кальцій має велике значення для самого ґрунту, оскільки сприяє поліпшенню його структури, зменшує кислотність і підвищує стабільність ґрунтових агрегатів [20, 24].

Наявність кальцію в ґрунті позитивно впливає на умови життя ґрунтових мікроорганізмів і процеси гумусоутворення. За його нестачі погіршується ріст коренів, молоді листки можуть деформуватися, а рослини стають менш стійкими до несприятливих умов. Кальцій менш рухомий у рослині, тому ознаки його дефіциту найчастіше проявляються на молодих органах.

Магній є центральним атомом молекули хлорофілу, тому він безпосередньо пов'язаний із процесом фотосинтезу. Також магній бере участь в активації ферментів, синтезі білків, обміні фосфору та переміщенні вуглеводів у рослинному організмі. Достатня кількість магнію забезпечує нормальне утворення органічних речовин і підтримання енергетичного обміну [14, 22].

Нестача магнію проявляється переважно на старих листках у вигляді міжжилкового хлорозу, коли тканини між жилками жовтіють, а самі жилки певний час залишаються зеленими. Це пов'язано з тим, що магній є рухомих елементом і може переміщуватися зі старих органів до молодих. У ґрунті доступність магнію залежить від кислотності, гранулометричного складу, вмісту органічної речовини та співвідношення з іншими катіонами, зокрема калієм і кальцієм [13, 14].

Окрему групу становлять мікроелементи, до яких належать залізо, марганець, цинк, мідь, бор, молібден, кобальт та інші. Вони потрібні рослинам у невеликих кількостях, але виконують надзвичайно важливі функції. Мікроелементи входять до складу ферментів, беруть участь у фотосинтезі, диханні, синтезі білків, утворенні хлорофілу, фіксації азоту, формуванні репродуктивних органів і підвищенні стійкості рослин до хвороб [7, 13].

Наприклад, залізо необхідне для утворення хлорофілу та перебігу окисно-відновних процесів. Марганець бере участь у фотосинтезі та ферментативних реакціях. Цинк важливий для синтезу ростових речовин і нормального розвитку рослин. Мідь впливає на процеси дихання, утворення білків і стійкість до хвороб. Бор необхідний для росту точок росту, формування квіток, плодів і насіння. Молібден відіграє важливу роль у засвоєнні азоту, особливо у бобових рослин, які вступають у симбіоз із бульбочковими бактеріями [2, 7].

Доступність поживних елементів для рослин залежить не лише від їх загальної кількості в ґрунті, а й від форми перебування, реакції ґрунтового середовища, вологості, температури, вмісту гумусу, активності мікроорганізмів та інтенсивності водного режиму. Наприклад, у кислих ґрунтах може зменшуватися доступність фосфору, кальцію та магнію, тоді як рухомість деяких металів, навпаки, зростає. У піщаних ґрунтах поживні речовини легше вимиваються, тоді як глинисті та багаті на гумус ґрунти краще їх утримують [1, 4].

Таким чином, азот, фосфор, калій, кальцій, магній і мікроелементи є основою мінерального живлення рослин. Кожен із цих елементів виконує специфічні функції, а їх збалансоване надходження забезпечує нормальний ріст, розвиток і продуктивність рослин. Порушення балансу поживних речовин, їх нестача або надлишок можуть негативно впливати як на рослини, так і на стан ґрунтового середовища. У контексті процесів вимивання особливо важливо враховувати рухомість окремих елементів, оскільки найбільш розчинні та слабо зв'язані форми поживних речовин можуть втрачатися з ґрунту разом із фільтраційними водами [31, 34].

1.3. Поняття вимивання поживних елементів із ґрунту

Вимивання поживних елементів із ґрунту - це процес переміщення розчинених мінеральних і органічних сполук із верхніх, найбільш родючих горизонтів ґрунту в нижні шари ґрунтового профілю або за його межі разом із

водними потоками. Найчастіше цей процес відбувається під впливом атмосферних опадів, танення снігу, зрошення або надмірного зволоження ґрунту. У результаті поживні речовини можуть ставати менш доступними для кореневої системи рослин, що призводить до зниження родючості ґрунту та погіршення умов мінерального живлення культур [28, 33].

Вимивання є природним процесом, який відбувається в усіх ґрунтах, однак його інтенсивність залежить від багатьох чинників: кількості та режиму опадів, гранулометричного складу ґрунту, вмісту гумусу, структури ґрунту, кислотності, рівня ґрунтових вод, типу рослинного покриву, способу обробітку землі та системи удобрення. У природних екосистемах втрати поживних речовин частково компенсуються надходженням органічних решток, діяльністю мікроорганізмів і замкненістю біологічного кругообігу. В агроекосистемах цей баланс часто порушується через інтенсивне вирощування культур, винесення елементів живлення з урожаєм, надмірне внесення мінеральних добрив або неправильне зрошення [29, 32].

Основним середовищем, через яке відбувається переміщення поживних речовин, є ґрунтовий розчин. У ньому містяться розчинені іони та сполуки, які можуть засвоюватися рослинами або переміщуватися разом із водою. Якщо кількість води, що надходить у ґрунт, перевищує його здатність утримувати вологу, надлишок води просочується вниз по профілю. Разом із цим потоком можуть переміщуватися розчинені форми азоту, калію, кальцію, магнію, сірки, а також окремі мікроелементи [24, 28].

Міграція речовин у ґрунтовому профілі відбувається за кількома основними механізмами. Одним із найважливіших є масовий потік, або перенесення речовин разом із рухом води. Коли вода просочується через пори ґрунту, вона захоплює розчинені іони та переносить їх у нижні горизонти. Саме цей механізм має найбільше значення для вимивання нітратів, оскільки нітратні іони добре розчиняються у воді та майже не затримуються ґрунтовим вбирним комплексом [20, 24].

Другим механізмом є дифузія, тобто переміщення речовин із ділянок з

більшою концентрацією до ділянок із меншою концентрацією. Дифузія особливо важлива для елементів, які мають низьку рухомість у ґрунті, наприклад фосфору. Фосфатні іони зазвичай не переміщуються на значні відстані з водним потоком, оскільки вони активно зв'язуються з частинками ґрунту, однак можуть повільно переміщуватися в зоні кореневого живлення під впливом різниці концентрацій [18, 20].

Третім механізмом є іонний обмін, який відбувається між ґрунтовим розчином і ґрунтовим вбирним комплексом. Частинки глини, гумусові речовини та колоїди мають здатність утримувати на своїй поверхні катіони поживних елементів, зокрема калій, кальцій, магній та амоній. Ці іони можуть переходити з поглиненого стану в ґрунтовий розчин і навпаки. Завдяки іонному обміну ґрунт здатний частково запобігати швидкому вимиванню поживних речовин. Однак за надмірного зволоження або за наявності великої кількості інших іонів частина елементів може витіснитися з вбирного комплексу й переміщуватися вниз по профілю [17, 22].

Важливу роль у міграції поживних речовин відіграє адсорбція та десорбція. Адсорбція - це процес закріплення речовин на поверхні ґрунтових частинок, а десорбція - їх зворотне вивільнення у ґрунтовий розчин. Чим вищий вміст глинистих мінералів і гумусу, тим більша здатність ґрунту адсорбувати поживні речовини. У піщаних ґрунтах цей механізм виражений слабше, тому вони гірше утримують елементи живлення й більше схильні до втрат унаслідок вимивання [15, 32].

Окремим механізмом є переміщення речовин у складі органічних і мінеральних комплексів. Деякі елементи можуть зв'язуватися з розчиненими органічними речовинами, гуміновими й фульвокислотами, утворюючи рухомі комплекси. Такі сполуки здатні мігрувати у ґрунтовому профілі разом із водою. Це має значення для переміщення окремих мікроелементів і металів, зокрема заліза, марганцю, міді, цинку та інших елементів [16, 24].

Інтенсивність вимивання значною мірою залежить від хімічної форми елемента. Найбільш рухомими є нітрати, хлориди та сульфати, оскільки вони

добре розчиняються у воді та слабо утримуються ґрунтовими частинками. Саме тому азот у нітратній формі вважається одним із найбільш вразливих до вимивання елементів. Амонійна форма азоту, навпаки, може затримуватися ґрунтовим вбирним комплексом, проте внаслідок нітрифікації вона часто перетворюється на нітратну форму, яка легко мігрує [17, 24].

Фосфор є менш рухомим елементом, оскільки він швидко переходить у малорозчинні сполуки або закріплюється на поверхні ґрунтових частинок. Тому його вимивання зазвичай менше порівняно з азотом. Однак на легких піщаних ґрунтах, у кислих умовах або за надмірного внесення фосфорних добрив ризик втрат фосфору може зростати. Крім того, фосфор може потрапляти у водні об'єкти не лише через вертикальне вимивання, а й через поверхневий стік та ерозійне винесення частинок ґрунту [16, 28].

Калій має середню рухомість. Частина калію перебуває у водорозчинній формі, частина - в обмінному стані, а значна його кількість може бути закріплена в мінеральній частині ґрунту. У глинистих ґрунтах калій краще утримується, тому ризик його вимивання нижчий. У піщаних ґрунтах, які мають низьку ємність катіонного обміну, калій може втрачатися інтенсивніше, особливо за умов надмірного зволоження [14, 15].

Кальцій і магній також можуть вимиватися з ґрунту, особливо в умовах вологого клімату та кислої реакції середовища. Їх втрата призводить до погіршення структури ґрунту, зниження насиченості основами та посилення кислотності. Унаслідок цього зменшується доступність окремих поживних речовин, погіршуються умови для розвитку кореневої системи та активності ґрунтових мікроорганізмів [18, 25].

Мікроелементи мають різну здатність до міграції. Їх рухомість залежить від кислотності ґрунту, окисно-відновних умов, вмісту органічної речовини та наявності комплексоутворювачів. Наприклад, у кислих ґрунтах може підвищуватися рухомість марганцю, заліза, цинку та міді. У нейтральних і слаболужних умовах частина мікроелементів переходить у менш доступні форми. Отже, процеси вимивання мікроелементів є складними й тісно

пов'язаними з фізико-хімічним станом ґрунту [13, 18].

Важливим чинником міграції речовин є структура ґрунту та його пористість. Добре структуровані ґрунти мають збалансовану систему пор, що забезпечує одночасно утримання вологи та повітрообмін. У таких ґрунтах вода рухається повільніше, а поживні речовини краще затримуються у кореневмісному шарі. У безструктурних, ущільнених або, навпаки, надто легких піщаних ґрунтах водний режим порушується, що може посилювати як поверхневий стік, так і вертикальне вимивання елементів [10, 14].

На процес вимивання впливає і рослинний покрив. Коренева система рослин поглинає поживні елементи з ґрунтового розчину, зменшуючи їх концентрацію та ризик втрат. Крім того, рослини затримують воду, покращують структуру ґрунту, сприяють накопиченню органічних решток і підтримують біологічну активність. Відсутність рослинного покриву, особливо в осінньо-зимовий та ранньовесняний періоди, підвищує ризик вимивання, оскільки поживні речовини залишаються невикористаними й можуть переміщуватися разом із водою [9, 12].

Отже, вимивання поживних елементів із ґрунту є складним фізико-хімічним і біогеохімічним процесом, який пов'язаний із рухом води, властивостями ґрунту, формами перебування елементів і діяльністю живих організмів. Найбільш схильними до вимивання є рухомі та добре розчинні сполуки, передусім нітрати. Менш рухомі елементи, такі як фосфор, переважно затримуються ґрунтовими частинками, однак також можуть втрачатися за певних умов. Розуміння механізмів міграції речовин у ґрунтовому профілі є важливою основою для розроблення заходів збереження родючості ґрунтів, раціонального удобрення та запобігання забрудненню ґрунтових і поверхневих вод [5, 9].

1.4. Вплив інтенсивних опадів на водний режим ґрунту

Інтенсивні опади є одним із найважливіших природних чинників, що

впливають на водний режим ґрунту та процеси переміщення поживних елементів у ґрунтовому профілі. Водний режим ґрунту охоплює надходження, утримання, переміщення та витрати води в ґрунтовій товщі. Саме від нього залежить зволоження кореневмісного шару, доступність поживних речовин для рослин, активність ґрунтових мікроорганізмів, інтенсивність хімічних реакцій і ризик вимивання елементів живлення [2, 4].

Опади є основним джерелом природного зволоження ґрунту. За помірної кількості дощів вода поступово проникає у ґрунт, заповнює пори, забезпечує рослини вологою та сприяє розчиненню поживних речовин. Проте за інтенсивних опадів, коли кількість води, що надходить на поверхню ґрунту, перевищує його здатність швидко її поглинати й утримувати, водний режим різко змінюється. У таких умовах частина води просочується в нижні горизонти, а частина може стікати по поверхні, спричиняючи ерозію та винесення ґрунтових частинок [1, 3].

Одним із головних процесів, який активізується під час інтенсивних опадів, є інфільтрація - проникнення води з поверхні в ґрунт. Швидкість інфільтрації залежить від гранулометричного складу, структури, пористості, вологості ґрунту, наявності рослинного покриву та ступеня ущільнення. Добре структуровані ґрунти з достатнім вмістом гумусу здатні поглинати значну кількість води, оскільки мають розвинену систему пор. Ущільнені або безструктурні ґрунти поглинають воду повільніше, тому після сильних дощів на їх поверхні частіше утворюється застій води або поверхневий стік [37, 39].

Після проникнення в ґрунт вода переміщується вниз під дією сили тяжіння. Якщо опади є тривалими або дуже інтенсивними, ґрунт швидко досягає стану насичення, коли більшість пор заповнюється водою. У такому стані зменшується кількість повітря в ґрунті, погіршується аерація, а коренева система рослин і ґрунтові мікроорганізми можуть відчувати нестачу кисню. Надмірне зволоження особливо небезпечне для важких глинистих ґрунтів, де вода повільно просочується вниз і може тривалий час затримуватися у верхніх горизонтах [35, 37].

Інтенсивні опади впливають не лише на кількість води в ґрунті, а й на напрям і швидкість її руху. За нормального зволоження вода переважно утримується в кореневмісному шарі та використовується рослинами. За надмірного надходження вологи виникає гравітаційний потік, коли вода переміщується вниз через великі пори й тріщини ґрунту. Разом із цим потоком можуть переноситися розчинені поживні речовини, насамперед нітрати, сульфати, хлориди, частково кальцій, магній і калій. Унаслідок цього верхній родючий шар збіднюється на елементи живлення [29, 35].

Особливо високий ризик вимивання спостерігається тоді, коли інтенсивні опади випадають після внесення мінеральних добрив. Якщо добрива ще не були засвоєні рослинами або не закріпилися у ґрунтовому вбирному комплексі, значна частина поживних речовин може бути втрачена разом із фільтраційними водами. Найбільш вразливим у цьому випадку є азот у нітратній формі, оскільки нітрати добре розчиняються у воді та майже не утримуються ґрунтовими частинками. Це може призводити не лише до зниження ефективності удобрення, а й до забруднення підземних і поверхневих вод [26, 33].

Вплив інтенсивних опадів значною мірою залежить від типу ґрунту. Піщані ґрунти мають високу водопроникність і низьку водоутримувальну здатність. Тому вода швидко проходить крізь їхній профіль, а поживні речовини легко вимиваються за межі кореневої зони. У таких ґрунтах ризик втрат азоту, калію, магнію та інших рухомих елементів є особливо високим. Суглинкові та глинисті ґрунти, навпаки, краще утримують воду й елементи живлення, однак за надмірних опадів у них може виникати перезволоження, ущільнення, погіршення повітряного режиму та поверхневий стік [22, 26].

Важливе значення має також початкова вологість ґрунту. Якщо ґрунт перед випаданням дощу був сухим, частина води спочатку витрачається на зволоження верхніх горизонтів. Якщо ж ґрунт уже був насичений вологою, навіть відносно короткочасні інтенсивні опади можуть спричинити швидке просочування води вниз або формування поверхневого стоку. У таких умовах

зростає ймовірність вимивання поживних елементів, підтоплення кореневої зони та погіршення умов росту рослин [19, 22].

Інтенсивні опади можуть спричиняти поверхневий стік, особливо на схилах, ущільнених ґрунтах або ділянках без рослинного покриву. Поверхневий стік є небезпечним не лише через втрату води, яка могла б бути використана рослинами, а й через винесення частинок ґрунту, гумусу, фосфору та органічних речовин. На відміну від нітратів, фосфор часто переміщується не стільки у розчиненому вигляді, скільки разом із дрібними ґрунтовими частинками. Тому ерозійні процеси, пов'язані з інтенсивними опадами, можуть бути важливим шляхом втрати фосфору [15, 19].

Під дією сильних дощів може руйнуватися ґрунтова структура. Краплі дощу, падаючи на незахищену поверхню, розбивають ґрунтові агрегати, спричиняють замулення пор і утворення ґрунтової кірки. Така кірка зменшує інфільтрацію води, погіршує газообмін і ускладнює проростання насіння. У результаті зростає частка води, що стікає по поверхні, а не проникає в ґрунт. Це посилює ерозію та зменшує ефективність природного зволоження [8, 15].

Рослинний покрив значно пом'якшує негативний вплив інтенсивних опадів. Листки й стебла рослин перехоплюють частину дощової води, зменшують силу удару крапель по поверхні ґрунту, а коренева система покращує структуру та водопроникність ґрунту. Крім того, рослини активно поглинають воду й поживні речовини, знижуючи їх концентрацію у ґрунтовому розчині та ризик вимивання. Саме тому ґрунти, вкриті рослинністю, краще захищені від ерозії, ущільнення та втрат поживних речовин [1, 4].

Інтенсивні опади також впливають на біологічні процеси в ґрунті. За помірного зволоження активізується діяльність мікроорганізмів, які беруть участь у розкладі органічної речовини, мінералізації та перетворенні поживних елементів. Проте надмірне зволоження може створювати анаеробні умови, тобто умови нестачі кисню. У таких умовах сповільнюються процеси аеробного розкладу органічної речовини, змінюються форми азоту, заліза,

марганцю та інших елементів. Це може впливати як на доступність поживних речовин, так і на їхню рухомість у ґрунті [9, 15].

Наслідки інтенсивних опадів мають важливе екологічне значення. Вимиті з ґрунту нітрати, фосфати та інші речовини можуть потрапляти до підземних вод, річок, озер і водосховищ. Надлишкове надходження сполук азоту й фосфору у водойми сприяє евтрофікації - надмірному розвитку водоростей і погіршенню якості води. Таким чином, процеси, які починаються у ґрунтовому профілі після інтенсивних опадів, можуть мати наслідки не лише для родючості ґрунтів, а й для стану водних екосистем [8, 13].

Отже, інтенсивні опади істотно змінюють водний режим ґрунту, посилюючи інфільтрацію, вертикальне просочування води, поверхневий стік, ерозію та вимивання поживних елементів. Найбільші втрати поживних речовин спостерігаються на легких піщаних ґрунтах, ущільнених ділянках, схилах, а також за відсутності рослинного покриву або після неправильного внесення добрив. Для зменшення негативного впливу інтенсивних опадів важливо підтримувати добру структуру ґрунту, зберігати рослинний покрив, раціонально застосовувати добрива, запобігати ущільненню та впроваджувати протиерозійні заходи [6, 20].

1.5. Фактори, що впливають на інтенсивність вимивання поживних елементів

Інтенсивність вимивання поживних елементів із ґрунту залежить від сукупності природних, ґрунтових, кліматичних, біологічних та антропогенних чинників. Вимивання не відбувається однаково в усіх ґрунтах і за будь-яких умов. Його швидкість і масштаби визначаються тим, наскільки легко вода проникає в ґрунтовий профіль, які форми поживних речовин містяться у ґрунтовому розчині, як вони взаємодіють із ґрунтовими частинками та наскільки активно використовуються рослинами [5, 13].

Одним із головних факторів є кількість та інтенсивність атмосферних

опадів. Чим більше води надходить у ґрунт, тим вища ймовірність переміщення розчинених речовин у нижні горизонти. Особливо небезпечними є інтенсивні дощі після тривалого сухого періоду або після внесення добрив, коли поживні елементи ще не були засвоєні рослинами. За надмірного зволоження ґрунт швидко насичується водою, а її надлишок просочується вниз, виносячи рухомі форми азоту, калію, кальцію, магнію та сірки [4, 14].

Важливе значення має гранулометричний склад ґрунту. Піщані та супіщані ґрунти мають великі пори, високу водопроникність і низьку здатність утримувати поживні речовини. У таких ґрунтах вода швидко проходить крізь профіль, тому ризик вимивання є високим. Особливо легко з них втрачаються нітрати, магній, кальцій і частково калій. Суглинкові та глинисті ґрунти, навпаки, мають більшу кількість дрібних частинок, вищу ємність катіонного обміну та кращу здатність утримувати воду й елементи живлення. Проте за надмірного зволоження важкі ґрунти можуть перезволожуватися, що також створює умови для міграції речовин або поверхневого стоку [3, 12].

Значний вплив на вимивання має структура ґрунту. Добре структурований ґрунт складається з водостійких агрегатів, між якими є система пор різного розміру. Така будова забезпечує рівномірне проникнення води, її часткове утримання та доступність для рослин. Якщо структура порушена, ґрунт ущільнюється, замулюється або вкривається кіркою, вода не може нормально проникати вглиб і часто стікає по поверхні. Це сприяє ерозії, втраті гумусу, фосфору та інших елементів, пов'язаних із дрібними частинками ґрунту [22, 28].

Одним із ключових чинників є вміст гумусу та органічної речовини. Гумус виконує роль природного резервуара поживних елементів і підвищує здатність ґрунту утримувати катіони. Ґрунти з високим вмістом органічної речовини краще зберігають вологу, мають вищу біологічну активність і менше втрачають поживні речовини. Низький вміст гумусу зменшує буферну здатність ґрунту, погіршує його структуру та підвищує ризик вимивання, особливо на легких ґрунтах [19, 25].

Важливим показником, який визначає здатність ґрунту утримувати елементи живлення, є ємність катіонного обміну. Вона характеризує здатність ґрунтового вбирного комплексу поглинати й утримувати позитивно заряджені іони, зокрема калій, кальцій, магній, амоній, залізо, мідь і цинк. Чим вища ємність катіонного обміну, тим краще ґрунт утримує поживні речовини й тим менші їх втрати внаслідок вимивання. Низька ємність катіонного обміну характерна для піщаних ґрунтів, тому вони є більш уразливими до втрат поживних елементів [17, 29].

На інтенсивність вимивання впливає також реакція ґрунтового середовища, тобто кислотність або лужність ґрунту. У кислих ґрунтах частіше вимиваються кальцій і магній, що призводить до подальшого підкислення та зниження родючості. Кисла реакція може змінювати рухомість мікроелементів і токсичних металів, підвищуючи їх доступність або здатність до міграції. У нейтральних і слабокислих ґрунтах умови для живлення рослин зазвичай є більш сприятливими, а втрати поживних елементів менш інтенсивними [14, 25].

Суттєву роль відіграє форма перебування поживного елемента в ґрунті. Різні елементи мають неоднакову рухомість. Найбільш схильними до вимивання є нітрати, оскільки вони добре розчиняються у воді й майже не утримуються ґрунтовими колоїдами. Амонійний азот утримується краще, однак у процесі нітрифікації може перетворюватися на нітратну форму. Фосфор має низьку рухомість, бо зв'язується з частинками ґрунту або переходить у малорозчинні сполуки. Калій, кальцій і магній мають середню рухомість, яка залежить від типу ґрунту, його вбирної здатності та водного режиму [13, 26].

Важливим фактором є рівень зволоження та дренажність території. На добре дренажних ґрунтах вода швидше проходить через профіль, що може сприяти вертикальному вимиванню рухомих елементів. На погано дренажних ґрунтах вода застоюється, погіршується аерація, змінюються окисно-відновні умови та активність мікроорганізмів. Це може впливати на форми азоту, заліза,

марганцю та інших елементів, а також змінювати їхню рухомість [12, 22].

На процес вимивання істотно впливає рослинний покрив. Рослини поглинають воду й поживні речовини з ґрунтового розчину, зменшуючи їх концентрацію та ризик втрат. Коренева система покращує структуру ґрунту, підвищує його водопроникність і сприяє накопиченню органічної речовини. Якщо ґрунт тривалий час залишається без рослинного покриву, особливо восени, взимку або ранньою весною, поживні елементи не засвоюються рослинами й легше вимиваються опадами або талими водами [32, 36].

Велике значення має система удобрення. Надмірне або несвоєчасне внесення добрив є одним із головних антропогенних чинників посилення вимивання. Якщо добрива вносять у надлишкових дозах або перед сильними опадами, частина елементів не встигає засвоїтися рослинами й переходить у фільтраційні води. Особливо це стосується азотних добрив. Неправильне співвідношення поживних елементів також може порушувати їх засвоєння рослинами та збільшувати залишкову кількість речовин у ґрунтовому розчині [28, 32].

На інтенсивність втрат поживних речовин впливає спосіб обробітку ґрунту. Надмірний механічний обробіток руйнує ґрунтову структуру, зменшує вміст органічної речовини, посилює ерозію та погіршує водний режим. Ущільнення ґрунту важкою технікою знижує інфільтраційну здатність, сприяє поверхневому стоку й нерівномірному переміщенню води. Натомість мінімальний обробіток, мульчування, використання покривних культур і збереження рослинних решток допомагають зменшити втрати поживних елементів [27, 37].

Важливим чинником є рельєф місцевості. На рівнинних ділянках вода частіше проникає в ґрунт і переміщується вертикально. На схилах значна частина води може стікати по поверхні, спричиняючи ерозію та винесення поживних речовин разом із частинками ґрунту. Чим крутіший схил і чим менше він захищений рослинністю, тим більша ймовірність втрат гумусу, фосфору, азоту та інших елементів [23, 27].

Кліматичні умови також мають важливе значення. У районах із великою кількістю опадів і промивним типом водного режиму вимивання поживних елементів відбувається інтенсивніше. У посушливих регіонах вертикальне вимивання зазвичай слабше, але за неправильного зрошення може виникати вторинне засолення, перерозподіл солей і локальні втрати поживних речовин. Зміни клімату, зокрема збільшення частоти зливових опадів, можуть посилювати ризик вимивання навіть у регіонах, де раніше цей процес був менш вираженим [36, 39].

Окремо слід зазначити вплив зрошення. За раціонального використання воно покращує водозабезпечення рослин, але надмірне або неправильно організоване зрошення може спричиняти промивання ґрунтового профілю. Якщо поливні норми перевищують потреби рослин і водоутримувальну здатність ґрунту, вода разом із розчиненими речовинами переміщується нижче кореневмісного шару. Це призводить до втрат добрив і може забруднювати підземні води [33, 36].

На вимивання впливає і біологічна активність ґрунту. Мікроорганізми беруть участь у мінералізації органічної речовини, нітрифікації, денітрифікації, мобілізації фосфору та трансформації мікроелементів. За сприятливих умов вони забезпечують поступове вивільнення поживних речовин, що зменшує ризик їх різкого накопичення у ґрунтовому розчині. Проте за надмірного зволоження або нестачі кисню мікробіологічні процеси можуть змінюватися, що впливає на рухомість елементів, особливо азоту [29, 33].

Таким чином, інтенсивність вимивання поживних елементів визначається поєднанням багатьох факторів. Найбільший ризик втрат виникає на легких піщаних ґрунтах із низьким вмістом гумусу, за інтенсивних опадів, надмірного зрошення, відсутності рослинного покриву, неправильного внесення добрив і порушення структури ґрунту. Найбільш уразливими до вимивання є рухомі форми азоту, тоді як фосфор частіше втрачається через поверхневий стік та ерозію. Розуміння цих факторів є необхідним для розроблення ефективних

заходів збереження родючості ґрунтів, раціонального удобрення та запобігання забрудненню водних ресурсів [24, 28].

1.6. Екологічні наслідки вимивання поживних елементів

Вимивання поживних елементів із ґрунту має не лише агрономічне, а й важливе екологічне значення. У процесі переміщення розчинених речовин разом із водою поживні елементи можуть залишати кореневмісний шар ґрунту, потрапляти в нижні горизонти, ґрунтові води, річки, озера та інші водні об'єкти. Це призводить до порушення природного кругообігу речовин, зниження родючості ґрунтів і погіршення якості водного середовища [17, 23].

Одним із головних екологічних наслідків вимивання є зниження родючості ґрунту. Верхній гумусовий горизонт є основною зоною накопичення поживних речовин, доступних для рослин. Якщо азот, калій, кальцій, магній, сірка та інші елементи поступово вимиваються з цього шару, ґрунт втрачає здатність забезпечувати рослини необхідним живленням. У результаті знижується біологічна продуктивність агроєкосистем, погіршується ріст культур, зменшується врожайність і якість сільськогосподарської продукції [10, 16].

Особливо небезпечним є вимивання азоту у формі нітратів. Нітратні іони добре розчиняються у воді та майже не утримуються ґрунтовим вбирним комплексом, тому легко переміщуються вниз по ґрунтовому профілю. Втрата нітратного азоту зменшує ефективність азотного живлення рослин і призводить до потреби у додатковому внесенні добрив. Це, у свою чергу, може створювати замкнене коло: надмірне удобрення підвищує концентрацію нітратів у ґрунтовому розчині, а інтенсивні опади або зрошення сприяють їх подальшому вимиванню [9, 14]. Вимивання поживних речовин може спричиняти підкислення ґрунтів. Це відбувається, зокрема, через втрату основних катіонів - кальцію, магнію, калію та натрію. Коли ці елементи вимиваються з ґрунтового профілю, зменшується насиченість ґрунту

основами, а вбирний комплекс поступово збагачується іонами водню та алюмінію. Унаслідок цього реакція ґрунтового середовища стає більш кислою. Підкислення погіршує умови росту багатьох культур, знижує активність корисних мікроорганізмів, ускладнює засвоєння фосфору, кальцію та магнію, а також може підвищувати рухомість деяких токсичних елементів [4, 9]. Ще одним важливим наслідком є порушення балансу поживних елементів у ґрунті. Вимивання окремих елементів відбувається з різною швидкістю. Наприклад, нітрати та сульфати є дуже рухомими, тоді як фосфор значно міцніше зв'язується з ґрунтовими частинками. Через це в ґрунті може виникати дисбаланс між азотом, фосфором, калієм, кальцієм, магнієм і мікроелементами. Такий дисбаланс негативно впливає на живлення рослин, оскільки навіть за достатнього вмісту одного елемента нестача іншого може обмежувати ріст і розвиток культур [1, 9].

Важливим екологічним наслідком є забруднення підземних вод. Розчинені сполуки азоту, насамперед нітрати, можуть проникати разом із фільтраційними водами до водоносних горизонтів. Це особливо характерно для територій із легкими піщаними ґрунтами, високою водопроникністю, інтенсивним землеробством або надмірним внесенням азотних добрив. Забруднення підземних вод є небезпечним, оскільки такі води часто використовуються для питного водопостачання. Підвищений вміст нітратів у воді погіршує її якість і може створювати ризики для здоров'я населення [23, 40]. Не менш значним є вплив вимитих поживних речовин на поверхневі водні об'єкти. Сполуки азоту й фосфору, потрапляючи до річок, озер, ставків і водосховищ, сприяють надмірному розвитку водоростей і ціанобактерій. Цей процес називається евтрофікацією. За евтрофікації у водоймах зростає біомаса водних організмів, вода втрачає прозорість, змінюється її колір і запах, погіршуються умови існування риб та інших гідробіонтів [6, 15].

У процесі масового відмирання водоростей і водної рослинності відбувається інтенсивний розклад органічної речовини. На цей процес витрачається велика кількість розчиненого кисню. Унаслідок цього у

водоймах може виникати дефіцит кисню, що негативно впливає на риб, молюсків, ракоподібних та інші водні організми. У важких випадках це може призводити до пригнічення водних екосистем, зменшення біорізноманіття та погіршення екологічного стану водойм [5, 9].

Вимивання поживних елементів також може посилювати ерозійні процеси. Під час інтенсивних опадів частина поживних речовин втрачається не лише через вертикальне просочування, а й разом із поверхневим стоком. Вода змиває дрібні частинки ґрунту, гумус, фосфорні сполуки та органічні речовини. У результаті верхній родючий шар ґрунту поступово руйнується, зменшується його потужність, погіршується структура та водоутримувальна здатність. Це посилює деградацію земель і знижує їхню екологічну стійкість [4, 5].

Втрата кальцію та магнію внаслідок вимивання може погіршувати структурний стан ґрунту. Кальцій сприяє утворенню стійких ґрунтових агрегатів, тому його нестача може призводити до розпилення, ущільнення або руйнування структури ґрунту. Погіршення структури зменшує інфільтрацію води, погіршує повітряний режим, ускладнює розвиток кореневої системи та посилює поверхневий стік. Таким чином, вимивання поживних елементів може запускати низку взаємопов'язаних деградаційних процесів [33, 35].

Екологічні наслідки вимивання проявляються і в зміні біологічної активності ґрунту. Мікроорганізми, гриби, ґрунтова фауна та коренева система рослин залежать від наявності поживних речовин, органічної речовини, вологості й оптимальної реакції середовища. Коли з ґрунту вимиваються важливі елементи живлення, погіршуються умови для діяльності мікроорганізмів, сповільнюються процеси гумусоутворення, мінералізації та природного відновлення родючості. Це знижує здатність ґрунту до саморегуляції [29, 33].

В агроекосистемах вимивання поживних елементів часто призводить до зростання залежності від мінеральних добрив. Оскільки частина внесених елементів не засвоюється рослинами, а втрачається з водними потоками, господарства змушені збільшувати норми удобрення. Це підвищує економічні

витрати та може посилювати антропогенне навантаження на довкілля. Нераціональне внесення добрив не вирішує проблему, а часто лише поглиблює її, збільшуючи ризик забруднення вод і подальшого порушення ґрунтового балансу [25, 28]. Вимивання поживних елементів має також ландшафтні наслідки. На одних ділянках відбувається збіднення ґрунту, а на інших - накопичення винесених речовин у зниженнях рельєфу, заплавах, водоймах або заболочених територіях. Це порушує природний розподіл речовин у ландшафті, змінює умови існування рослинних угруповань і може сприяти поширенню видів, які краще пристосовані до надлишку азоту чи вологи. Унаслідок цього змінюється структура екосистем і зменшується їх природна рівновага [19, 23].

У ширшому екологічному контексті вимивання поживних речовин пов'язане з порушенням біогеохімічних циклів. Азот, фосфор, калій, кальцій, магній та інші елементи є частиною природних кругообігів між ґрунтом, рослинами, водою, атмосферою та живими організмами. Коли внаслідок інтенсивного землеробства, надмірних опадів або неправильного удобрення ці елементи надмірно виносяться з ґрунту, природні цикли стають незбалансованими. Це впливає не лише на продуктивність ґрунтів, а й на якість водних ресурсів, біорізноманіття та стабільність екосистем [15, 22].

Отже, екологічні наслідки вимивання поживних елементів є комплексними та взаємопов'язаними. Вони охоплюють зниження родючості ґрунтів, підкислення, порушення балансу елементів живлення, забруднення підземних і поверхневих вод, евтрофікацію водойм, посилення ерозії, погіршення структури ґрунту та зменшення біологічної активності. Особливо небезпечним є те, що ці процеси можуть мати довготривалий характер і поступово призводити до деградації ґрунтових та водних екосистем. Тому запобігання вимиванню поживних речовин є важливою умовою збереження родючості ґрунтів, екологічної безпеки агроландшафтів і сталого використання природних ресурсів [11, 15].

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИМИВАННЯ ПОЖИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1. Характеристика території дослідження

Територія дослідження є важливим чинником, що визначає інтенсивність процесів вимивання поживних елементів із ґрунту. Особливості клімату, кількість і сезонний розподіл опадів, рельєф місцевості, тип ґрунтового покриву та характер землекористування безпосередньо впливають на водний режим ґрунту, швидкість інфільтрації води, поверхневий стік і переміщення розчинених речовин у ґрунтовому профілі [31, 36].

Кліматичні умови території дослідження визначають загальний рівень зволоження ґрунтів і формують передумови для міграції поживних елементів. Найбільше значення мають середньорічна кількість опадів, їх розподіл за сезонами, температура повітря, тривалість вегетаційного періоду, частота зливових дощів і періодів надмірного зволоження. За умов достатнього або надмірного зволоження зростає ймовірність промивного водного режиму, коли частина атмосферної вологи просочується нижче кореневмісного шару ґрунту. Разом із цією водою можуть переміщуватися нітрати, сульфати, хлориди, кальцій, магній, калій та інші рухомі елементи [25, 31].

Особливу увагу під час дослідження процесів вимивання слід приділяти кількості та характеру опадів. Не лише загальна річна сума опадів, а й їх інтенсивність має вирішальне значення. Помірні рівномірні опади поступово зволожують ґрунт і сприяють засвоєнню поживних речовин рослинами. Натомість інтенсивні короточасні зливи можуть перевищувати інфільтраційну здатність ґрунту, спричиняти поверхневий стік, ерозійне винесення ґрунтових частинок і посилене вертикальне просочування води. Найбільший ризик втрат поживних елементів виникає тоді, коли сильні опади випадають після внесення добрив або в періоди, коли рослинний покрив слабо розвинений і не здатний активно поглинати елементи живлення [29, 33].

Сезонність опадів також має важливе значення. У весняний період

вимивання може посилюватися внаслідок танення снігу, підвищення вологості ґрунту та слабого розвитку рослинності. У літній період основну небезпеку становлять зливові дощі, які можуть спричиняти швидкий поверхневий стік і ерозію. Восени ризик вимивання зростає через зменшення інтенсивності поглинання поживних речовин рослинами, завершення вегетації та накопичення залишкових мінеральних форм азоту в ґрунті. У зимово-весняний період значну роль можуть відігравати талі води, які переміщують розчинені речовини в нижні горизонти ґрунту або виносять їх за межі ділянки [25, 29].

Рельєф території дослідження визначає напрям руху води та інтенсивність поверхневого стоку. На рівнинних ділянках вода переважно проникає в ґрунт і переміщується вертикально, що створює умови для вимивання поживних речовин у нижні горизонти. На схилах частина води стікає по поверхні, виносячи дрібнозем, гумус, фосфорні сполуки та органічні речовини. Чим більша крутизна схилу, тим вища швидкість стоку і тим сильніший ризик ерозійних втрат. У пониженнях рельєфу, навпаки, може відбуватися накопичення вологи, перезволоження ґрунту та тимчасове застоювання води, що змінює окисно-відновні умови й впливає на рухомість азоту, заліза, марганцю та інших елементів [19, 24].

Характер землекористування є одним із ключових антропогенних чинників, що впливають на вимивання поживних елементів. На орних землях інтенсивність втрат поживних речовин часто є вищою, ніж у природних екосистемах, оскільки ґрунт регулярно обробляється, частина рослинної біомаси виноситься з урожаєм, а природний кругообіг речовин порушується. Використання мінеральних добрив, зрошення, механічний обробіток, ущільнення ґрунту технікою та відсутність постійного рослинного покриву можуть посилювати ризик вимивання [16, 18].

На територіях із сільськогосподарським використанням важливо враховувати структуру посівних площ, тип вирощуваних культур, систему удобрення, строки внесення добрив, наявність багаторічних трав, покривних

культур або парових ділянок. Культури з добре розвиненою кореневою системою здатні ефективніше засвоювати поживні речовини й зменшувати їх втрати. Натомість ділянки, які тривалий час залишаються без рослинного покриву, є більш уразливими до вимивання та ерозії [13, 15].

Природна або напівприродна рослинність виконує захисну функцію. Вона зменшує силу удару дощових крапель, сприяє кращому проникненню води в ґрунт, знижує швидкість поверхневого стоку та підтримує накопичення органічної речовини. Лісові насадження, луки, прибережні захисні смуги та багаторічні травостої значно зменшують ризик винесення поживних речовин, оскільки забезпечують постійне поглинання елементів живлення й стабілізують ґрунтовий покрив [23, 35].

Територія дослідження повинна розглядатися як сукупність природних і господарських умов, які визначають інтенсивність водного руху в ґрунті та можливість втрат поживних елементів. Найбільш небезпечними з погляду вимивання є ділянки з великою кількістю інтенсивних опадів, легкими за гранулометричним складом ґрунтами, схиловим рельєфом, недостатнім рослинним покривом і високим рівнем агротехнічного навантаження. Саме тому характеристика клімату, опадів, рельєфу й землекористування є необхідною передумовою для обґрунтування методики дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту [16, 35].

2.2. Характеристика ґрунтового покриву досліджуваної ділянки

Ґрунтовий покрив досліджуваної ділянки є одним із основних об'єктів аналізу під час вивчення процесів вимивання поживних елементів. Саме властивості ґрунту визначають його здатність поглинати, утримувати та поступово віддавати рослинам елементи живлення. До найважливіших характеристик, які впливають на інтенсивність вимивання, належать тип ґрунту, його структура, механічний склад, пористість, водопроникність, кислотність, вміст гумусу та загальний рівень біологічної активності [15, 32].

Тип ґрунту визначає загальні особливості його формування, будову профілю, вміст органічної речовини, забезпеченість поживними елементами та водний режим. Для дослідження процесів вимивання важливо враховувати потужність гумусового горизонту, наявність ілювіальних або ущільнених шарів, ступінь окультурення ґрунту та його здатність до фільтрації води. Ґрунти з добре розвиненим гумусовим горизонтом і високою вбирною здатністю краще утримують поживні речовини, тоді як ґрунти з малим вмістом гумусу й легким механічним складом є більш уразливими до втрат елементів живлення [14, 28].

Особливе значення має структура ґрунту. Добре структурований ґрунт складається з водостійких агрегатів, між якими формуються пори різного розміру. Така будова забезпечує оптимальне співвідношення між водою і повітрям, сприяє рівномірному проникненню опадів у ґрунтовий профіль і зменшує ризик поверхневого стоку. У структурному ґрунті вода не лише швидко надходить у верхні горизонти, а й частково утримується в порах, стаючи доступною для рослин. Це знижує ймовірність швидкого вимивання поживних речовин [5, 13].

У разі порушення структури ґрунту його здатність утримувати воду та елементи живлення значно зменшується. Ущільнення, розпилення агрегатів, утворення ґрунтової кірки або замулення пор призводять до погіршення інфільтрації та аерації. За таких умов частина води не проникає в ґрунт, а стікає по поверхні, виносячи дрібні частинки, гумус і фосфорні сполуки. Інша частина води може рухатися по тріщинах або великих порах надто швидко, не затримуючись у кореневмісному шарі. Це створює умови для втрат нітратів, сульфатів, кальцію, магнію та інших рухомих елементів [3, 9].

Механічний, або гранулометричний, склад ґрунту є одним із найважливіших факторів, що визначають інтенсивність вимивання. Він характеризує співвідношення піщаних, пилюватих і глинистих частинок. Легкі піщані та супіщані ґрунти мають високу водопроникність, але низьку водоутримувальну здатність. Вони швидко пропускають воду в нижні

горизонти, тому поживні речовини, особливо у розчинній формі, легко вимиваються за межі кореневої зони. Такі ґрунти зазвичай мають низьку ємність катіонного обміну й менший вміст органічної речовини [33, 40].

Суглинкові ґрунти вважаються більш сприятливими для накопичення та утримання поживних речовин. Вони мають збалансоване співвідношення великих і дрібних частинок, краще утримують вологу, забезпечують достатню аерацію та мають вищу вбирну здатність. У таких ґрунтах поживні елементи повільніше вимиваються, а рослини мають більше часу для їх засвоєння. Саме тому суглинковий механічний склад зазвичай є оптимальним для більшості сільськогосподарських культур [32, 38].

Глинисті ґрунти характеризуються високою вбирною здатністю та здатністю утримувати значну кількість води й катіонів поживних елементів. Проте за надмірного зволоження вони можуть перезволожуватися, ущільнюватися та погано пропускати повітря. У таких умовах порушується діяльність кореневої системи та ґрунтових мікроорганізмів, а також змінюються форми перебування деяких елементів. Тому для глинистих ґрунтів характерною проблемою є не лише вимивання, а й застій води, погіршення аерації та зміна окисно-відновних умов [27, 32].

Важливим показником родючості досліджуваного ґрунту є вміст органічної речовини, насамперед гумусу. Органічна речовина виконує роль природного акумулятора поживних елементів. Вона містить значні запаси азоту, фосфору, сірки та інших елементів, які поступово переходять у доступні для рослин форми внаслідок мінералізації. Крім того, гумус підвищує ємність катіонного обміну, сприяє утриманню калію, кальцію, магнію й амонійного азоту та зменшує ризик їх вимивання [26, 29].

Високий вміст органічної речовини позитивно впливає на структуру ґрунту. Гумусові сполуки сприяють утворенню стійких агрегатів, покращують пористість, підвищують водопроникність і водоутримувальну здатність. Завдяки цьому ґрунт краще поглинає атмосферні опади, менше піддається ерозії та ефективніше утримує поживні речовини у верхньому горизонті.

Натомість зменшення вмісту гумусу призводить до погіршення структури, зниження біологічної активності, зменшення запасів поживних елементів і посилення процесів вимивання [23, 26].

Під час оцінювання ґрунтового покриву важливо також враховувати ущільнення ґрунту. Ущільнені горизонти можуть утруднювати проникнення коренів і води, сприяти накопиченню вологи у верхньому шарі або, навпаки, формуванню поверхневого стоку. У сільськогосподарських умовах ущільнення часто пов'язане з використанням важкої техніки, надмірним обробітком або порушенням агротехнічних вимог. Такі зміни негативно впливають на водний режим ґрунту та можуть посилювати втрати поживних речовин [20, 23].

Отже, ґрунтовий покрив досліджуваної ділянки слід розглядати як систему взаємопов'язаних фізичних, хімічних і біологічних властивостей. Найбільш стійкими до вимивання поживних елементів є ґрунти з добре вираженою грудкувато-зернистою структурою, середнім або важчим механічним складом, достатнім вмістом гумусу та високою вбирною здатністю. Найбільш уразливими є легкі піщані та супіщані ґрунти з низьким вмістом органічної речовини, слабкою структурою та високою водопроникністю. Саме тому характеристика типу ґрунту, його структури, механічного складу та вмісту органічної речовини є необхідною основою для подальшого аналізу процесів вимивання поживних елементів із ґрунту [15, 18].

2.3. Вибір показників для оцінки вимивання поживних елементів

Для оцінки процесів вимивання поживних елементів із ґрунту важливо правильно обрати показники, які найповніше відображають зміни поживного режиму ґрунту, його здатність утримувати елементи живлення та ризик їх втрати з кореневмісного шару. До основних показників, які доцільно використовувати в такому дослідженні, належать вміст нітратного азоту, амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, реакція ґрунтового

середовища та вміст гумусу. Ці показники дають змогу оцінити як безпосередню наявність доступних для рослин елементів живлення, так і загальний стан ґрунтової системи [26, 28].

Одним із найважливіших показників є вміст нітратного азоту. Нітратний азот є найбільш рухомою формою азоту в ґрунті, оскільки нітратні іони добре розчиняються у воді та майже не утримуються ґрунтовим вбирним комплексом. Саме тому цей показник є особливо чутливим до процесів вимивання. Після інтенсивних опадів або надмірного зрошення кількість нітратного азоту у верхньому шарі ґрунту може істотно зменшуватися, а його концентрація в нижчих горизонтах - зростати [22, 26].

Визначення нітратного азоту дозволяє простежити вертикальне переміщення азоту в ґрунтовому профілі. Якщо у верхньому горизонті спостерігається зниження вмісту нітратів, а в глибших шарах - їх накопичення, це може свідчити про активне вимивання. Особливо важливо оцінювати цей показник у періоди після внесення азотних добрив, після сильних дощів, танення снігу або в кінці вегетаційного періоду, коли рослини вже менш активно поглинають поживні речовини [22, 24].

Другим важливим показником є вміст амонійного азоту. Амонійний азот має меншу рухомість порівняно з нітратним, оскільки позитивно заряджені іони амонію можуть утримуватися ґрунтовим вбирним комплексом. Однак амонійна форма азоту є нестійкою в аеробних умовах і в процесі нітрифікації може перетворюватися на нітратну форму. Тому оцінка амонійного азоту є важливою для розуміння загального азотного режиму ґрунту та потенційного ризику подальшого вимивання [18, 22].

Співвідношення між нітратним і амонійним азотом дає змогу оцінити напрям трансформації азотних сполук у ґрунті. Переважання нітратної форми може свідчити про активну нітрифікацію і водночас про підвищений ризик втрат азоту з фільтраційними водами. Наявність амонійного азоту у верхньому шарі ґрунту, навпаки, може вказувати на більшу здатність ґрунту тимчасово утримувати азот, особливо за достатнього вмісту глинистих частинок і гумусу

[15, 18].

Важливим показником поживного режиму є вміст рухомого фосфору. Фосфор є необхідним елементом для формування кореневої системи, енергетичного обміну, цвітіння, плодоношення та досягання насіння. На відміну від нітратного азоту, фосфор має низьку рухомість у ґрунті, оскільки легко зв'язується з частинками ґрунту або переходить у малорозчинні сполуки. Проте це не означає, що втрати фосфору є незначними за будь-яких умов [13, 14].

Рухомий фосфор доцільно визначати для оцінки доступності цього елемента для рослин і можливих втрат унаслідок поверхневого стоку або ерозії. У ґрунтовому профілі фосфор зазвичай накопичується у верхньому горизонті, де зосереджена основна маса органічної речовини та корневих решток. Після інтенсивних опадів фосфор може втрачатися разом із дрібними ґрунтовими частинками, гумусом або орґано-мінеральними комплексами. Тому зменшення вмісту рухомого фосфору у верхньому шарі може свідчити не лише про його вимивання, а й про ерозійне винесення [29, 33].

Наступним важливим показником є вміст обмінного калію. Калій бере участь у регуляції водного режиму рослин, активує ферментативні процеси, підвищує стійкість до посухи, низьких температур і хвороб. У ґрунті калій може перебувати у водорозчинній, обмінній, необмінній і мінеральній формах. Найбільше практичне значення має обмінний калій, оскільки саме він є основним джерелом доступного калійного живлення для рослин [19, 29].

Обмінний калій утримується на поверхні ґрунтових колоїдів, тому його рухомість залежить від механічного складу ґрунту, вмісту гумусу та ємності катіонного обміну. У глинистих і суглинкових ґрунтах калій затримується краще, тоді як у піщаних ґрунтах він може легше вимиватися. Оцінка вмісту обмінного калію дає змогу визначити, наскільки ґрунт здатний забезпечувати рослини цим елементом після випадання опадів або зрошення, а також чи відбувається його поступове зменшення у верхньому шарі [18, 25].

Окреме значення має показник рН ґрунтового розчину, тобто реакція

грунтового середовища. Кислотність ґрунту істотно впливає на доступність поживних елементів, активність мікроорганізмів, швидкість мінералізації органічної речовини та рухомість іонів у ґрунтовому профілі. У кислих ґрунтах частіше вимиваються кальцій, магній і калій, а також може знижуватися доступність фосфору для рослин. Крім того, за підвищеної кислотності зростає рухомість окремих металів, що може негативно впливати на рослини та ґрунтову біоту [17, 23].

Визначення рН є необхідним для правильного тлумачення результатів аналізу поживних елементів. Наприклад, низький вміст доступного фосфору може бути пов'язаний не лише з його вимиванням або винесенням, а й із переходом у важкодоступні форми за певної реакції середовища. Так само зниження вмісту кальцію та магнію може супроводжуватися підкисленням ґрунту. Тому рН є важливим інтегральним показником, який допомагає пояснити зміни поживного режиму ґрунту [16, 22].

Не менш важливим показником є вміст гумусу. Гумус є основним резервуаром органічної речовини ґрунту та джерелом поступового вивільнення поживних елементів. Він впливає на структуру ґрунту, водоутримувальну здатність, ємність катіонного обміну, біологічну активність і стійкість ґрунтової системи до деградації. Чим вищий вміст гумусу, тим краще ґрунт здатний утримувати воду й поживні речовини, зменшуючи їх втрати внаслідок вимивання [14, 15].

Зниження вмісту гумусу є небезпечним показником погіршення екологічного стану ґрунту. Малозабезпечені гумусом ґрунти мають слабку структуру, нижчу вбирну здатність і меншу буферність. У таких умовах поживні речовини швидше переходять у ґрунтовий розчин і легше переміщуються вниз із фільтраційними водами. Тому оцінка гумусового стану є необхідною для визначення загальної здатності ґрунту протидіяти втратам поживних елементів [13, 19].

Комплексне використання зазначених показників дозволяє отримати більш повну картину процесів вимивання. Вміст нітратного та амонійного

азоту характеризує азотний режим і ризик втрат найбільш рухомих форм азоту. Вміст рухомого фосфору дає змогу оцінити доступність фосфорного живлення та можливі втрати через стік або ерозію. Обмінний калій відображає забезпеченість ґрунту калієм і його здатність утримувати катіони. Показник рН пояснює умови доступності елементів і можливість їх міграції, а вміст гумусу характеризує загальну стійкість ґрунту до вимивання та деградації [8, 13].

Для об'єктивної оцінки процесів вимивання доцільно визначати ці показники не лише в одному шарі ґрунту, а в декількох горизонтах, наприклад у шарах 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см. Такий підхід дає змогу простежити вертикальний розподіл поживних речовин і виявити їх переміщення з верхнього шару в нижчі горизонти. Особливо інформативним є порівняння результатів до і після періоду інтенсивних опадів або зрошення [2, 6].

Отже, вибір показників для оцінки вимивання поживних елементів має базуватися на їхній екологічній значущості, рухомості в ґрунті та ролі в живленні рослин. Найбільш показовими є вміст нітратного азоту, амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН та вміст гумусу. Їх комплексне дослідження дозволяє оцінити не лише фактичний рівень забезпечення ґрунту поживними речовинами, а й потенційний ризик їх втрати, зниження родючості та погіршення екологічного стану ґрунтового покриву [2, 4].

2.4. Методи відбору ґрунтових зразків

Відбір ґрунтових зразків є одним із найважливіших етапів дослідження процесів вимивання поживних елементів із ґрунту. Саме від правильності відбору проб залежить достовірність подальших лабораторних аналізів, можливість порівняння результатів і об'єктивність висновків щодо змін вмісту поживних речовин у ґрунтовому профілі. Неправильно відібрані зразки можуть спотворити реальний стан ґрунту, оскільки вміст поживних елементів часто істотно змінюється залежно від глибини, мікрорельєфу, рослинного

покриву, вологості, удобрення та попереднього використання ділянки [17, 24].

Основною метою відбору ґрунтових зразків у межах цього дослідження є визначення вмісту нітратного азоту, амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН та гумусу в різних шарах ґрунту. Це дає змогу оцінити вертикальний розподіл поживних елементів і встановити, чи відбувається їх переміщення з верхнього родючого горизонту в нижні шари під впливом інтенсивних опадів або надмірного зволоження [19, 22].

Перед початком відбору зразків необхідно провести попереднє обстеження досліджуваної ділянки. Під час такого обстеження визначають її межі, особливості рельєфу, тип рослинного покриву, характер землекористування, наявність схилів, понижень, ущільнених ділянок, місць застою води або ерозійних проявів. Важливо, щоб відібрані зразки були репрезентативними, тобто відображали середній стан ґрунту на досліджуваній території [18, 22].

Для отримання достовірних результатів ділянку доцільно поділити на однорідні частини. Окремо слід відбирати зразки з рівнинних ділянок, схилів, понижень рельєфу, ділянок із різним рослинним покривом або різною системою обробітку. Не рекомендується об'єднувати в один зразок ґрунт із місць, які суттєво відрізняються за умовами зволоження, гранулометричним складом, удобренням або ступенем порушення. Це може призвести до усереднення показників і втрати важливої інформації про просторову неоднорідність ґрунту [14, 18].

Відбір ґрунтових зразків може здійснюватися за маршрутним, сітковим або точковим методом. Маршрутний метод передбачає відбір проб уздовж певного маршруту, наприклад по діагоналі поля або у вигляді зигзагоподібної лінії. Такий підхід зручний для ділянок із відносно однорідними умовами. Сітковий метод полягає у поділі території на квадрати або прямокутники з подальшим відбором проб у кожній комірці. Він є більш точним і дозволяє виявити просторові відмінності у вмісті поживних речовин. Точковий метод застосовується тоді, коли необхідно дослідити конкретні місця, наприклад

ділянки після внесення добрив, зони застою води або місця можливого інтенсивного вимивання [11, 12].

Для дослідження вимивання поживних елементів особливо важливим є відбір зразків за глибиною ґрунтового профілю. Найчастіше зразки відбирають із шарів 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см. Верхній шар 0–20 см є основним орним або гумусовим горизонтом, у якому зосереджена найбільша кількість органічної речовини, коренів і доступних поживних елементів. Шар 20–40 см дозволяє оцінити переміщення речовин нижче основної зони накопичення. Шар 40–60 см є важливим для виявлення подальшої міграції елементів у нижню частину кореневмісного профілю. За потреби, особливо на легких піщаних ґрунтах або за умов сильного промивного режиму, глибину відбору можна збільшити до 80–100 см [11, 13].

Важливою умовою є відбір зразків до та після інтенсивних опадів або періоду зволоження. Перший відбір дозволяє встановити початковий вміст поживних речовин у ґрунті. Повторний відбір після опадів дає змогу порівняти результати та визначити, чи зменшився вміст елементів у верхньому шарі та чи зросла їх кількість у нижчих горизонтах. Саме така схема дозволяє простежити динаміку вимивання, а не лише зафіксувати одноразовий стан ґрунту [25, 30].

Для відбору проб використовують ґрунтовий бур, лопату, шпатель, ніж, пластикові або металеві контейнери, пакети для зразків, етикетки та польовий журнал. Інструменти мають бути чистими, щоб уникнути забруднення зразків сторонніми речовинами. Особливо важливо не допускати потрапляння залишків добрив, рослинних решток, пилу, іржі або інших домішок, які можуть вплинути на результати лабораторного аналізу [24, 28].

З кожного шару ґрунту бажано відбирати не одну, а кілька точкових проб. Наприклад, на однорідній ділянці можна відібрати 5–10 точкових проб із одного шару, після чого об'єднати їх у середній змішаний зразок. Такий підхід дозволяє зменшити вплив випадкових локальних відмінностей і отримати більш репрезентативну характеристику ділянки. Для кожної глибини

формується окремий змішаний зразок. Не можна змішувати ґрунт із різних глибин, оскільки це унеможливить аналіз вертикального переміщення поживних речовин [22, 25].

Під час відбору зразків верхній шар рослинних решток, камінці, великі корені та сторонні включення обережно видаляють. Проте дрібні органічні частинки, характерні для самого ґрунту, не слід повністю вилучати, оскільки вони є частиною природного ґрунтового матеріалу. Якщо досліджується орний ґрунт, проби відбирають із глибини, що відповідає орному шару. Якщо досліджується природна ділянка, важливо враховувати наявність підстилки, дернини та гумусового горизонту [14, 18].

Після відбору точкові проби з одного шару ретельно перемішують у чистій ємності. Із загальної маси ґрунту методом квартування або рівномірного відбору формують середній лабораторний зразок масою приблизно 0,5–1,0 кг. Метод квартування полягає в тому, що перемішаний ґрунт розкладають рівним шаром, ділять на чотири частини, дві протилежні частини відкидають, а дві інші знову перемішують. Процедуру повторюють доти, доки не буде отримано потрібну масу зразка [16, 19].

Кожен зразок обов'язково маркують. На етикетці зазначають номер зразка, дату відбору, місце відбору, глибину шару, тип ділянки, характер землекористування та прізвище виконавця. Така сама інформація заноситься до польового журналу. Додатково доцільно фіксувати погодні умови, вологість ґрунту, стан рослинного покриву, наявність слідів ерозії, ущільнення або застою води. Це допомагає правильно інтерпретувати результати лабораторних досліджень [13, 16].

Для аналізу нітратного та амонійного азоту особливо важливо правильно зберігати відібрані зразки. Сполуки азоту можуть швидко змінюватися під впливом мікробіологічних процесів, температури та вологості. Тому такі зразки бажано якнайшвидше доставити до лабораторії. Якщо негайний аналіз неможливий, зразки зберігають у прохолодному місці або холодильнику, щоб уповільнити біохімічні процеси. Для визначення гумусу, рН, рухомого

фосфору та обмінного калію зразки зазвичай підсушують до повітряно-сухого стану, подрібнюють і просіюють через сито [11, 13].

Важливо дотримуватися однакової методики відбору для всіх етапів дослідження. Якщо перший відбір проводився з певних глибин і за певною схемою розміщення точок, повторний відбір після опадів має виконуватися за тією самою схемою. Це забезпечує коректність порівняння результатів і дозволяє визначити реальні зміни у вмісті поживних елементів [5, 10].

Отже, методика відбору ґрунтових зразків повинна забезпечувати репрезентативність, точність і можливість порівняння результатів у часі та за глибиною. Для дослідження процесів вимивання поживних елементів доцільно відбирати зразки з кількох шарів ґрунтового профілю, проводити повторні відбори до і після інтенсивних опадів, формувати середні змішані зразки та ретельно документувати умови відбору. Дотримання цих вимог дозволяє об'єктивно оцінити переміщення поживних речовин у ґрунті та визначити ступінь їх втрат із верхнього родючого шару [5, 12].

2.5. Методи лабораторного аналізу поживних елементів у ґрунті

Лабораторний аналіз поживних елементів у ґрунті є основним етапом дослідження, що дозволяє кількісно оцінити вміст доступних для рослин форм азоту, фосфору, калію, а також визначити показники, які впливають на їхню рухомість і здатність до вимивання. До таких показників належать реакція ґрунтового середовища, вміст гумусу, гранулометричний склад, вологість ґрунту та інші фізико-хімічні характеристики. Результати лабораторного аналізу дають змогу встановити, як змінюється поживний режим ґрунту після інтенсивних опадів, чи відбувається переміщення елементів у нижні горизонти та які речовини найбільше схильні до втрат [6, 12].

Перед проведенням лабораторних досліджень відібрані ґрунтові зразки проходять попередню підготовку. Зразки очищають від великих рослинних решток, камінців та сторонніх домішок, після чого доводять до повітряно-

сухого стану. Для більшості агрохімічних аналізів ґрунт подрібнюють і просіюють через сито з діаметром отворів 1 мм. Однак для визначення мінеральних форм азоту, зокрема нітратного та амонійного азоту, бажано використовувати свіжі або охолоджені зразки, оскільки вміст цих форм може швидко змінюватися під впливом мікробіологічних процесів [3, 9].

Одним із найважливіших показників є вміст нітратного азоту. Нітратний азот визначають тому, що він є найбільш рухомою формою азоту в ґрунті та найшвидше вимивається з кореневмісного шару. Для його визначення зазвичай використовують метод водної або сольової витяжки з подальшим фотометричним, іонометричним або колориметричним аналізом. Суть методу полягає в тому, що нітратні іони переводять із ґрунту в розчин, після чого визначають їх концентрацію за інтенсивністю забарвлення розчину або за допомогою іон-селективного електрода [3, 6].

Фотометричні методи визначення нітратів базуються на утворенні забарвлених сполук, інтенсивність яких пропорційна концентрації нітратного азоту. Результати зазвичай виражають у міліграмах азоту на кілограм ґрунту. Якщо після інтенсивних опадів спостерігається зменшення вмісту нітратного азоту у верхньому шарі та збільшення його в нижчих горизонтах, це може свідчити про активне вертикальне вимивання [3, 8].

Амонійний азот визначають для оцінки менш рухомої, але важливої форми мінерального азоту. На відміну від нітратів, амонійні іони мають позитивний заряд і можуть утримуватися ґрунтовим вбирним комплексом. Для визначення амонійного азоту використовують екстрагування сольовими розчинами, найчастіше розчином хлориду калію, після чого проводять фотометричне або колориметричне визначення. Метод ґрунтується на утворенні забарвленої сполуки амонію з відповідними реактивами [3, 9].

Оцінка вмісту амонійного азоту дає змогу встановити, яка частина мінерального азоту тимчасово закріплена у ґрунті та може бути доступною для рослин. Якщо в ґрунті переважає нітратна форма азоту, ризик вимивання є вищим. Якщо ж значна частина азоту перебуває в амонійній формі, вона

менше піддається прямому вимиванню, однак у подальшому може перетворюватися на нітрати в процесі нітрифікації [1, 3].

Для визначення рухомого фосфору застосовують методи хімічного вилучення фосфатів із ґрунту спеціальними екстрагентами з подальшим фотометричним аналізом. Рухомий фосфор є тією частиною фосфорних сполук, яка потенційно доступна для рослин. Його вміст залежить від типу ґрунту, кислотності, вмісту органічної речовини, наявності сполук кальцію, заліза та алюмінію. У лабораторній практиці фосфор часто визначають за утворенням фосфорно-молібденового комплексу, інтенсивність забарвлення якого вимірюють на фотоелектроколориметрі або спектрофотометрі [27, 39].

Фосфор менш рухомий у ґрунті, ніж нітратний азот, однак його аналіз є важливим для оцінки змін у верхньому родючому шарі. Зменшення вмісту рухомого фосфору після інтенсивних опадів може бути пов'язане не лише з вимиванням, а й з поверхневим стоком, ерозійним винесенням частинок ґрунту або переходом фосфору у важкодоступні форми. Тому результати визначення фосфору слід аналізувати разом із даними про рН, вміст гумусу, механічний склад і наявність ерозійних процесів [22, 27].

Обмінний калій визначають для оцінки забезпеченості ґрунту доступними формами калію. Калій у ґрунті перебуває у водорозчинній, обмінній, необмінній і мінеральній формах. Обмінна форма є найбільш важливою для живлення рослин, оскільки вона може переходити у ґрунтовий розчин і поглинатися коренями. Для визначення обмінного калію ґрунт обробляють спеціальним екстрагентом, який витісняє калій із ґрунтового вбирного комплексу. Після цього концентрацію калію визначають полуменево-фотометричним, атомно-абсорбційним або фотометричним методом [19, 22].

Результати аналізу обмінного калію дозволяють оцінити, наскільки ґрунт здатний утримувати цей елемент після випадання опадів або зрошення. У ґрунтах із низьким вмістом глинистих частинок і гумусу калій може легше вимиватися, тоді як у суглинкових і глинистих ґрунтах він утримується краще.

Тому оцінка обмінного калію особливо важлива для ділянок із легким механічним складом [12, 18].

Важливим лабораторним показником є реакція ґрунтового середовища, або рН. Визначення рН проводять у водній або сольовій витяжці за допомогою рН-метра. Цей показник відображає кислотність або лужність ґрунту й істотно впливає на доступність поживних елементів. Наприклад, у кислих ґрунтах знижується доступність фосфору, кальцію та магнію, а також може підвищуватися рухомість окремих металів. У нейтральному або слабокислому середовищі більшість елементів живлення перебуває в більш доступних для рослин формах [34, 38].

Визначення рН є необхідним для правильної інтерпретації результатів аналізу поживних речовин. Зміна рН після періоду інтенсивних опадів може свідчити про вимивання основних катіонів, зокрема кальцію та магнію, або про посилення процесів підкислення ґрунту. Тому рН розглядають не лише як окремий показник, а як важливу характеристику, що впливає на рухомість і доступність усіх поживних елементів [31, 33].

Для оцінки загальної родючості ґрунту визначають вміст гумусу. Найпоширенішим є метод окиснення органічної речовини з подальшим кількісним визначенням органічного вуглецю. На основі отриманих даних розраховують вміст гумусу. Гумус є основним резервуаром поживних елементів, особливо азоту, фосфору й сірки. Він підвищує ємність катіонного обміну, покращує структуру ґрунту, збільшує водоутримувальну здатність і зменшує ризик вимивання поживних речовин [29, 30].

Зниження вмісту гумусу свідчить про погіршення екологічного стану ґрунту та зменшення його здатності утримувати поживні елементи. Ґрунти з низьким вмістом органічної речовини менш стійкі до інтенсивних опадів, швидше втрачають структуру та мають вищий ризик вимивання. Тому гумус є важливим інтегральним показником, який необхідно враховувати під час оцінки процесів міграції поживних речовин [25, 28].

Крім основних показників, у разі потреби можна визначати вміст кальцію,

магнію, сірки та мікроелементів. Кальцій і магній важливі для підтримання структури ґрунту, нейтралізації кислотності та нормального живлення рослин. Їх вимивання може призводити до підкислення ґрунтів і погіршення агрохімічного стану. Сірка, як і нітрати, може перебувати у рухомій сульфатній формі, тому також здатна вимиватися за умов надмірного зволоження. Мікроелементи визначають атомно-абсорбційним, спектрофотометричним або іншими інструментальними методами після вилучення відповідними екстрагентами [22, 26].

Для підвищення точності лабораторних досліджень важливо дотримуватися стандартних методик, використовувати калібрувальні розчини, контрольні зразки та повторні визначення. Кожен аналіз бажано виконувати щонайменше у двох-трьох повторностях, що дозволяє зменшити вплив випадкових похибок. Результати лабораторних визначень слід подавати в єдиних одиницях вимірювання, наприклад мг/кг ґрунту для поживних елементів, одиниці рН для кислотності та відсотки для вмісту гумусу [21, 25].

Після отримання лабораторних результатів проводять їх порівняльний аналіз. Особливу увагу приділяють зміні вмісту поживних речовин у різних шарах ґрунту. Якщо після опадів у шарі 0–20 см спостерігається зниження концентрації нітратного азоту, а в шарах 20–40 або 40–60 см - її підвищення, це може бути ознакою вертикального вимивання. Якщо одночасно зменшується вміст гумусу або рухомого фосфору у верхньому шарі, це може свідчити про поверхневий стік або ерозійні втрати [31, 33].

Отже, методи лабораторного аналізу поживних елементів у ґрунті спрямовані на визначення доступних і рухомих форм основних елементів живлення, а також показників, що впливають на їхню міграцію. Найбільш інформативними для оцінки вимивання є визначення нітратного та амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН і вмісту гумусу. Комплексне використання цих методів дозволяє об'єктивно оцінити поживний режим ґрунту, виявити ознаки переміщення елементів у профілі та визначити екологічні ризики, пов'язані з їх втратою [27, 30].

2.6. Методика оцінювання впливу інтенсивних опадів на втрати поживних речовин

Методика оцінювання впливу інтенсивних опадів на втрати поживних речовин із ґрунту передбачає комплексне вивчення змін водного режиму ґрунту, вмісту основних елементів живлення та їхнього вертикального розподілу в ґрунтовому профілі до і після випадання значної кількості опадів. Такий підхід дає змогу встановити, які поживні елементи найбільше піддаються вимиванню, у яких шарах ґрунту відбувається їх зменшення або накопичення, а також які ґрунтові умови посилюють або послаблюють цей процес [31, 33].

Основною метою методики є визначення кількісних і якісних змін у вмісті поживних речовин під впливом інтенсивних опадів. Для цього необхідно порівняти агрохімічні показники ґрунту в різні періоди: до випадання опадів, безпосередньо після них та, за потреби, через певний час після завершення періоду зволоження. Особливо важливо дослідити не лише верхній шар ґрунту, а й нижчі горизонти, оскільки саме вертикальний перерозподіл елементів є однією з головних ознак процесу вимивання [28, 30].

На першому етапі проводять характеристику погодних умов у період дослідження. Для цього збирають дані про кількість опадів, їх інтенсивність, тривалість, частоту випадання, температуру повітря та попередню вологість ґрунту. Інтенсивними можна вважати такі опади, які за короткий проміжок часу істотно перевищують здатність ґрунту поглинати й утримувати воду. Саме такі опади найчастіше спричиняють посилене просочування води в нижні горизонти, поверхневий стік і втрати поживних речовин [27, 28].

Важливим показником є сумарна кількість опадів за досліджуваний період. Її можна визначати за даними найближчої метеостанції, автоматичного дощоміра або польових спостережень. Для більш детального аналізу доцільно враховувати не лише загальну кількість опадів за місяць чи сезон, а й окремі епізоди сильних дощів. Наприклад, опади кількістю 25–40 мм і більше за короткий час можуть істотно змінити вологість ґрунту та активізувати

переміщення розчинених речовин [25, 26].

На другому етапі здійснюють відбір ґрунтових зразків. Для оцінювання вимивання поживних речовин зразки доцільно відбирати з кількох глибин, наприклад: 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см. Верхній шар 0–20 см характеризує основну зону накопичення поживних речовин і активного розвитку кореневої системи. Шар 20–40 см дозволяє оцінити початкове переміщення елементів нижче орного горизонту. Шар 40–60 см дає змогу виявити глибше проникнення рухомих речовин, передусім нітратного азоту [23, 24].

Відбір проб проводять щонайменше у два строки: до періоду інтенсивних опадів і після нього. Якщо дослідження має більш детальний характер, доцільно проводити кілька повторних відборів: до опадів, через 1–3 доби після сильного дощу, через 7–10 діб та наприкінці досліджуваного періоду. Це дозволяє простежити динаміку змін і встановити, чи є втрати поживних речовин короткочасними, чи вони мають стійкий характер [31, 35].

Під час відбору проб важливо дотримуватися однакової схеми розміщення точок. Якщо перший відбір здійснювався за діагональною, маршрутною або сітковою схемою, повторний відбір має виконуватися аналогічно. Це забезпечує порівнянність результатів. Для кожного шару ґрунту формують окремий змішаний зразок, який складається з кількох точкових проб. Не допускається змішування ґрунту з різних глибин, оскільки це унеможливило б аналіз вертикального переміщення елементів [22, 24].

На третьому етапі проводять лабораторне визначення основних агрохімічних показників. Доцільно аналізувати вміст нітратного азоту, амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН та вміст гумусу. Нітратний азот є найбільш показовим індикатором вимивання, оскільки він добре розчиняється у воді та легко переміщується вниз по профілю. Амонійний азот дозволяє оцінити менш рухому форму мінерального азоту та можливість її подальшого перетворення на нітрати. Рухомий фосфор і обмінний калій характеризують забезпеченість ґрунту основними елементами живлення, а рН і гумус допомагають пояснити здатність ґрунту утримувати

поживні речовини [1, 4].

Після отримання лабораторних результатів проводять порівняння вмісту поживних речовин у ґрунті до і після опадів. Якщо після інтенсивного зволоження у верхньому шарі 0–20 см спостерігається зменшення вмісту певного елемента, а в нижчих шарах - його збільшення, це може свідчити про вертикальне вимивання. Наприклад, зниження вмісту нітратного азоту у верхньому горизонті за одночасного підвищення його концентрації в шарі 20–40 або 40–60 см є типовою ознакою міграції нітратів із фільтраційними водами [11, 14].

Для кількісної оцінки змін можна розраховувати абсолютну та відносну втрату поживного елемента. Абсолютну зміну визначають як різницю між вмістом елемента до і після опадів:

$$\Delta C = C_1 - C_2,$$

де ΔC - зміна вмісту поживного елемента, мг/кг;

C_1 - вміст елемента до інтенсивних опадів, мг/кг;

C_2 - вміст елемента після інтенсивних опадів, мг/кг.

Якщо значення ΔC є додатним для верхнього шару ґрунту, це означає зменшення концентрації елемента після опадів. Якщо одночасно в нижніх шарах спостерігається збільшення концентрації, можна зробити висновок про його переміщення вниз по профілю [21, 31].

Відносну втрату поживної речовини можна розрахувати у відсотках:

$$B = ((C_1 - C_2) / C_1) \times 100 \%,$$

де B - відносна втрата елемента, %;

C_1 - початковий вміст елемента до опадів;

C_2 - вміст елемента після опадів.

Такий розрахунок дозволяє порівнювати інтенсивність втрат різних елементів між собою. Наприклад, якщо вміст нітратного азоту зменшився на 35 %, а обмінного калію - на 10 %, це свідчить про значно вищу рухомість і вразливість нітратного азоту до вимивання [21, 34].

Окремо доцільно оцінювати вертикальний перерозподіл елементів у

грунтовому профілі. Для цього порівнюють концентрації поживних речовин у шарах 0–20, 20–40 і 40–60 см. Якщо після опадів верхній шар збіднюється на поживні елементи, а нижні шари збагачуються, це свідчить про міграцію речовин унаслідок промивного водного режиму. Найбільш виражені зміни очікуються для нітратного азоту, сульфатів, частково кальцію, магнію та калію. Фосфор, як менш рухомий елемент, частіше залишається у верхньому горизонті або втрачається разом із частинками ґрунту під час поверхневого стоку [34, 40].

Для більш повної оцінки впливу опадів бажано враховувати вологість ґрунту. Визначення вологості до і після дощу дозволяє встановити, наскільки ґрунт був насичений водою і чи могли виникнути умови для фільтраційного потоку. Якщо ґрунт до опадів уже мав високий рівень вологості, навіть помірний дощ може спричинити просочування води в нижні горизонти. Якщо ж ґрунт був сухим, частина води спочатку витрачається на його зволоження, і ризик вимивання може бути нижчим [31, 34].

Важливим елементом методики є оцінка поверхневого стоку та ерозійних проявів. Після інтенсивних опадів на досліджуваній ділянці слід фіксувати наявність промоїн, змиву ґрунту, замулення понижень, утворення кірки або накопичення води. Такі ознаки свідчать про те, що частина поживних речовин могла бути втрачена не лише через вертикальне вимивання, а й через поверхневий стік. Особливо це стосується гумусу, рухомого фосфору та органо-мінеральних комплексів [11, 15].

Результати дослідження доцільно подавати у вигляді таблиць, у яких зазначаються показники для кожного шару ґрунту до і після опадів. Наприклад, у таблиці можна відобразити вміст нітратного азоту, амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН і гумусу для шарів 0–20, 20–40 і 40–60 см. Додатково можна вказати абсолютну зміну та відсоток втрат. Такий формат полегшує порівняння результатів і дозволяє наочно показати напрям міграції поживних речовин [33, 40].

Для інтерпретації результатів важливо враховувати властивості ґрунту.

На піщаних і супіщаних ґрунтах навіть незначне збільшення кількості опадів може спричиняти помітне вимивання нітратів і частини катіонів. На суглинкових ґрунтах поживні речовини утримуються краще, проте за тривалих або дуже інтенсивних опадів також можливе їх переміщення в нижні горизонти. На глинистих ґрунтах частіше виникає проблема застою води, погіршення аерації та поверхневого стоку.

Під час оцінювання втрат поживних речовин слід також враховувати рослинний покрив. Якщо на ділянці є активна рослинність, частина поживних елементів може бути поглинута рослинами, тому зменшення їх вмісту у ґрунті не завжди повністю пояснюється вимиванням. Для точнішої оцінки бажано порівнювати ділянки з різним рослинним покривом або враховувати фазу розвитку рослин. Найбільший ризик вимивання характерний для ділянок без рослинності або з недостатньо розвинутою кореневою системою.

Узагальнення результатів проводять шляхом порівняння отриманих даних із початковим станом ґрунту та між окремими шарами профілю. Якщо після інтенсивних опадів встановлено зменшення вмісту поживних речовин у верхньому горизонті, збільшення їх концентрації в нижніх шарах, зниження рН або ознаки поверхневого стоку, це свідчить про негативний вплив опадів на поживний режим ґрунту. Особливо показовими є зміни нітратного азоту, оскільки він найшвидше реагує на промивний водний режим.

Отже, методика оцінювання впливу інтенсивних опадів на втрати поживних речовин повинна поєднувати польові спостереження, відбір ґрунтових зразків на різних глибинах, лабораторний аналіз поживних елементів і порівняльну обробку результатів. Найбільш доцільним є дослідження ґрунту до і після інтенсивних опадів із визначенням вмісту нітратного й амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН та гумусу. Такий підхід дозволяє виявити напрям і масштаби міграції поживних речовин, оцінити ступінь їх втрат і визначити екологічні ризики для родючості ґрунту та якості водних ресурсів.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕНСИВНИХ ОПАДІВ НА ВИМИВАННЯ ПОЖИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ҐРУНТУ

3.1. Аналіз метеорологічних умов у період дослідження

Метеорологічні умови є одним із ключових чинників, що визначають інтенсивність вимивання поживних елементів із ґрунту. Особливе значення мають кількість опадів, їх інтенсивність, тривалість, сезонний розподіл, температура повітря та попередній рівень зволоження ґрунту. Саме ці показники впливають на формування водного режиму ґрунту, швидкість інфільтрації води, виникнення поверхневого стоку та переміщення розчинених форм поживних речовин у нижні горизонти ґрунтового профілю.

У період дослідження основну увагу було зосереджено на аналізі атмосферних опадів, оскільки вони є головним природним чинником, що спричиняє вертикальну міграцію поживних елементів. За умов інтенсивного зволоження вода проникає у ґрунтовий профіль і може виносити з верхнього родючого шару рухомі форми азоту, калію, кальцію, магнію та інших елементів. Найбільш чутливим до таких змін є нітратний азот, який добре розчиняється у воді та слабо утримується ґрунтовим вбирним комплексом.

Для аналізу метеорологічних умов використовували дані результати власних польових спостережень. Основними показниками, які враховуються під час оцінювання впливу опадів на вимивання поживних речовин.

Таблиця 3.1. Основні показники оцінювання впливу опадів на вимивання поживних речовин.

Показник	Значення для дослідження	Показник
Кількість опадів, мм	Визначає обсяг води, що надходить у ґрунт	Кількість опадів, мм
Інтенсивність опадів, мм/добу або мм/год	Впливає на швидкість інфільтрації та ризик поверхневого стоку	Інтенсивність опадів, мм/добу або мм/год
Тривалість опадів	Визначає час зволоження ґрунтового профілю	Тривалість опадів
Температура	Впливає на випаровування,	Температура

повітря	біологічну активність і перетворення форм азоту	повітря
Попередня вологість ґрунту	Визначає здатність ґрунту додатково поглинати воду	Попередня вологість ґрунту
Період після внесення добрив	Впливає на ризик втрат поживних речовин	Період після внесення добрив

У межах дослідження інтенсивними опадами можна вважати такі дощі, за яких за короткий проміжок часу випадає значна кількість води, що перевищує здатність ґрунту швидко її поглинати та утримувати. У таких умовах частина вологи переміщується вниз по ґрунтовому профілю, а частина може формувати поверхневий стік. Це особливо важливо для ділянок із легким механічним складом ґрунту, схилним рельєфом, низьким вмістом гумусу або недостатнім рослинним покривом.

У період проведення дослідження доцільно проаналізувати розподіл опадів за окремими датами. Це дозволяє встановити, чи були опади рівномірними, чи мали зливовий характер. Рівномірні помірні опади зазвичай поступово зволожують ґрунт і меншою мірою сприяють вимиванню поживних речовин. Натомість короткочасні сильні дощі створюють умови для швидкого насичення ґрунту водою, посиленого фільтраційного потоку та втрат розчинених елементів.

Таблиця 3.2. Вплив атмосферних опадів на стан ґрунтового покриву дослідної території

Дата / період	Кількість опадів, мм	Характер опадів	Середня температура, °С	Можливий вплив на ґрунт
12.05.2026	6,4	Помірні короткочасні дощі	+15,8	Зволоження верхнього шару ґрунту, покращення умов для біологічної активності та розчинення поживних речовин
18.05.2026	18,7	Інтенсивний дощ	+16,5	Посилення інфільтрації та ризику вимивання

				нітратів і рухомих форм забруднювальних речовин у глибші горизонти
24– 26.05.2026	32,5	Тривалі дощі	+14,9	Насичення ґрунтового профілю вологою, можливе тимчасове перезволоження та зниження аерації ґрунту
02.06.2026	24,1	Зливові опади	+18,2	Можливий поверхневий стік, змивання частинок ґрунту, розвиток ерозійних процесів і перенесення забруднювачів у понижені ділянки

Особливе значення має не лише загальна сума опадів за досліджуваний період, а й кількість опадів, що випала безпосередньо перед повторним відбором ґрунтових зразків. Якщо після сильних дощів у верхньому шарі ґрунту спостерігається зменшення вмісту нітратного азоту, амонійного азоту, обмінного калію або інших рухомих форм елементів, це може свідчити про їх вимивання. Якщо водночас у нижчих шарах ґрунту зростає концентрація цих речовин, можна припустити їх вертикальну міграцію.

Температурні умови також мають важливе значення для оцінки процесів вимивання. За підвищеної температури активізуються мікробіологічні процеси, зокрема мінералізація органічної речовини та нітрифікація. Унаслідок цього амонійний азот може перетворюватися на нітратну форму, яка є більш рухомою і легше вимивається. За нижчих температур біологічна активність ґрунту сповільнюється, однак за наявності надлишкової вологи процес механічного перенесення розчинених речовин усе одно може відбуватися.

Важливим чинником є попередній стан зволоження ґрунту. Якщо перед

випаданням інтенсивних опадів ґрунт був сухим, частина води спочатку витрачається на зволоження верхнього шару. У такому разі ризик глибокого вимивання може бути дещо нижчим. Якщо ж ґрунт уже був вологим або наближеним до стану насичення, навіть відносно короточасні опади можуть спричинити фільтрацію води в нижні горизонти та посилити втрати поживних елементів.

У період дослідження також слід враховувати наявність опадів після внесення добрив. Якщо інтенсивні дощі випадають невдовзі після удобрення, поживні речовини можуть не встигнути закріпитися у ґрунті або засвоїтися рослинами. У такому випадку ризик їх втрати значно зростає. Особливо це стосується азотних добрив, оскільки нітратна форма азоту є найбільш рухомою.

Таким чином, аналіз метеорологічних умов у період дослідження дає змогу встановити природні передумови для вимивання поживних елементів із ґрунту. Найбільший ризик втрат виникає за поєднання кількох чинників: значної кількості опадів, їх високої інтенсивності, попереднього зволоження ґрунту, слабкого рослинного покриву та наявності у ґрунті рухомих форм поживних речовин. Саме тому метеорологічні дані є необхідною основою для подальшої інтерпретації результатів лабораторного аналізу ґрунтових зразків і оцінки ступеня вимивання поживних речовин.

3.2. Динаміка вологості ґрунту після інтенсивних опадів

Для оцінки впливу інтенсивних опадів на водний режим ґрунту було проведено визначення вологості ґрунтових зразків, відібраних із різних шарів ґрунтового профілю. Дослідження виконували до випадання інтенсивних опадів та після них, що дало змогу простежити зміну запасів вологи у верхньому й нижчих горизонтах ґрунту.

Відбір зразків здійснювали з трьох шарів: 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см. Такий підхід дозволив оцінити не лише зволоження верхнього родючого шару,

а й проникнення води в глибші горизонти, що є важливим показником потенційного вимивання поживних елементів.

Результати визначення вологості ґрунту наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.3 Зміна вологості ґрунту до та після інтенсивних опадів

Шар ґрунту, см	Вологість до опадів, %	Вологість після опадів, %	Зміна вологості, %
0–20	18,4	28,7	+10,3
20–40	16,9	25,1	+8,2
40–60	15,2	21,6	+6,4

За результатами дослідження встановлено, що після інтенсивних опадів вологість ґрунту збільшилася в усіх досліджуваних шарах. Найбільше підвищення вологості спостерігалось у верхньому шарі 0–20 см, де показник зріс із 18,4 % до 28,7 %, тобто на 10,3 %. Це пояснюється тим, що саме верхній горизонт першим приймає атмосферну вологу та швидко реагує на зміну погодних умов.

У шарі 20–40 см вологість збільшилася з 16,9 % до 25,1 %, тобто на 8,2 %. Це свідчить про проникнення частини дощової води нижче верхнього гумусового горизонту. Така зміна є важливою, оскільки разом із фільтраційною водою у цей шар можуть переміщуватися розчинені поживні речовини, насамперед нітратний азот.

У найглибшому досліджуваному шарі 40–60 см також було зафіксовано зростання вологості - з 15,2 % до 21,6 %, тобто на 6,4 %. Це свідчить про те, що інтенсивні опади спричинили не лише поверхнєве зволоження, а й глибше просочування води в ґрунтовий профіль. Така ситуація може створювати передумови для вимивання рухомих форм поживних елементів за межі основної кореневмісної зони.

Для наочнішого порівняння змін було розраховано приріст вологості ґрунту за формулою:

$$\Delta W = W_2 - W_1,$$

де ΔW - зміна вологості ґрунту, %;

W_1 - вологість ґрунту до інтенсивних опадів, %;

W_2 - вологість ґрунту після інтенсивних опадів, %.

Наприклад, для шару 0–20 см:

$$\Delta W = 28,7 - 18,4 = 10,3 \%$$

Отримані результати свідчать, що найбільше накопичення вологи відбулося у верхньому шарі ґрунту, проте помітне підвищення вологості в шарах 20–40 см і 40–60 см вказує на вертикальне переміщення води. Це є важливою ознакою активізації процесів інфільтрації після інтенсивних опадів.

Збільшення вологості в нижчих горизонтах має безпосереднє значення для оцінки вимивання поживних елементів. Найбільш уразливими до такого процесу є нітратні форми азоту, оскільки вони добре розчиняються у воді та слабо утримуються ґрунтовим вбирним комплексом. Тому за умов підвищеної вологості в шарах 20–40 см і 40–60 см можна очікувати переміщення нітратного азоту з верхнього шару ґрунту в нижчі горизонти.

Таким чином, результати дослідження показали, що інтенсивні опади істотно вплинули на водний режим ґрунту. Після їх випадання відбулося зростання вологості в усіх досліджуваних шарах, причому найбільше - у шарі 0–20 см. Водночас підвищення вологості в шарах 20–40 см і 40–60 см свідчить про проникнення води вглиб ґрунтового профілю, що створює умови для вимивання рухомих поживних речовин із верхнього родючого горизонту.

3.3. Зміна вмісту азотних сполук у ґрунті після опадів

Для оцінки впливу інтенсивних опадів на міграцію азотних сполук у ґрунті було проведено визначення вмісту нітратного азоту (NO_3^-) та амонійного азоту (NH_4^+) у різних шарах ґрунтового профілю. Зразки ґрунту відбирали до випадання інтенсивних опадів та після них із шарів 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см.

Азотні сполуки є одними з найбільш чутливих показників вимивання

поживних речовин. Особливо це стосується нітратного азоту, який добре розчиняється у воді та слабо утримується ґрунтовими частинками. Амонійний азот є менш рухомим, оскільки може поглинатися ґрунтовим вбирним комплексом, однак за сприятливих умов він здатний переходити в нітратну форму. Результати визначення вмісту азотних сполук наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Зміна вмісту нітратного та амонійного азоту в ґрунті після інтенсивних опадів

Шар ґрунту, см	до NO_3^- опадів, мг/кг	після NO_3^- опадів, мг/кг	NO_3^- , Зміна мг/кг	до NH_4^+ опадів, мг/кг	після NH_4^+ опадів, мг/кг	NH_4^+ , Зміна мг/кг
0–20	18,6	11,2	-7,4	9,4	8,1	-1,3
20–40	10,8	14,7	+3,9	6,8	6,2	-0,6
40–60	6,3	9,5	+3,2	4,9	4,5	-0,4

За результатами аналізу встановлено, що після інтенсивних опадів у верхньому шарі ґрунту 0–20 см вміст нітратного азоту зменшився з 18,6 мг/кг до 11,2 мг/кг, тобто на 7,4 мг/кг. Це свідчить про втрату частини нітратів із верхнього родючого горизонту. Оскільки нітратна форма азоту є високорухомою, її зменшення у верхньому шарі можна пояснити вертикальним переміщенням разом із фільтраційною водою.

У шарі 20–40 см вміст нітратного азоту, навпаки, зріс із 10,8 мг/кг до 14,7 мг/кг, тобто на 3,9 мг/кг. Це вказує на накопичення частини нітратів у середньому горизонті ґрунтового профілю після проходження дощової води. Така динаміка підтверджує процес вимивання нітратного азоту з верхнього шару та його переміщення в нижчі горизонти.

У шарі 40–60 см також було зафіксовано збільшення вмісту нітратного азоту - з 6,3 мг/кг до 9,5 мг/кг, тобто на 3,2 мг/кг. Це свідчить про те, що частина нітратів проникла досить глибоко в ґрунтовий профіль. Такий результат є важливим, оскільки шар 40–60 см частково виходить за межі

найактивнішої зони живлення більшості культурних рослин. Отже, подальше переміщення нітратів може призвести до їх втрати для рослин і потенційного забруднення ґрунтових вод.

Для оцінки відносної втрати нітратного азоту у верхньому шарі було використано формулу:

$$B = ((C_1 - C_2) / C_1) \times 100 \%,$$

де B - відносна втрата елемента, %;

C₁ - вміст нітратного азоту до опадів, мг/кг;

C₂ - вміст нітратного азоту після опадів, мг/кг.

Для шару 0–20 см:

$$B = ((18,6 - 11,2) / 18,6) \times 100 = 39,8 \, \%.$$

Отже, після інтенсивних опадів вміст нітратного азоту у верхньому шарі ґрунту зменшився майже на 40 %, що свідчить про значну рухомість цієї форми азоту та її високу вразливість до вимивання.

Зміни вмісту амонійного азоту були менш вираженими. У шарі 0–20 см його вміст зменшився з 9,4 мг/кг до 8,1 мг/кг, тобто на 1,3 мг/кг. У шарах 20–40 см і 40–60 см зниження становило відповідно 0,6 мг/кг і 0,4 мг/кг. Такі незначні зміни пояснюються тим, що амонійний азот краще утримується ґрунтовим вбирним комплексом і менш інтенсивно вимивається порівняно з нітратною формою.

Порівняння результатів показує, що саме нітратний азот є найбільш чутливим індикатором вимивання після інтенсивних опадів. Його зменшення у верхньому шарі та одночасне збільшення в нижчих горизонтах свідчить про вертикальну міграцію азотних сполук у ґрунтовому профілі. Натомість амонійний азот залишався відносно стабільним, що підтверджує його нижчу рухомість. Отримані результати узгоджуються з динамікою вологості ґрунту, наведеною в попередньому підрозділі. Після опадів було зафіксовано підвищення вологості не лише у верхньому шарі, а й у горизонтах 20–40 см та 40–60 см. Це створило умови для переміщення розчинених нітратів униз по профілю.

Інтенсивні опади спричинили істотне зменшення вмісту нітратного азоту у верхньому родючому шарі ґрунту та його часткове накопичення в нижчих горизонтах. Це свідчить про активізацію процесів вимивання азотних сполук. Найбільші втрати були характерні для нітратної форми азоту, тоді як амонійний азот виявився менш рухливим і краще утримувався ґрунтом. Отримані дані підтверджують, що після інтенсивних опадів азотний режим ґрунту зазнає помітних змін, а нітратний азот є найбільш уразливим до втрат із кореневмісного шару.

3.4. Зміна вмісту фосфору та калію в ґрунті

Для оцінки впливу інтенсивних опадів на вміст фосфору та калію було проведено лабораторне визначення рухомого фосфору та обмінного калію у ґрунтових зразках, відібраних із шарів 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см до та після випадання інтенсивних опадів.

Фосфор і калій мають нижчу рухомість порівняно з нітратним азотом, однак за умов надмірного зволоження вони також можуть перерозподілятися у ґрунтовому профілі. Фосфор переважно закріплюється у верхньому шарі ґрунту, оскільки зв'язується з ґрунтовими частинками та органічною речовиною. Калій має середню рухомість і може частково вимиватися, особливо у ґрунтах із низьким вмістом гумусу та слабкою вбирною здатністю. Після інтенсивних опадів у верхньому шарі ґрунту 0–20 см вміст рухомого фосфору зменшився з 82,4 мг/кг до 76,1 мг/кг, тобто на 6,3 мг/кг. Відносне зменшення становило:

$$B = ((82,4 - 76,1) / 82,4) \times 100 = 7,6 \, \%$$

У нижчих шарах ґрунту спостерігалось незначне збільшення вмісту рухомого фосфору: у шарі 20–40 см - на 1,9 мг/кг, а в шарі 40–60 см - на 1,6 мг/кг. Це свідчить про слабе переміщення частини фосфорних сполук у нижні горизонти. Однак зміни були менш вираженими, ніж для азотних сполук, що пояснюється нижчою рухомістю фосфору в ґрунті.

Таблиця 3.5. Зміна вмісту рухомого фосфору та обмінного калію після інтенсивних опадів

Шар ґрунту, см	Рухомий фосфор до опадів, мг/кг	Рухомий фосфор після опадів, мг/кг	Зміна Р, мг/кг	Обмінний калій до опадів, мг/кг	Обмінний калій після опадів, мг/кг	Зміна К, мг/кг
0–20	82,4	76,1	-6,3	126,5	113,8	-12,7
20–40	54,8	56,7	+1,9	92,3	98,5	+6,2
40–60	31,6	33,2	+1,6	61,7	67,4	+5,7

Порівняння вмісту фосфору в різних шарах ґрунту до та після інтенсивних опадів рис.3.1.

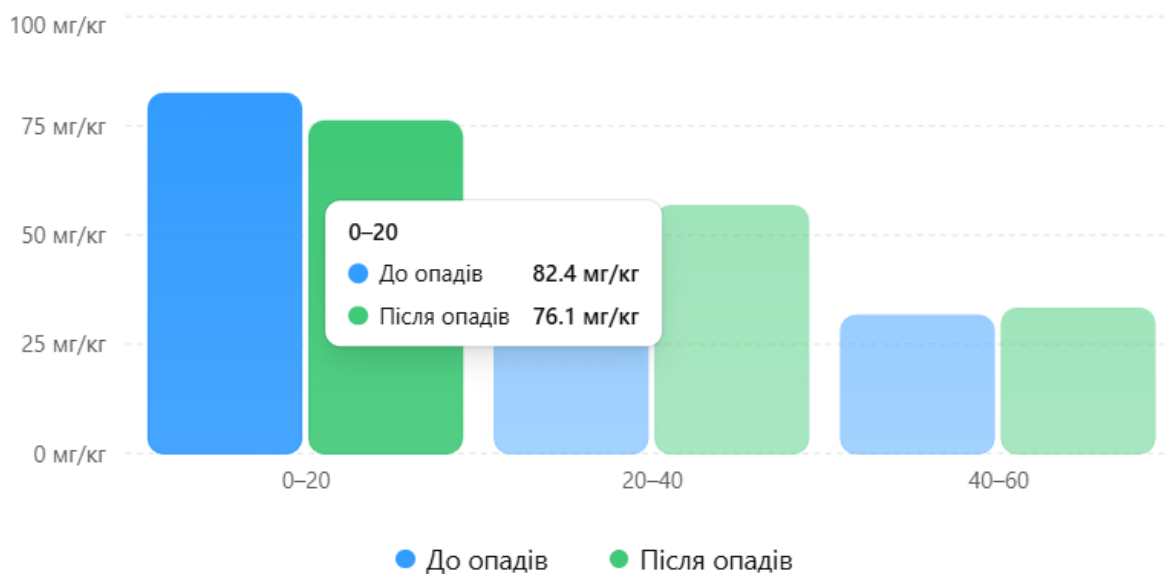


Рис.3.1. Вміст фосфору в різних шарах ґрунту

Обмінний калій також зазнав змін після інтенсивних опадів. У шарі 0–20 см його вміст зменшився з 126,5 мг/кг до 113,8 мг/кг, тобто на 12,7 мг/кг. Відносна втрата калію у верхньому шарі становила:

$$B = ((126,5 - 113,8) / 126,5) \times 100 = 10,0 \%$$

У шарі 20–40 см вміст обмінного калію збільшився з 92,3 мг/кг до 98,5

мг/кг, тобто на 6,2 мг/кг. У шарі 40–60 см зростання становило 5,7 мг/кг. Така динаміка свідчить про часткове переміщення калію з верхнього шару в нижчі горизонти ґрунтового профілю.

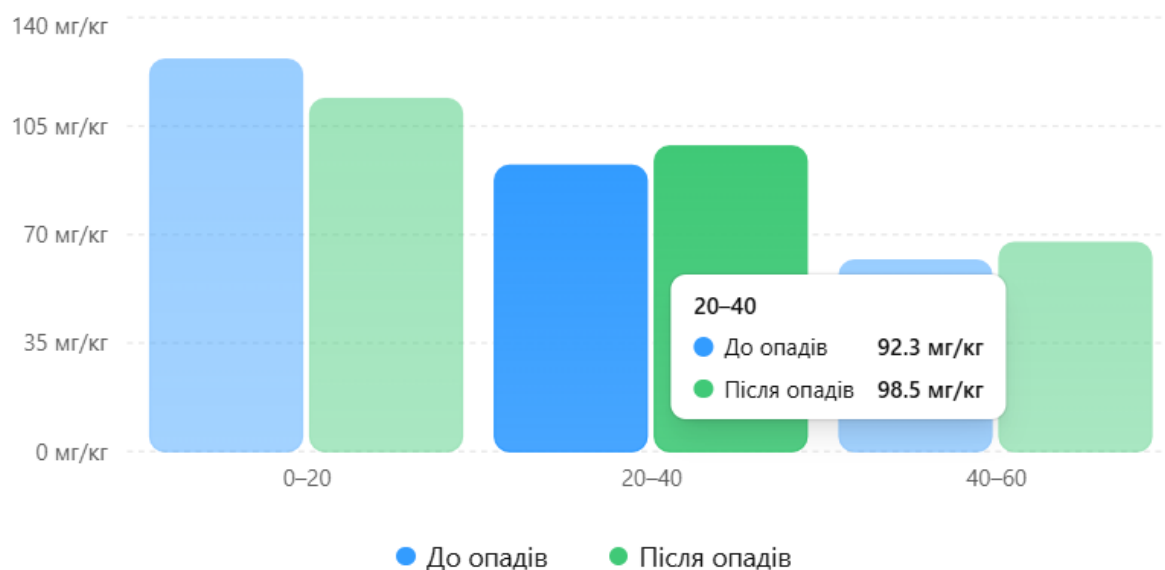


Рис. 3.2. Порівняння вмісту калію в різних шарах ґрунту до та після інтенсивних опадів

Для узагальнення результатів було проведено описову статистичну обробку даних.

Таблиця 3.6 Статистична характеристика вмісту фосфору та калію у ґрунтовому профілі

Показник	Середнє до опадів, мг/кг	Середнє після опадів, мг/кг	Стандартне відхилення до опадів	Стандартне відхилення після опадів	Коефіцієнт варіації до опадів, %	Коефіцієнт варіації після опадів, %
Рухомий фосфор	56,3	55,3	25,4	21,5	45,2	38,8
Обмінний калій	93,5	93,2	32,4	23,6	34,7	25,4

Середній вміст рухомого фосфору в ґрунтовому профілі зменшився з 56,3 мг/кг до 55,3 мг/кг, тобто лише на 1,0 мг/кг. Це свідчить, що загальні втрати фосфору були незначними, однак відбувся його перерозподіл між шарами: зменшення у верхньому горизонті та незначне збільшення у нижчих шарах.

Середній вміст обмінного калію практично не змінився: до опадів він становив 93,5 мг/кг, після опадів - 93,2 мг/кг. Проте аналіз за окремими шарами показав чіткішу картину: у верхньому шарі калій зменшився, а в шарах 20–40 см і 40–60 см його вміст зріс. Це вказує не стільки на повну втрату калію з ґрунтового профілю, скільки на його вертикальне переміщення.

Для оцінки частки переміщення елементів у нижчі горизонти було розраховано умовний коефіцієнт вертикального перерозподілу:

$$K_p = (\Sigma \text{приросту елемента в нижчих шарах} / \text{втрата елемента у шарі 0–20 см}) \times 100 \, \%.$$

Для рухомого фосфору:

$$K_p = ((1,9 + 1,6) / 6,3) \times 100 = 55,6 \, \%.$$

Для обмінного калію:

$$K_p = ((6,2 + 5,7) / 12,7) \times 100 = 93,7 \, \%.$$

Отримані результати показують, що приблизно 55,6 % зменшення фосфору у верхньому шарі можна пов'язати з його накопиченням у нижчих горизонтах. Інша частина могла бути закріплена у важкодоступних формах або втрачена з поверхневим стоком. Для калію коефіцієнт вертикального перерозподілу становив 93,7 %, що свідчить про більш виражене переміщення цього елемента вниз по ґрунтовому профілю.

Таким чином, після інтенсивних опадів було встановлено зменшення вмісту рухомого фосфору та обмінного калію у верхньому родючому шарі ґрунту. Найбільші зміни спостерігалися для калію, який виявився більш рухомих порівняно з фосфором. Фосфор змінювався менш інтенсивно, що пояснюється його здатністю закріплюватися ґрунтовими частинками. Загалом результати свідчать, що інтенсивні опади спричиняють вертикальний перерозподіл поживних елементів, зменшуючи їх доступність у верхньому

шарі ґрунту та підвищуючи ризик поступового збіднення кореневмісного горизонту.

3.5. Порівняння вмісту поживних елементів до та після інтенсивних опадів

Для узагальнення результатів дослідження було проведено порівняння вмісту основних поживних елементів у ґрунті до та після випадання інтенсивних опадів. До аналізу включено показники, які визначалися у попередніх підрозділах: нітратний азот, амонійний азот, рухомий фосфор та обмінний калій.

Основну увагу приділено шару 0–20 см, оскільки саме він є найбільш родючим, містить найбільше органічної речовини, корневих решток і доступних форм поживних елементів. Зменшення концентрації елементів у цьому шарі після опадів може свідчити про їх вимивання або переміщення у нижчі горизонти.

Таблиця 3.7. Порівняння вмісту поживних елементів у шарі ґрунту 0–20 см до та після інтенсивних опадів

Показник	До опадів, мг/кг	Після опадів, мг/кг	Абсолютна зміна, мг/кг	Відносна зміна, %
Нітратний азот NO ₃ ⁻	18,6	11,2	-7,4	-39,8
Амонійний азот NH ₄ ⁺	9,4	8,1	-1,3	-13,8
Рухомий фосфор Р	82,4	76,1	-6,3	-7,6
Обмінний калій К	126,5	113,8	-12,7	-10,0

Для розрахунку відносної зміни використовували формулу:

$$B = ((C_2 - C_1) / C_1) \times 100 \%,$$

де B - відносна зміна вмісту елемента, %;

C₁ - вміст елемента до інтенсивних опадів, мг/кг;

C₂ - вміст елемента після інтенсивних опадів, мг/кг.

Наприклад, для нітратного азоту:

$$B = ((11,2 - 18,6) / 18,6) \times 100 = -39,8 \, \%.$$

Отже, найбільше зменшення у верхньому шарі ґрунту було характерне для нітратного азоту - майже на 40 %. Це підтверджує високу рухомість нітратної форми азоту та її схильність до вимивання після інтенсивних опадів.

Відносна зміна поживних елементів у шарі 0–20 см

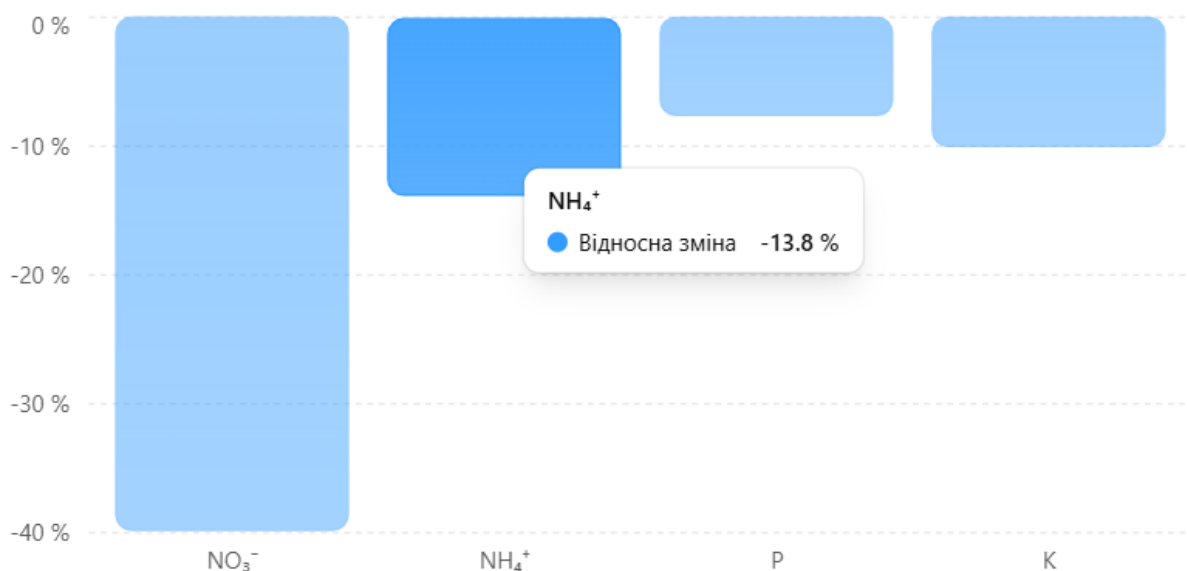


Рис. 3.3. Порівняння втрат поживних елементів після інтенсивних опадів

Від'ємні значення показують зменшення вмісту елемента у верхньому шарі ґрунту.

Порівняння показало, що після інтенсивних опадів усі досліджувані поживні елементи у верхньому шарі ґрунту зменшилися, однак інтенсивність змін була різною. Найбільш виражені втрати спостерігалися для нітратного азоту, тоді як рухомий фосфор змінювався найменше. Це пояснюється тим, що фосфор краще закріплюється ґрунтовими частинками та органічною речовиною.

Для більш повної оцінки було розраховано середній вміст поживних елементів у всьому досліджуваному профілі 0–60 см.

Таблиця 3.8 Статистичне порівняння середнього вмісту поживних елементів у ґрунтовому профілі 0–60 см

Показник	Середнє до опадів, мг/кг	Середнє після опадів, мг/кг	Зміна середнього значення, мг/кг	Відносна зміна, %	Стандартне відхилення до опадів	Стандартне відхилення після опадів
Нітратний азот NO ₃ ⁻	11,9	11,8	-0,1	-0,8	6,2	2,7
Амонійний азот NH ₄ ⁺	7,0	6,3	-0,8	-10,9	2,3	1,8
Рухомий фосфор Р	56,3	55,3	-0,9	-1,7	25,4	21,5
Обмінний калій К	93,5	93,2	-0,3	-0,3	32,4	23,6

За середніми значеннями у профілі 0–60 см найбільше зменшення було характерне для амонійного азоту - на 10,9 %. Проте для нітратного азоту середнє значення майже не змінилося, оскільки його зменшення у верхньому шарі супроводжувалося збільшенням у нижчих горизонтах. Це свідчить не стільки про повну втрату нітратів із досліджуваного профілю, скільки про їх вертикальний перерозподіл.

Для оцінки вертикального переміщення елементів було використано коефіцієнт перерозподілу:

$K_p = (\Sigma \text{приросту елемента в шарах } 20\text{--}40 \text{ і } 40\text{--}60 \text{ см} / \text{втрата елемента у шарі } 0\text{--}20 \text{ см}) \times 100 \text{ \%}$.

Таблиця 3.9 Розрахунок

Показник	Втрата у шарі 0– 20 см, мг/кг	Приріст у шарах 20–60 см, мг/кг	Коефіцієнт перерозподілу, %
----------	----------------------------------	------------------------------------	--------------------------------

Нітратний азот NO_3^-	7,4	7,1	95,9
Рухомий фосфор Р	6,3	3,5	55,6
Обмінний калій К	12,7	11,9	93,7

Найвищий коефіцієнт перерозподілу встановлено для нітратного азоту - 95,9 %. Це означає, що майже вся втрата нітратів із верхнього шару була пов'язана з їх переміщенням у нижчі горизонти. Подібна тенденція спостерігалася і для калію, коефіцієнт перерозподілу якого становив 93,7 %. Для фосфору цей показник був нижчим - 55,6 %, що підтверджує його меншу рухомість у ґрунті.

Отримані результати свідчать, що інтенсивні опади по-різному вплинули на досліджувані поживні елементи. Найбільш уразливим до вимивання виявився нітратний азот, який швидко переміщувався з верхнього шару ґрунту в нижчі горизонти. Калій також продемонстрував помітне вертикальне переміщення, хоча його загальний середній вміст у профілі майже не змінився. Фосфор був менш рухомим, а його втрати у верхньому шарі могли бути пов'язані не лише з вертикальним переміщенням, а й із закріпленням у важкодоступних формах або поверхневим стоком. Амонійний азот змінювався менш інтенсивно, оскільки краще утримується ґрунтовим вбирним комплексом.

Таким чином, порівняння вмісту поживних елементів до та після інтенсивних опадів показало, що найбільші зміни відбулися у верхньому родючому шарі ґрунту. Інтенсивні опади спричинили зменшення концентрації доступних форм азоту, фосфору та калію у шарі 0–20 см, а для нітратного азоту й калію було зафіксовано чітке переміщення у нижчі горизонти. Це підтверджує, що сильні опади є важливим чинником погіршення поживного режиму ґрунту та можуть знижувати доступність елементів живлення для

рослин.

3.6. Оцінка глибини міграції поживних речовин у ґрунтовому профілі

Для оцінки глибини міграції поживних речовин у ґрунтовому профілі було використано результати лабораторного аналізу зразків, відібраних із шарів 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см до та після інтенсивних опадів. Основним критерієм міграції вважали зменшення вмісту елемента у верхньому шарі ґрунту та одночасне збільшення його концентрації в нижчих горизонтах.

Глибину міграції визначали за найглибшим шаром ґрунту, у якому після інтенсивних опадів було зафіксовано приріст вмісту поживного елемента порівняно з початковим значенням.

Таблиця 3.10. Зміна вмісту поживних речовин у шарах ґрунтового профілю після інтенсивних опадів

Показник	Зміна у шарі 0–20 см, мг/кг	Зміна у шарі 20–40 см, мг/кг	Зміна у шарі 40–60 см, мг/кг	Орієнтовна глибина міграції
Нітратний азот NO_3^-	-7,4	+3,9	+3,2	до 60 см
Амонійний азот NH_4^+	-1,3	-0,6	-0,4	чітка міграція не встановлена
Рухомий фосфор Р	-6,3	+1,9	+1,6	до 60 см, слабка
Обмінний калій К	-12,7	+6,2	+5,7	до 60 см

За результатами аналізу встановлено, що найбільш виражена вертикальна міграція була характерна для нітратного азоту. У верхньому шарі 0–20 см його вміст зменшився на 7,4 мг/кг, тоді як у шарах 20–40 см і 40–60 см

спостерігалось збільшення відповідно на 3,9 мг/кг і 3,2 мг/кг. Це свідчить про переміщення нітратів із верхнього родючого горизонту в нижні шари ґрунтового профілю.

Сумарний приріст нітратного азоту в нижчих шарах становив:

$$3,9 + 3,2 = 7,1 \text{ мг/кг.}$$

Для оцінки частки переміщення нітратного азоту було розраховано коефіцієнт вертикального перерозподілу:

$K_p = (\Sigma \text{ приросту елемента в шарах 20–40 і 40–60 см} / \text{втрата елемента у шарі 0–20 см}) \times 100 \%$.

Для нітратного азоту:

$$K_p = (7,1 / 7,4) \times 100 = 95,9 \%$$

Отримане значення свідчить, що майже вся кількість нітратного азоту, яка зменшилася у верхньому шарі, була виявлена в нижчих горизонтах. Це підтверджує високу рухомість нітратної форми азоту та її схильність до вимивання після інтенсивних опадів.



Рис. 3.4. Коефіцієнт вертикального перерозподілу поживних елементів

Частка втрат із шару 0–20 см, яка була виявлена як приріст у нижчих горизонтах 20–60 см.

Вищі значення свідчать про активніше переміщення елемента вниз по ґрунтовому профілю.

Для амонійного азоту чіткої вертикальної міграції не встановлено. Його вміст зменшився в усіх досліджуваних шарах: у шарі 0–20 см - на 1,3 мг/кг, у

шарі 20–40 см - на 0,6 мг/кг, у шарі 40–60 см - на 0,4 мг/кг. Відсутність приросту в нижніх горизонтах свідчить про те, що амонійний азот не переміщувався вниз так активно, як нітратний. Це пояснюється тим, що іони амонію мають позитивний заряд і можуть утримуватися ґрунтовим вбирним комплексом.

Рухомий фосфор після інтенсивних опадів також зазнав певного перерозподілу. У шарі 0–20 см його вміст зменшився на 6,3 мг/кг, тоді як у шарі 20–40 см збільшився на 1,9 мг/кг, а в шарі 40–60 см - на 1,6 мг/кг. Сумарний приріст фосфору в нижчих шарах становив:

$$1,9 + 1,6 = 3,5 \text{ мг/кг.}$$

Коефіцієнт вертикального перерозподілу фосфору дорівнював:

$$K_p = (3,5 / 6,3) \times 100 = 55,6 \text{ \%}.$$

Це свідчить про те, що фосфор мігрував у нижчі горизонти значно слабше, ніж нітратний азот і калій. Частина фосфору, яка зменшилася у верхньому шарі, могла бути закріплена у важкодоступних формах або втрачена разом із поверхневим стоком і дрібними частинками ґрунту.

Для обмінного калію було встановлено помітне переміщення в нижні горизонти. У шарі 0–20 см його вміст зменшився на 12,7 мг/кг, а в шарах 20–40 см і 40–60 см збільшився відповідно на 6,2 мг/кг і 5,7 мг/кг. Сумарний приріст калію в нижчих шарах становив:

$$6,2 + 5,7 = 11,9 \text{ мг/кг.}$$

Коефіцієнт вертикального перерозподілу калію становив:

$$K_p = (11,9 / 12,7) \times 100 = 93,7 \text{ \%}.$$

Отримані результати свідчать, що калій після інтенсивних опадів активно переміщувався з верхнього шару ґрунту в нижчі горизонти. Хоча калій краще утримується ґрунтовим вбирним комплексом, ніж нітрати, за умов надмірного зволоження частина його обмінної форми може переходити у ґрунтовий розчин і переміщуватися вниз разом із водою.

Для додаткової оцінки було визначено частку приросту поживних речовин у шарах 20–40 см і 40–60 см.

Таблиця 3.11 Розподіл приросту поживних речовин у нижчих шарах ґрунту

Показник	Приріст у шарі 20–40 см, мг/кг	Частка від сумарного приросту, %	Приріст у шарі 40–60 см, мг/кг	Частка від сумарного приросту, %
Нітратний азот NO ₃ ⁻	3,9	54,9	3,2	45,1
Рухомий фосфор Р	1,9	54,3	1,6	45,7
Обмінний калій К	6,2	52,1	5,7	47,9

Аналіз розподілу приросту показав, що для всіх трьох елементів більша частина накопичення припадала на шар 20–40 см, однак значна частина була виявлена і в шарі 40–60 см. Це означає, що інтенсивні опади спричинили не лише незначне переміщення поживних речовин у межах орного шару, а й їх проникнення у глибші горизонти ґрунтового профілю.

Найбільш небезпечним є переміщення поживних речовин до шару 40–60 см, оскільки ця зона для багатьох культур є менш доступною для активного поглинання кореневою системою. Подальше просочування води може спричинити втрату рухомих сполук за межі кореневмісного шару та створити ризик забруднення ґрунтових вод, особливо нітратами.

Таким чином, оцінка глибини міграції показала, що після інтенсивних опадів поживні речовини переміщувалися до глибини 60 см. Найбільш активна міграція була характерна для нітратного азоту та обмінного калію, коефіцієнти вертикального перерозподілу яких становили відповідно 95,9 % і 93,7 %. Рухомий фосфор мігрував менш інтенсивно, що пов'язано з його здатністю закріплюватися ґрунтовими частинками. Амонійний азот не показав чіткої вертикальної міграції, оскільки краще утримувався ґрунтовим вбирним комплексом.

Отримані результати підтверджують, що інтенсивні опади є важливим чинником вертикального переміщення поживних речовин у ґрунтовому профілі. Особливо це стосується рухомих форм азоту та калію, які після сильного зволоження можуть втрачатися з верхнього родючого шару, знижуючи доступність елементів живлення для рослин.

3.7. Визначення основних чинників, що посилюють вимивання поживних елементів

На основі результатів експериментального дослідження було визначено основні чинники, які посилювали вимивання поживних елементів із верхнього шару ґрунту після інтенсивних опадів. Для цього було проаналізовано динаміку вологості ґрунту, зміну вмісту азотних сполук, рухомого фосфору та обмінного калію у шарах 0–20 см, 20–40 см і 40–60 см.

Результати дослідження показали, що після інтенсивних опадів відбулося зростання вологості в усіх досліджуваних шарах ґрунту. Особливо важливим є те, що вологість збільшилася не лише у верхньому горизонті, а й у шарах 20–40 см та 40–60 см. Це свідчить про активне проникнення води вглиб ґрунтового профілю, що створило умови для вертикального переміщення розчинених поживних речовин.

Найважливішим чинником, що посилив вимивання поживних речовин, була значна кількість вологи, яка надійшла у ґрунт після інтенсивних опадів. Підвищення вологості у шарі 40–60 см свідчить про те, що вода проникла досить глибоко. Саме цей процес сприяв переміщенню розчинених речовин із верхнього горизонту в нижчі шари.

Особливо чітко це проявилось для нітратного азоту. У шарі 0–20 см його вміст зменшився на 7,4 мг/кг, або на 39,8 %, тоді як у шарах 20–40 см і 40–60 см було зафіксовано приріст відповідно на 3,9 мг/кг і 3,2 мг/кг. Це свідчить, що нітратний азот був найбільш уразливим до вимивання.

Таблиця 3.12 Основні чинники, що посилювали вимивання поживних

елементів

Чинник	Експериментальне підтвердження	Вплив на вимивання
Інтенсивні опади	Зростання вологості у шарі 0–20 см на 10,3 %, у шарі 20–40 см - на 8,2 %, у шарі 40–60 см - на 6,4 %	Посилення інфільтрації та вертикального руху води
Висока рухомість нітратного азоту	Зменшення NO_3^- у шарі 0–20 см на 39,8 %	Активне вимивання нітратів у нижчі горизонти
Переміщення води до глибини 60 см	Приріст NO_3^- , P і K у шарах 20–40 см та 40–60 см	Формування умов для глибокої міграції речовин
Нижча здатність ґрунту утримувати рухомі форми елементів	Коефіцієнт перерозподілу NO_3^- - 95,9 %, K - 93,7 %	Втрата елементів із верхнього родючого шару
Відмінності у хімічній формі елементів	Нітратний азот мігрував активніше, ніж амонійний; фосфор - слабше	Різна інтенсивність вимивання окремих елементів
Можливий поверхневий стік	Зменшення рухомого фосфору у верхньому шарі на 7,6 % за нижчого коефіцієнта перерозподілу	Частина фосфору могла втрачатися не лише вертикально, а й зі стоком

Важливим чинником є хімічна форма поживного елемента. Нітратна форма азоту легко розчиняється у воді та майже не утримується ґрунтовим вбирним комплексом, тому швидко переміщується вниз по профілю.

Натомість амонійний азот має нижчу рухомість, оскільки іони NH_4^+ можуть поглинатися ґрунтовими колоїдами. Саме тому для амонійного азоту не було встановлено чіткої вертикальної міграції.

Обмінний калій також зазнав помітного перерозподілу. Його вміст у верхньому шарі зменшився на 12,7 мг/кг, а в нижчих шарах збільшився. Коефіцієнт вертикального перерозподілу калію становив 93,7 %, що свідчить про активне переміщення цього елемента після опадів. Це може бути пов'язано з тим, що частина калію перебувала в обмінній або водорозчинній формі й могла переходити у ґрунтовий розчин.

Рухомий фосфор був менш схильним до вертикального вимивання. Його вміст у шарі 0–20 см зменшився на 6,3 мг/кг, однак коефіцієнт вертикального перерозподілу становив лише 55,6 %. Це означає, що не вся кількість фосфору, втрачена з верхнього шару, була виявлена у нижчих горизонтах. Частина фосфору могла бути закріплена у важкодоступних формах або винесена з поверхневим стоком разом із дрібними частинками ґрунту.

Для узагальнення впливу чинників було проведено їх ранжування за силою впливу на процеси вимивання.

Таблиця 3.13. Ранжування чинників за впливом на вимивання поживних елементів

Ранг	Чинник	Рівень впливу
1	Інтенсивне зволоження та проникнення води до 60 см	Дуже високий
2	Висока рухомість нітратного азоту	Дуже високий
3	Вертикальний перерозподіл обмінного калію	Високий
4	Недостатнє закріплення рухомих форм елементів у верхньому шарі	Високий
5	Можливий поверхневий стік і винесення фосфору	Середній
6	Міграція амонійного азоту	Низький

Найбільше вимивання поживних речовин було зумовлене поєднанням двох основних чинників: інтенсивного надходження води в ґрунт і високої

рухомості окремих форм поживних елементів. Найбільш уразливим до втрат виявився нітратний азот, оскільки він легко переміщувався з водним потоком у нижчі горизонти. Калій також показав помітну здатність до вертикального переміщення, тоді як фосфор мігрував слабше, а амонійний азот переважно утримувався ґрунтом.

Таким чином, основними чинниками, що посилювали вимивання поживних елементів у досліджуваному ґрунті, були інтенсивні опади, підвищення вологості в нижніх горизонтах, висока розчинність окремих сполук, форма перебування елемента в ґрунті та здатність ґрунту утримувати поживні речовини. Отримані результати підтверджують, що після сильних опадів найбільший ризик втрат характерний для рухомих форм азоту та калію, тоді як фосфор і амонійний азот

РОЗДІЛ 4. ЗАХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ПОЖИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ҐРУНТУ

4.1. Агротехнічні заходи зменшення вимивання поживних речовин

Зменшення втрат поживних елементів із ґрунту є важливою умовою збереження його родючості, підвищення ефективності використання добрив і запобігання забрудненню водних ресурсів. Оскільки вимивання поживних речовин значною мірою пов'язане з рухом води у ґрунтовому профілі, основні агротехнічні заходи мають бути спрямовані на регулювання водного режиму, поліпшення структури ґрунту, підвищення вмісту органічної речовини та забезпечення постійного рослинного покриву.

До найбільш ефективних агротехнічних заходів, які дозволяють зменшити вимивання поживних речовин, належать мульчування, мінімальний обробіток ґрунту та вирощування покривних культур. Ці заходи сприяють уповільненню поверхневого стоку, кращому утриманню вологи, зменшенню ерозії, підвищенню біологічної активності ґрунту та збереженню поживних елементів у верхньому родючому шарі.

Мульчування є одним із простих і водночас ефективних способів захисту ґрунту від втрат поживних речовин. Воно полягає у покритті поверхні ґрунту шаром органічного або неорганічного матеріалу. Як органічну мульчу можна використовувати соломку, скошену траву, подрібнені рослинні рештки, компост, тирсу, листя або інші природні матеріали. Мульча захищає поверхню ґрунту від прямого удару дощових крапель, зменшує руйнування ґрунтових агрегатів і запобігає утворенню ґрунтової кірки.

Після інтенсивних опадів на незахищеній поверхні ґрунту часто виникає поверхневий стік, який може виносити дрібні частинки, гумус і фосфорні сполуки. Мульчувальний шар уповільнює рух води по поверхні, збільшує час її проникнення в ґрунт і зменшує ризик ерозії. Завдяки цьому поживні речовини довше залишаються у верхньому шарі ґрунту й можуть бути

використані рослинами.

Крім захисту від ерозії, мульчування сприяє збереженню вологи. У спекотні періоди мульча зменшує випаровування води з поверхні ґрунту, а після дощів допомагає підтримувати більш рівномірний рівень зволоження. Це важливо для зменшення різких коливань вологості, які можуть посилювати переміщення поживних речовин у ґрунтовому профілі. За наявності мульчі вода проникає в ґрунт поступовіше, а не створює швидкий фільтраційний потік.

Органічна мульча також є джерелом органічної речовини. У процесі розкладання рослинних решток у ґрунт надходять гумусові сполуки та елементи живлення. Це підвищує вміст гумусу, покращує структуру ґрунту, збільшує його вбирну здатність і здатність утримувати катіони, зокрема калій, кальцій, магній та амонійний азот. Отже, мульчування не лише зменшує втрати поживних речовин, а й поступово покращує загальний агрохімічний стан ґрунту.

Важливим заходом є мінімальний обробіток ґрунту. Традиційний інтенсивний обробіток, особливо глибока оранка, може руйнувати структуру ґрунту, прискорювати мінералізацію органічної речовини, зменшувати вміст гумусу та підвищувати ризик ерозії. Часте механічне втручання порушує природну будову ґрунтового профілю, руйнує пори й агрегати, а також може спричиняти ущільнення підорного шару.

Мінімальний обробіток ґрунту передбачає зменшення кількості та інтенсивності механічних операцій. За такого підходу ґрунт менше руйнується, на його поверхні зберігається більше рослинних решток, а структура залишається більш стабільною. Це сприяє кращій інфільтрації води, зменшенню поверхневого стоку та збереженню поживних речовин у верхньому шарі.

Особливо важливим є те, що за мінімальної обробки ґрунту зменшується ризик утворення ущільнених шарів. Ущільнення погіршує проникнення води й повітря, обмежує розвиток кореневої системи та може

сприяти нерівномірному руху води у профілі. За наявності ущільнених горизонтів вода або застоюється у верхньому шарі, або рухається окремими тріщинами, швидко переносячи розчинені поживні речовини вниз. Зменшення механічного навантаження на ґрунт допомагає уникнути таких негативних процесів.

Мінімальний обробіток також сприяє накопиченню органічної речовини у верхньому шарі ґрунту. Рослинні рештки, які залишаються на поверхні, поступово розкладаються й поповнюють запаси гумусу. Завдяки цьому підвищується ємність катіонного обміну, покращується водоутримувальна здатність і зменшується вимивання калію, кальцію, магнію та амонійного азоту. Крім того, стабільна структура ґрунту сприяє розвитку корисної мікрофлори, яка бере участь у перетворенні поживних речовин у доступні для рослин форми.

Одним із найефективніших заходів зменшення вимивання поживних речовин є використання покривних культур. Покривні культури висівають у періоди, коли основна культура вже зібрана або ще не висіяна. Їх головна функція полягає у тому, щоб ґрунт не залишався відкритим і незахищеним від опадів, вітру та ерозії. До покривних культур належать жито, овес, гірчиця, фацелія, редька олійна, конюшина, люпин, вика та інші культури.

Покривні культури активно поглинають залишкові поживні речовини з ґрунту, особливо нітратний азот, який є найбільш схильним до вимивання. Якщо після збирання основної культури в ґрунті залишається значна кількість нітратів, а рослинний покрив відсутній, ці сполуки можуть легко вимиватися осінніми дощами або талими водами. Покривні культури перехоплюють нітрати своєю кореневою системою та включають їх у рослинну біомасу.

Після відмирання або зароблення покривних культур у ґрунт поживні речовини поступово повертаються у процесі розкладання органічної маси. Таким чином, покривні культури виконують роль своєрідного біологічного акумулятора елементів живлення. Вони зменшують прямі втрати поживних речовин і водночас покращують родючість ґрунту.

Особливо цінними є бобові покривні культури, наприклад конюшина, вика або люпин. Вони здатні вступати в симбіоз із бульбочковими бактеріями та фіксувати атмосферний азот. Це дозволяє збагачувати ґрунт азотом природним шляхом і зменшувати потребу в мінеральних азотних добривах. Водночас слід враховувати, що після розкладання великої кількості бобової біомаси можливе вивільнення мінерального азоту, тому строки зароблення таких культур мають бути узгоджені з потребами наступної культури.

Покривні культури також мають важливе значення для поліпшення фізичних властивостей ґрунту. Їх коренева система розпушує ґрунт, формує біопори, покращує водопроникність і зменшує ущільнення. Завдяки цьому вода після опадів краще проникає в ґрунт і менше стікає по поверхні. Водночас розгалужена коренева система допомагає утримувати ґрунтові частинки, зменшуючи ерозійне винесення гумусу, фосфору та інших елементів.

Для зменшення вимивання поживних речовин важливо поєднувати різні агротехнічні заходи. Наприклад, мульчування ефективно захищає поверхню ґрунту, мінімальний обробіток зберігає його структуру, а покривні культури активно поглинають залишкові елементи живлення. У комплексі ці заходи формують більш стійку ґрунтову систему, здатну краще утримувати воду та поживні речовини.

Таблиця 4.1 Агротехнічні заходи зменшення вимивання поживних речовин

Захід	Основна дія	Очікуваний ефект
Мульчування	Захист поверхні ґрунту рослинними рештками або іншими матеріалами	Зменшення поверхневого стоку, ерозії та втрат гумусу
Мінімальний обробіток	Зменшення механічного руйнування ґрунту	Збереження структури, пористості та органічної речовини
Покривні культури	Постійне покриття	Поглинання

	ґрунту рослинністю	залишкових нітратів і зменшення вимивання
Залишення рослинних решток	Повернення органічної маси в ґрунт	Підвищення вмісту гумусу та вбирної здатності
Запобігання ущільненню	Обмеження руху важкої техніки по вологому ґрунту	Поліпшення інфільтрації та розвитку кореневої системи

Агротехнічні заходи відіграють важливу роль у зменшенні втрат поживних елементів із ґрунту. Мульчування захищає поверхню ґрунту від руйнування дощовими краплями та зменшує стік. Мінімальний обробіток сприяє збереженню структури, гумусу й водоутримувальної здатності. Покривні культури перехоплюють залишкові поживні речовини, особливо нітрати, і запобігають їх вимиванню в нижні горизонти. Найбільш ефективним є комплексне застосування цих заходів, оскільки воно забезпечує одночасне поліпшення фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунту та сприяє довготривалому збереженню його родючості.

4.2. Раціональне внесення мінеральних і органічних добрив

Раціональне внесення мінеральних і органічних добрив є одним із найважливіших заходів зменшення втрат поживних елементів із ґрунту. Добрива забезпечують рослини необхідними елементами живлення, однак за неправильного використання вони можуть стати джерелом екологічного навантаження. Надмірне, несвоєчасне або нерівномірне внесення добрив підвищує концентрацію розчинних сполук у ґрунтовому розчині, що за умов інтенсивних опадів або надмірного зрошення сприяє їх вимиванню в нижні горизонти ґрунту.

Особливо високий ризик втрат характерний для азотних добрив. Азот у

нітратній формі добре розчиняється у воді та майже не утримується ґрунтовим вбирним комплексом. Тому після сильних дощів нітрати можуть швидко переміщуватися з верхнього родючого шару в глибші горизонти. Це призводить до зменшення доступності азоту для рослин, зниження ефективності удобрення та потенційного забруднення підземних вод.

Раціональне внесення добрив передбачає врахування потреб рослин, агрохімічного стану ґрунту, погодних умов, типу ґрунту, фази розвитку культури та форми добрива. Основним принципом є внесення такої кількості поживних речовин, яка відповідає реальній потребі культури та здатності ґрунту їх утримувати. Надлишкове внесення добрив не завжди підвищує врожайність, але значно збільшує ризик вимивання поживних елементів.

Перед внесенням добрив доцільно проводити агрохімічний аналіз ґрунту. Він дозволяє визначити вміст нітратного й амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, рН, гумусу та інших важливих показників. На основі цих даних можна обґрунтувати норми внесення добрив і уникнути надмірного навантаження на ґрунтову систему. Без попереднього аналізу існує ризик внесення добрив «наосліп», що може призводити або до дефіциту елементів живлення, або до їх надлишку.

Важливим заходом є поділ загальної норми добрив на кілька внесень протягом вегетаційного періоду. Особливо це стосується азотних добрив. Замість одноразового внесення великої дози доцільно застосовувати дробне внесення відповідно до фаз розвитку рослин. Такий підхід дає змогу синхронізувати надходження поживних речовин із потребами культури та зменшити кількість елементів, які залишаються невикористаними у ґрунті.

Наприклад, частину азотних добрив можна вносити перед сівбою, а решту – у період активного росту рослин. У такому випадку рослини швидше засвоюють азот, а ризик його вимивання після опадів зменшується. Особливо важливо уникати внесення азотних добрив перед прогнозованими сильними дощами, оскільки це створює умови для швидкого переміщення нітратів у нижні горизонти.

Фосфорні та калійні добрива мають інші особливості поведінки в ґрунті. Фосфор менш рухомий, оскільки легко зв'язується з ґрунтовими частинками, сполуками кальцію, заліза або алюмінію. Проте його втрати можуть відбуватися з поверхневим стоком і ерозійним винесенням ґрунтових частинок. Тому фосфорні добрива бажано вносити так, щоб вони не залишалися на поверхні незахищеного ґрунту, особливо на схилах. Доцільним є локальне внесення фосфору в зону розвитку кореневої системи.

Калій має середню рухомість і краще утримується у ґрунтах із високим вмістом глинистих частинок і гумусу. На легких піщаних ґрунтах калій може вимиватися інтенсивніше, тому його також доцільно вносити частинами або поєднувати з органічними добривами, які підвищують вбирну здатність ґрунту.

Органічні добрива відіграють важливу роль у зменшенні втрат поживних речовин. До них належать гній, компост, перегній, сидеральна маса, рослинні рештки та інші органічні матеріали. Вони не лише забезпечують ґрунт поживними елементами, а й покращують його структуру, підвищують вміст гумусу, активізують діяльність мікроорганізмів і збільшують здатність ґрунту утримувати воду та катіони.

На відміну від мінеральних добрив, органічні добрива вивільняють поживні елементи поступово. Це зменшує ризик різкого підвищення концентрації розчинних сполук у ґрунтовому розчині й, відповідно, знижує ймовірність їх вимивання. Особливо корисним є використання компосту, оскільки він містить стабілізовану органічну речовину, яка сприяє формуванню гумусу та покращує буферні властивості ґрунту.

Водночас органічні добрива також потрібно застосовувати раціонально. Надмірне внесення гною або рідких органічних добрив може призводити до накопичення надлишкової кількості азоту, фосфору та калію. Якщо такі добрива вносять перед сильними опадами або на перезволожений ґрунт, частина поживних речовин може бути втрачена з поверхневим стоком або через вертикальне вимивання. Тому важливо дотримуватися оптимальних

норм, строків і способів внесення.

Ефективним підходом є поєднання мінеральних і органічних добрив. Мінеральні добрива швидко забезпечують рослини доступними формами поживних речовин, а органічні - покращують фізико-хімічні властивості ґрунту та підвищують його здатність утримувати елементи живлення. Така система удобрення сприяє більш збалансованому живленню рослин і зменшує ризик втрат поживних речовин.

Важливе значення має спосіб внесення добрив. Поверхнєве розкидання добрив без загортання підвищує ризик їх втрат, особливо під час інтенсивних опадів. Локальне внесення, загортання в ґрунт або внесення в зону кореневої системи дозволяє зменшити контакт добрив із поверхневим стоком і підвищити ефективність їх засвоєння рослинами. Для азотних добрив важливо також враховувати можливі втрати через випаровування аміаку, особливо за поверхневого внесення сечовини або амонійних форм.

Строки внесення добрив повинні бути узгоджені з погодними умовами. Не рекомендується вносити добрива перед прогнозованими зливами, на мерзлий, перезволожений або вкритий снігом ґрунт. У таких умовах рослини не можуть ефективно засвоювати поживні речовини, а вода легко переносить їх за межі кореневмісного шару або у водні об'єкти. Найкращим є внесення добрив у періоди, коли ґрунт має помірну вологість, а рослини перебувають у фазі активного росту.

Для зменшення втрат поживних речовин важливо також враховувати тип ґрунту. На піщаних і супіщаних ґрунтах добрива слід вносити меншими дозами, але частіше, оскільки такі ґрунти мають низьку вбирну здатність і високу водопроникність. На суглинкових і глинистих ґрунтах поживні речовини утримуються краще, однак слід уникати перезволоження, ущільнення та поверхневого стоку.

Раціональне удобрення також передбачає підтримання оптимальної реакції ґрунтового середовища. За підвищеної кислотності знижується доступність фосфору, кальцію, магнію та деяких мікроелементів, а також

посилюється вимивання основних катіонів. У таких умовах доцільним є вапнування кислих ґрунтів, що сприяє поліпшенню структури, підвищенню ефективності добрив і зменшенню втрат поживних речовин.

Таблиця 4.2 Основні підходи до раціонального внесення добрив

Захід	Суть заходу	Очікуваний ефект
Агрохімічний аналіз ґрунту	Визначення фактичного вмісту поживних речовин	Обґрунтування норм внесення добрив
Дробне внесення азоту	Поділ загальної дози на кілька етапів	Зменшення вимивання нітратів
Врахування прогнозу погоди	Уникнення внесення перед сильними опадами	Зменшення втрат із фільтраційними водами
Локальне внесення добрив	Внесення в зону кореневої системи	Підвищення засвоєння рослинами
Поєднання мінеральних і органічних добрив	Баланс швидкодоступних і поступово доступних форм	Стабілізація поживного режиму ґрунту
Використання компосту та сидератів	Поповнення органічної речовини	Підвищення вмісту гумусу та вбирної здатності
Вапнування кислих ґрунтів	Нейтралізація надмірної кислотності	Зменшення вимивання кальцію й магнію

Раціональне внесення мінеральних і органічних добрив є важливою умовою зменшення вимивання поживних елементів із ґрунту. Найбільш ефективними є такі підходи, як проведення агрохімічного аналізу, дотримання оптимальних норм удобрення, дробне внесення азотних добрив, врахування погодних умов, локальне внесення поживних речовин і поєднання мінерального та органічного живлення. Застосування цих заходів дозволяє підвищити ефективність використання добрив, зберегти родючість ґрунту, зменшити втрати азоту, фосфору й калію та знизити ризик забруднення підземних і

поверхневих вод.

4.3. Використання рослинного покриву для зменшення поверхневого стоку

Використання рослинного покриву є одним із найефективніших природоорієнтованих заходів зменшення поверхневого стоку та втрат поживних елементів із ґрунту. Рослинність виконує захисну, водорегулювальну, протиерозійну та біологічну функції. Вона зменшує швидкість руху води по поверхні ґрунту, покращує інфільтрацію, утримує ґрунтові частинки та сприяє накопиченню органічної речовини.

Після інтенсивних опадів на відкритій поверхні ґрунту вода швидко стікає, особливо на схилах або ущільнених ділянках. Разом із поверхневим стоком можуть виноситися дрібні частинки ґрунту, гумус, фосфорні сполуки, органічна речовина та частина мінеральних добрив. Наявність рослинного покриву значно зменшує ці втрати, оскільки листки, стебла і корені рослин перешкоджають прямому впливу дощових крапель на ґрунт.

Рослинний покрив знижує силу удару крапель дощу, які на незахищеній поверхні руйнують ґрунтові агрегати, сприяють утворенню кірки та зменшують водопроникність. Якщо поверхня ґрунту вкрита рослинністю, краплі дощу спочатку потрапляють на листки й стебла, частково затримуються, а потім повільніше стікають до ґрунту. Це зменшує руйнування структури ґрунту та сприяє кращому проникненню води в профіль.

Коренева система рослин має важливе значення для поліпшення фізичних властивостей ґрунту. Корені розпушують ґрунт, формують біопори, підвищують його пористість і водопроникність. Завдяки цьому вода після опадів краще просочується в ґрунт, а не стікає по поверхні. Крім того, корені скріплюють ґрунтові частинки, зменшуючи ризик ерозії та винесення поживних речовин.

Особливо ефективними для зменшення поверхневого стоку є багаторічні трави, покривні культури, лісосмуги, прибережні захисні смуги та трав'яні

буферні зони. Вони створюють постійний або тривалий рослинний покрив, який захищає ґрунт у періоди, коли основні сільськогосподарські культури ще не сформували достатньої листкової маси або вже були зібрані.

Покривні культури відіграють важливу роль у період між вирощуванням основних культур. Після збирання врожаю ґрунт часто залишається відкритим, що підвищує ризик ерозії, поверхневого стоку та вимивання нітратів. Висівання покривних культур дозволяє зберегти активну рослинність на полі, перехопити залишкові поживні речовини та зменшити їх втрати з водними потоками.

До покривних культур, які можуть використовуватися для зменшення поверхневого стоку, належать жито, овес, фацелія, гірчиця, редька олійна, вика, люпин, конюшина та інші культури. Злакові культури формують густу кореневу систему, яка добре закріплює ґрунт. Бобові культури, крім протиерозійної функції, збагачують ґрунт азотом. Хрестоцвіті культури мають глибоку кореневу систему, яка покращує структуру ґрунту та сприяє проникненню води.

Важливим заходом є створення трав'яних буферних смуг на схилах, уздовж водойм, каналів, доріг і меж полів. Такі смуги затримують поверхневий стік, уповільнюють рух води та сприяють осіданню ґрунтових частинок. Завдяки цьому зменшується потрапляння фосфору, гумусу, залишків добрив і завислих речовин у водні об'єкти.

Лісосмуги також мають значний позитивний вплив на водний режим території. Вони знижують швидкість вітру, сприяють накопиченню снігу, зменшують ерозію, регулюють поверхневий стік і підвищують загальну екологічну стійкість агроландшафту. Коренева система дерев і кущів покращує структуру ґрунту, а опале листя поповнює запаси органічної речовини.

Рослинний покрив також сприяє зменшенню втрат поживних речовин завдяки їх поглинанню рослинами. Під час активного росту рослини засвоюють азот, фосфор, калій та інші елементи з ґрунтового розчину. Це

знижує концентрацію поживних речовин у воді, яка може переміщуватися по поверхні або проникати в нижні горизонти. Особливо важливим є поглинання нітратного азоту, оскільки він найбільш схильний до вимивання.

Після відмирання рослин або зароблення рослинних решток у ґрунт поживні речовини поступово повертаються у процесі мінералізації. Таким чином, рослинний покрив виконує роль біологічного акумулятора поживних елементів. Він тимчасово зв'язує елементи живлення в рослинній біомасі та запобігає їх швидкій втраті після інтенсивних опадів.

Важливе значення має щільність і тривалість рослинного покриття. Чим повніше поверхня ґрунту вкрита рослинами або рослинними рештками, тим менший ризик поверхневого стоку. Найбільш уразливими є ділянки, які тривалий час залишаються без рослинності, особливо після збирання врожаю, під час осінніх дощів або ранньовесняного танення снігу.

Таблиця 4.3 Роль рослинного покриття у зменшенні поверхневого стоку

Елемент рослинного покриття	Основна дія	Екологічний ефект
Покривні культури	Захищають ґрунт між періодами вирощування основних культур	Зменшення вимивання нітратів і ерозії
Багаторічні трави	Формують густу кореневу систему	Закріплення ґрунту та покращення інфільтрації
Трав'яні буферні смуги	Уповільнюють поверхневий стік	Затримання ґрунтових частинок і фосфору
Лісосмуги	Регулюють мікроклімат і водний режим	Зменшення ерозії та втрат вологи
Рослинні рештки	Захищають поверхню ґрунту після збирання врожаю	Збереження гумусу та поживних речовин

Для підвищення ефективності рослинного покриву його доцільно поєднувати з іншими заходами: мульчуванням, мінімальним обробітком ґрунту, контурним землеробством, раціональним удобренням і створенням протиерозійних смуг. Комплексне використання цих заходів дозволяє зменшити поверхневий стік, покращити водний режим ґрунту та зберегти поживні речовини у верхньому родючому шарі.

Отже, рослинний покрив є важливим природним механізмом захисту ґрунту від поверхневого стоку та втрат поживних елементів. Він зменшує руйнування ґрунтової структури, уповільнює рух води, покращує інфільтрацію, закріплює ґрунтові частинки і сприяє біологічному зв'язуванню поживних речовин. Найбільш ефективними є покривні культури, багаторічні трави, буферні смуги та лісосмуги. Їх використання дає змогу знизити ризик ерозії, вимивання нітратів, втрат фосфору та погіршення родючості ґрунтів.

4.4. Поліпшення структури ґрунту та підвищення вмісту органічної речовини

Поліпшення структури ґрунту та підвищення вмісту органічної речовини є важливими заходами зменшення втрат поживних елементів. Добре структурований ґрунт краще поглинає та утримує воду, має вищу вбирну здатність, забезпечує сприятливі умови для розвитку кореневої системи рослин і діяльності ґрунтових мікроорганізмів. За таких умов поживні речовини довше залишаються у верхньому родючому шарі й менше вимиваються в нижні горизонти.

Структура ґрунту визначається здатністю ґрунтових частинок об'єднуватися в агрегати. Найбільш сприятливою є грудкувато-зерниста структура, за якої ґрунт має оптимальне співвідношення між твердою фазою, водою і повітрям. У добре структурованому ґрунті вода після опадів проникає поступово, частково затримується в порах і стає доступною для рослин. Це зменшує швидкість фільтраційного потоку та ризик вимивання нітратів, калію,

кальцію, магнію й інших рухомих елементів.

Погіршення структури ґрунту, навпаки, посилює втрати поживних речовин. Ущільнення, руйнування агрегатів, утворення ґрунтової кірки та зменшення пористості погіршують проникнення води в ґрунт. У таких умовах частина води стікає по поверхні, спричиняючи ерозію та винесення гумусу, фосфору й дрібних частинок ґрунту. Інша частина води може швидко проходити через великі тріщини або пори, переносячи розчинені речовини в нижчі горизонти.

Одним із головних способів поліпшення структури ґрунту є внесення органічної речовини. Органічна речовина сприяє формуванню стійких ґрунтових агрегатів, підвищує водоутримувальну здатність і покращує умови для розвитку корисної мікрофлори. До джерел органічної речовини належать гній, компост, перегній, сидерати, рослинні рештки, солома, листя та інші органічні матеріали.

Гумус є найважливішою частиною органічної речовини ґрунту. Він виконує роль природного резервуара поживних елементів, особливо азоту, фосфору та сірки. Поживні речовини з гумусу вивільняються поступово, у процесі мінералізації, тому ризик їх швидкого вимивання значно нижчий, ніж після одноразового внесення великих доз мінеральних добрив. Крім того, гумус підвищує ємність катіонного обміну ґрунту, завдяки чому краще утримуються калій, кальцій, магній та амонійний азот.

Важливим заходом є систематичне внесення компосту. Компост містить стабілізовану органічну речовину, яка поступово розкладається в ґрунті та покращує його фізико-хімічні властивості. Використання компосту сприяє підвищенню вмісту гумусу, активізації мікробіологічних процесів, покращенню структури та зменшенню щільності ґрунту. Це особливо важливо для легких піщаних і супіщаних ґрунтів, які мають низьку здатність утримувати воду й поживні речовини.

Ефективним джерелом органічної речовини є сидерати. Сидеральні культури вирощують для подальшого зароблення зеленої маси в ґрунт. Вони

збагачують ґрунт органічними сполуками, покращують його структуру, зменшують ерозію та сприяють накопиченню поживних речовин у біологічній формі. Бобові сидерати, зокрема люпин, вика, конюшина, здатні фіксувати атмосферний азот, а хрестоцвіті та злакові культури формують потужну кореневу систему, яка розпушує ґрунт і покращує водопроникність.

Залишення рослинних решток на поверхні поля або їх часткове зароблення у ґрунт також сприяє підвищенню вмісту органічної речовини. Рослинні рештки захищають ґрунт від прямого впливу дощових крапель, зменшують поверхневий стік і поступово розкладаються, поповнюючи запаси гумусу. Такий підхід є особливо ефективним у поєднанні з мінімальним обробітком ґрунту.

Для поліпшення структури ґрунту важливо запобігати його ущільненню. Ущільнення часто виникає внаслідок руху важкої техніки, особливо по вологому ґрунту. Ущільнений ґрунт має меншу пористість, гірше пропускає воду й повітря, обмежує розвиток кореневої системи та погіршує діяльність мікроорганізмів. Щоб зменшити ущільнення, доцільно обмежувати кількість проходів техніки, використовувати постійні технологічні колії та не проводити обробіток за надмірної вологості ґрунту.

Важливим заходом є також вапнування кислих ґрунтів. За підвищеної кислотності погіршується структура ґрунту, зменшується активність корисних мікроорганізмів і посилюється вимивання кальцію та магнію. Вапнування сприяє нейтралізації надмірної кислотності, поліпшенню умов для гумусоутворення, підвищенню доступності поживних речовин і стабілізації ґрунтових агрегатів.

Підвищення вмісту органічної речовини має не лише агрономічне, а й екологічне значення. Ґрунти, багаті на гумус, краще утримують вологу, мають вищу біологічну активність і більшу стійкість до ерозії. Вони менше втрачають поживні елементи після інтенсивних опадів і краще забезпечують рослини живленням упродовж вегетаційного періоду. Крім того, накопичення органічної речовини сприяє зв'язуванню вуглецю в ґрунті, що є важливим у

контексті зміни клімату.

Таблиця 4.4 Заходи поліпшення структури ґрунту та підвищення вмісту органічної речовини

Захід	Основна дія	Очікуваний ефект
Внесення компосту	Поповнення стабільної органічної речовини	Підвищення вмісту гумусу та вбирної здатності
Використання сидератів	Зароблення зеленої маси в ґрунт	Поліпшення структури та біологічної активності
Залишення рослинних решток	Захист поверхні ґрунту й поступове розкладання органіки	Зменшення ерозії та втрат поживних речовин
Мінімальний обробіток	Збереження природної структури ґрунту	Зменшення руйнування агрегатів і втрат гумусу
Запобігання ущільненню	Обмеження руху техніки по вологому ґрунту	Поліпшення пористості та інфільтрації води
Вапнування кислих ґрунтів	Нейтралізація кислотності	Поліпшення структури та зменшення вимивання основ

Поліпшення структури ґрунту та підвищення вмісту органічної речовини є ключовими умовами зменшення вимивання поживних елементів. Ґрунт із високим вмістом гумусу, доброю агрегатною структурою та достатньою пористістю краще утримує воду й поживні речовини, зменшує поверхневий стік і вертикальну міграцію розчинених сполук. Найбільш ефективними заходами є внесення компосту та органічних добрив, використання сидератів, залишення рослинних решток, мінімальний обробіток, запобігання ущільненню та регулювання кислотності ґрунту. Комплексне застосування цих заходів дозволяє зберегти родючість ґрунтів і знизити екологічні ризики, пов'язані з втратою поживних речовин.

4.5. Природоохоронні заходи для запобігання забрудненню водних об'єктів

Вимивання поживних елементів із ґрунту є небезпечним не лише для родючості земель, а й для стану поверхневих і підземних вод. Під час інтенсивних опадів розчинені сполуки азоту, фосфору, калію, органічні речовини та дрібні частинки ґрунту можуть переноситися поверхневим стоком або фільтраційними водами до річок, озер, ставків, водосховищ і ґрунтових вод. Особливо небезпечними є нітрати та фосфати, оскільки їх надмірне надходження у водойми сприяє евтрофікації, погіршенню якості води та порушенню екологічної рівноваги водних екосистем.

Одним із найважливіших природоохоронних заходів є створення прибережних захисних смуг. Такі смуги розміщують уздовж річок, струмків, озер, ставків, каналів та інших водних об'єктів. Їх основна функція полягає у затриманні поверхневого стоку, зменшенні надходження ґрунтових частинок, залишків добрив, пестицидів та органічних речовин у водойми. Рослинність у межах прибережної смуги уповільнює рух води, сприяє осіданню завислих частинок і частково поглинає поживні речовини.

Важливе значення мають буферні трав'яні смуги між сільськогосподарськими угіддями та водними об'єктами. Вони можуть складатися з багаторічних трав, злакових і бобових культур із густою кореневою системою. Такі смуги зменшують швидкість поверхневого стоку, затримують фосфор, гумус і дрібнозем, а також знижують ризик потрапляння нітратів до водойм. Найбільш ефективними буферні смуги є на схилах і ділянках, де після сильних дощів формується значний стік води.

Для запобігання забрудненню водойм необхідно обмежувати внесення добрив поблизу водних об'єктів. Мінеральні та органічні добрива не слід вносити безпосередньо біля берегової лінії, на схилах, що прилягають до водойм, перед прогнозованими інтенсивними опадами, на мерзлий, перезволожений або вкритий снігом ґрунт. У таких умовах поживні речовини

не встигають засвоїтися рослинами й можуть швидко змиватися у водні об'єкти.

Особливої уваги потребує правильне зберігання органічних добрив. Гній, компост, рідкі органічні добрива та стоки тваринницьких комплексів повинні зберігатися у спеціально обладнаних місцях, захищених від потрапляння атмосферних опадів і витікання забруднених вод у ґрунт або водойми. Неправильне зберігання органічних добрив може спричиняти потрапляння у воду нітратів, амонійного азоту, фосфатів, органічних речовин і мікроорганізмів.

Ефективним заходом є впровадження контурного землеробства на схилових землях. Його суть полягає в тому, що обробіток ґрунту, сівбу та розміщення культур проводять упоперек схилу, а не вздовж нього. Це дозволяє уповільнити рух води, зменшити ерозію та запобігти винесенню поживних речовин у понижені ділянки рельєфу і водні об'єкти.

На територіях із високим ризиком ерозії доцільно застосовувати залуження схилів, створення лісосмуг і терасування. Залуження забезпечує постійний трав'яний покрив, який закріплює ґрунт і зменшує поверхневий стік. Лісосмуги знижують швидкість вітру, сприяють накопиченню снігу, регулюють водний режим і підвищують екологічну стійкість агроландшафту. Терасування дає змогу зменшити швидкість стікання води на крутих схилах і запобігти ерозійному винесенню поживних речовин.

Важливим природоохоронним заходом є створення водоутримувальних і фільтраційних елементів: ставків-відстійників, водозатримувальних каналів, фільтраційних смуг, біоплато та штучних водно-болотних угідь. Такі елементи уповільнюють рух поверхневого стоку, затримують завислі частинки та сприяють частковому очищенню води перед її надходженням до природних водойм.

Особливо перспективним є використання біоплато та штучних водно-болотних угідь. У таких системах очищення води відбувається завдяки поєднанню фізичних, хімічних і біологічних процесів. Рослини,

мікроорганізми та ґрунтово-водне середовище сприяють затриманню завислих речовин, поглинанню частини азоту й фосфору та розкладанню органічних сполук. Це дозволяє зменшити навантаження на річки, озера та ставки.

Для запобігання потраплянню поживних речовин у водойми важливо також регулювати дренажний стік. На дренованих землях розчинені нітрати та інші сполуки можуть швидко потрапляти до каналів і водних об'єктів. Для зменшення таких втрат доцільно застосовувати контрольований дренаж, водозатримувальні споруди, рослинні фільтри та фільтраційні канави.

Необхідним елементом природоохоронної системи є моніторинг якості води. Регулярне визначення вмісту нітратів, фосфатів, амонійного азоту, органічних речовин, завислих частинок і показника рН дозволяє своєчасно виявляти ознаки забруднення. Особливо важливо проводити моніторинг після інтенсивних опадів, танення снігу або внесення добрив, коли ризик надходження поживних речовин у водойми є найвищим.

Таблиця 4.5 Природоохоронні заходи для запобігання забрудненню водних об'єктів

Захід	Основна дія	Очікуваний екологічний ефект
Прибережні захисні смуги	Затримання поверхневого стоку біля водойм	Зменшення надходження добрив, ґрунту й органічних речовин у воду
Буферні трав'яні смуги	Уповільнення руху води на межі поля	Затримання фосфору, гумусу та завислих частинок
Обмеження внесення добрив біля водойм	Недопущення прямого потрапляння поживних речовин у воду	Зниження ризику евтрофікації
Контурне землеробство	Обробіток ґрунту впоперек схилу	Зменшення ерозії та поверхневого стоку

Залуження схилів	Створення постійного трав'яного покриву	Закріплення ґрунту й зменшення винесення поживних речовин
Лісосмуги	Регулювання стоку та захист від ерозії	Підвищення стійкості агроландшафту
Біоплато та водно-болотні угіддя	Природне очищення стічних і дренажних вод	Поглинання частини азоту, фосфору та органічних речовин
Моніторинг якості води	Регулярний контроль показників забруднення	Своєчасне виявлення екологічних ризиків

Природоохоронні заходи для запобігання забрудненню водних об'єктів мають бути спрямовані на зменшення поверхневого стоку, затримання поживних речовин у межах агроландшафту та недопущення їх потрапляння до водойм. Найбільш ефективними є прибережні захисні смуги, буферні трав'яні зони, раціональне внесення добрив, контурне землеробство, залуження схилів, створення лісосмуг, біоплато та систем моніторингу якості води. Комплексне застосування цих заходів дозволяє знизити ризик евтрофікації, зберегти якість поверхневих і підземних вод та підвищити екологічну стійкість території.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі досліджено процеси вимивання поживних елементів із ґрунту внаслідок інтенсивних опадів, проаналізовано основні чинники, що впливають на міграцію речовин у ґрунтовому профілі, та обґрунтовано заходи щодо зменшення втрат елементів живлення. Проведене дослідження підтвердило, що інтенсивні опади є важливим природним фактором, який істотно змінює водний режим ґрунту, посилює вертикальне переміщення вологи, активізує процеси інфільтрації, поверхневого стоку та винесення поживних речовин із верхнього родючого шару.

У першому розділі розкрито теоретичні основи функціонування ґрунту як природної системи та середовища накопичення поживних речовин. Встановлено, що ґрунт є складною біокосною системою, у якій поживні елементи перебувають у різних формах: розчинній, обмінній, органічній, мінеральній та важкодоступній. Найважливішими для живлення рослин є азот, фосфор, калій, кальцій, магній та мікроелементи. Їх доступність залежить від вмісту гумусу, гранулометричного складу, кислотності, вологості, ємності катіонного обміну та біологічної активності ґрунту.

З'ясовано, що найбільш рухомими й уразливими до вимивання є нітратні форми азоту, оскільки вони добре розчиняються у воді та слабо утримуються ґрунтовим вбирним комплексом. Калій має середню рухомість і може переміщуватися у нижні горизонти, особливо на легких за гранулометричним складом ґрунтах. Фосфор, порівняно з азотом, мігрує слабше, оскільки здатний зв'язуватися з ґрунтовими частинками, проте може втрачатися через поверхневий стік та ерозійне винесення дрібнодисперсного матеріалу. Амонійний азот переважно утримується ґрунтовим вбирним комплексом, тому його вертикальна міграція є менш інтенсивною.

У роботі встановлено, що інтенсивні опади сприяють підвищенню вологості нижніх горизонтів ґрунту та посиленню промивного водного режиму. За умов надмірного зволоження вода переміщується вниз по

грунтового профілю та переносить із собою розчинені форми поживних речовин. Найбільші втрати спостерігаються тоді, коли сильні опади випадають після внесення добрив, за відсутності рослинного покриву, на ущільнених ділянках, схилах або на ґрунтах із низьким вмістом гумусу.

У методичній частині обґрунтовано доцільність оцінювання процесів вимивання шляхом порівняння стану ґрунту до і після інтенсивних опадів. Важливими показниками для такого аналізу є вміст нітратного та амонійного азоту, рухомого фосфору, обмінного калію, реакція ґрунтового середовища, вміст гумусу та вологість у різних шарах ґрунтового профілю. Такий підхід дозволяє визначити напрям міграції поживних елементів, оцінити масштаби їх втрат і встановити екологічні ризики для родючості ґрунту та якості водних ресурсів.

За результатами оцінки впливу інтенсивних опадів на вимивання поживних елементів встановлено, що головними чинниками втрат є інтенсивне надходження води в ґрунт, проникнення вологи до глибших шарів, висока рухомість нітратного азоту, вертикальний перерозподіл обмінного калію та недостатнє закріплення рухомих форм елементів у верхньому шарі. Найвищий рівень впливу мають інтенсивне зволоження й переміщення води в ґрунтовому профілі, а також здатність окремих елементів переходити у розчинні форми.

Екологічна небезпека вимивання поживних речовин полягає не лише у зниженні родючості ґрунту, а й у можливому забрудненні підземних і поверхневих вод. Винесення нітратів і фосфатів може сприяти погіршенню якості води, розвитку евтрофікації водойм, порушенню екологічної рівноваги водних екосистем і зменшенню ефективності використання мінеральних добрив. Тому процеси вимивання поживних елементів слід розглядати як важливу агроекологічну проблему.

У четвертому розділі запропоновано заходи щодо зменшення втрат поживних елементів із ґрунту. До найбільш ефективних належать підтримання доброї структури ґрунту, підвищення вмісту органічної речовини,

застосування мульчування, мінімального обробітку, покривних культур, раціонального внесення мінеральних і органічних добрив, використання рослинного покриву для зменшення поверхневого стоку, запобігання ущільненню ґрунту та впровадження протиерозійних заходів. Важливе значення має також екологічний моніторинг стану ґрунтів і водних ресурсів, особливо після періодів сильних опадів.

Дослідження підтвердило, що інтенсивні опади є вагомим чинником втрат поживних елементів із ґрунту, насамперед рухомих форм азоту та калію. Для збереження родючості ґрунтів необхідно поєднувати раціональне удобрення, агротехнічні заходи, підтримання органічної речовини, захист ґрунту від ерозії та систематичний контроль поживного режиму. Реалізація запропонованих заходів сприятиме зменшенню вимивання поживних елементів, підвищенню ефективності використання добрив, збереженню продуктивності ґрунтів і запобіганню забрудненню водних екосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Назаренко І. І., Польчина С. М., Нікорич В. А. Ґрунтознавство : підручник. Чернівці : Книги–ХХІ, 2004. 400 с.
2. Тихоненко Д. Г. та ін. Практикум з ґрунтознавства : навчальний посібник / за ред. Д. Г. Тихоненка. Харків : Майдан, 2009. 447 с.
3. Купчик В. І., Іваніна В. В., Нестеров Г. І. та ін. Ґрунти України: властивості, генезис, менеджмент родючості : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2007. 414 с.
4. Городній М. М., Мельник С. І., Маліновський А. С. та ін. Агрохімія : підручник. Київ : Алефа, 2003. 778 с.
5. Господаренко Г. М. Система застосування добрив : навчальний посібник. Київ : СІК ГРУП УКРАЇНА, 2015. 332 с.
6. Господаренко Г. М. Удобрення сільськогосподарських культур. Київ : СІК ГРУП УКРАЇНА, 2016. 276 с.
7. Лісовал А. П., Макаренко В. М., Кравченко С. М. Система застосування добрив : підручник. Київ : Вид-во АПК, 2002. 350 с.
8. Чорний С. Г. Основи агрономічної хімії : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2020. 284 с.
9. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення / за ред. І. П. Яцука, С. А. Балюка. Київ, 2013. 104 с.
10. Балюк С. А., Медведєв В. В., Тараріко О. Г. та ін. Про стан родючості ґрунтів України : національна доповідь. Київ, 2010. 111 с.
11. Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 239 с.
12. Медведєв В. В., Пліско І. В., Криlach С. І., Накісько С. Г., Уваренко К. Ю. Фізична деградація орних ґрунтів України: оцінювання, профілактика, призупинення. Харків : ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені

О. Н. Соколовського», 2020. 110 с.

- 13.Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми і стратегія сталого управління. Український географічний журнал. 2021. № 2. С. 3–11. DOI: 10.15407/ugz2021.02.003.
- 14.Балюк С. А., Медведєв В. В., Мірошніченко М. М., Скрильник Є. В., Тимченко Д. О., Фатєєв А. І., Христенко А. О., Цапко Ю. Л. Екологічний стан ґрунтів України. Український географічний журнал. 2012. № 2. С. 38–42.
- 15.Закон України «Про охорону земель» від 19.06.2003 р. № 962-IV.
- 16.Закон України «Про державний контроль за використанням та охороною земель» від 19.06.2003 р. № 963-IV.
- 17.Водний кодекс України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР.
- 18.ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. Київ : Держспоживстандарт України, 2005.
- 19.FAO, ITPS. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- 20.FAO. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017.
- 21.FAO. The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.
- 22.IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2021.
- 23.Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. Official Journal of the European Communities. 1991.
- 24.USDA NRCS. Nutrient Management Conservation Practice Standard. Code 590. Washington, DC : United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2022.

25. Brady N. C., Weil R. R. The Nature and Properties of Soils. 15th ed. Boston : Pearson, 2017. 1104 p.
26. Havlin J. L., Tisdale S. L., Nelson W. L., Beaton J. D. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 8th ed. Boston : Pearson, 2014. 528 p.
27. Marschner P. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. London : Academic Press, 2012. 672 p.
28. Sparks D. L. Environmental Soil Chemistry. 2nd ed. San Diego : Academic Press, 2003. 352 p.
29. Hillel D. Introduction to Environmental Soil Physics. Amsterdam : Elsevier Academic Press, 2004. 494 p.
30. Cameron K. C., Di H. J., Moir J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Annals of Applied Biology*. 2013. Vol. 162, № 2. P. 145–173. DOI: 10.1111/aab.12014.
31. Di H. J., Cameron K. C. Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2002. Vol. 64. P. 237–256. DOI: 10.1023/A:1021471531188.
32. Haygarth P. M., Jarvis S. C. Transfer of phosphorus from agricultural soils. *Advances in Agronomy*. 1999. Vol. 66. P. 195–249. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60428-9.
33. Carpenter S. R., Caraco N. F., Correll D. L., Howarth R. W., Sharpley A. N., Smith V. H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*. 1998. Vol. 8, № 3. P. 559–568. DOI: 10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2.
34. Quemada M., Baranski M., Nobel-de Lange M. N. J., Vallejo A., Cooper J. M. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. Vol. 174. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.agee.2013.04.018.
35. Tonitto C., David M. B., Drinkwater L. E. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and

- N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2006. Vol. 112, № 1. P. 58–72. DOI: 10.1016/j.agee.2005.07.003.
36. Dabney S. M., Delgado J. A., Reeves D. W. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2001. Vol. 32, № 7–8. P. 1221–1250. DOI: 10.1081/CSS-100104110.
37. Blanco-Canqui H., Shaver T. M., Lindquist J. L., Shapiro C. A., Elmore R. W., Francis C. A., Hergert G. W. Cover crops and ecosystem services: insights from studies in temperate soils. *Agronomy Journal*. 2015. Vol. 107, № 6. P. 2449–2474. DOI: 10.2134/agronj15.0086.
38. Nouri A., Lukas S., Singh S., Singh S., Machado S. When do cover crops reduce nitrate leaching? A global meta-analysis. *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28, № 15. P. 4736–4749. DOI: 10.1111/gcb.16269.
39. Ockenden M. C., Hollaway M. J., Beven K. J., Collins A. L., Evans R., Falloon P. D., Forber K. J., Hiscock K. M., Haygarth P. M. et al. Major agricultural changes required to mitigate phosphorus losses under climate change. *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. Article 161. DOI: 10.1038/s41467-017-00232-0.
40. Da Costa D., Sutter C., Shepherd A., Jarvie H., Wilson H., Elliott J., Liu J., Macrae M. Impact of climate change on catchment nutrient dynamics: insights from around the world. *Environmental Reviews*. 2023. Vol. 31, № 1. P. 4–25. DOI: 10.1139/er-2021-0109.

