

© В.В. Ішков^{1,2}, Є.С. Козій¹, О.І. Чернобук¹, П.С. Пашченко²,
М.А. Козар³, О.С. Дрешпак¹

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

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

³ Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна

ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ГЕРМАНІУ У ВУГІЛЬНОМУ ПЛАСТІ С7Н ПОЛЯ ШАХТИ «ПАВЛОГРАДСЬКА»

© V. Ishkov^{1,2}, Ye. Kozii¹, O. Chernobuk¹, P. Pashchenko²,
M. Kozar³, O. Dreshpak¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

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

³ M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine

SPATIAL DISTRIBUTION OF GERMANIUM IN COAL SEAM C7H OF THE PAVLOHRADSKA MINE FIELD

Мета роботи полягає у встановленні особливостей просторового розподілу германію у вугільному пласті с7^н поля шахти «Павлоградська» Західного Донбасу.

Методика. Кожна мінеральна фракція з неорганічної частини вугільного пласта с7^н відбиралася цілеспрямовано в гірських виробках шахти і керна 8 свердловин. Усього було відібрано 30 проб кожної мінеральної фракції. Мінеральний склад фракцій контролювався застосуванням методів оптичної мікроскопії і рентгеноструктурного аналізу. Ідентифікація мінерального складу неорганічної частини вугільних пластів відбувалася на 3 різномасштабних рівнях: макрорівню – візуально стандартними мінералогічними методами; мікрорівню – методами оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопів МІН-8 та МБС-9; ультрамікрорівню – методом рентгеноструктурного аналізу.

Основні результати. По площі пласту с7^н виявлена наявність трьох зон підвищеного вмісту германію, встановлено їх просторове положення. Встановлено що спільними рисами геологічної будови вугільного пласту с7^н поля шахти «Павлоградська» на ділянках з максимальним вмістом германію є мінімальна потужність вугільного шару, наявність одного чи двох партингів, присутність щонайменше двох малоамплітудних порушень північно-східного простягання.

Наукова новизна. Виявлено існування у вугільному пласті с7^н поля шахти «Павлоградська» генетично різних форм знаходження германію. Доведено, що на вміст германію у вугільному шарі с7^н в межах поля шахти «Павлоградська» впливають, як сингенетичні фактори: потужність пласту, особливості його будови і фаціальна мінливість безпосередньої та основної покрівлі і ґрунту вугільного шару, так і епігенетичні – наявність малоамплітудних порушень північно-східного простягання.

Практична значимість полягає в обґрунтуванні методу найбільш точної оцінки центральної тенденції у розподілі вибіркової сукупності концентрацій германію у вугільному пласті с₇^H поля шахти «Павлоградська», побудові серії карт що віддзеркалюють особливості просторового розповсюдження цього елемента в межах пласту.

Ключові слова: германій, вугільний пласт, поле шахти, нормований вміст, регресійний аналіз, кореляційний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, частотні гістограми.

Формулювання завдання та аналіз останніх досліджень. Актуальність дослідження германію (Ge) в вугільних шарах обумовлена його потенціалом для промислового використання і отже важливістю як стратегічної сировини. Найважливішими для промислового використання є напівпровідникові властивості германію, одного з найпоширеніших природних напівпровідникових матеріалів, що визначили його широке застосування у радіоелектроніці та електротехніці. Германій є одним з 12 хімічних елементів, що належать до так званих елементарних або простих напівпровідників. Прозорість в ІЧ області спектра металевого германію надвисокої чистоти має військово стратегічне значення. Здатність сплавів германію із міддю, магнієм та алюмінієм до підвищеної стійкості в кислих агресивних середовищах зумовили їх широке використання у багатьох галузях хімічної промисловості. Ge-органічні сполуки з вуглецем (містять зв'язок «Ge-C») беруть участь у життєдіяльності організмів (перенесення кисню в крові, підвищують імунні властивості, протипухлинна активність та ін.). В даний час германій переважно використовується як напівпровідниковий матеріал для електронних приладів, як ключовий компонент конструкцій систем пасивного теплобачення, військових систем ІЧ-наведення, приладів нічного бачення, протипожежних систем, компонент спеціальних сплавів, а також головний компонент деяких медичних препаратів що сприяють підвищенню імунітету та мають протипухлинні властивості.

Із германієвої сировини послідовно отримують: Ge – концентрат (від 5% до 30% Ge), тетрахлорид германію (GeCl₄), його окисл, полі- та монокристали. Всі проміжні продукти у цьому технологічному ланцюжку є товарною продукцією для застосування у різних галузях. Наприклад, для отримання скла в оптоволоконній техніці використовується GeCl₄, в каталізаторах для полімеризації PET-пластмас – GeO₂ чистотою до 99,999%, у виробництві кристалів BGO (Bi₁₄Ge₃O₁₂) синтіляційних датчиків фотонів високих енергій – ще більш чистий GeO₂, у приладах нічного бачення в ІК – діапазоні застосовуються полі- та монокристалічні вікна та лінзи з штучно вирощених кристалів германію. Слід зазначити, що напівпровідникові властивості германію потрібні не тільки у електронній промисловості, а й у сонячних перетворювачах, і у Si–Ge з'єднаннях. Таким чином, для кожної товарної продукції переробки германієвої сировини існує свій особистий світовий ринок. Коректна геолого-економічна оцінка родовищ германієвої сировини повина обов'язково враховувати рівень, динаміку та тенденцію зміни цін на усіх цих ринках.

Як відомо германій відноситься до розсіяних елементів. Ця його особливість пояснюється тим, що в залежності від умов у геохімічних процесах він може поводитися як халькофільний, літофільний або як сидерофільний елемент. Завдяки

цьому, германій в якості ізоморфної домішки присутній у кристалічних ґратах більшості силікатів, сульфідів поліметалів та деяких окислах заліза. Крім того, германій здатний утворювати власні мінерали, які як мікрровключення (так звані "мінерали-в'язні") в інших мінералах (так звані "мінерали-господарі") або формуючи власні агрегати та великі скупчення (дуже рідко), можуть служити ресурсною базою цього елемента.

Нині (на 2022–2023 рр.) надійні оцінки як щодо загальних світових ресурсів, так і щодо виробництва германію та його сполук не опубліковано. Існуючі оцінки на початок ХХІ століття спираються на принципово різні підходи, причому деякі ресурси германію, які поки що слабо чи частково залучені у виробництво цього елемента не враховуються зовсім. Зокрема це стосується багатьох, якщо не більшості родовищ і германієносного вугілля. В той же час вугілля є головним джерелом германію у багатьох країнах, включаючи Україну, Китай, Узбекистан, Канаду, США [1–15]. При цьому на стратегічну важливість руд, що містять германій, для сталого розвитку та обороноздатності країни, вказано ще у рішенні Ради національної безпеки та оборони України від 16 липня 2021 року та Указі Президента України №306/2021 «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку та обороноздатності держави».

Згідно з прогнозами Геологічної служби США, очікується зростання світового попиту на германій до 320–400 тон щороку до 2030 року, з можливим збільшенням виробництва майже в півтора рази. Зараз ціна монокристалів германію, залежно від їх якісних характеристик може досягати 10–15 тисяч доларів за кілограм. В той же час, на Донбасі під час видобутку вугілля втрачається близько 100 тон германію щорічно, що становить на сьогодні приблизно 45% від відомого загального світового річного виробництва цього металу.

Попередні дослідження авторів мікроелементного складу вугілля Донбасу фокусувались на аналізі розподілу мікроелементів, гаданих «токсичними» та «потенційно токсичними», у вугільних пластах регіону [3–4, 11, 16]. Була розроблена методологія для класифікації вугільних родовищ [10] та нафтових полів Дніпровсько-Донецької западини за вмістом різних мікроелементів [5–6, 12]. Інші дослідження були зосереджені на аналізі розподілу германію в окремих вугільних шарах Павлоградсько-Петропавлівського району Донбасу [7–9]. Але до теперішнього часу просторовий розподіл германію у вугільному пласті c_7^H поля шахти «Павлоградська» не розглядався.

Мета роботи: полягає у встановленні особливостей просторового розподілу германію у вугільному пласті c_7^H поля шахти «Павлоградська».

Об'єкт дослідження – вугільний пласт c_7^H в межах поля шахти «Павлоградська»

Методика досліджень. Особливість виконаних досліджень полягала в неможливості безпосереднього спостереження геологічних процесів, пов'язаних з накопиченням та розподілом елементів у геологічних об'єктах. В таких випадках розгляд їх динаміки традиційно виконується шляхом порівняння статистичних даних й аналізу картографічних матеріалів стосовно розподілу хімічних

елементів в об'єктах що розглядаються. Далі одержані результати осмислюються з урахуванням фізико-хімічних й геологічних особливостей. Тобто, отримання інформації стосовно розподілу хімічних елементів в геологічних об'єктах є першим етапом дослідження, що йде від узагальнення фактичного матеріалу, через його теоретичне осмислення до перевірки виявлених закономірностей дослідним шляхом.

Проби відбиралися в гірських виробках (пластові проби, відібрані борозновим способом [2] і з дублікатів керна) особисто авторами за участю співробітників геологічних служб вугледобувного підприємства і різних виробничих геологорозвідувальних організацій в період з 1981р. по 2014р. Обсяг контрольного випробування склав 5% від загального обсягу проб.

Макроскопічно, за допомогою стандартних мінералогічних методів із матеріалу цих проб були виділені сульфідні, силікатні і карбонатні фракції.

Кожна мінеральна фракція з неорганічної частини вугільного пласта c_7^H відбиралася цілеспрямовано в гірських виробках шахти і керна 8 свердловин. Усього було відібрано 30 проб кожної мінеральної фракції. Перш за все, по візуально макроскопічно помітним текстурно-структурним ознакам кожна з них поділялася на 2 групи (по 15 проб у кожній). У першу групу проб входили зразки що мали явні ознаки сингенетичного утворення. Це були, як правило, на прикладі сульфідної фракції, поодинокі вкраплення в вугіллі кристалів розміром не більше 4 мм та їх зростків, що утворювали незначні сферичні конкреції та дрібні лінзовидні прошарки розташовані згідно загальної шаруватості пласта і розташовані не ближче 5 см від найближчої тріщини. До другої групи входили сульфідні зразки яких мали всі безперечні ознаки епігенетичного утворення. Всі вони були відібрані з матеріалу тріщин, що є січними, стосовно вугільного пласта. Аналогічно, були відібрані проби силікатних та карбонатних фракцій.

Мінеральний склад фракцій контролювався застосуванням методів оптичної мікроскопії і рентгеноструктурного аналізу. По комплексу структурно-текстурних ознак визначались їх епігенетична чи сингенетична природа. Кількість вуглисто-мінеральних зростків по окремих фракціях не перевищувало 10%. Таким чином, ідентифікація мінерального складу неорганічної частини вугільних пластів відбувалася на 3 різномасштабних рівнях: макрорівню – візуально стандартними мінералогічними методами; мікрорівню – методами оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопів МІН-8 та МБС-9; ультрамікрорівню – методом рентгеноструктурного аналізу.

Всі аналітичні роботи виконувалися в центральних сертифікованих лабораторіях виробничих геологорозвідувальних організацій. Вміст германію визначався фотоколориметричним методом згідно з [1]. На внутрішній лабораторний контроль направлено 7% 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 Стьюдента і значимість середньої випадкової похибки, яка перевіряється за допомогою критерію Фішера. Оскільки вказані

вище похибки при рівні значимості 0,95 були не значимими, якість аналізів було визнано задовільною.

За допомогою програм Excel 2016 і Statistica 11.0 на початковому етапі обробки первинної геохімічної інформації розраховувалися значення основних описових статистичних показників, виконувалась побудова частотних гістограм вмісту і встановлення особливостей розподілу германію.

При побудові всіх карт використовувалася програма Surfer 11. В ході побудови карт, графіків, розрахунку коефіцієнтів кореляції і рівнянь регресії всі значення концентрацій германію й технологічних параметрів вугілля нормувались за формулою:

$$X_{\text{норм}} = \frac{X_i - X_{\text{min}}}{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}},$$

де: X_i – результат одиничного значення концентрації елемента; X_{max} – результат максимального значення концентрації елемента; X_{min} – результат мінімального значення концентрації елемента.

Нормування здійснювалося для приведення вибірки до одного масштабу незалежно від одиниць виміру та розмаху вибірок.

Результати досліджень та їх обговорення. За адміністративним поділом поле шахти «Павлоградська» ПАТ «ДТЕК «Павлоградвугілля» розташована на території Павлоградського району Дніпропетровської області. У геологічному відношенні вона знаходиться у Павлоградсько-Петропавлівському геолого-промисловому районі Донбасу. У геологічній будові шахтного поля приймають участь кам'яновугільні відклади світи C_1^3 нижнього карбону перекриті чохлам палеогенових, неогенових і четвертинних відкладів. Загальна потужність кайнозойських відкладів досягає 55 м. Утворення карбону представлені нижньою частиною Сарматської вугленосної світи Серпухівського ярусу нижнього відділу кам'яновугільного періоду який складено переважно: аргілітами, алевролітами, пісковиками, вапняками та вугіллям. В межах шахтного поля породи карбону характеризуються пологим (2-5°) слабохвилястим моноклінальним заляганням з падінням порід на північ та північний схід. Складна тектонічна будова шахтного поля зумовлена наявністю розривних порушень різної амплітуди. Північною межею площі поля шахти є Південно-Тернівський скид. По ньому амплітуда зміщення порід складає від 83 до 140 м, а потужність зони їх подрібнення досягає від 10 до 100 м.

У межах поля шахти «Павлоградська» вугільний пласт c_7^H має переважно просту будову та характеризується як відносно витриманий. За середньою пластовою зольністю вугілля пласту на різних ділянках відноситься до мало- та середньозольного; за середнім вмістом сірки загальної – до мало- та середньосірчистого. За технологічними властивостями згідно ДСТУ 3472-96 вугілля пласту c_7^H відноситься до марки «ДГ» (довгополум'яне газове) і може бути використане як високоякісне енергетичне паливо або в якості компонента шихти для коксування. В межах поля шахти «Павлоградська» вугільний пласт c_7^H має потужність від 0,2 до 1,5 м.

У межах поля шахти «Павлоградська» концентрація германію по пласту c_7^H змінюється від 8,8 г/т до 24,7 г/т, при середньому значенні $17,62 \pm 0,47$ г/т. Це в 6,08 рази перевищує кларк германію для кам'яного вугілля світу, який наведено у [17]. Медіанне і модальне значення вмісту Ge відповідно складає 18,05 г/т і 20,6 г/т. Стандартне відхилення, дисперсія вибірки, її ексцес і асиметричність відповідно дорівнюють 4,02 г/т, 16,18 г/т, -0,61 та -0,42. Для наочності та візуального аналізу характеру вибірки вмістів германію і встановлення особливостей їх розподілу була побудована гістограма (рис. 1).

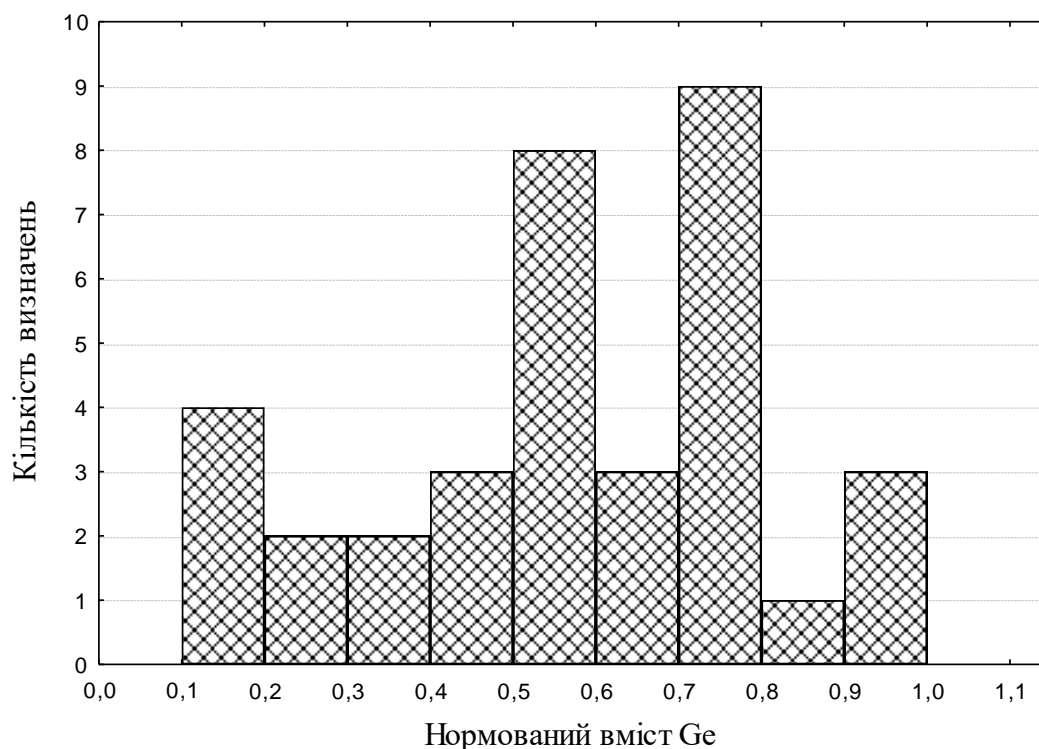


Рис. 1. Гістограма розподілу нормованого вмісту германію по пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська»

Візуальний аналіз наведеної гістограми свідчить про: 1) невідповідність вибірки нормальному або логнормальному закону розподілу; 2) фіксується полімодальність розподілу нормованого вмісту германію; 3) спостерігається зсув ядра щільності розподілу вправо, у бік більш високих значень. Додатково було виконано аналітичні розрахунки відповідності емпіричного розподілу досліджуваного параметру розподілу Гауса. С цією метою були розраховані критерії Колмогорова – Смірнова, Шапіро-Уїлка, Ліллієфорса та згоди χ^2 -квадрат Пірсона. У всіх випадках результати розрахунків підтвердили невідповідність досліджуваної вибірки нормальному або логнормальному закону розподілу. Таким чином, для більш реалістичної оцінки центральної тенденції вмісту германію замість значень середнього арифметичного необхідно використовувати його медіанне значення.

Друга ділянка розташована у південно-західному напрямку від першої на другій вісі «віяла» вздовж свердловин 6283, 854, 6692 та 974. Саме у пробах вугілля зі керну свердловини 974 було відмічено максимальне значення вмісту германію на цій ділянці – 21,3 г/т.

Третя ділянка з аномально високими концентраціями германію знаходиться у південно-східній частині першої зони підвищеного вмісту цього елемента і розташована на третій вісі «віяла» на ділянці біля свердловин 6284, Н3401, Н3211, Н32040 та Н32049. Максимальне значення вмісту германію на цій ділянці було відмічено у пробах вугілля зі керну свердловини Н3211, де воно досягло значення 23,6 г/т. Треба відмітити, що це значення найбільше для всієї першої зони підвищеного вмісту германію.

Друга відносно локальна зона підвищеного вмісту германію встановлена в південно-західному напрямку від першої значної зони підвищеного вмісту цього елемента, майже біля південного кордону шахтопласту, на ділянці свердловин Н3491, Н32048 та Н3494. Саме із проб вугілля зі керну свердловини Н3494 було отримано максимальне значення вмісту германію для цієї зони, що дорівнювало 21,3 г/т.

Третя відносно локальна зона підвищеного вмісту германію знаходиться у самій південній частині шахтного поля біля свердловин 992, Н32111, Н32112, 995 та 3023. Максимальне значення вмісту германію на цій ділянці і по всьому шахтопласту зафіксовано у пробах вугілля зі керну свердловини 992, де воно досягло рівня 24,7 г/т.

Порівняльний аналіз матеріалів буріння по кожній із свердловин та даних шахтної геолого-маркшейдерської служби показав, що на всіх ділянках з максимальним вмістом германію у геологічній будові вугільного пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська» є декілька спільних рис. Вони полягають у наступному: 1) мінімальна потужність вугільного шару; 2) наявність одного чи двох партингів; 3) присутність щонайменше двох малоамплітудних порушень північно-східного простягання.

На побудованій карті локальних відхилень нормованого вмісту германію у вугільному пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська» (рис. 3) чітко фіксується одна значна і майже суцільна зона позитивних локальних відхилень нормованого вмісту германію що була виділена по ізогіпсі 0,05.

Вона простежуються у вигляді широкої смуги від свердловин Н32312, Н32315 та Н3498 на півночі і північно-західному кордоні шахтного поля, максимального звужуючись біля свердловин 250 та Н3439 в його середині і далі, знову розширюючись біля його південних меж досягаючи максимуму на ділянці зі свердловинами 993, 3023 та Н32111. Ця зона перетинає шахтопласт майже по середині у меридіональному напрямку. На побудованій карті спостерігається значна ундуляція її поверхні. Максимуми позитивних локальних відхилень приурочені до ділянок прилеглих до свердловин 356 (перша ділянка), 974 (друга ділянка), Н3499, Н3494 (третя ділянка) та 992 (четверта ділянка). Інші дві дуже незначні зони позитивних локальних відхилень нормованого вмісту германію розташовані біля свердловин Н3401 і Н32118. Аналіз особливостей геологічної

будови і просторового положення зон позитивних локальних відхилень германію в межах пласта c_7^H поля шахти «Павлоградська» дозволяє прийти до висновку що вони пов'язані із локальними зменшеннями потужності вугільного шару.

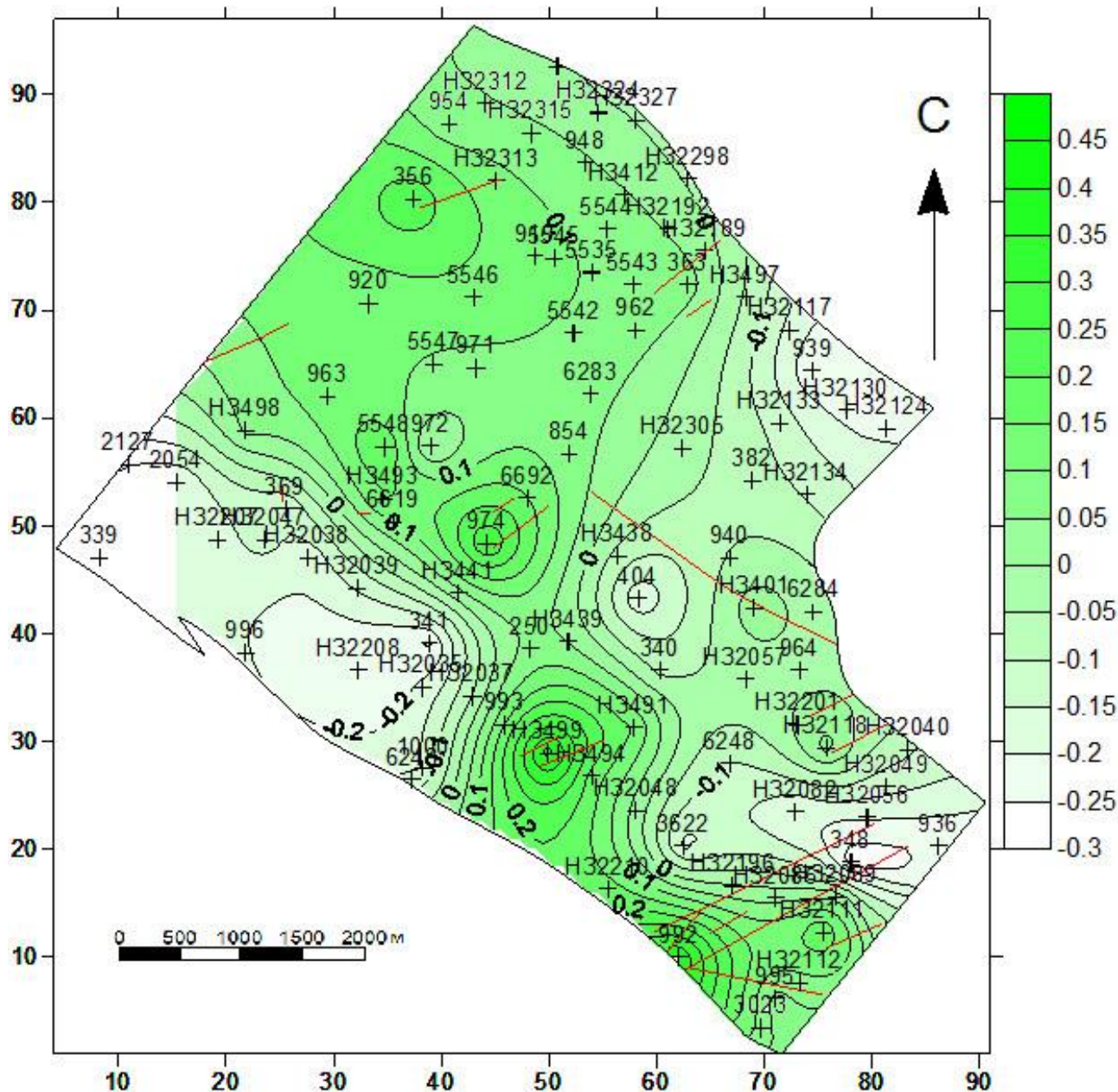


Рис. 3. Карта локальних відхилень нормованого вмісту германію у вугіллі пласта c_7^H поля шахти «Павлоградська»

На карті градієнту нормованого вмісту германію у вугільному пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська» (рис. 4) добре простежуються дві смуги максимальних градієнтів вмісту цього елементу.

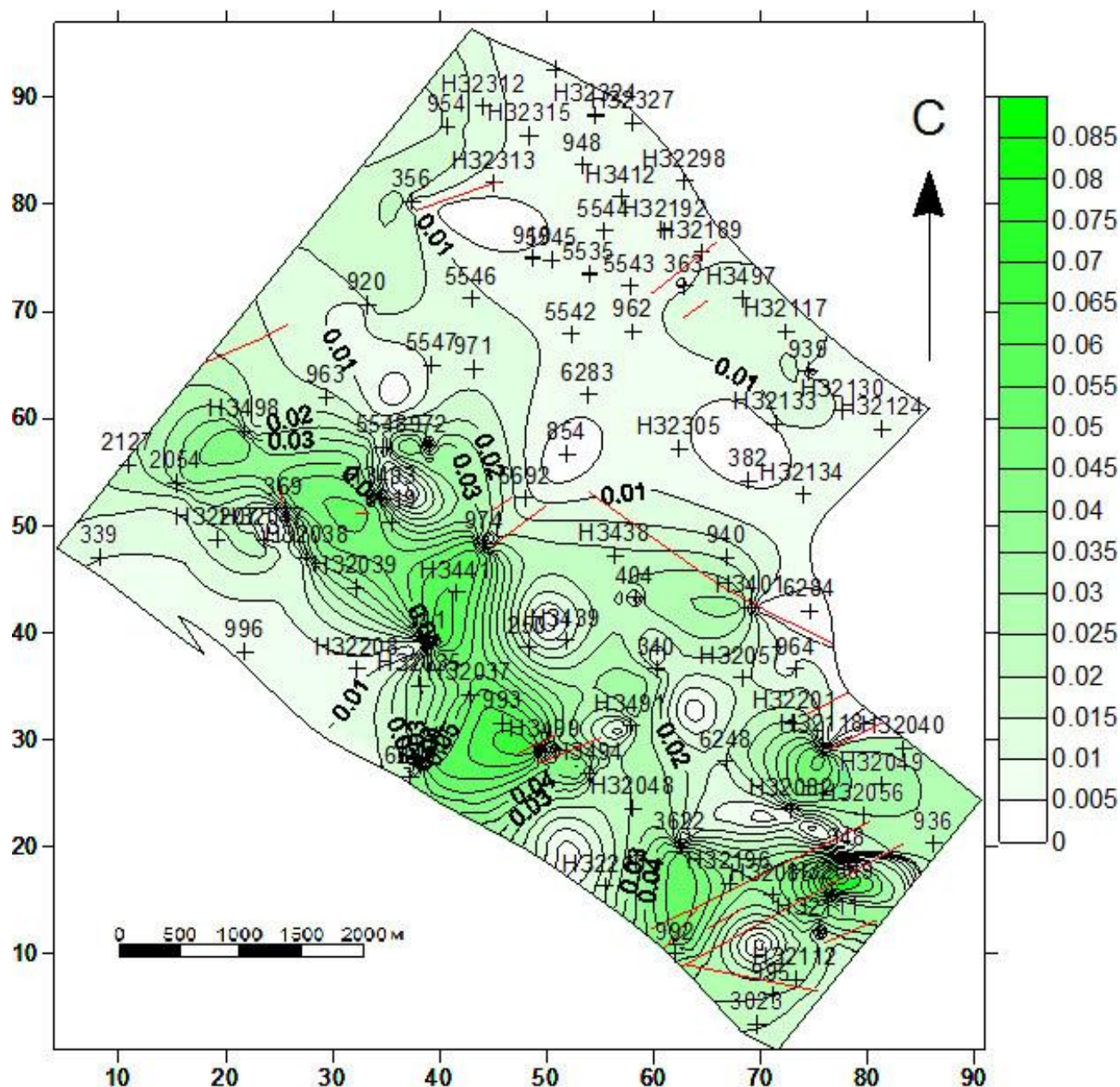


Рис. 4. Карта значень градієнту нормованого вмісту германію у вугіллі пласта c_7^m поля шахти «Павлоградська»

Обидві вони розташовані на південній половині шахтного поля і відокремлені одна від одної вузькою меридеальною смугою яка знаходиться у районі свердловин H3221, H32048, H3491 та 340. Перша з них включає територію розташування свердловин 2054, H3498, H3220, H32038, H32039, 6619, H3493, 5548, 972, 974, H3441, 341, H32035, H32037, 1000, 6243, 993, H3499 та H3494. Друга смуга охоплює площу розташування свердловин H32196, 3622, 992, 995, H32112, H32111, H32089, 348, H32082, H32056, H32118 та H32201. На площі розвитку цих двох смуг спостерігається підвищена мінливість потужності вугільного пласта, його будова, присутність розривних порушень та фаціальна мінливість безпосередньої та основної покрівлі.

На карті регіональної складової нормованого вмісту германію (рис. 5), спостерігається збільшення його концентрації в північно-східному напрямку.

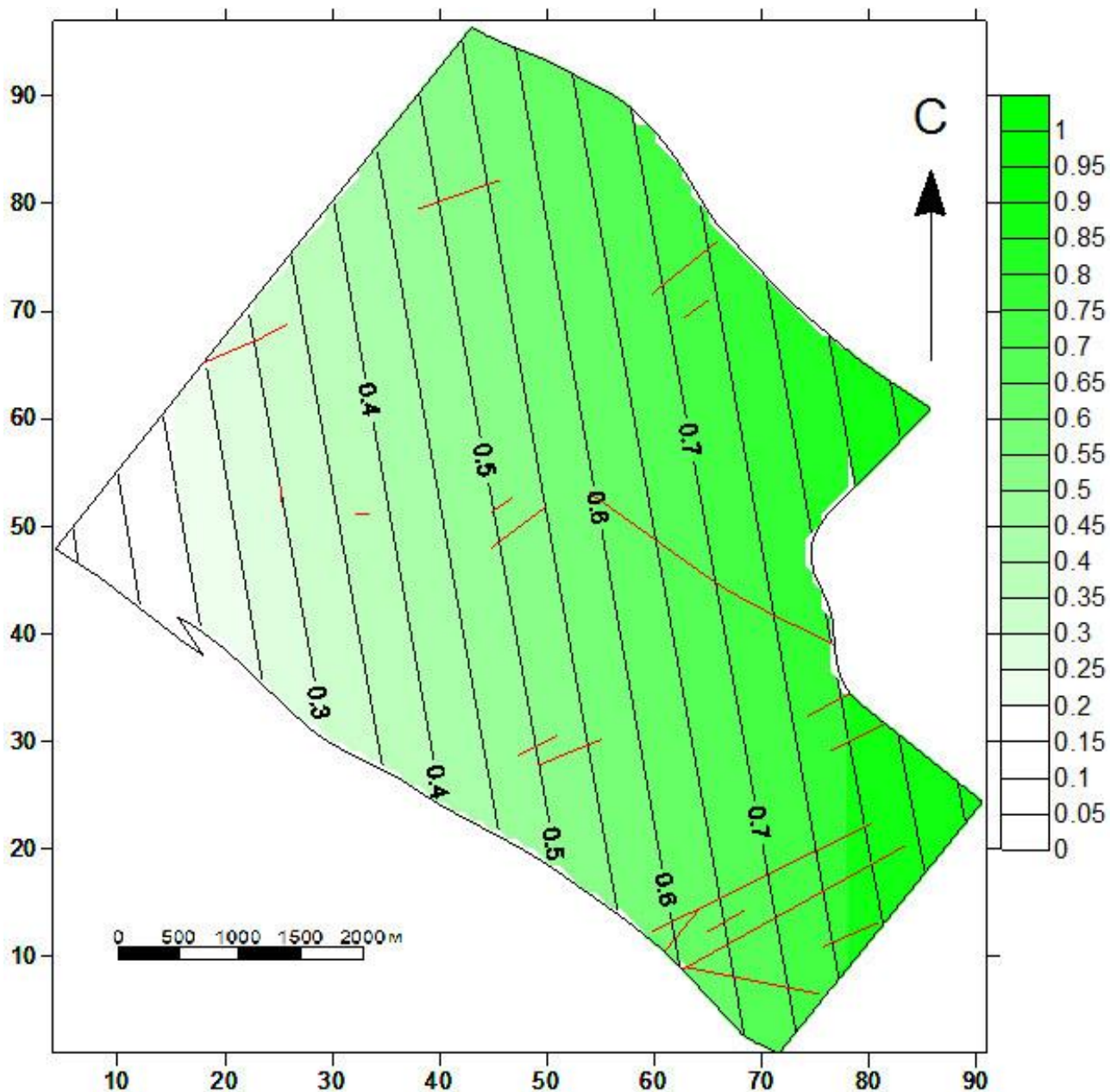


Рис. 5. Карта значень градієнту нормованого вмісту германію у вугіллі пласта c_7^H поля шахти «Павлоградська»

Для перевірки гіпотези про зв'язок змістів германію у вугільному пласті з його потужністю було виконано кореляційний та регресійний аналізи. За результатами кореляційного аналізу встановлено зворотній та дуже тісний за шкалою Чеддока зв'язок між концентраціями германію та потужністю (m), при цьому коефіцієнт кореляції Пірсона дорівнює $-0,94$. За результатами регресійного аналізу було розраховане лінійне рівняння регресії:

$$Ge = 0,917 - 0,9577 \cdot m.$$

Графік рівняння регресії наведено на рисунку 6.

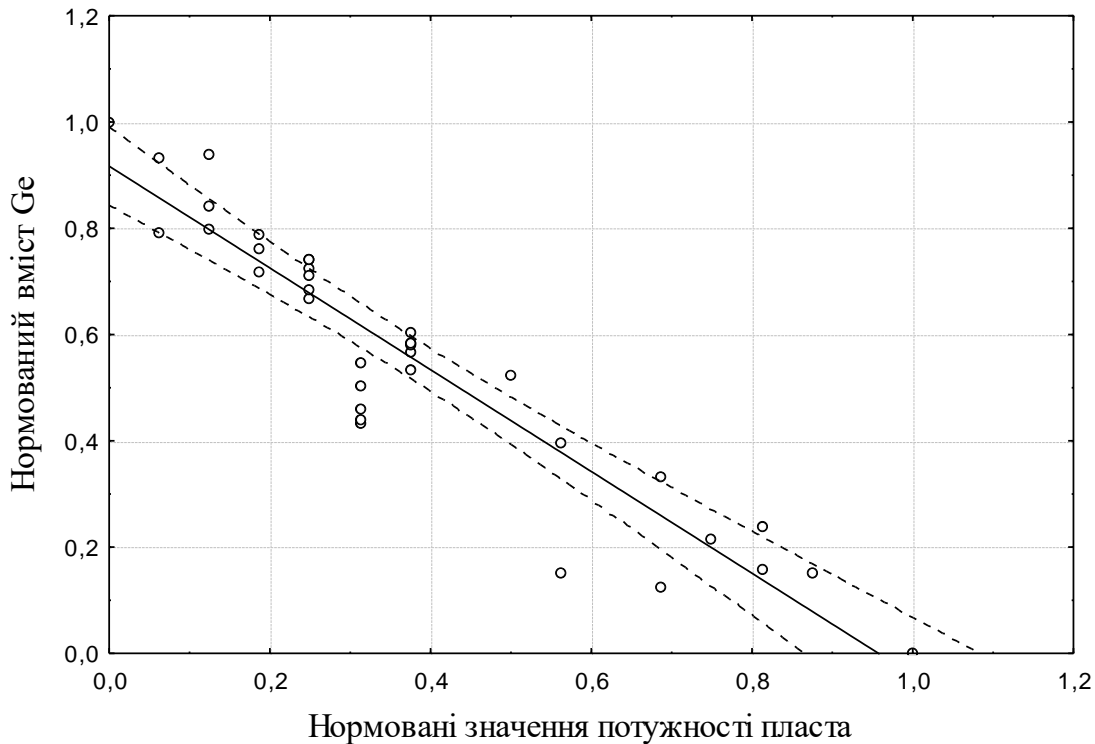


Рис. 6. Графік лінійного рівняння регресії між вмістом германію та потужністю вугільного пласта c_7^H поля шахти «Павлоградська»

Висновки. Виконані дослідження дозволяють сформулювати наступні основні висновки: 1). У межах поля шахти «Павлоградська» концентрація германію по пласту c_7^H змінюється від 8,8 г/т до 24,7 г/т, при середньому значенні $17,62 \pm 0,47$ г/т, що в 6,08 рази перевищує кларк германію для кам'яного вугілля світу. Це свідчить про суттєве збагачення вугілля пласта германію і дозволяє розглядати його як цінне потенційне джерело отримання цієї стратигічної сировини. 2). Встановлено невідповідність вибірки германію нормальному або логнормальному закону розподілу, при цьому фіксується полімодальність розподілу нормованого вмісту германію що в свою чергу свідчить з одного боку про наявність у досліджуваному пласті різних форм його концентрації, які були реалізовані у конкретних геологічних умовах пласта c_7^H шахти «Павлоградська», а з іншого – про загальний полігенний характер його накопичення у цьому пласті. Невідповідність вибірки германію закону розподілу Гауса свідчить що для більш реалістичної оцінки центральної тенденції вмісту германію замість значень середнього арифметичного необхідно використовувати його медіане значення. При цьому оцінка його ресурсів у пласті дещо зростає, що ще більше підвищує значення даного вугільного шару як комплексної мінеральної сировини. 3). По площі пласту c_7^H виявлена наявність трьох зон підвищеного вмісту Ge, встановлено їх просторове положення. 4). Встановлено що спільними рисами геологічної будови вугільного пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська» на ділянках з максимальним вмістом германію є: 1) мінімальна потужність вугільного шару;

2) наявність одного чи двох партингів; 3) присутність щонайменше двох малоамплітудних порушень північно-східного простягання. Це надає можливість вважати ці риси прогнозними критеріями наявності максимального вмісту германію у цьому шахтопласту. 5). Виявлено що локальне зменшення потужності вугільного шару c_7^H викликає появу зон позитивних локальних відхилень вмісту германію. 6). Підвищена мінливість потужності вугільного пласта, його будови, присутність розривних порушень та фаціальна мінливість безпосередньої та основної покрівлі та ґрунту вугільного шару призводить до зростання градієнту вмісту германію. 7). Встановлене збільшення регіональної складової вмісту германію у північно-східному напрямку. 8). Доведена наявність зворотнього та дуже тісного кореляційного зв'язку між концентраціями германію та потужністю вугільного пласту c_7^H поля шахти «Павлоградська» та розраховане рівняння регресії між цими параметрами дозволяє прогнозувати вміст германію без проведення нових випробувань та аналітичних досліджень.

Перелік посилань

1. Вугілля буре, кам'яне, антрацити, аргіліти та алевроліти. Методи визначення вмісту германію. ГОСТ 10175-75. (1975). Вид-во стандартів.
2. Вугілля буре, кам'яне, антрацит та горючі сланці. Метод відбору пластових проб. ГОСТ 9815-75. (1975). Вид-во стандартів.
3. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2020). Деякі особливості розподілу берилію у вугільному пласті k_5 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)
4. Ішков, В.В., & Козій, Є.С. (2021). Розподіл арсену та ртуті у вугільному пласті k_5 шахти "Капітальна", Донбас. *Мінералогічний журнал*, 43(4). 73–86. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.43.04.073>
5. 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>
6. Ішков, В.В., Козій, Є.С., Козар, М.О., Єрофєєв, А.М., Барташевський, С.Є., & Дрешпак, О.С. (2023). Особливості загального вмісту металів у нафтах родовищ Дніпровсько-Донецької Западини. *Збірник наукових праць НГУ*, 72, 98–114. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.098>
7. Ішков, В.В., Козій, Є.С., Козар, М.А., & Чернобук, О.І. (2022). Розподіл германію у вугільному пласті c_4 шахти «Самарська» Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району Донбасу. *Вісник Одеського національного університету. Сер.: Географічні та геологічні науки*, 27(2(41)), 190–206. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.2\(41\).268761](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2022.2(41).268761)
8. Ішков, В.В., Козій, Є.С., & Чернобук, О.І. (2022). Аналіз впливу потужності вугільного пласта c_8^H шахти Дніпровська на вміст германію. *Збірник наукових праць НГУ*, 70, 76–90. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/70.076>
9. Ішков, В.В., Козій, Є.С., Чернобук, О.І., & Хоменко, В.Л. (2022). Результати кластеризації ділянок різної потужності вугільного пласта c_{10}^B шахти «Дніпровська» за вмістом германію. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна»*, 1(27)–2(28), 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)
10. Козій, Є.С., & Ішков, В.В. (2017). Класифікація вугілля основних робочих пластів Павлоградсько-Петропавлівського геолого-промислового району по вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів. *Збірник наукових праць «Геотехнічна механіка»*, 136, 74–86.
11. Чернобук, О.І., Ішков, В.В., Козій, Є.С., Козар, М.А., Пащенко, П.С., & Дрешпак, О.С. (2023). Зв'язок германію із зольністю та «токсичними» елементами у вугіллі на прикладі

пласта с₅ поля шахти Благодатна Західного Донбасу. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-геологічна»*, 2(30), 68–79.

<https://doi.org/10.31474/2073-9575-2023-2-30-68-79>

12. Ishkov, V.V., & Kozii, Ye.S. (2024). Geochemistry features of mercury in oils from the deposits of the Dnipro-Donetsk depth. *Mining Machines*, 42(1), 12–29. <https://doi.org/10.32056/KO-MAG2024.1.2>
13. Ishkov, V.V., & Kozii, Ye.S. (2022). Method of clusterization of c₆ coal seam zones of different thickness in the Dniprovsk mine field by germanium concentration. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 163, 5–15. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.163.005>
14. Ishkov, V.V., Kozii, Ye.S., & Chernobuk, O.I. (2023). Geochemical peculiarities of germanium, arsenic, mercury, beryllium, fluorine and total sulfur in the c₈^H coal seam of the Dniprovsk mine field. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 164, 21–36. <https://doi.org/10.15407/geotm2023.164.021>
15. Ishkov, V.V., Kozii, Ye.S., Chernobuk, O.I., & Pashchenko, P.S. (2022). The relationship of germanium concentrations and the thickness of the c₈^H coal seam of the Dniprovsk coal mine. *Collection of scientific works "Geotechnical Mechanics"*, 162, 164–176. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.162.164>
16. 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>
17. Yudovich, Ya.E., & Ketris, M.P. (2004). *Germanium in coals*. Syktyvkar.

ABSTRACT

The purpose of the work is to establish the features of the spatial distribution of germanium in the coal seam c₇^H of the "Pavlohradsk" mine field in Western Donbas.

The methods of work. Each mineral fraction from the inorganic part of the c₇^H coal seam was selected purposefully in the mine workings and the core of 8 wells. A total of 30 samples of each mineral fraction were taken. The mineral composition of the fractions was monitored using the methods of optical microscopy and X-ray structural analysis. The identification of the mineral composition of the inorganic part of coal seams took place at 3 different scale levels: macro level – visually using standard mineralogical methods; micro level – by methods of optical microscopy using MIN-8 and MBS-9 microscopes; ultramicro level – by X-ray structural analysis.

Findings. The presence of three zones of increased germanium content was found on the area of the c₇^H seam, and their spatial location was established. It was established that the common features of the geological structure of the c₇^H coal seam of the "Pavlohradsk" mine field in the areas with the maximum germanium content are the minimum thickness of the coal seam, the presence of one or two partings, the presence of at least two low-amplitude northeast-trending disturbances.

The main scientific novelty of the obtained results. The presence of genetically different forms of germanium in the c₇^H coal seam of the "Pavlohradsk" mine field was revealed. It has been proven that the content of germanium in the c₇^H coal seam within the boundaries of the Pavlohradsk mine field is influenced by both syngenetic factors: the thickness of the seam, the peculiarities of its structure, and the facies variability of the immediate and main roof and soil of the coal seam, as well as epigenetic factors - the presence of low-amplitude disturbances of the northeast reach.

The main practical value of the performed research is in the substantiation of the method of the most accurate assessment of the central tendency in the distribution of a sample population of

germanium concentrations in the c₇^H coal seam of the Pavlohradska mine field, the construction of a series of maps that reflect the features of the spatial distribution of this element within the seam.

Keywords: *germanium, coal seam, mine field, normalized content, regression analysis, correlation analysis, X-ray structural analysis, frequency histograms.*