

УДК 553.94:550.42

**В.В. ШКОВ**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

**Є.С. КОЗІЙ**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна  
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

**О.І. ЧЕРНОБУК**

Грузинський марганець, м. Батумі, Грузія

**М.А. КОЗАР**

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененко, м. Київ, Україна

**П.С. ПАЩЕНКО**

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

**О.С. ДРЕШПАК**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ТА ЗВ'ЯЗКУ ГЕРМАНІЮ,  
ЗОЛЬНОСТІ ТА БЕРИЛІЮ У ВУГІЛЛІ ПЛАСТА С5 ПОЛЯ ШАХТИ  
«БЛАГОДАТНА»**

*У статті наведені результати досліджень особливостей просторового розподілу германію та берилію у вугільному пласті с5 поля шахти «Благодатна» Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. Розраховані рівняння регресії які дозволяють прогнозувати концентрації германію у вугільному пласті с5 поля шахти «Благодатна». Виявлено існування у вугільному пласті с5 шахти «Благодатна» генетично різних форм знаходження германію та берилію і зольності. Зафіксована полімодальність розподілу для всіх розглянутих показників.*

**Ключові слова:** германій, берилій, вугільний пласт, коефіцієнт кореляції, рівняння регресії, гістограма розподілу.

**Постановка проблеми та мета досліджень.** Дослідження германію (Ge) у вугільних пластах важливі через його потенціал для промислового вилучення та застосування як цінного супутнього ресурсу. Вугілля є головним джерелом Ge у таких країнах, як Україна, Китай, Узбекистан, Канада, США та деяких інших [1-2]. Підвищений інтерес до цих досліджень також пов'язаний із класифікацією руд, що містять Ge, як стратегічно важливої сировини для сталого розвитку та оборонної могутності держави. Це підтверджується рішенням Ради національної безпеки та оборони України від 16 липня 2021 року та Указом Президента України №306/2021 «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин,

які мають стратегічне значення для сталого розвитку та обороноздатності держави».

Прогнози Геологічної служби США вказують на збільшення глобального попиту на Ge до 2030 року до 320-400 тон на рік, з очікуваним зростанням виробництва майже в 1,5 рази. Вартість монокристалів Ge може досягати 10 - 15 тисяч доларів за кілограм. Паралельно на Донбасі щорічно при видобутку вугілля відбувається списання близько 100 тон Ge, що еквівалентно приблизно 60% світового річного виробництва металу.

Дослідження в області геохімії мікроелементів у вугільних пластах Донбасу попередньо торкалися розподілу мікроелементів, кваліфікованих як «токсичні» та «потенційно токсичні» [3-4]. Було розроблено методологію для типізації вугільних родовищ та нафтових полів Дніпровсько-Донецької западини на основі вмісту різних мікроелементів [5-6]. Інші роботи присвячені аналізу розподілу Ge в окремих вугільних пластах Павлоградсько-Петропавлівського району [7-9].

Поточне дослідження має за мету виявлення основних особливостей розподілу та зв'язку між вмістами Ge, Be та зольності у вугільному пласті c<sub>5</sub> шахти «Благодатна». Така робота виконується вперше.

**Методика досліджень.** Емпіричну базу дослідження склали дані 58 аналізів Ge, Be та зольності вугілля виконаних після 1981 року в акредитованих державних лабораторіях. Ці аналізи головним чином, виконувались на зразках, зібраних у процесі роботи виробничих та науково-дослідних підприємств за безпосередньою участю авторів. У деяких випадках отримані дані доповнювалися результатами додаткового опробування борозновим методом з шахтних виробок, що проводилося з 1988 по 2015 рік.

Перед відбором проб із гірничих виробок проводилися вимірювання потужності та інші візуальні дослідження вугільних пачок та породних шарів для вибору найбільш репрезентативних ділянок. Контроль якості

випробувань включав 7% всього обсягу проб. Кількісне визначення Ge проводилося методом спектрального емісійного аналізу. Для внутрішнього та зовнішнього контролю використовувалися 7% та 10% проб-дублікатів відповідно. Правильність і відтворюваність результатів оцінювалися із застосуванням критеріїв Стюдента і Фішера, і за рівня значимості 0,95 систематична і випадкова похибки визнано несуттєвими, що підтвердило задовільну якість аналізів. На початку дослідження первинні геохімічні дані піддалися обробці з використанням програм STATISTICA 13.3 та IBM SPSS Statistics 22 для розрахунку базових статистичних характеристик, включаючи вибіркоче середнє, стандартну помилку середнього, медіану, ексцес, моду, стандартне відхилення, дисперсію, мінімальні та максимальні значення коефіцієнт варіації та асиметрію вибірки. Також було виконано побудову частотних гістограм для вмісту Ge та потужності пласта, а також визначення характеристик їх розподілу. Щоб досягти цілей дослідження, було проведено кореляційний та регресійний аналізи за допомогою методів, доступних у Micromine, однієї з провідних професійних гірничо-геологічних інформаційних систем для 3D-моделювання, статистичної обробки даних та планування гірничих робіт (ліцензія MM5123).

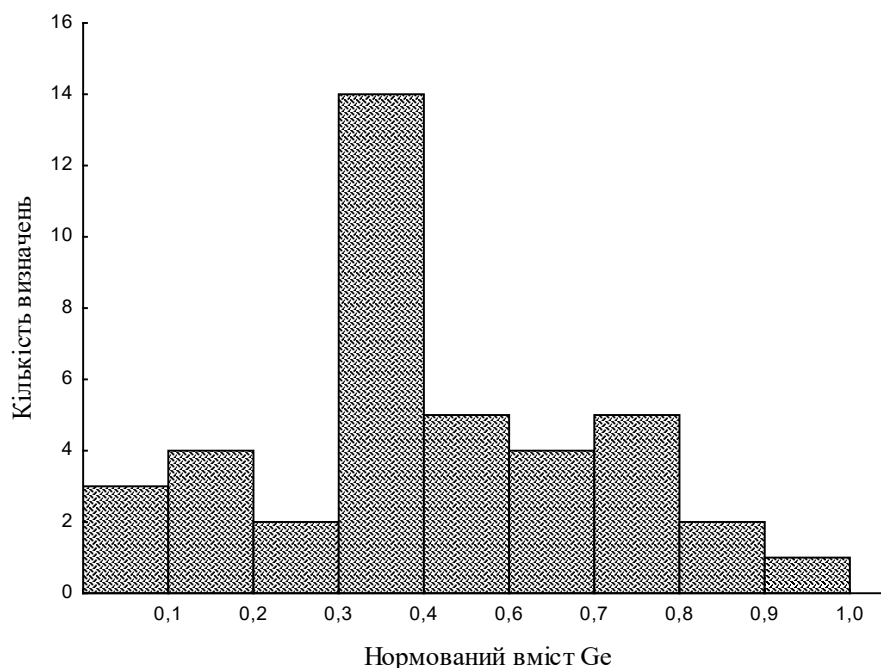
**Результати досліджень.** На полі шахти «Благодатна» концентрація Ge у вугіллі пласта  $c_5$  варіює в межах від 8,4 г/т до 28,7 г/т, при середньому значенні  $17,5 \pm 0,75$  г/т, медіані 16,9 г/т, моді 16,1 г/т, стандартному відхиленні 4,72, дисперсії вибірки 22,32, ексцесу вибірки -0,04, асиметричності вибірки 0,17.

Вміст Be на ділянках відбору проб змінюється від 1,66 г/т до 5,24 г/т, середнє значення дорівнює  $3,92 \pm 0,12$  г/т, медіана 4 г/т, стандартне відхилення 0,74, дисперсія 0,54, ексцес 1,13, асиметричність – 0,82.

Зольність вугільного пласта змінюється від 3,1% (на ділянці із простою будовою) до 21,7% (було зафіксовано на ділянці з двопачечною будовою),

середнє значення  $8,2 \pm 0,6\%$ , медіана дорівнює  $7,2\%$ , стандартне відхилення  $3,8$ , дисперсія  $14,8$ , ексцес  $3,3$ , асиметричність  $1,6$ , мода –  $6\%$ .

Для візуалізації щільності розподілу концентрацій Ge, Be та зольності вугілля, що були встановлені на ділянках відбору проб були побудовані частотні гістограми (рис. 1-3).



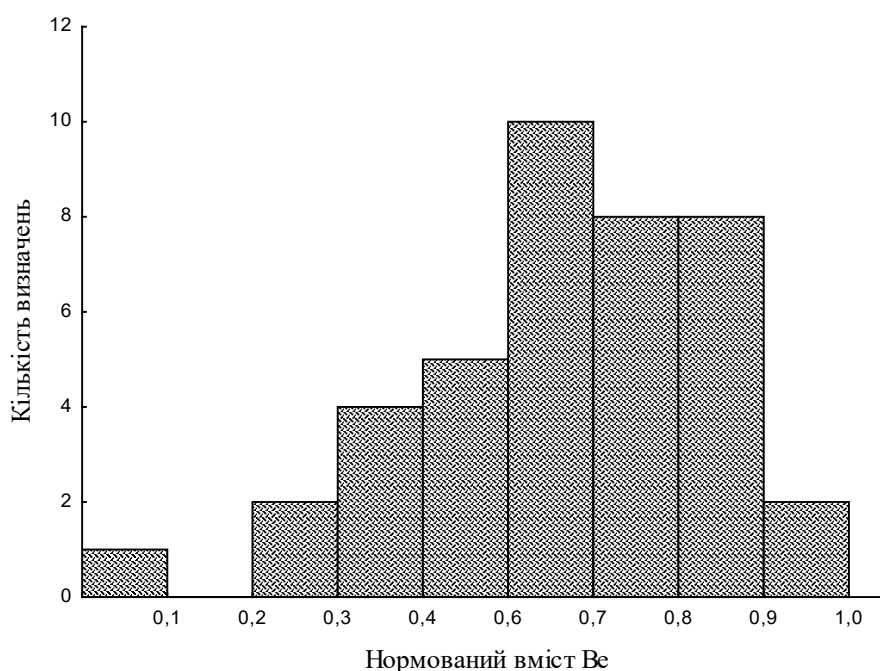
**Рис. 1.** Частотна гістограма нормованих значень вмісту германію

Аналіз побудованих гістограм свідчить про: 1) невідповідність усіх вибірок логнормальному або нормальному законам розподілу; 2) в усіх випадках спостерігається полімодальність розподілу показників; 3) на всіх гістограмах розподілу ядро щільності розподілу зміщено вліво, за винятком берилію.

Додатково були виконані аналітичні розрахунки відповідності емпіричних розподілів досліджуваних показників розподілу Гауса за критеріями Ліллієфорса, Колмогорова – Смірнова, згоди хі-квадрата Пірсона та Шапіро-Уїлка, які підтвердили висновки наведені раніше.

В свою чергу це означає що для більш коректної оцінки центральної тенденції в розподілі концентрацій Ge, Be та зольності замість значень

середнього арифметичного необхідно використовувати їх медіанні значення. Сам факт наявності полімодальних розподілів розглянутих показників дозволяє припустити існування декількох різних механізмів їх накопичення та форм знаходження. Однакове зміщення щільності розподілу вліво як для Ge так і для зольності, на думку авторів, свідчить що форми їх знаходження які відповідають за мінімальні вмісти спільно акумулювалися на сингенетичному етапі формування пласта.



**Рис. 2.** Частотна гістограма нормованих значень вмісту берилію

За шкалою Чедока зв'язок концентрацій Ge з вмістом Be у вугільному пласті що розглядається, згідно результатів кореляційного (коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона -0,01) та регресійних аналізів є зворотний і дуже слабкий. На рис. 4 наведено графік результату моделювання лінійного зв'язку значень вмісту Ge з концентраціями Be. Рівняння регресії цієї моделі:  $Ge = 0,4537 - 0,0096 \cdot Be$ .

Зв'язок вмістів Ge із зольністю за шкалою Чедока у вугільному пласті c<sub>5</sub>, згідно результатів кореляційного (коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона 0,06) та регресійних аналізів є прямим і дуже слабкий. На рис. 5 наведено

графік результату регресійного аналізу моделювання лінійного зв'язку значень вмісту Ge з цим показником. Рівняння регресії для цієї моделі:

$$Ge = 0,4289 + 0,0682 \cdot A^d.$$

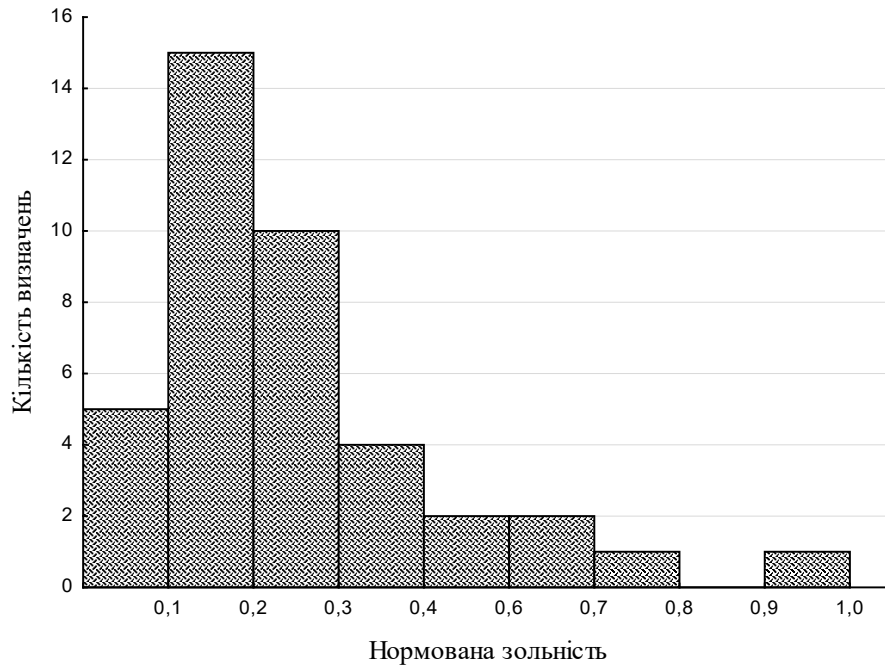


Рис. 3. Частотна гістограма нормованих значень зольності

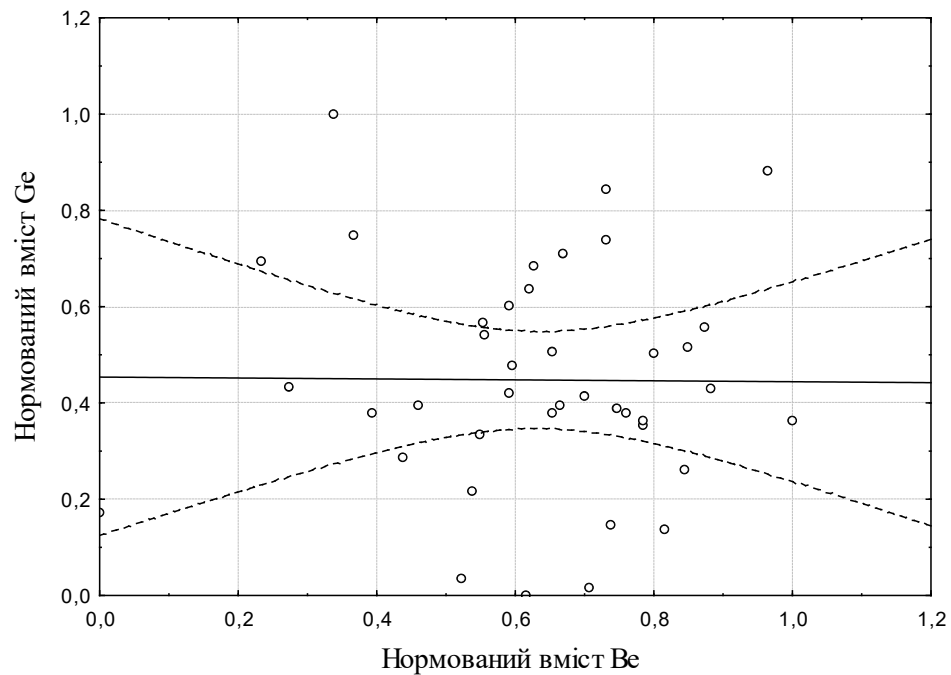
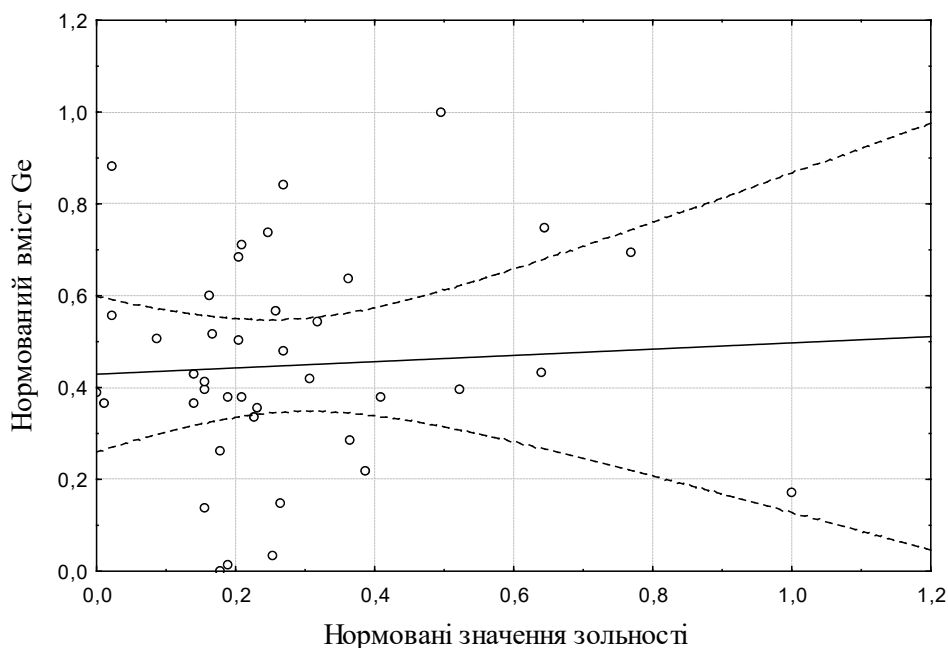


Рис. 4. Результат регресійного аналізу моделювання лінійного зв'язку між концентраціями германію та вмістом берилію

**Висновки.** 1). Різноманітна імовірна форма знаходження розглянутих показників загалом у вугіллі, яка була реалізована у конкретних геологічних умовах пласта  $c_5$  шахти «Благодатна», дозволяє ставитися до встановлених за допомогою регресійного та кореляційного аналізу закономірностей тільки як своєрідного тренду залежностей між ними. 2). Загальною особливістю розподілу Ge, Be та зольності у вугільному пласті  $c_5$  поля шахти «Благодатна» є невідповідність нормальному та логнормальному законам та полімодальність розподілів зі зміщенням ядер щільності вліво, крім берилію. 3). Кожен із показників що досліджувались у пласті  $c_5$  шахти «Благодатна» накопичувався у декількох формах, які суттєво різнилися за своїм генезисом. При цьому форми їх знаходження які відповідають за мінімальні вмісти спільно акумулювалися на сингенетичному етапі.



**Рис. 5.** Результат регресійного аналізу моделювання лінійного зв'язку між концентраціями германію та зольності

Основна наукова новизна: 1) виявлено існування у вугільному пласті  $c_5$  шахти «Благодатна» генетично різних форм знаходження Ge, Be і зольності; 2) для всіх розглянутих показників встановлена полімодальність розподілів.

Основна практична цінність виконаних досліджень полягає у обґрунтуванні способу найбільш коректної оцінки центральної тенденції



розподілу вибіркової сукупності концентрації Ge, Be та зольності у вугільному пласті с<sub>5</sub> шахти «Благодатна». Наявність дуже слабкого негативного кореляційного зв'язку між вмістом Ge та Be надає можливість прогнозувати мінімальний характер можливих екологічних ризиків від цього елементу при селективної переробці вугілля збагаченого на Ge.

### Список літератури

1. Ішков В.В., Козій Є.С., Чернобук О.І., Хоменко В.Л. (2022). Результати кластеризації ділянок різної потужності вугільного пласта с<sub>10</sub><sup>В</sup> шахти «Дніпровська» за вмістом германію. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна»*. № 1(27)-2(28). С. 107-115. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1\(27\)-2\(28\)-107-115](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2022-1(27)-2(28)-107-115)
2. Ishkov V.V., Kozii Ye.S., Chernobuk O.I., Pashchenko P.S. (2022). The relationship of germanium concentrations and the thickness of the с<sub>8</sub><sup>В</sup> coal seam of the Dniprovsk coal mine. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 162, 165-177.
3. Козій Є.С., Ішков В.В. (2017). Класифікація вугілля основних робочих пластів Павло-градсько-Петропавлівського геолого-промислового району по вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів. *Зб. наукових праць «Геотехнічна механіка»*, 136, 74-86.
4. Ішков В.В., Козій Є.С. (2020). Розподіл ртуті у вугільному пласті с<sub>7</sub><sup>В</sup> поля шахти «Павлоградська». *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна»*, 1(23)-2(24), 26-33. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2020-3\(23\)-4\(24\)-26-33](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2020-3(23)-4(24)-26-33)
5. Єрофеев А.М., Ішков В.В., Козій Є.С., Барташевський С.Є. (2021). Дослідження методів кластеризації родовищ нафти Дніпровсько-Донецької западини з метою створення їх класифікації за вмістом металів (на прикладі V). *Наукові Праці ДонНТУ. Серія Гірничо-Геологічна*, 1–2(25–26), 83-93. [https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1\(25\)-2\(26\)-83-93](https://doi.org/10.31474/2073-9575-2021-1(25)-2(26)-83-93)
6. Ішков В.В., Козій Є.С., Козар М.А. (2023). Розробка класифікацій родовищ нафти за вмістом металів (на прикладі Дніпровсько-Донецької западини). *Мінеральні ресурси України*, 1, 23-34. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.1.23-34>
7. Ішков В.В., Козій Є.С., Чернобук О.І., Козар М.О., & Дрешпак О.С. (2022). Про зв'язок між концентрацією германію і вмістом токсичних елементів та сірки загальної у вугільному пласті с<sub>8</sub><sup>В</sup> шахти «Дніпровська». *Збірник наукових праць НГУ*, 71, 145-159. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.145>
8. Ishkov V.V., Kozii Ye.S. (2022). Method of clusterization of с<sub>6</sub> coal seam zones of different thickness in the Dniprovsk mine field by germanium



concentration. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 163, 75-85.

9. Ishkov V.V., Kozii Ye.S., Chernobuk O.I., Pashchenko P.S. (2022). The relationship of germanium concentrations and the thickness of the  $c_8^H$  coal seam of the Dniprovska coal mine. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 162, 165-177.