

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.05.060>

УДК 550.38+551.521

**М.І. Орлюк<sup>1</sup>, А.В. Марченко<sup>1</sup>, П.І. Яцевський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

<sup>2</sup> ННІ "Інститут геології" Київського національного університету ім. Тараса Шевченка

E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua; orliuk@ukr.net

## **Зв'язок радонових та геомагнітних аномалій території України**

*Представлено академіком НАН України В.І. Старостенком*

*Виявлення та оцінка областей концентрації радону є актуальною задачею при вивченні екологічної безпеки території для проживання людей. Показано, що радонові аномалії продукуються радіоактивними елементами торієм і ураном, які концентруються в радіоактивних мінералах. За результатами якісного аналізу виявлено кореляцію радонових та уранових аномалій з від'ємними магнітними аномаліями регіонального та локального класів і з розломами північно-західного та широтного простягання. Запропоновано фізико-мінералогічне та тектонічне обґрунтування такого зв'язку. Він зумовлений насамперед закономірним зменшенням концентрації феромагнітних мінералів та збільшенням радіоактивних мінералів у ряду зміни кислотності порід: ультраосновні — основні — середні — кислі. Відповідно, опосередковано основними джерелами радонових аномалій є гранітоїди та альбітити, які характеризуються мінімальними величинами намагніченості. Отже, слабка намагніченість та підвищений вміст радіоактивних мінералів у цих породах у поєднанні з глибинними розломами та зонами тріщинуватості в загальних рисах пояснюють зв'язок радонових і магнітних аномалій.*

**Ключові слова:** радон, магнітні аномалії, Український щит, радіоактивність, розломи.

Вивчення фізичних і мінералогічних характеристик порід є необхідною умовою для визначення зв'язку між магнітними і радоновими аномаліями. Уран і торій є ключовими радіоактивними елементами в земній корі. Основними урановмісними мінералами є ураніт, бетафіт, кофініт і ряд інших. Також уран як другорядний компонент міститься в цирконі, ксенотимі, монациті, ортиті, апатиті та сфені. Монацит, аланіт, циркон, сфен, ксенотима і апатит як акцесорний компонент містять торій.

Радіоактивність магматичних порід має тенденцію до збільшення зі зростанням кислотності порід. Граніт, сієніт, гранодіорит, як правило, характеризуються високою радіоактивністю, а основні та ультраосновні породи — надзвичайно низькою радіоактивністю [1].

$^{222}\text{Rn}$  — радіоактивний газ, який характеризується періодом напіврозпаду приблизно 3,8 доби, утворюється в результаті альфа-розпаду  $^{226}\text{Ra}$  в ланцюзі розпаду  $^{238}\text{U}$ . Атоми  $^{226}\text{Ra}$ , що містяться в зернах мінералів, генерують атоми  $^{222}\text{Rn}$ , з яких більша частина за-

лишається в мінеральних зернах, а менша частина потрапляє в поровий простір породи. Об'ємна питома радіоактивність радону в ґрунтовому повітрі змінюється від 0 до 100 кБк/м<sup>3</sup>, однак іноді досягаючи величин в сотні кБк/м<sup>3</sup> і більше. Конвективне перенесення радону обумовлено рухом підземних вод, температурним градієнтом, тиском і припливним ефектом. Об'ємна питома радіоактивність радону в уранових мінеральних тілах надзвичайно висока і характеризується значеннями порядку 10<sup>4</sup> кБк/м<sup>3</sup>, тоді як об'ємна питома радіоактивність радону при віддаленні на кілька метрів або десятків метрів від рудного тіла знижується до 10<sup>0</sup> або 10<sup>1</sup> кБк/м<sup>3</sup> [2–6].

**Природна радіоактивність та зв'язок з геомагнітним полем на території України.** На території України основні джерела природної радіації зосереджені в межах Українського кристалічного щита та меншою мірою на Донбасі й у Карпатах. Площі з високим рівнем радоновиділення займають близько 20 % території кристалічного щита [7]. Вони характеризуються численними природними радіоекологічними аномаліями з концентраціями радону до 100 еман і більше, урану —  $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$  г/дм<sup>3</sup> і радію —  $10^{-11} - 5 \cdot 10^{-11}$  г/дм<sup>3</sup>.

Найбільший вплив на формування радіоактивного фону в Україні мають U, Th, <sup>40</sup>K, <sup>87</sup>Rb. Пересічний вміст урану в кристалічних породах — 2,2 г/т, торію — 14 г/т, співвідношення Th/U — 5,6.

Південна частина Українського щита являє собою головний радононосний та ураноносний район України, понад 50 % якого характеризується аномальними концентраціями радону й урану в ґрунтах і підземних водах. У кристалічних породах щита виявлений ряд значних природних аномалій торію [7].

Основною урановмісною породою є альбітит (лейкократова метасоматична порода, основна маса якої складається з дрібнозернистого альбіту, а на її фоні — порфіроподібні виділення кварцу, мікрокліну, подекуди слюд, рідше амфіболу). Ця порода пов'язана з купольними структурами Українського щита, які складені в основному гранітними масивами кіровоградського комплексу. Мінеральний склад альбітиту залежить від складу вихідних порід і помітно змінюється відповідно до їх лужності. У складі рудних асоціацій відзначаються альбіт, новостворений кварц і група залізовмісних мінералів — феробіотит, анкерит (або залізистий кальцит), гематит, пірит, з якими пов'язана уранова мінералізація [8].

Родовища радонових вод знаходяться в основному на Українському щиті. Походження радонових вод пов'язане з радіоактивними елементами в породах — докембрійських гранітоїдах. За вмістом радону вода ділиться на чотири групи: 1) дуже слаборадонові води, 185–740 Бк/кг; 2) слаборадонові води, 740–1480 Бк/кг; 3) радонові води середньої концентрації, 1480–7400 Бк/кг; 4) високорадонові води, понад 7400 Бк/кг. Водоносні горизонти здебільшого знаходяться на глибинах від десятків до сотень метрів [9].

Вміст радону підземних вод пов'язаний з особливостями будови верхньої частини земної кори в області поширення водоносних горизонтів у докембрійських комплексах Українського щита. Для підземних вод різних регіонів, розташованих у межах Українського щита, концентрація радону змінюється від 30 до 7400 Бк/кг, а поза його межами — 37 Бк/кг. Формування підвищеного вмісту радону підземних вод водоносних горизонтів пов'язано з речовинним складом порід фундаменту і наявністю розломів та зон тріщинуватості.

З метою зіставлення геомагнітного поля з радоновими та урановими аномаліями було розроблено карти його двох компонент: регіональної ( $\Delta T$ )<sub>а,пер</sub>, в якій відображається пере-

важно магнітна неоднорідність нижньої частин земної кори, та локальної  $(\Delta T)_{a,лок}$  — магнітна неоднорідність верхньої частини земної кори (рис. 1). Показано, що уранові і радонові аномалії пов'язані в основному з від'ємними аномаліями геомагнітного поля різних класів. У першому наближенні це свідчить про те, що в цих районах породи земної кори представлені кислими різновидами. Зауважимо, що на фоні від'ємних аномалій можуть бути наявні додатні магнітні аномалії складної форми, зв'язані з виділенням феромагнітних мінералів на стадії утворення альбітиту. Також варто відзначити, що більшість проявів радону приурочені до розломних зон північно-західного напрямку та вузлів їх перетину з розломами ортогональної системи.

**Фізико-мінералогічне обґрунтування зв'язку джерел магнітних та радонових аномалій.** Джерела магнітних та радонових аномалій насамперед визначаються магнітними та радіоактивними властивостями гірських порід. У зв'язку з цим було проаналізовано усереднені величини магнітної сприйнятливості та радіоактивності для магматичних порід Українського щита (таблиця).

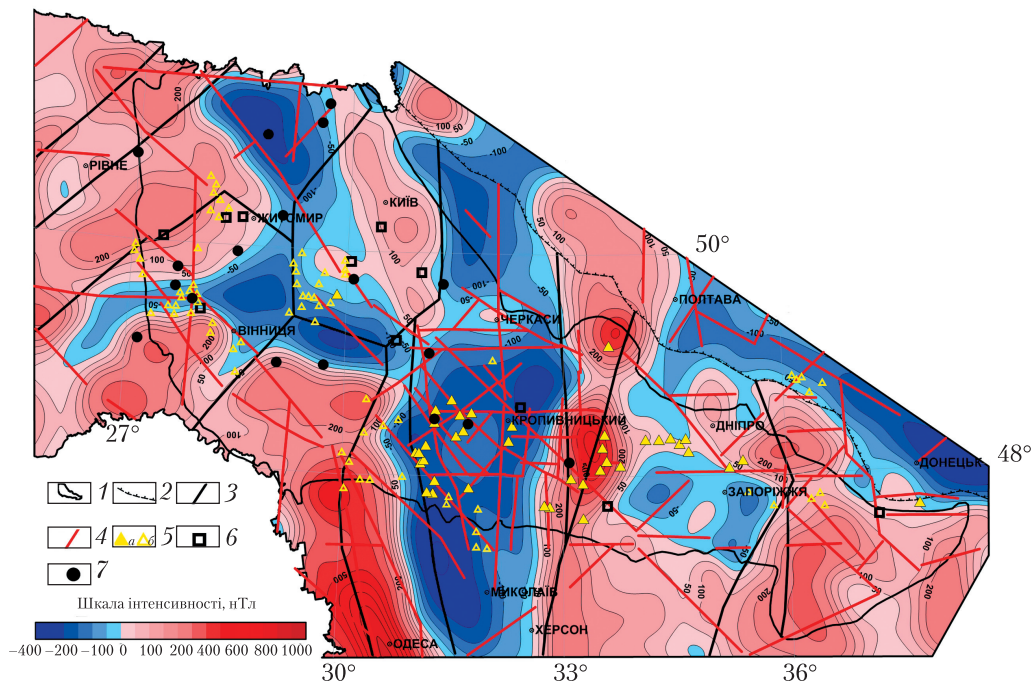
З таблиці видно, що зі зменшенням магнітної сприйнятливості концентрація радіоактивних елементів зростає. Метаморфізовані ультраосновні породи характеризуються найбільшими значеннями магнітної сприйнятливості, а кислі породи різного генезису (магматичного, метасоматичного, палінгенного) — найбільшою концентрацією радіоактивних елементів. Ця залежність пояснюється зміною мінералогічного складу гірських порід при переході від кислих до ультраосновних, при цьому концентрація феромагнітних мінералів збільшується, а вміст мінералів, які містять радіоактивні елементи, зменшується. Звичайно, що ця закономірність може мати винятки залежно від окиснювально-відновних та термодинамічних умов формування порід конкретних структур.

Граніти і альбітиту, як основні урановмісні породи Українського щита, є слабомагнітними, значення магнітної сприйнятливості яких рідко перевищує  $100 \cdot 4\pi \cdot 10^{-6}$  од. СІ [13]. Магнітні властивості альбітиту залежать від материнської породи, але він характеризується меншою магнітною сприйнятливістю та намагніченістю за рахунок перекристалізації чи виносу магнітних мінералів.

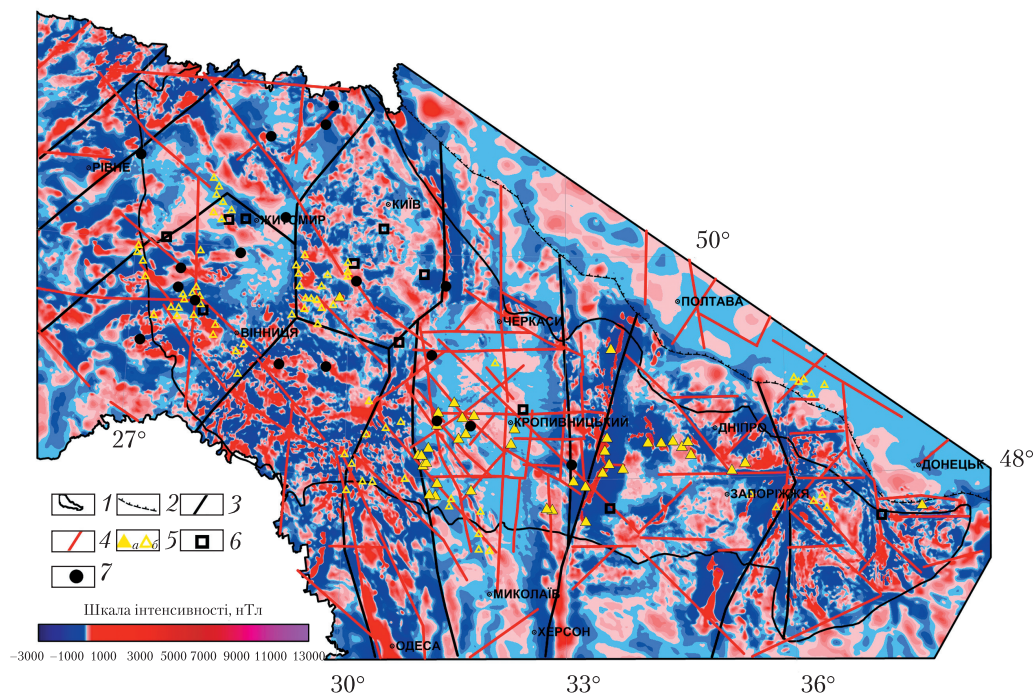
Варто зазначити, що у гірських породах уран входить у кристалічну структуру силікатів або знаходиться в рухомій формі (до 90 % урану в деяких гранітах) і легко вилугується.

**Зіставлення величини магнітної сприйнятливості гірських порід з концентрацією радіоактивних елементів у них) [4, 13, 14]**

Тип порід	Концентрація радіоактивних елементів, %			Магнітна сприйнятливість, $4\pi \cdot 10^{-6}$ од. СІ	
	К	U · 10 <sup>-4</sup>	Th · 10 <sup>-4</sup>	Граничні значення	Середнє значення
Метаморфізовані ультраосновні (дуніт, піроксеніт)	0,15	0,03	0,08	1>50000	1700
Основні (габро, діабаз)	0,7	0,6	1,8	<1>25000	1000
Середні (кварцовий діорит, діорит)	1,8	1,8	6	<1>15000	750
Кислі (гранодіорит, плагіограніт, лейкократовий, біотитовий граніт, аляскіт)	2,3—4,0	2,1—7,0	8,3—40,0	<1>7500	350



а



б

Схема зіставлення регіональної ( $\Delta T$ )<sub>а,рег</sub> (а) та локальної ( $\Delta T$ )<sub>а,лок</sub> (б) компонент геомагнітного поля Українського щита з аномаліями розподілу радіоактивних елементів. 1 – границя Українського щита; 2 – границя Дніпровсько-Донецького авлакогену; 3 – зони міжмегаблокових розломів; 4 – зони глибинних розломів згідно з [10, 11]; 5 – родовища (а) та прояви (б) урану [12]; 6 – родовища радонових вод; 7 – аномалії торію в кристалічних породах

Висока інтенсивність міграції і здатність до концентрації визначають типи уранового рудоутворення, в тому числі в магматичних породах. Особливо висока радіоактивність притаманна гранітам, що містять 50–110 Бк/кг  $^{238}\text{U}$ , 85–480 Бк/кг  $^{232}\text{Th}$ , 95–115 Бк/кг  $^{226}\text{Ra}$ . До гранітів просторово тяжіють підземні радонові води (у корі вивітрювання, зонах тріщинуватості тощо) з вмістом  $^{222}\text{Rn}$  1–40 кБк/л. Заміри вмісту радону, які проводилися над розломами, показали, що його концентрація підвищувалася в кілька разів. Зазвичай зони розломів відображаються також аномаліями геофізичних полів, зокрема часто від'ємними магнітними аномаліями.

Згідно з результатами дослідження, головними факторами, які зумовлюють радонові аномалії є гірські породи фундаменту (переважно гранітоїди, з якими пов'язані акцесорні мінерали ортит, циркон, апатит, сфен, що містять радіоактивні елементи і є джерелами радону) та наявність глибинних розломів і зон тріщинуватості.

Основні джерела природної радіації на території України зосереджені переважно в межах Українського щита. Гранітоїди та альбітити – це основні породи, які створюють уранові та радонові аномалії. Вміст радону підземних вод зв'язаний з особливостями будови верхньої частини земної кори в області поширення водоносних горизонтів у докембрійських комплексах Українського щита. На підставі якісного аналізу показано, що радонові та уранові аномалії і родовища корелюють в основному з від'ємними аномаліями магнітного поля регіонального та локального класів і з розломами північно-західного та широтного простягання, або вузлами їх перетину. Це може вказувати на те, що в цих районах кислі породи земної кори зазнали складних метаморфічних процесів у зонах глибинних розломів, що розвивалися в умовах стиснення або зсуву.

Виявлені закономірності можуть застосовуватися для територій у межах Українського щита, зокрема, для обастей розповсюдження кислих, середніх та лужних порід, в акцесорних мінералах яких міститься уран, за наявності зон тріщинуватості та розломів.

Розглянуто, звичайно, найбільш загальні риси зв'язку радонових і магнітних аномалій та запропоновано його фізико-геологічне обґрунтування. В подальшому планується розглянути виявлені закономірності для конкретних проявів та родовищ радіоактивних елементів.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration. IAEA Nuclear energy series publications, No. NF-T-1.5. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. 58 p. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1558\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1558_web.pdf)
2. Бекман И.Н. Радиоактивность и радиация. Москва: Онтонпринт, 2011. 398 с.
3. Гарецкий Р.Г., Каратаев Г.И., Матвеев А.В. Отражение радоновых аномалий в магнитном поле и тектонических элементах Беларуси. *Геофиз. журн.* 2016. **38**, № 5. С.40–48.
4. Добринин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. Петрофизика (Физика горных пород). Москва: Нефть и газ, 2004. 368 с.
5. Garetsky R.G. Radon, health and natural hazards 2009–2014. Summary report: From the National Committee of Belarus on the International Geological Correlation Program (IGCP) on the activity in 2010. 2014. Project 571.
6. Комов И.Л. Methods and facilities for the assessment of the radon-hazard potential. Kyiv: Logos, 2004. 416 p.
7. Иванов С.А. Радиоекологичні дослідження. Навчально-методичний посібник. Львів: ВІЦ Національної бібліотеки ім. Івана Франка, 2004. 149 с.

8. Фомин Ю.А., Лазаренко Е.Е. Щелочные полевые шпаты ураноносных альбититов центральной части украинского щита. *Сб. науч. тр. Института геохимии окружающей среды*. 2010. Вып. 18. С. 57–72.
9. Діденко П.І. Радон підземних вод України. *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. 2011. № 3. С.123–128.
10. Ентин В.А. Геофизическая основа тектонической карты Украины масштаба 1 : 1 000 000. *Геофиз. журн.* 2005. 27, № 1. С. 74–85.
11. Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых: Старостенко В.И., Гинтов О.Б. (ред.). Киев: Прастыи луды, 2013. 500 с.
12. Верховцев В.Г., Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Возняк Д.К., Діденко П.І., Коваль В.Б., Крамар О.О., Мельниченко Б.Ф., Ноженко О.В., Семенюк М.П., Синицин В.О., Суцук К.Г., Тищенко Ю.Є., Фомин Ю.О., Швайко В.Г., Юськів Ю.В., Ярошук М.О. Перспективи розвитку уранової сировинної бази ядерної енергетики України. Київ : Наук. думка, 2014. 333 с.
13. Крутиховская З.А., Пашкевич И.К., Силина И.М. Магнитная модель и структура земной коры Украинского щита. Киев: Наук.думка, 1982. 216 с.
14. Орлюк М.І., Яцевський П.І. Зв'язок радонових аномалій, магнітного поля та розломів на території міста Київ. *Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Геологія*. 2016. Вип. 3. С. 18–22.

Надійшло до редакції 12.12.2017

## REFERENCES

1. Advances in airborne and ground geophysical methods for uranium exploration. (2013). IAEA Nuclear energy series publications, No. NF-T-1.5. Vienna: International Atomic Energy Agency. Retrieved from [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1558\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1558_web.pdf)
2. Beckman, I. N. (2011). Radioactivity and radiation. Moscow: Ontoprint (in Russian).
3. Garetsky, R. G., Karataev, G. I. & Matveyev A. V. (2016). Reflection of radon anomalies in the magnetic field and tectonic elements of Belarus. *Geofiz. zhurn.*, No. 5, pp. 40-48 (in Russian).
4. Dobrynyn, V. M., Vendelshteyn, B. Y. & Kozhevnykov, D. A. (2004). Petrophysics (Physics of rocks). Moscow: Neft i gaz (in Russian).
5. Garetsky, R. G. (2014). Radon, health and natural hazards 2009–2014. Summary report: From the National Committee of Belarus on the International Geological Correlation Program (IGCP) on the activity in 2010. Project 571.
6. Komov, I. L. (2004). Methods and facilities for the assessment of the radon-hazard potential. Kyiv: Logos.
7. Ivanov, E. A. (2004). Radioecological research. Lviv: Publishing Center of Ivan Franko National Library (in Ukrainian).
8. Fomin, Y. & Lasarenko, H. (2010). Feldspars of uranium-bearing albitites of the central part of Ukrainian shield. *Sb. nauch. trudov Instituta geokhimii okruzhayushchey sredy*, Iss. 18, pp. 57-72 (in Russian).
9. Didenko, P. I. (2011). Radon of ground waters of Ukraine. *Tekhnogenno-ekolohichna bezpeka ta tsyvilnyi zakhyst*, No. 3, pp. 123-128 (in Ukrainian).
10. Entin, V. A. (2005). Geophysical basis tectonic map of Ukraine, scale 1: 1 000 000. *Geofiz. zhurn.*, 27, No. 1, pp. 74-85 (in Russian).
11. Starostenko, V. I. & Gintov, O. B. (Eds). (2013). The Kirovograd ore area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits. Kiev: Prastyie ludy (in Russian).
12. Verhovtsev, V. G., Lisichenko, G. V., Zabolonov, Yu. L., Voznyak, D. K., Didenko, P. I., Koval, V. B., Kramar, O. O., Melnichenko, B. F., Nozhenko, O. V., Semenyuk, M. P., Sinitsin, V. O., Sushchuk, K. G., Tishchenko, Yu. E., Fomin, Yu. O., Shvayko, V. G., Yuskiv, Yu. V. & Yaroshchuk, M. O. (2014). Prospects for the development of uranium resource base of nuclear power of Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
13. Krutikhovskaya, Z. A., Pashkevich, I. K. & Silina, I. M. (1982). Magnetic model and structure of the Earth's crust of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
14. Orlyuk, M. I & Yatsevskiy, P. I. (2016). The relations of radon anomalies, magnetic field and faults on the territory of Kyiv. *Visn. Kyiv. nac. un-tu im. Tarasa Shevchenka. Geologija*, Iss. 3, pp.18-22 (in Ukrainian).

Received 12.12.2017

М.І. Орлюк<sup>1</sup>, А.В. Марченко<sup>1</sup>, П.І. Яцевський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут геофізики ім. С.І. Субботина НАН України, Київ

<sup>2</sup> УНІ «Інститут геології» Київського національного університету ім. Тараса Шевченка

E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua; orliuk@ukr.net

## СВЯЗЬ РАДОНОВЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ

Выявление и оценка областей концентрации радона является актуальной задачей при изучении экологической безопасности территории для проживания людей. Показано, что радоновые аномалии продуцируются радиоактивными элементами торием и ураном, которые концентрируются в радиоактивных минералах. По результатам качественного анализа выявлена корреляция радоновых и урановых аномалий с отрицательными магнитными аномалиями регионального и локального классов и с разломами северо-западного и широтного простирания. Предложено физико-минералогическое и тектоническое обоснование такой связи. Она обусловлена прежде всего закономерным уменьшением концентрации ферромагнитных минералов и увеличением радиоактивных минералов в ряду изменения кислотности пород: ультраосновные – основные – средние – кислые. Соответственно, основными источниками радоновых аномалий являются гранитоиды и альбититы, которые характеризуются минимальными величинами намагниченности. Следовательно, слабая намагниченность и повышенное содержание радиоактивных минералов в этих породах в сочетании с глубинными разломами и зонами трещиноватости в общих чертах объясняют связь радоновых и магнитных аномалий.

**Ключевые слова:** радон, магнитные аномалии, Украинский щит, радиоактивность, разломы.

М.І. Орлюк<sup>1</sup>, А.В. Марченко<sup>1</sup>, П.І. Яцевський<sup>2</sup>

<sup>1</sup> S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> Taras Shevchenko National University of Kiev, ISR “Institute of Geology”

E-mail: orlyuk@igph.kiev.ua; orliuk@ukr.net

## CORRELATION OF RADON AND GEOMAGNETIC ANOMALIES OF THE TERRITORY OF UKRAINE

The appearance and estimation of the radon concentration areas are an urgent task in the study of the environmental safety for the people living. According to the research, radon anomalies are caused by radioactive elements thorium and uranium, which are concentrated in radioactive minerals. In this work, based on the qualitative analysis, the correlation of radon and uranium anomalies with negative magnetic anomalies of regional and local classes and with faults of northwestern and latitudinal directions is revealed. A physico-mineralogical tectonic basis for such a connection is proposed. It is caused, first of all, by a regular decrease in the concentration of ferromagnetic minerals and by an increase in radioactive minerals in the series of changes in the acidity of rocks: ultrabasic – basic – medium – acidic. Therefore, indirectly, the main sources of radon anomalies are granitoids and albitites, which are characterized by the minimum values of magnetization. Thus, a weak magnetization and an increased content of radioactive minerals in these rocks in conjunction with deep faults and zones of cracking explain, in general terms, the relationship of radon and magnetic anomalies.

**Keywords:** radon, magnetic anomalies, Ukrainian Shield, radioactivity, faults.