

© В.В. Ішков^{1,2}, Є.С. Козій¹, О.І. Чернобук³

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

³ Джорджиан Манганез, Тбілісі, Грузія

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОТУЖНОСТІ ВУГІЛЬНОГО ПЛАСТА C₈^H ШАХТИ ДНІПРОВСЬКА НА ВМІСТ ГЕРМАНІЮ

© V. Ishkov^{1,2}, Ye. Kozii¹, O. Chernobuk³

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

³ Georgian Manganese, Tbilisi, Georgia

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE C₈^H COAL SEAM THICKNESS OF DNIPROVSKA MINE ON THE CONTENT OF GERMANIUM

Мета. Дослідити та проаналізувати вплив потужності вугільного пласта c₈^H шахти Дніпровська на вміст германію та розробити об'єктивну (природну) типізацію ділянок вугільного пласта різної потужності за концентраціями цього елемента.

Методика. Фактологічною основою роботи були результати 370 аналізів германію та інших елементів-домішок (їх ще називають «малими елементами»), вимірювань потужності пласту, зольності та сірчистості вугілля виконаних в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій України з матеріалу пластових проб отриманих виробничими і науково-дослідницькими підприємствами і організаціями. Для приведення вибірок до одного масштабу вихідні дані нормувались. Для досягнення поставленої мети у роботі використано лабораторні та статистичні методи наукових досліджень з урахуванням та інтерпретації отриманих результатів в геологічних поняттях. У процесі досліджень було здійснено кластеризацію ділянок пласта різної потужності за вмістом Ge зваженим центроїдним медіанним методом, який був реалізований у найпопулярніших професійних статистичних програмних платформах «STATISTICA» та «SPSS» й виконано аналіз результатів кластеризації.

Результати. Реалізація підходу, який викладений в статті, дає можливість запропонувати природну типізацію ділянок за потужністю вугільного пласта по вмісту германію. Аналіз отриманих результатів моделювання свідчить про прояв так званого «закону Зільбермінця» – емпіричної закономірності збагачення деякими елементами (насамперед – германію) приконтаткових зон вугільних пластів. Потужність таких шарів звичайно не перевищує 0,2 – 0,3 м.

Наукова новизна. Полягає у встановленні чисельних характеристик диференційного впливу потужності вугільного пласта c₈^H шахти «Дніпровська» на вміст Ge та розробці природної типізації ділянок із різною потужністю пласта c₈^H шахти Дніпровська за концентрацією цього елемента.

Практична значимість. Полягає у тому, що запропоновано методичний підхід та алгоритм дій для поділу вугільних пластів на природні, близькі за вмістом Ge і генетично споріднені ділянки, що надає можливість найбільш ефективного планування організаційно-технологічних заходів та виконання їх максимально вірогідної геолого-економічної оцінки, яка спрямована на видобуток Ge з вугілля.

Ключові слова: германій, вугільний пласт, регресійний аналіз, кластерний аналіз, гістограма розподілу, нормований вміст.

Вступ. Актуальність дослідження вмісту германію у вугільних пластах обумовлена можливістю його промислового вилучення та використання в якості цінного попутного компонента [1-5]. За нашою оцінкою середньомісячні ціни за кілограм діоксиду германію на світовому ринку з 1992 р. по 2011 р. коливалися від 380 до 1460 \$ США. Світове виробництво рафінованого германію складає 130 т, 2/3 з якого припадає на Китай. Промисловістю США щорічно (з 2019 – 2022 рр.) використовується (оцінка авторів) близько 30 т Ge. Найголовнішими світовими кінцевими споживачами цього елемента зараз є виробництво волоконно-оптичних систем (30%), інфрачервоної оптики (25%), компонентів для полімеризаційного каталізу (25%), електроніки та фотоелементів для сонячної енергетики (15%), фосфору, металургійна і фармацевтична промисловості (разом 5%). Значна кількість Ge міститься в золах-винесення, які формуються при згорянні деяких марок енергетичного вугілля. Германій накопичується в гідротермальних та осадових процесах, де реалізується можливість його відділення від кремнію. Незвичайний процес природного збагачення призводить до високого змісту германію у деяких вугільних пластах, вперше виявлених Віктором Моріцем Гольдшмідтом під час широкого обстеження родовищ германія [6]. Найвища концентрація, колись виявлена, була у вугільній золі вугілля родовища Хартлі із вмістом германію 1,6%. Вугільні родовища Китаю поблизу Сілінхаоте, Внутрішня Монголія, містять близько 1600 тон германію.

Зараз вугілля є основним оціненим джерелом германію в Україні, Китаї, Узбекистані, а також в Росії. Ge-вугільні родовища розробляються в Англії, Канаді, США, Україні, Росії та ін. Цікавий факт, що має безпосереднє відношення до питання актуальності теми статті: у СРСР в 80-х рр. отримували біля 4,5 т/рік Ge виключно на коксохімічних заводах України. Це у середніх цінах на 2021 рік становить $1200\$ \text{ США} \cdot 4500 \text{ кг} = 5\,400\,000 \$ \text{ США}$. Особливу актуальність виконаним дослідженням надає рішення Ради національної безпеки та оборони України від 16 липня 2021 року «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку та обороноздатності держави» та Указ Президента України №306/2021, який вводить в дію це рішення. В цих документах руди германію включені до переліку, що мають стратегічне значення для сталого розвитку та обороноздатності держави.

Аналіз попередніх досліджень. Вперше встановлено явище зонального розподілу Ge за розрізом вугільних пластів – з накопиченням його в контактних зонах (пригрунтових та покрівельних пачках, а також у пачках біля внутрішньопластових прошарків породи – партингів) у 1936 році у роботі В.А. Зільбермінця зі співавторами у вугіллі Західного Донбасу [7]. А в 1966 року А.В. Павлов запропонував називати таку емпіричну закономірність «законом Зільбермінця» [8].

Мета. Дана робота присвячена результатам досліджень впливу потужності вугільного пласта s_8^H шахти Дніпровська на вміст германію та розробці об'єктивної (природної) типізації ділянок вугільного пласта різної потужності за концентраціями цього елемента.

Слід зазначити, що такі дослідження раніше не виконувалися. Таким чином, розробка природної типізації ділянок вугільного пласта різної потужності за концентраціями германію є актуальним науковим завданням, що створить можливість визначення їх геохімічних особливостей та еколого-економічних наслідків надрокористування.

Методи дослідження. Фактологічною основою роботи були результати 370 аналізів германію та інших елементів-домішок (їх ще називають «малими елементами»), вимірювань потужності пласту, зольності та сірчистості вугілля виконаних після 1983р. в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій України з матеріалу пластових проб отриманих виробничими і науково-дослідницькими підприємствами і організаціями. У ряді випадків вони доповнювались аналізами пластових проб відібраних борозновим методом [9] із дублікатів керна і гірничих виробок за участю авторів та співробітників геологічної служби вугледобувного підприємства і виробничих геологорозвідувальних організацій в період з 1983 по 2017 рік.

Перед відбором проб з гірничих виробок проводились заміри вугільних пачок, породних прошарків, за результатами яких, визначались найбільш представницькі ділянки відбору проб. Обсяг контрольного випробування склав 7% від загального обсягу проб.

Концентрація Ge визначалася згідно [10]. Вміст Hg визначався атомно-абсорбційним аналізом, As [11], інші елементи - кількісним емісійним спектральним аналізом [12]. На внутрішній лабораторний контроль направлено 6% дублікатів проб. Зовнішньому лабораторному контролю піддано 10% дублікатів проб. Якість результатів аналізів (правильність і відтворюваність) оцінювалася, як значимість середньої систематичної похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Стюдента і значимість середньої випадкової похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Фішера. Оскільки вказані вище похибки при рівні значимості 0,95 є не значимими, якість аналізів визнано задовільною.

На початковому етапі обробки первинної геохімічної інформації за допомогою програм STATISTICA 13.3 та IBM SPSS Statistics 22 розраховувалися значення основних описових статистичних показників (вибіркового середнього арифметичного, його стандартної помилки, медіани, ексцесу, моди, стандартного відхилення, дисперсії вибірки, мінімального і максимального значення вмісту, коефіцієнту варіації, асиметрії вибірки), виконувалась побудова частотних гістограм вмісту Ge та потужності пласта і встановлення особливостей розподілу цих параметрів.

При побудові частотних гістограм кількість інтервалів розраховувалася за формулою Герберта Стерджеса:

$$n = 1 + [\log_2 N],$$

де n – кількість інтервалів, \log_2 – логарифм на підставі 2, N – кількість аналізів, $[x]$ – позначає цілу частину числа x .

Як відомо, процедура типізації (класифікації) – це систематизація об'єктів по апріорно заданим ознакам. Об'єктивною причиною практичного значення типізації є складні проблеми зберігання, пошуку, використання величезних архівів емпіричних даних. Виникає необхідність скоротити кількість цих даних і при цьому не втратити занадто багато інформації закладеної в них. Зазвичай для цього використовуються кластерний аналіз, таксономія, розпізнавання образів, факторний аналіз.

Однією з найбільш ефективних процедур спрощення та мінімізації масиву даних для того, щоб полегшити його змістовну інтерпретацію, є кластеризація. Термін кластерний аналіз, вперше введений Тріоном (Tryon) в 1939 році, в даний час включає в себе більше 100 різних алгоритмів [13]. Незважаючи на те, що кластерний аналіз відомий відносно давно, поширення ця група методів отримала значно пізніше, ніж інші багатовимірні методи математичної статистики. Лише після публікації книги Р. Сокала і П. Сніта «Начала численної таксономії» в 1973 році починають з'являтися перші дослідження з використанням цього методу [14]. На даний час процедури кластеризації широко застосовуються в біології (для виділення просторових та тимчасових угруповань організмів в однорідних умовах, для угруповання подібних геномних послідовностей, для визначення генотипів, тощо). Такі ж процедури використовуються у медицині (для класифікації антибіотиків за типом антибактеріальної активності, для автоматичного виділення різних типів тканин на тривимірному зображенні у позитронно-емісійній томографії, тощо), у маркетингу (для обробки даних різних опитувань, виділення типових груп покупців, поділу ринку для створення персоналізованих пропозицій, тощо). Процедури кластеризації використовують у комп'ютерних науках (для визначення популяційних ніш, що утворилися в ході роботи еволюційних алгоритмів, у сегментації зображень для визначення меж та розпізнавання об'єктів, тощо). Тим не менш, до цих пір в геологічних дослідженнях відомі лише поодинокі випадки вдалого застосування кластерного аналізу, незважаючи на його виняткову простоту і візуальну наочність. Разом з тим кластерний аналіз не тільки набагато простіше і наочніше вирішує задачу систематизації об'єктів, але і має незаперечну перевагу - результат його застосування не пов'язаний з втратою навіть частини вихідної інформації про відмінності об'єктів або кореляції ознак.

Важливо що на відміну від інших методів, які використовують при вирішенні задач типізації, кластерний аналіз не вимагає апріорних припущень про набір даних, що не накладає обмеження на подання досліджуваних об'єктів, дозволяє аналізувати природні показники різних типів даних (інтервальних даних, частот, бінарних даних, тощо). Використання кластерного аналізу з метою типізації має ряд переваг, оскільки дозволяє виконати розбиття безлічі досліджуваних об'єктів і ознак на однорідні у відповідному розумінні групи або кластери, а також виявити внутрішню структуру (на різних ієрархічних рівнях) вибіркової сукупності. У той же час, як і будь-який інший метод, кластерний аналіз має певні недоліки. Зокрема, склад і кількість кластерів залежить від обраних критеріїв

угруповання («стратегії класифікації»), а застосування різних методів, що відповідають різним концептуальним підходам до виділення таксонів, до одних і тих же вибірок, може призвести до суттєво відмінних результатів [13]. Таким чином, характерною особливістю кластерного аналізу, на відміну від інших методів багатомірної статистики, є сильна залежність одержуваних результатів від апріорних установок дослідника на змістовному рівні. У нашому випадку, до апріорних установок відносяться: відсутність гіпотез щодо числа кластерів, їх структури та форми; досягнення максимальної візуалізації розбиття родовищ по класам на різних масштабних рівнях; встановлення методу (алгоритму) кластеризації для найбільш стійкого поділу всієї сукупності ділянок пласта, що розглядаються.

У кластерному аналізі вважається, що: а) вибрані характеристики допускають в принципі бажане розбиття на кластери; б) одиниці виміру (масштаб) обрані правильно.

Таким чином, вибір масштабу у процедурах типізації відіграє значну роль. Для приведення до одного масштабу вихідні дані, як правило, тим чи іншим чином нормують. Так як вміст Ge на ділянках вугільного пласта, що розглядаються досить рівномірно заповнює весь інтервал значень, без суттєвих аномалій що набагато перевищують типовий розкид, то нормування вихідних значень вмісту Ge та потужностей пласта здійснювалось за формулою:

$$X_{i \text{ норм.}} = (X_i - X_{\text{max.}}) / (X_{\text{max.}} - X_{\text{min.}}),$$

де $X_{i \text{ норм.}}$ – одиничне нормоване значення вмісту германію, X_i – одиничне значення вмісту германію, $X_{\text{max.}}$ – максимальне значення вмісту германію у вугіллі, $X_{\text{min.}}$ – мінімальне значення вмісту германію у вугіллі.

Для досягнення поставленої в роботі мети у процесі досліджень було здійснено кластеризацію ділянок пласта різної потужності за вмістом Ge зваженим центроїдним медіанним методом, який був реалізований у найпопулярніших професійних статистичних програмних платформах «STATISTICA» та «SPSS»; виконано аналіз результатів кластеризації.

Результати дослідження та їх обговорення. На полі шахти «Дніпровська» концентрація германію у вугіллі пласта c_8^H за даними 370 аналізів варіює в межах від 0,14 г/т до 23,63 г/т, при середньому значенні $8,34 \pm 0,26$ г/т, медіані 6,79 г/т, моді 7,69 г/т, стандартному відхиленні 5,04, дисперсії вибірки 25,38, ексцесу вибірки 0,23, асиметричності вибірки 0,97. Потужність пласта на ділянках відбору проб змінюється від 0,06 м до 1,00 м, середнє значення дорівнює $0,66 \pm 0,01$ м, медіана 0,7 м, модальне значення 0,7 м, стандартне відхилення 0,16, дисперсія 0,02, ексцес 0,55, асиметричність – 0,69. З метою візуалізації щільності розподілу концентрацій Ge та потужностей пласта, що відповідали ділянкам відбору проб були побудовані гістограми (рис. 1).

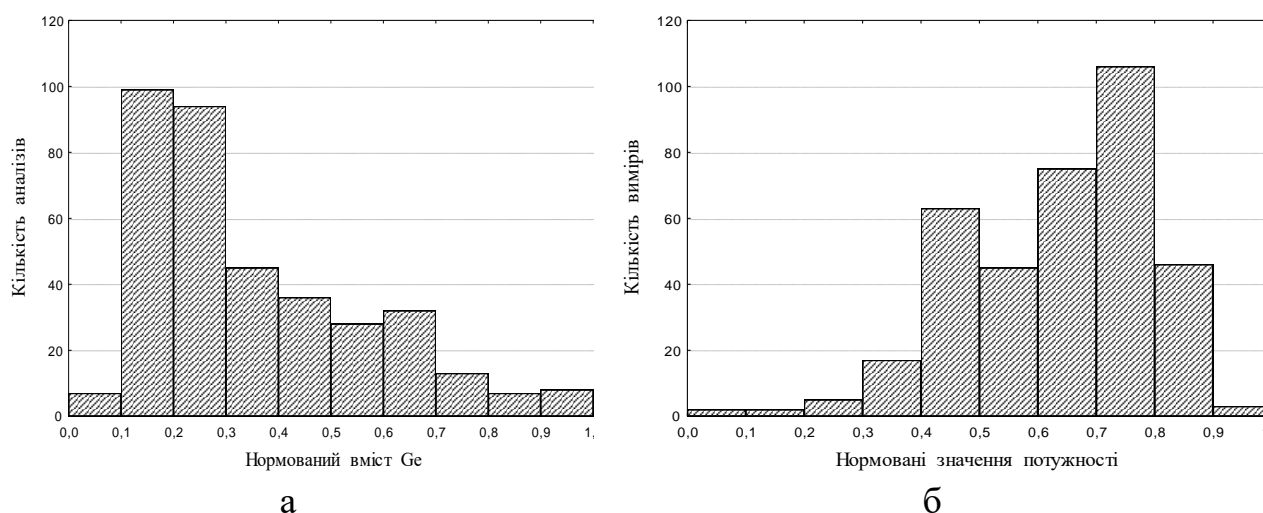


Рис. 1. Гістограми: а – нормованого вмісту Ge, б – нормованих значень потужності пласта

Візуальний аналіз наведених гістограм свідчить про: 1) невідповідність обох вибірок нормальному або логнормальному закону розподілу; 2) в обох випадках чітко фіксується бімодальність розподілу показників; 3) у разі розподілу концентрацій Ge спостерігається зсув ядра щільності розподілу вліво, а на гістограмі розподілу потужності пласта ядро щільності розподілу зміщено вправо.

Незважаючи на переконливий візуальний аналіз наведених (див. рис. 1) гістограм розподілу, авторами було виконано аналітичні розрахунки відповідності емпіричних розподілів досліджуваних параметрів розподілу Гауса. Для цього були розраховані критерії Шапіро-Уїлка, согласия хі-квадрат Пірсона, Колмогорова – Смірнова та Ліллієфорса. У всіх випадках результати розрахунків підтвердили невідповідність обох вибірок нормальному або логнормальному закону розподілу. Таким чином, для більш реалістичної оцінки центральної тенденції вмісту Ge та потужності пласта замість значень середнього арифметичного необхідно використовувати медіанні значення обох показників.

Зв'язок вмісту германію з потужністю вугільного пласта згідно результатів аналізів загальної вибірки за шкалою Чедока враховуючі дані кореляційного (лінійного Пірсона $-0,94$, та непараметричних Спірмена $-0,95$, Кендела $-0,84$ і гамма $-0,86$) та регресійних аналізів є зворотній і дуже високий, при довірчому інтервалі $0,99$ він є статистично значущим. На рис. 2а наведено графік результату регресійного аналізу моделювання лінійного зв'язку вмісту германію з потужністю вугільного пласта. Рівняння регресії для цієї моделі $Ge = 1,0835 - 1,1614 \cdot m$, але на нашу думку більш придатна для інтерпретації у геологічних поняттях поліноміальна кубічна модель, її графік наведено на рис. 2б, а розраховане рівняння регресії $Ge = 0,987 + 0,1291 \cdot m - 3,3477 \cdot m^2 + 2,357 \cdot m^3$. При аналізі цієї регресійної моделі з одночасним урахуванням вихідних даних як значень вмісту германію, так і значень потужності пласта, а також результати попередніх досліджень [15-20] виникає можливість сформулювати попередні висновки щодо зв'язку між цими показниками.

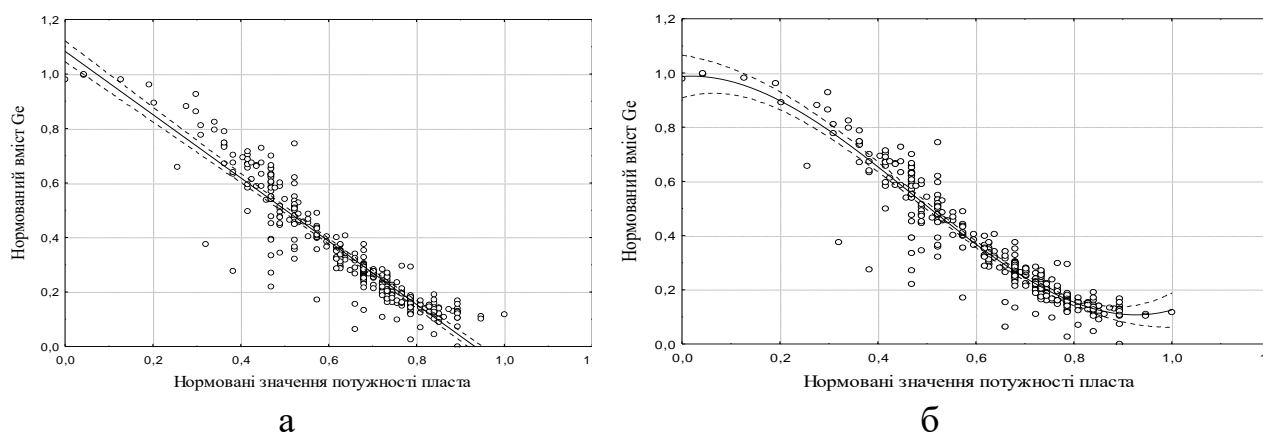


Рис. 2. Результат регресійного аналізу моделювання: а – лінійного зв'язку вмісту германію з потужністю вугільного пласта, б – поліноміального кубічного зв'язку вмісту германію з потужністю вугільного пласта

Справа у тому, що у вертикальному профілі вугільного пласта Ge розподіляється вкрай нерівномірно. Основний вплив на вміст германію потужності пласта є наслідком прояву так званого «закону Зільбермінця» – емпіричної закономірності збагачення деякими елементами (насамперед – германію) приконтактових зон вугільних пластів. Потужність таких шарів звичайно не перевищує 0,2 – 0,3 м. Треба відмітити, що прояви «закону Зільбермінця» відзначаються у кожному вугільному басейні світу. Вони знаходять досить задовільне тлумачення у рамках концепції після седиментаційного діагенетичного накопичення германію у контактній зоні по дифузійному та частково – по фільтраційному механізмів у період торфонакопичення [21-23]. Таким чином, за всіх інших рівних умов, при зменшенні потужності пласта в цілому вклад збагачених германієм його ділянок у загальний вміст цього металу в пласті буде збільшуватись. При цьому в окремих випадках, ці збагачені шари будуть зливатимуться і весь вугільний пласт буде являти собою суцільну зону збагачення. Цим можна пояснити приуроченість практично усіх аномально високих значень вмісту германію до ділянок пласта з потужністю не більше 0,45м.

Для розробки методики вибору найефективнішого методу створення об'єктивної (природної) типізації ділянок вугільного пласта різної потужності за концентраціями Ge загальна вибірка із врахуванням кількості проб була поділена на 10 приватних вибірок, основні характеристики яких наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики приватних вибірок вмісту Ge

№ приватної вибірки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інтервал потужності, м	≤ 0,45	0,45 – 0,50	0,50 – 0,55	0,55 – 0,60	0,60 – 0,65	0,65 – 0,70	0,70 – 0,75	0,75 – 0,80	0,80 – 0,85	≥ 0,85
Кількість проб	35	40	35	19	26	44	58	47	27	22
Медіанні значення вмісту Ge нормовані по загальній вибірці	0,73	0,60	0,48	0,44	0,34	0,28	0,22	0,18	0,14	0,12
Дисперсія	0,023	0,012	0,007	0,006	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001

Для візуалізації статистичних особливостей усіх отриманих приватних вибірок була побудована ящична діаграма, яка наведена на рис. 3.

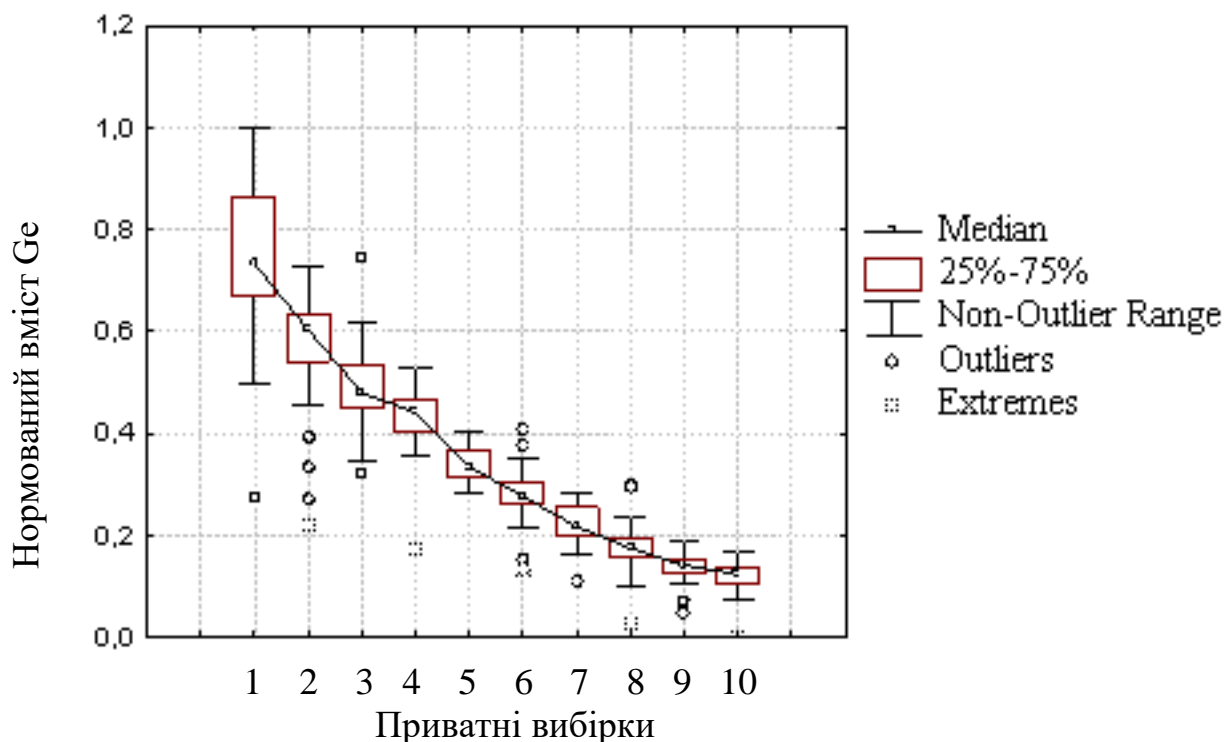


Рис. 3. Ящична діаграма концентрацій Ge у приватних вибірках

На побудованій ящичній діаграмі відображаються 5 найважливіших консолідованих характеристик (мінімальне значення, медіанне значення, перша та

третя квартиль, максимальне значення), а також значення, що були кваліфіковані з використанням критерію міжквартильного розмаху як викиди та їх різновиди – екстремальні викиди. Для більш виразнішого прояву тенденції мінливості центральної характеристики приватних вибірок їх медіанні значення з'єднані прямою лінією. Формальний аналіз побудованої діаграми дозволяє сформулювати такі основні висновки: 1) мінімальний інтерквартильний розмах спостерігається у 9 приватній вибірці, максимальний в – 1; 2) у всіх приватних вибірок, крім п'ятої, виявляється наявність викидів. Їх кількість варіює від одного (для 1, 4, 7 та 10 вибірки) до чотирьох (для 2 та 6 вибірки). У більшості випадків викиди нижче значень міжквартильного розмаху (1, 2, 4, 7, 9 та 10 вибірки), і рідше, виявлені в рівній кількості з обох сторін (3, 6 і 8 вибірки); 3) екстремальні одиничні викиди, що спостерігаються у всіх парних приватних вибірках (2, 4, 6, 8 та 10) фіксують тільки аномально низькі значення концентрації Ge; 4) Мінливість кутів нахилу лінії, що з'єднує медіанні значення приватних вибірок, відображає загальну варіабельність цього показника.

У роботах [24-42] було обґрунтовано використання одного із методів кластерного аналізу – зваженого центроїдного медіанного методу для розробки природної класифікації (або типізації) родовищ нафти і вугільних пластів за вмістом елементів-домішок, а також окремих ділянок вугільних пластів за концентрацією Ge. В результаті виконання кластерного аналізу зазначеним методом було побудовано дендрограму кластеризації, яку наведено на рис. 4.

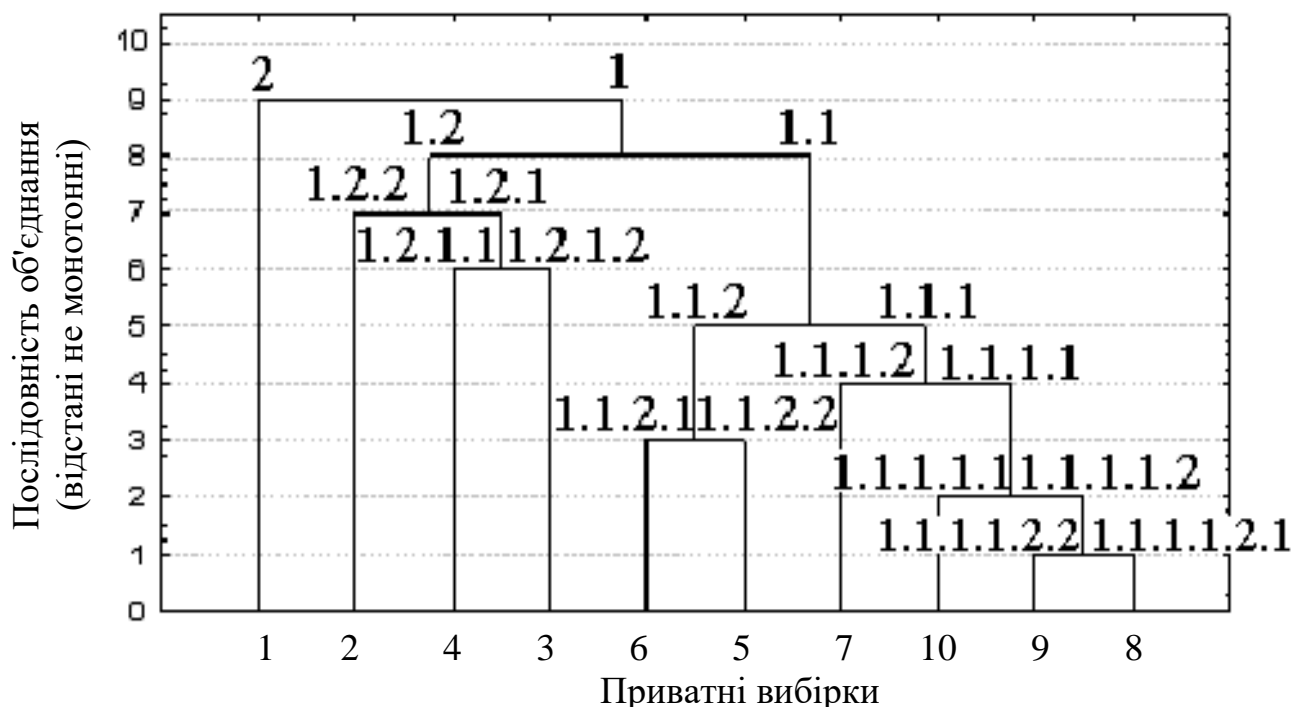


Рис. 4. Дендрограма результатів кластеризації зваженим центроїдним медіанним методом ділянок за вмістом Ge. Умовні позначення: 1, 2, 1.1, 1.2, 1.1.1, 1.1.2, 1.1.1.1, 1.1.1.2, 1.2.1, 1.2.2, 1.2.1.1, 1.1.2.1, 1.1.1.1.1, 1.1.1.1.2, 1.2.1.2, 1.1.1.1.2.1, 1.1.1.1.2.2 – кластери

Аналіз дендрограми результатів кластеризації дозволяє, використовуючи якісні оцінки, всі основні кластери з концентрації Ge поділити на 7 типів: 1) кластер 1.1.1.1. сформоване ділянками з аномально низькими вмістами Ge потужністю більше 0,75 м. До цього кластеру відносяться приватні вибірки 8, 9, 10. Медіанне значення нормованих концентрацій Ge 0,15, що відповідає 3,67 г/т; 2) кластер 1.1.1.2 з низькими концентраціями містить тільки 7 приватну вибірку, що об'єднує ділянки вугільного пласта потужністю 0,70 – 0,75 м. Медіанна величина нормованих концентрацій Ge 0,22, що становить 5,25 г/т; 3) кластер 1.1.2 із вмістами нижче середнього вміщує два підкластера 1.1.2.1 та 1.1.2.2 сформовані відповідно ділянками пласта потужністю 0,60 – 0,65 і 0,65 – 0,70 м. У середньому за кластером медіанне значення нормованих концентрацій Ge 0,30, що відповідає 7,11 г/т; 4) кластер 1.2.1.1 сформований тільки 4 приватною вибіркою, що об'єднує ділянки пласта потужністю 0,55 – 0,60 м, з середніми показниками вмісту Ge, його медіана нормованих концентрацій Ge 0,44, яка дорівнює 10,37 г/т; 5) кластер 1.2.1.2 складений 3 приватною вибіркою ділянок пласта потужністю 0,50 – 0,55 м із вмістом Ge вище середнього. Медіанне нормоване значення цього елемента за кластером – 0,48, що складає 11,41 г/т; 6) високий вміст Ge мають ділянки пласта потужністю 0,45 – 0,50 м кластеру 1.1.2, що відносяться до приватної вибірки 2. Медіанна величина нормованих концентрацій вибірки становить 0,60, що відповідає 14,25 г/т; 7) Кластер 2 формують ділянки пласта 1 вибірки з аномально високим вмістом. Потужність пласта на ділянках – $\leq 0,45$ м. Медіанна нормованих концентрацій – 0,73, це становить 17,36 г/т.

Висновки. Виконані дослідження дозволяють сформулювати наступні основні висновки:

1. На полі шахти «Дніпровська» концентрація германію у вугіллі пласта c_8^H за даними 370 аналізів варіює в межах від 0,14 г/т до 23,63 г/т, при середньому значенні $8,34 \pm 0,26$ г/т, медіані 6,79 г/т, моді 7,69 г/т, стандартному відхиленні 5,04, дисперсії вибірки 25,38, ексцесу вибірки 0,23, асиметричності вибірки 0,97.

2. Потужність пласта на ділянках відбору проб змінюється від 0,06 м до 1,00 м, середнє значення дорівнює $0,66 \pm 0,01$ м, медіана 0,7 м, модальне значення 0,7 м, стандартне відхилення 0,16, дисперсія 0,02, ексцес 0,55, асиметричність – 0,69.

3. Загальний розподіл вибірок вмісту як германію, так і потужності пласта, є бімодальним та асиметричним відносно одне одного. Зв'язок концентрації германію з потужністю вугільного пласта згідно результатів аналізів загальної вибірки за шкалою Чедока враховуючі дані кореляційного та регресійних аналізів є зворотній і дуже високий, при довірчому інтервалі 0,99 він є статистично значущим.

4. Результат регресійного аналізу моделювання зв'язку вмісту германію з потужністю вугільного пласта показує найбільшу адекватність даних, що спостерігаються, поліноміальної кубічної моделі.

5. Аналіз регресійного аналізу моделювання та побудованій ящичній діаграми свідчить про прояв у даному випадку так званого «закону Зільбермінця» –

емпіричної закономірності збагачення деякими елементами (насамперед – германію) приконтактних зон вугільних пластів. Потужність таких шарів звичайно не перевищує 0,2 – 0,3 м.

6. За результатами кластерного аналізу вибірккові середні оцінки концентрацій Ge, що значимо відрізняються між окремими вибірками ділянок за потужністю вугільного пласта можна інтерпретувати в термінології якісної оцінки, як: аномально низькі; низькі; нижче середніх; середні; вище середніх; високі; аномально високі. Реалізація такого підходу, у свою чергу, дає можливість запропонувати природну типізацію ділянок за потужністю вугільного пласта за вмістом Ge, яку наведено у таблиці 2.

Практичне значення результатів досліджень полягає в тому, що запропоновано методичний підхід та алгоритм дій для поділу вугільних пластів на природні, близькі за вмістом Ge і генетично споріднені ділянки, що надає можливість найбільш ефективного планування організаційно-технологічних заходів та виконання їх максимально вірогідної геолого-економічної оцінки, яка спрямована видобуток Ge з вугілля.

Основна наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні чисельних характеристик диференційного впливу потужності вугільного пласта c_8^H шахти «Дніпровська» на вміст Ge та розробці природної типізації ділянок із різною потужністю пласта c_8^H шахти Дніпровська за концентрацією цього елемента.

Таблиця 2

Природна типізація ділянок із різною потужністю пласта c_8^H шахти Дніпровська за вмістом Ge

№ п.п.	Характеристика вмісту Ge (якісна оцінка вмісту; вміст від/до; медіанне значення вмісту), г/т	Потужність вугільного пласта, м
1	аномально низькі значення; 0,14/7,12; 3,67	$\geq 0, 0,75$
2	низькі значення; 2,72/6,82; 5,25	0,70 – 0,75
3	значення нижче середніх; 1,65/9,68; 7,11	0,60 – 0,70
4	середнє значення; 4,17/12,57; 10,37	0,55 – 0,60
5	значення вище за середнє; 7,69/17,62; 11,41	0,50 – 0,55
6	високе значення; 5,32/17,26; 14,25	0,45 – 0,50
7	аномально високі значення; 6,62/23,63; 17,36	$\leq 0,45$

Перелік посилань

1. Наумов, А.В. (2007). Світовий ринок германію та його перспективи. *Изв. вузов. Цв. Металлургия*, 4, 32-40.
2. Naumov, A. V. (2007). World market of germanium and its prospects. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 48(4), 265–272.
<https://doi.org/10.3103/S1067821207040049>
3. Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Клименко, А.Г. (2021). Особливості розподілу германію у вугільному пласті c_1 шахти «Дніпровська». *Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми розвитку гірничо-промислових районів»*, 42-50.

4. Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Сливний, С.О. (2021). Про розподіл германію у вугільному пласті с₈^В поля шахти «Західно-Донбаська». *Міжнародна конференція молодих вчених «Геотехнічні проблеми розробки родовищ»*, 27-32.
5. Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Чернобук, О.І. (2022) Зв'язок германію із зольністю у вугільному пласті с₁₀^В шахти «Дніпровська». *X Міжнародна науково-практична конференція «Технології і процеси в гірництві та будівництві»*, 25-33.
6. Гольдшмидт, В. М. (1930). "Ueber das Vorkommen des Germaniums in Steinkohlen und Steinkohlenprodukten". *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 141-167.
7. Зильберминц, В. А., Русанов, А. К., & Кострыкин, В. М. (1936). К вопросу о распространении германия в ископаемых углях. *Академику В.И. Вернадскому к пятидесятилетию научной деятельности, I*, 169-190.
8. Павлов, А.В. (1966). Вещественный состав золы углей некоторых районов Западного Шпицбергена. *Уч. зап. НИИГА. Региональн. геол.*, 8, 128-136.
9. ГОСТ 9815-75. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. *Метод отбора пластмассовых проб.* (1975). Изд-во стандартов.
10. ГОСТ 10175-75. Угли бурые, каменные, антрациты, аргиллиты и алевролиты. *Методы определения содержания германия.* (1975). Изд-во стандартов.
11. ГОСТ 10478-93. *Топливо твердое. Методы определения мышьяка.* (1993). Изд-во стандартов.
12. ГОСТ 28974-91. Угли бурые, каменные и антрациты. *Методы определения бериллия, бора, марганца, бария, хром, никеля, кобальта, свинца, галлия, ванадия, меди, цинка, молибдена, иттрия и лантана.* (1991). Изд-во стандартов.
13. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2014). О классификации угольных пластов по содержанию токсичных элементов с помощью кластерного анализа. *Збірник наукових праць НГУ*, 45, 209-221.
14. Козій, Є.С. (2017). Особливості розподілу токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта с₁₀^В шахти «Шашкова» Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Збірник наукових праць «Геотехнічна механіка»*, 132, 157-172.
15. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2017). Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта с₁₀^В шахти «Дніпровська» Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. *Збірник наукових праць «Геотехнічна механіка»*, 133, 213-227.
16. Козій, Є.С. (2018). Миш'як, берилій, фтор і ртуть у вугіллі пласта с₈^В шахти "Дніпровська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісн. Дніпроп. ун-ту. Геол., географ*, 26 (1), 113-120.
<https://doi.org/10.15421/111812>
17. Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Циба, А.С. (2021). Особливості розподілу деяких токсичних та потенційно токсичних елементів у вертикальному розрізі вугільного пласта і «Закон Зильбермінця». *Матеріали конференції «Тиждень студентської науки 2021»*, 238-240.
18. Ішков, В.В. Козій, Є.С., Циба, А.С., & Пономаренко, О.В. (2021). Особливості розподілу деяких токсичних та потенційно токсичних елементів у вертикальному розрізі вугільних пластів Донбасу. *Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів»*, 80-82.
19. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2017). Про розподіл токсичних і потенційно токсичних елементів у вугіллі пласта с₇^Н шахти "Павлоградська" Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісн. Київ. нац. ун-ту. Геологія*, 79 (4). 59-66.
<https://doi.org/10.17721/1728-2713.79.09>
20. Ішков, В.В. (1999). Проблеми геохімії «малих» і токсичних елементів у вугіллі України. *Наук. вісник НГА України*, 1, 128-132
21. Юдович, Я.Э. (1978). *Геохимия ископаемых углей.* Наука.

22. Юдович, Я.Э. (1965). Распределение элементов в вертикальном профиле угольных пластов. *Недра*, 7, 134-142.
23. Юдович, Я.Э., & Кетрис, М.П. (2005). *Селен в углях*. Геопринт.
24. Козій, Є.С., & Ішков, В.В. (2017). Класифікація вугілля основних робочих пластів Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району по вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів. *Зб. наук. пр. «Геотехнічна механіка»*, 136, 74-86.
25. Ішков, В.В., Сердюк, Е.А., & Слипенький, Е.В. (2003). Особенности применения методов кластерного анализа для классификации угольных пластов по содержанию токсичных и потенциально токсичных элементов (на примере Красноармейского геолого-промышленного района). *Сб. науч. тр. НГУ*, 1 (19), 5-16.
26. Ішков, В.В., Чернобук, О.І., Березняк, О., & Дьячков, П.А. (2022). Дослідження методів кластеризації ділянок різної потужності вугільного пласта з метою створення їх природної типізації за вмістом германію (на прикладі пласта с₈^H шахти «Дніпровська», Україна). *Problems of the development of modern science. Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference*, 86-95.
<https://doi.org/10.46299/ISG.2022.1.34>
27. Козар, М.А., Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Стрельник, Ю.В. (2021). Токсичні елементи мінеральної та органічної складової вугілля нижнього карбону Західного Донбасу. *Геологічна наука в незалежній Україні: Збірник тез наукової конференції Ін-ту геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України*, 55-58.
28. Єрофєєв, А. М., Ішков, В. В., Козій, Е. 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)
29. Kozii, Ye.S. (2021). Toxic elements in the c₁ coal seam of the Blahodatna mine of Pavlohrad-Petropavlivka geological and industrial area of Donbas. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 158, 103-116.
<https://doi.org/10.15407/geotm2021.158.103>
30. Kozii, Ye.S. (2021). Arsenic, mercury, fluorine and beryllium in the c₁ coal seam of the Blahodatna mine of Pavlohrad-Petropavlivka geological and industrial area of western Donbas. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 159, 58-68.
<https://doi.org/10.15407/geotm2021.159.058>
31. Kozii, Ye. (2020). Coal height of coal seam k₅ of "Kapitalna" mine. *Proceedings of the "Widening Our Horizons": International Forum for Students and Young Researchers*, 399-401.
32. Yerofieiev, A.M., Ishkov, V.V., Kozii, Ye.S., & Bartashevskiy, S.Ye. (2021). Geochemical features of nickel in the oils of the Dnipro-Donetsk basin. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 160, 17-30.
<https://doi.org/10.15407/geotm2021.160.017>
33. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2020). Розподіл ртуті у вугільному пласті с₇^H поля шахти «Павлоградська». *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна»*, 1-2(23-24), 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)
34. Kozii, Ye. (2021). Chromium in the coal seams of the Chervonoarmiiskyi geological and industrial area of Donbas. *Proceedings of the "Widening Our Horizons": International Forum for Students and Young Researchers*, 453-455.
35. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. Розподіл арсену та ртуті у вугільному пласті k₅ шахти "Капітальна", Донбас. *Мінерал. журн.* 2021, 43 (4), 73-86.
<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.04.073>

36. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2020). Деякі особливості розподілу берилію у вугільному пласті k₅ шахти «Капітальна» Красноармійського геолого-промислового району Донбасу. *Вісник ОНУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*, 25 (1(36)), 214-227.
[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1\(36\).205180](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2020.1(36).205180)
37. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2020). Особливості розподілу свинцю у вугільних пластах Донецько-Макіївського геолого-промислового району Донбасу. *Вид-во ІГН НАН України. Серія тектоніка і стратиграфія*, 47, 77-90.
<https://doi.org/10.30836/igs.0375-7773.2020.216155>
38. Mametova, L.F., Mirek, A., & Kozii, Ye.S. (2020). Pyritization of the Middle Carboniferous Sandstones of the Donbas. *Mineral. Journ. (Ukraine)*, 42 (2), 14-19.
<https://doi.org/10.15407/mineraljournal.42.02.014>
39. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2021). Накоплення Со і Мп на прикладі пласта с₅ Західного Донбасу як результат їх міграції з кор виветривання Українського кристалічного щита. *Матеріали Міжнародного совещання по геології россыпей і месторождений кор виветривания «Россыпи и месторождения кор виветривания XXI века: задачи, проблемы, решения»*, 160-162.
40. Kozar, M.A., Ishkov, V.V., Kozii, Ye.S., & Pashchenko, P.S. (2020). New data about the distribution of nickel, lead and chromium in the coal seams of the Donetsk-Makiivka geological and industrial district of the Donbas. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, 29(4), 722-730.
<https://doi.org/10.15421/112065>
41. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2019). Аналіз поширення хрому і ртуті в основних вугільних пластах Красноармійського геолого-промислового району. *Вид-во ІГН НАН України. Серія тектоніка і стратиграфія*, 46, 96-104.
<https://doi.org/10.30836/igs.0375-7773.2019.208881>
42. Нестеровський, В.А., Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2020). Токсичні і потенційно токсичні елементи у вугіллі пласта с₈^н шахти «Благодатна» Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 88(1), 17-24.
<http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.03>

ABSTRACT

Purpose. The factual basis of the work was the results of 370 analyzes of germanium and other impurity elements (they are also called "small elements"), measurements of formation thickness, ash content and sulfur content of coal performed in the central certified laboratories of production geological exploration organizations of Ukraine from the material of formation samples obtained by production and research enterprises and organizations. To bring the samples to the same scale, the raw data were normalized. To investigate and analyze the influence of the thickness of the coal seam с₈^н of the Dniprovsk mine on the content of germanium and to develop an objective (natural) typification of the areas of the coal seam of different thickness according to the concentrations of this element.

Methodology. To achieve the goal, the work uses laboratory and statistical methods of scientific research, taking into account and interpreting the obtained results in geological concepts. In the course of the research, the clustering of seam sections of different thickness according to Ge content was carried out using the weighted centroid median method, which was implemented in the most popular professional statistical software platforms "STATISTICA" and "SPSS", and the analysis of the clustering results was performed.

Findings. The implementation of the approach outlined in the article makes it possible to propose a natural typification of areas based on the thickness of the coal seam according to the germanium content. The analysis of the obtained modeling results indicates the manifestation of the so-called

"Zilbermints law" – an empirical regularity of the enrichment of some elements (primarily germanium) in the near-contact zones of coal seams. The thickness of such layers usually does not exceed 0.2-0.3 m.

Scientific novelty. It consists in establishing the numerical characteristics of the differential influence of the thickness of the coal seam c_8^H of the Dniprovskia mine on the content of Ge and the development of a natural typification of areas with different thickness of the c_8^H seam of the Dniprovskia mine according to the concentration of this element.

Practical significance. It consists in the fact that a methodical approach and an algorithm of actions are proposed for the division of coal seams into natural, close in Ge content and genetically related areas, which provides the possibility of the most effective planning of organizational and technological measures and the implementation of their most likely geological and economic assessment, which is aimed at extraction of Ge from coal.

Keywords: *germanium, coal seam, regression analysis, cluster analysis, distribution histogram, normalized content.*