

УДК 338.43

КОРЕЛЯЦІЙНО-РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЧИННИКІВ СЕРЕДОВИЩА НА КОЕФІЦІЄНТ ФІТОМЕЛІОРАТИВНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОГЕННИХ ЛАНДШАФТІВ

О. Мандрик, д. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-2689-7165

В. Тирлич, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0002-6609-1975

К. Барабан, аспірантка

ORCID ID: 0009-0001-7429-4051

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу<https://doi.org/0.31734/agronomy2025.29.022>

Мандрик О., Тирлич В., Барабан К. Кореляційно-регресійний аналіз впливу чинників середовища на коефіцієнт фіто меліоративної ефективності техногенних ландшафтів

У статті висвітлено результати кореляційно-регресійного аналізу, спрямованого на виявлення взаємозв'язків між коефіцієнтом фіто меліоративної ефективності (КФЕ) та фізико-хімічними параметрами середовища техногенних ландшафтів, зокрема впливу вмісту важких металів у стічних водах. Об'єктом дослідження є породний відвал шахти «Межирічанська» ДП «Львіввугілля», який перебуває у стані природної фіторекультивациї. Дослідження проводили з урахуванням просторової відповідності між точками визначення КФЕ та місцями відбору проб, що забезпечило достовірність статистичного моделювання.

З метою виявлення ключових факторів, що визначають формування рослинного покриву на деградованих територіях, застосовано методи кореляційно-регресійного аналізу. Встановлено статистично достовірні взаємозв'язки між КФЕ й такими параметрами, як кислотність ґрунту, освітленість, вологість повітря, рівень радіаційного фону та концентрацій Mn, K, Ca, Mg у стічних водах, що інфільтруються через масив терикону. Значення даних хімічних елементів виявилися максимальними серед усіх досліджених у межах вибірки, що обумовлює їх пріоритетне включення до статистичного аналізу.

Побудовані багатофакторні моделі дали змогу кількісно оцінити силу впливу кожної змінної. Встановлено, що значний вплив на формування рослинного покриву має вміст кальцію у стічних водах терикону, тоді як підвищення кислотності ґрунту є чинником, що істотно знижує значення КФЕ. Аналіз часткових коефіцієнтів еластичності дозволив визначити та уточнити пріоритетність дії факторів на формування рослинного покриву.

Результати отриманих нами досліджень слугують для розробки адаптивних стратегій фіторекультивациї та підвищення екологічної безпеки деградованих ландшафтів гірничопромислових регіонів. Запропонований підхід забезпечує наукове обґрунтування пріоритетності впливу окремих чинників і дозволяє формувати ефективні фітотехнології реабілітації територій, порушених вугільною промисловістю.

Ключові слова: фіто меліорація, кореляційно-регресійний аналіз, важкі метали, екологічна безпека, техногенні ландшафти, коефіцієнт фіто меліоративної ефективності.

Mandryk O., Tyrlych V., Baraban K. Correlation-regression analysis of the influence of environmental factors on the phytomeliorative efficiency coefficient of technogenic landscapes

The article presents results of the correlation-regression analysis aimed at identifying relationships between the phytomeliorative efficiency coefficient (PEC) and the physical-chemical parameters of technogenic landscape environments, particularly the influence of heavy metal present in wastewater. The research object is the spoil heap of the "Mezhyrichanska" coal mine of SE "Lvivuhillia", currently undergoing natural phytoremediation. The study accounted for spatial correspondence between PEC measurement points and sampling locations, ensuring the reliability of the statistical modeling.

To identify the key factors influencing vegetation cover formation on degraded areas, the correlation-regression analysis methods were applied. Statistically significant relationships were established between PEC and such parameters as soil acidity, light intensity, air humidity, radiation background, and concentrations of Mn, K, Ca, and Mg in wastewater infiltrating through the spoil heap body. These chemical elements showed the highest values among all those studied within the sample set, justifying their prioritization in statistical evaluation.

The constructed multifactorial models allowed for quantitative assessment of the influence strength of each variable. It was found that the calcium content in the wastewater has a considerable effect on vegetation cover development, while increased soil acidity is a factor that significantly reduces the PEC. The analysis of partial elasticity coefficients enabled the identification and clarification of the factor impact hierarchy on vegetation formation.

The obtained results contribute to the development of adaptive phytoremediation strategies and the enhancement of ecological safety in degraded landscapes of mining regions. The proposed approach provides scientific justification for prioritizing certain environmental factors and supports the development of effective phytotechnologies for the rehabilitation of areas affected by coal mining.

Keywords: phytomelioration, correlation-regression analysis, heavy metals, ecological safety, technogenic landscapes, phytomeliorative efficiency coefficient.

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток гірничодобувної промисловості призводить до масштабної деградації природних ландшафтів, порушення структури ґрунтового покриву, накопичення важких металів і радіоактивних елементів у навколишньому середовищі. Одним із найбільш ефективних підходів до реабілітації дегазованих територій є фіторекультивація, успішність якої залежить від адаптивних можливостей рослинних угруповань до несприятливих фізико-хімічних умов [1–4].

Проте недостатня кількість екологічних досліджень щодо кількісного впливу окремих забруднювальних чинників на фітомеліоративну ефективність доводить ускладнює розробку ефективних програм його відновлення. Виникає потреба у застосуванні математичних методів аналізу, зокрема кореляційно-регресійного аналізу, для комплексної оцінки взаємозв'язків між рівнем забруднення середовища та реакцією рослинного покриву.

Тому встановимо кількісні залежності між основними фізико-хімічними чинниками екотопу (вмістом важких металів, рівнем радіаційного фону, вологістю субстрату) та фітомеліоративною ефективністю рослинного покриву на території породних відвалів. Для досягнення цієї мети застосовано методи кореляційно-регресійного аналізу, що дозволяють виявити провідні фактори впливу та кількісно оцінити їхній внесок у формування фітоценозів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Природна рослинність та біорозмаїття – важливі чинники для відновлення та реабілітації териконів у Львівсько-Волинському вугільному басейні та інших регіонах [5].

У досліджуваному районі внаслідок видобувної діяльності відбувається деформація земної поверхні, зростає концентрація забруднювальних компонентів в атмосферному повітрі, зокрема: токсичного пилу, шкідливих газів та продуктів хімічних реакцій; фіксуються явища підтоплення та засолення ґрунтів, спостерігається забруднення підземних і поверхневих вод, а також загострюються соціально-економічні диспропорції, що сприяє формуванню депресивних зон. Одним із критичних екологічних наслідків є зменшення біологічного та ландшафтного різноманіття [6; 7].

Основоположниками наукового напрямку фітомеліорації були відомі науковці: В. І. Вернадський, В. В. Докучаєв, О. О. Ніценко, О. Л. Бельгард, В. М. Маурер, Х. Пойкер, В. П. Кучерявий, М. І. Гордієнко, О. І. Новосельцева, Ф. М. Бровко, У. М. Башуцька, Н. Г. Міронова, Я. В. Генік, А. В. Павличенко, В. В. Попович, М. Л. Копій, Я. В. Генік та ін. [8–11].

Висоцький Г. М. одним із перших сформулював цілісну теоретичну основу фітомеліорації, систематизувавши розрізнені емпіричні спостереження та практичні напрацювання у вигляді науково обґрунтованої теорії [12]. У праці доведено доцільність застосування конкретного видового складу рослин для озеленення та екологічної стабілізації техногенних ландшафтів цього регіону.

Вагомий внесок у розвиток теорії та практики фітомеліорації зробила Н. Г. Міронова, яка зосередила свої дослідження на вивченні закономірностей формування фітоценозів у техногенно порушених ландшафтах. У її працях розкрито механізми адаптації рослин до екстремальних едафо-кліматичних умов, а також обґрунтовано доцільність використання певних фітомеліорантів для стабілізації порушених екосистем [13].

Наукова праця В. П. Кучерявого [10] присвячена класифікації сукцесій біогеоценологічного покриву урбоценозів, має важливе значення для вдосконалення систем моніторингу та прогнозування екологічного стану урбанізованих територій.

У результаті досліджень, проведених низкою науковців [3; 10; 13; 14], встановлено, що на породних відвалах, розташованих в умовах кліматичних і едафічних особливостей України, можливо успішно культивувати близько 40 видів деревних і чагарникових порід. До рекомендованого асортименту належить, зокрема, липа дрібнолиста (*Tilia cordata*), яблуня лісова (*Malus sylvestris*), клен польовий (*Acer campestre*) і клен ясенелистий (*Acer negundo*), сосна звичайна (*Pinus sylvestris*), тополя канадська (*Populus × canadensis*) і чорна (*Populus nigra*), береза повисла (*Betula pendula*), клен татарський (*Acer tataricum*), акація жовта (*Caragana arborescens*) та бирючина звичайна (*Ligustrum vulgare*).

У науковій праці У. Б. Башуцької досліджено теоретичні й прикладні аспекти формування фітомеліоративного покриву на породних відвалах

вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району на основі аналізу антропогенно-природних сукцесій рослинності. Авторка проаналізувала трансформацію компонентів ландшафту, едафічні властивості шахтних порід, мікрокліматичні умови та формування як природних, так і штучних деревних насаджень.

Монографія В. В. Поповича [15] присвячена вивченню фітомеліорації затухаючих териконів вугільних шахт Нововолинського гірничопромислового регіону. У дослідженні охарактеризовано видовий склад рослинності, що бере участь у процесах природного заростання та рекультивації териконів, проаналізовано фітоценотичну та просторову структуру рослинних угруповань на різних типах відвалів, динаміку стадій сукцесій, щільність і розподіл особин у межах популяцій, а також фітомеліоративну ефективність зазначених угруповань.

У науковій праці Н. Л. Колесник [16] проаналізовано формування рослинних фітоценозів на техногенно порушених територіях різного ступеня відновлення та типу рекультивації в межах Яворівського й Новороздільського сірчаних кар'єрів. Досліджено основні хімічні характеристики техноземів, зокрема показники, що впливають на фітоценогенез і ґрунтоутворення.

Отже, одна з основних екологічних проблем – втрата родючого верхнього шару ґрунту під час будівництва (нашарування породних відвалів) і експлуатації териконів. А обробка та утилізація відходів вугільної гірничодобувної і енергетичної промисловості призводить до забруднення ґрунту та ґрунтових вод. Контамінація ґрунтового покриву внаслідок впливу породних відвалів (териконів) становить суттєву екологічну загрозу, оскільки спричиняє деградацію ґрунтових властивостей і порушення природної рівноваги геоекосистем. Важкі метали, як-от свинець, кадмій, ртуть, інші органічні сполуки та токсичні хімікати, що містяться у териконах, потрапляючи у ґрунт, впливають на його якість та призводять до його забруднення.

Отже, екологічна загроза породних відвалів, зумовлена комплексом чинників, серед яких ключову роль відіграють хімічна та мінералогічна структура техногенних порід, специфіка фізико-хімічних трансформацій як ендегенного, так і екзогенного характеру, а також кліматичні, гідрогеологічні й геоморфологічні умови середовища. Кожен відвал, залежно від географічного положення та інженерно-геологічних особливостей, виявляє індивідуальні морфологічні та екологічні характеристики, що зумовлюють його специфічний негативний вплив як на компоненти довкілля, так і на стан здоров'я людей [17; 18].

Проте, незважаючи на значну кількість публікацій із цієї тематики, питання оцінювання довгострокової ефективності різних типів рекультиваційних заходів, аналізу фітоценотичної динаміки на різних етапах сукцесії, ролі місцевих видів у фітомеліорації, а також соціально-екологічного ефекту відновлення порушених територій, залишається відкритим.

Постановка завдання. Аналіз літературних джерел показав, що, попри значний обсяг досліджень, окремі питання залишаються недостатньо вивченими або потребують подальшого уточнення в контексті регіональних особливостей, зокрема Червоноградського гірничопромислового району. Тому постає потреба у комплексному дослідженні, яке поєднувало б теоретичні положення та польові дослідження з метою формування цілісного бачення перспектив сталого використання техногенних ландшафтів.

Така комплексна оцінка екологічного стану техногенно порушених територій потребує не лише збору ізольованих показників, а й виявлення статистично достовірних взаємозв'язків між ними. Кореляційно-регресійний аналіз – ефективний інструмент математичної обробки даних, що дозволяє оцінити ступінь і напрям взаємозв'язків між екологічними показниками, а також побудувати аналітичні моделі, здатні прогнозувати зміни у стані середовища під впливом окремих чинників.

Кореляційно-регресійний аналіз – це побудова та аналіз математичної моделі у вигляді рівняння регресії (рівняння кореляційного зв'язку), що відображає залежність результативної ознаки від однієї або кількох ознак факторів і надає оцінку міри тісноти зв'язків [19; 20]. Це класичний метод імовірнісного моделювання, який вивчає взаємозв'язки, що встановлюються в середньому для великої сукупності даних, одержаних з інформаційної бази, яка має досить типові та надійні статистичні характеристики. При цьому враховуються якісна однорідність (наближеність умов формування результативних і факторних ознак) та кількісна однорідність (відсутність одиниці спостереження, яка за числовими характеристиками суттєво відрізняється від основної маси даних) [21].

Отже, застосування кореляційно-регресійного аналізу дасть змогу виявити статистично достовірні взаємозв'язки між фізико-хімічними та біоіндикаційними показниками техногенно змінених територій.

Виклад основного матеріалу. Дослідження ми проводили на породному відвалі шахти «Межи-

річанська» ДП «Львіввугілля» (Червоноградський район, Львівська область). Об'єктом дослідження слугували території, що перебувають у стадії природної фітомеліорації. Основним завданням було визначити вплив фізико-хімічних характеристик середовища та вмісту важких металів у шахтних водах на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності рослинного покриву.

Для збору емпіричних даних на шести ділянках породного відвалу заклали пробні площі розміром 10×10 м. На кожній ділянці проводили такі вимірювання:

- рівня освітленості (лк);
- відносної вологості повітря (%);
- кислотності ґрунту (рН);
- проєктивного покриття рослинного покриву (%);
- рівня радіаційного фону (мкЗв/год);
- концентрацій важких металів (Mn, K, Ca, Mg) у шахтних водах.

Коефіцієнт фітомеліоративної ефективності (КФЕ) розраховували за бальною шкалою відповідно до площі, зайнятої окремими типами рослинних угруповань.

Для виявлення взаємозв'язків між КФЕ та досліджуваними факторами застосовували метод кореляційно-регресійного аналізу. Кореляційний аналіз дозволив оцінити тісноту зв'язку між результативною ознакою (КФЕ) та факторами середовища [20], а регресійний аналіз – визначити математичні залежності впливу факторних ознак на результативну [21].

Для проведення аналізу використали дані проведених експериментальних досліджень (табл. 1, 2).

Зв'язок між показниками описували рівняннями лінійної множинної регресії вигляду:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots + a_nx_n, \quad (1)$$

де: y – розрахункові значення результативної ознаки-функції, за яку приймемо коефіцієнт фітомеліоративної ефективності; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – факторні ознаки для кожного з окремо перелічених факторів, тобто рівень освітленості, відносна вологість повітря, кислотність ґрунту, проєктивне перекриття, рівень радіаційного фону; $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ – коефіцієнти рівняння регресії, які обчислюють методом найменших квадратів.

Таблиця 1

Таблиця мікрокліматичних показників досліджуваного породного відвалу

№ з/п	КФМ (рослинне покриття)	Рівень освітлення, лк	Відносна вологість повітря, %	Кислотність ґрунту, рН	Проєктивне покриття рослинного покриву, %	Радіація, мкЗв/год
1	1,5	46500	53,4	5,5	17,5	0,28
2	4	44150	50,1	6	62,5	0,32
3	4,5	45230	55	5,7	60	0,3
4	5	39550	56	5,8	70	0,29
5	3	38590	49	6,1	65	0,27
6	1,5	46500	53,4	5,5	17,5	0,28
7	3	41500	54,1	4,9	45	0,27
8	5	40700	59,5	6,2	75	0,32
9	3,5	39940	49,6	5,6	45	0,24
10	3,5	38150	54,1	5,2	35	0,28
11	1,5	46500	53,4	5,5	17,5	0,28
12	2,5	42890	51,1	6	45	0,28
13	1,5	41900	57	5,7	55	0,27
14	5	45800	56,7	6,1	75	0,25
15	2,5	39620	54	5,4	35	0,22
16	1,5	46500	53,4	5,5	17,5	0,28
17	3,5	48670	52,7	6	85	0,28
18	5	43600	57,1	5,3	65	0,31
19	5,5	39850	54	5,5	50	0,31
20	2,5	38900	51	5,1	35	0,21

Таблиця 2

Наявність вмісту важких металів у стічних водах досліджуваного терикону

№ з/п	KFM (рослинне покриття)	Марганець (Mn)	Калій (K)	Кальцій (Ca)	Марганець (Mg)
1	1.5	1.65	0.88	11.45	7.5
2	4	59.3	8.9	278.5	333.2
3	4.5	51.7	0.58	175.1	35.3
4	5	8.2	0.4	91.2	294.4
5	3	45	7.1	167	134.9
6	1.5	1.65	0.88	11.47	7.5
7	3	32.1	3.2	23.9	290.5
8	5	45.9	2.3	203.92	45.2
9	3.5	13.4	9.2	90.3	55.67
10	3.5	4.56	3.9	45.2	73.1
11	1.5	1.65	0.88	11.47	7.5
12	2.5	2.1	0.23	111.7	33.1
13	1.5	89.2	9.1	167.3	134.59
14	5	23	0.45	125.9	195.23
15	2.5	10.4	0.56	20.4	35.6
16	1.5	1.65	0.88	11.47	7.5
17	3.5	25.7	0.9	145.45	255.9
18	5	5.6	2.81	132.1	34.9
19	5.5	45.1	4.78	168.6	210.34
20	2.5	5.5	0.78	59.4	104.8

Аналогічне рівняння будували для аналізу впливу вмісту важких металів у шахтних водах, де факторами слугували концентрації важких металів: Mn, K, Ca, Mg.

Розрахунки здійснювали із застосуванням функціоналу статистичних розрахунків у програмному середовищі Microsoft Excel. Для перевірки значущості моделі та окремих коефіцієнтів застосовували критерії Фішера та Стьюдента, визначали коефіцієнт детермінації та матрицю парних коефіцієнтів кореляції.

Оцінка наявності мультиколінеарності проводили аналізом парних кореляційних зв'язків між незалежними змінними.

Кореляційно-регресійний аналіз впливу фізико-хімічних характеристик середовища на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності

Для оцінки впливу фізико-хімічних характеристик середовища на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності рослинного покриття породного відвалу шахти «Межирічанська» було проведено кореляційно-регресійний аналіз. Факторними ознаками слугували: рівень освітленості (лк), відносна вологість повітря (%), кислотність ґрунту (рН), проєктивне покриття рослинного покриття (%) та рівень радіаційного фону (мкЗв/год).

Зв'язок між досліджуваними показниками описували за допомогою рівняння множинної лінійної регресії:

$$y = 3,6895 + 0,0483x_1 - 0,7993x_2 + 0,0389x_3 - 9,86 \times 10^{-5}x_4 + 13,9445x_5, \quad (2)$$

де: y – коефіцієнт фітомеліоративної ефективності; x_1 – проєктивне покриття рослинного покриття (%); x_2 – кислотність ґрунту (рН); x_3 – відносна вологість повітря (%); x_4 – рівень освітлення (лк); x_5 – рівень радіаційного фону (мкЗв/год).

За результатами аналізу встановили:

- збільшення рівня освітленості на 1 лк приводить до зменшення коефіцієнта фітомеліоративної ефективності на 0,0000986 бала;
- підвищення відносної вологості повітря на 1 % зумовлює збільшення коефіцієнта на 0,0389 бала;
- збільшення кислотності ґрунту на 1 рН сприяє до зменшення коефіцієнта на 0,7993 бала;
- зростання проєктивного покриття на 1 % приводить до збільшення коефіцієнта на 0,0483 бала;
- підвищення рівня радіаційного фону на 1 мкЗв/год обумовлює збільшення коефіцієнта на 13,9445 бала.

Коефіцієнт детермінації моделі $R^2 = 0,7009$ вказує на те, що близько 70 % варіації результативної ознаки за рахунок включених до моделі факторів.

Перевірка загальної значущості рівняння за критерієм Фішера підтвердила його статистичну надійність (F -статистика вища за табличне значення при рівні значущості 0,05).

Аналіз статистичної значущості окремих коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стюдента показав, що найбільш вагомим чинником є проєктивне покриття рослинного покриву (%), для якого розрахункове значення перевищує критичне, тобто цей фактор статично значущий. Матриця парних коефіцієнтів кореляції між змінними вказує на відсутність мультиколінеарності, що забезпечує коректність побудованої моделі.

Кореляційно-регресійний аналіз впливу вмісту важких металів у стічних водах на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності

З метою оцінки впливу концентрацій важких металів на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності (КФЕ) рослинного покриву породного відвалу шахти «Межирічанська» проведено багатофакторний кореляційно-регресійний аналіз. Як факторні ознаки розглядали концентрації марганцю (Mn), калію (K), кальцію (Ca) та магнію (Mg) у шахтних водах.

У результаті розрахунку одержали рівняння множинної лінійної регресії, яке має вигляд:

$$y = 2,0422 - 0,0245x_1 - 0,0906x_2 + 0,0163x_3 + 0,0035x_4, \quad (3)$$

де: y – коефіцієнт фітомеліоративної ефективності; x_1 – концентрація марганцю (Mn), мг/дм³; x_2 – концентрація калію (K), мг/дм³; x_3 – концентрація кальцію (Ca), мг/дм³; x_4 – концентрація магнію (Mg), мг/дм³.

Аналіз коефіцієнтів регресії засвідчив такі закономірності:

- підвищення вмісту марганцю у воді на 1 мг/дм³ призводить до зниження КФЕ на 0,0245 бала;
- зростання концентрації калію на 1 мг/дм³ зменшує КФЕ на 0,0906 бала;
- збільшення вмісту кальцію на 1 мг/дм³ сприяє підвищенню КФЕ на 0,0163 бала;
- підвищення вмісту магнію на 1 мг/дм³ збільшує КФЕ на 0,0035 бала.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,5543$, що свідчить про те, що 55,43% варіації результативної ознаки пояснюється змінами факторних ознак.

Перевірка моделі за допомогою F -статистики розподілу Фішера показала, що коефіцієнт детермінації R^2 статистично значущий і рівняння регресії статистично надійне, тобто між усіма вхідними змінними в цілому та вихідною змінною є лінійна залежність при рівні значущості $\alpha = 0,05$.

Статистична оцінка окремих коефіцієнтів регресії за допомогою t -критерію Стюдента показала, що лише концентрація кальцію має статистично значущий вплив на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності (t -статистика для кальцію перевищила критичне значення).

Матриця парних коефіцієнтів кореляції між факторами виявила наявність мультиколінеарності, що вказує на взаємозалежність певних факторних ознак (наприклад, між марганцем та калієм, марганцем та кальцієм).

Згідно з аналізом часткових коефіцієнтів еластичності, найбільший вплив на зміну КФЕ має концентрація кальцію у воді. Збільшення вмісту кальцію на 1 % викликає збільшення КФЕ на 0,511 %.

Оцінка мультиколінеарності факторів і статистична значущість моделей

Для перевірки коректності побудованих регресійних моделей проаналізовано мультиколінеарність факторних ознак на основі обчислення парних коефіцієнтів кореляції.

Оцінка мультиколінеарності у моделі з фізико-хімічними характеристиками середовища

Матриця парних коефіцієнтів кореляції між рівнем освітленості, відносною вологістю повітря, кислотністю ґрунту, проєктивним покриттям рослинного покриву та рівнем радіації показала, що всі коефіцієнти кореляції перебувають у межах, які вказують на не тісний зв'язок між незалежними змінними (показники не перевищували 0,7).

Отже, мультиколінеарність у цій моделі відсутня, що забезпечує надійність оцінок коефіцієнтів регресії.

Оцінка мультиколінеарності у моделі із вмістом важких металів

У моделі, що аналізувала вплив важких металів на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності, виявлено наявність мультиколінеарності між окремими факторами, зокрема:

- між концентраціями марганцю та калію ($r = 0,6209$);
- між концентраціями марганцю та кальцію ($r = 0,7517$).

Така взаємозалежність факторів може впливати на точність оцінки коефіцієнтів регресії та потребує обережної інтерпретації результатів.

Статистична значущість моделей

Для моделі фізико-хімічних характеристик середовища:

- коефіцієнт множинної кореляції утворив: $R = 0,8859$, що свідчить про сильний зв'язок між результативною і факторними ознаками;

- коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,7009$ вказує, що 70 % варіації результативної ознаки пояснюється зміною входних змінних;

- значення F -статистики підтвердило статистичну значущість рівняння на рівні 0,05.

Для моделі впливу важких металів:

• коефіцієнт множинної кореляції становив $R = 0,7445$;

• коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,5543$;

• статистична перевірка за критерієм

Фішера показала, що модель статистично надійна при рівні значущості 0,05.

Оцінка окремих коефіцієнтів регресії за t -критерієм Стюдента в обох моделях показала, що не всі фактори мають статистично значущий вплив. У моделі фізико-хімічних характеристик середовища статистично значущим фактором виявилось проєктивне покриття рослинного покриву, тоді як у моделі важких металів – концентрація кальцію у воді.

Аналіз часткових коефіцієнтів еластичності

Для оцінки сили впливу кожної факторної ознаки на результативну ознаку – коефіцієнт фітомеліоративної ефективності – обчислено часткові коефіцієнти еластичності. Вони показують, на скільки відсотків зміниться КФЕ при зміні на 1 % відповідного факторного показника за незмінності інших факторів.

Результати для моделі фізико-хімічних характеристик середовища

На основі розрахунків встановлено такі часткові коефіцієнти еластичності:

• збільшення кислотності ґрунту (рН) на 1 % спричиняє зменшення коефіцієнта фітомеліоративної ефективності на 1,374 %;

• підвищення рівня освітленості на 1 % призводить до зменшення КФЕ на 1,287 %;

• зростання відносної вологості повітря на 1 % спричиняє збільшення КФЕ на 0,638 %;

• збільшення проєктивного покриття рослинного покриву на 1 % сприяє зростанню КФЕ на 0,717 %;

• підвищення рівня радіаційного фону на 1 % обумовлює збільшення КФЕ на 1,179 %.

Найбільш впливовими факторами у цій моделі є кислотність ґрунту, рівень освітленості та радіаційний фон.

Результати для моделі вмісту важких металів

Аналіз показав такі часткові коефіцієнти еластичності:

• Підвищення концентрації кальцію (Ca) на 1 % збільшує коефіцієнт фітомеліоративної ефективності на 0,511 %.

• Зростання вмісту марганцю (Mn) на 1 % спричиняє зменшення КФЕ на 0,177 %.

• Підвищення концентрації калію (K) на 1 % зменшує КФЕ на 0,0812 %.

• Підвищення концентрації магнію (Mg) на 1 % збільшує КФЕ на 0,124 %.

Отже, найбільший позитивний вплив серед досліджених важких металів має концентрація кальцію у воді.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що серед фізико-хімічних характеристик середовища домінуючим чинником із негативним впливом є кислотність ґрунту, тоді як серед вмісту важких металів основним позитивним чинником є концентрація кальцію. Інші фактори виявилися менш впливовими за абсолютними значеннями еластичності.

Висновки. У результаті проведеного кореляційно-регресійного аналізу встановлено, що фізико-хімічні характеристики середовища, зокрема кислотність ґрунту, рівень освітленості та проєктивне покриття рослинного покриву, мають суттєвий вплив на коефіцієнт фітомеліоративної ефективності рослинного покриву породного відвалу шахти «Межирічанська».

Згідно з результатами регресійного моделювання, найбільш вагомий негативний вплив на рівень фітомеліоративної ефективності має підвищення кислотності ґрунту, тоді як збільшення проєктивного покриття і відносної вологості повітря позитивно корелює з покращенням фітомеліоративного процесу.

Аналіз впливу вмісту важких металів у шахтних водах показав, що концентрація кальцію має статистично значущий позитивний вплив на підвищення коефіцієнта фітомеліоративної ефективності. Натомість підвищення вмісту марганцю і калію сприяє його зниженню.

Виявлено, що у моделі фізико-хімічних характеристик мультиколінеарність відсутня, тоді як у моделі важких металів зафіксована помірна мультиколінеарність між окремими факторами, що потребує обережної інтерпретації впливу кожного окремого елемента.

Використання часткових коефіцієнтів еластичності дало змогу кількісно оцінити ступінь впливу окремих факторів на результативну ознаку. Найбільший відносний негативний вплив серед усіх досліджених параметрів має підвищення кислотності ґрунту, а найбільший позитивний – концентрація кальцію у воді.

Отримані результати важливі для обґрунтування екологічних заходів щодо рекультивативних породних відвалів, спрямованих на покращання фітомеліоративних процесів та підвищення рівня екологічної безпеки гірничопромислових територій.

Бібліографічний список

1. Кучерявий В. П. Фітомеліорація: Львів: Світ, 2003. 540 с.
2. Башущка У. Б. Антропогенно-природні сукцесії рослинності деастрованих ландшафтів Червоноградського гірничопромислового регіону: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.03.01. Львів, 2004. 214 с.
3. Озеленення териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну. *Науковий вісник УкрДЛТУ: зб. наук.-техн. праць*. 2000. Вип. 10.2. С. 61–63.
4. Бессонова В. П. Практикум з фізіології рослин. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ. 2006. 316 с.
5. Барабан К. І., Приходько М. М. Біоіндексація деастрованих ґрунтів в зоні впливу териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України: Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (м. Харків, 2–3 листопада 202 р.)*. 2023. С. 195–197.
6. Воробійов С. Г. Захист територій, прилеглих до породних відвалів, від надходження забруднювальних речовин (на прикладі Луганської області): автореф. дис. канд. техн. наук. Київ, 2011. 22 с.
7. Горобей М. С., Улицький О. А., Бойко К. Є., Клименко О. Аналіз результатів досліджень техногенного забруднення довкілля територій навколо вуглевидобувних підприємств. *Науково-практичний журнал Екологічні науки*. 2020. Т. 33, № 6. С. 57–61. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.8>
8. Вакерич М. М., Кишко К. М., Гедзур Т. І., Глюдзик-Шемота М. Ю. Ґрунтознавство: навч.-метод. посібник: Ужгород, 2022. 94 с.
9. Кучерявий В. П. Урбоекологія: Львів: «Новий світ-2000», 2020. 460 с.
10. Луньова О. В. Особливості формування техноекосистем вугільних родовищ та оцінка екологічних ризиків. *Геотехнічна механіка*. 2019. № 149. С. 58–67. <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.058>
11. Висоцький С. П., Козир Д. А. Контроль екологічного стану породних відвалів. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 3 (131). С. 12–18.
12. Основи екології: підручник для студ. вищ. навч. закл. / за заг. ред. д-ра екон. наук, проф. Л. Г. Мельника та канд. екон. наук, проф. М. К. Шапочки. Суми: Університетська книга, 2017. 759 с.
13. Мандрик О. М., Охарев В. О., Триснюк Т. В., Михайлюк Р. Й. Моніторинг забруднення басейну Дністра внаслідок підтоплення та інших надзвичайних ситуацій. *Екологічна безпека та природокористування*. 2022. № 43 (3). С. 35–42. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.3.35-42>
14. Попович В. В. Фітомеліорація згасаючих териконів Львівсько-Волинського вугільного басейну: монографія. Львів: ВР та НВД ЛДУБЖД, 2014. 174 с.
15. Колесник Н. Л. Важкі метали в екосистемі ставів та їх вплив на рибопродуктивність і харчову цінність риби в умовах інтенсивного вирощування: автореф. дис. ... к. с.-г. н.: 06.02.03. Київ, 2012. 26 с.
16. Адаменко О. М. Екологічна безпека територій. Івано-Франківськ: В. П. Супрун, 2014. 444 с.
17. Мандрик О. М., Пукіш А. В., Зельманович А. В. Особливості формування фізичного та хімічного складу високомінералізованих прикордонних вод. *Розробка родовищ: зб. наук. пр.* 2017. Т. 11, вип. 1. С. 72–79.
18. Долінський Л. Б., Рибачок О. С. Кореляційно-регресійний аналіз інвестиційної привабливості АПК. *Економічний аналіз*. 2016. № 24 (1). Р. 30–37. URL: <https://www.econa.org.ua/index.php/econa/article/view/1148> (дата звернення: 15.01.2025).
19. Hayes A., Anderson S. Correlation. Investopedia. 2021. URL: <https://www.investopedia.com/terms/c/correlation.asp> (дата звернення: 15.01.2025).
20. Павлюк К. В. Методичні підходи до розроблення нормативів і оцінки науково-дослідницької праці на основі багатофакторного кореляційно-регресійного аналізу. *Наукові праці НДФІ*. 2020. № 3 (92). С. 5–19. <https://doi.org/10.33763/npndfi2020.03.005>

Стаття надійшла 20.01.2025