

УДК 552.33 (477)

О.В. Дубина, С.Г. Кривдік

ЕФЕКТ СОРЕ В ПЕТРОЛОГІЇ МАГМАТИЧНИХ ПОРІД

Для пояснення незвичних петрологічних і мінералогічних особливостей деяких магматичних комплексів Українського щита запропоновано застосувати термодифузійний ефект Соре. Серед таких особливостей виділяються значно підвищена або надто висока залізистість порід і мінералів, а також збагаченість титаном, фосфором і рідкісними металами деяких лужно-ультраосновних (карбонатитових) комплексів Українського щита (Чернігівський у Приазов'ї), Корсунь-Новомиргородський анортозит-рапаківігранітний плутон та Південно-Кальчицький габро-сієнітовий масив (Приазов'я). Високою залізистістю відзначаються також і лужно-ультраосновні породи Проскурівського і Антонівського масивів у Дністрово-Бузькому районі. Ці особливості хімічного складу порід і мінералів було виділено авторами раніше, на них акцентовано увагу як на незвичних (відмінних від таких у типових магматичних комплексах інших регіонів), а утворення їх пояснено абісальними умовами формування за низької фугітивності кисню. Це, на думку авторів, глибоко (до 10—20 км) еродовані масиви магматичних порід. Не заперечуючи важливості впливу глибини розташування магматичних осередків на хімічний склад продуктів розкristалізації розплавів (порід і мінералів), вважаємо, що цього, очевидно, недостатньо для задовільної петрогенетичної інтерпретації вказаних та деяких інших петрохімічних та мінералогічних особливостей. У цій статті високозалізисті магматичні породи розглядаються, згідно з ефектом Соре, як такі, що кристалізувалися в зоні вищої температури (на більшій глибині магматичного осередку), тоді як високомагнезійні породи формувалися в зоні з пониженою температурою (в гіпабісальних умовах), де могли накопичуватися більш тугоплавкі компоненти магми. Звичайно, цей процес досить складний і в ньому можуть поєднуватися з ефектом Соре як механізми кристалізаційного фракціонування (в силікатних розплавах), так і ліквіація розплавів (у карбонатитових комплексах). Очевидно, термодифузійний ефект Соре може інтенсивніше проявлятися в магматичних розплавах з низькою в'язкістю і насичених леткими компонентами (карбонатити, мелілітити, пікрити, базальти).

E-mail: kryvdik@ukr.net

Вступ. Ще на початковій стадії дослідження чернігівського карбонатитового комплексу в Приазов'ї було встановлено деякі зовсім незвичні або, здавалося б, неймовірні мінералогічні особливості карбонатитів та деяких лужних порід, що асоціюють з ними. Так, було виявлено високозалізисті олівіні (до Fa_{70}) у карбонатитах та мельтейгітах [5]. На той час це пояснювали абісальними умовами формування і, відповідно, глибоким ерозійним зрізом (до 10—20 км) Чернігівського масиву. Пізніше подібні породи (лужні піроксеніти, якупірангіти, ійоліт-мельтейгіти) з високозалізистими піроксенами було виявлено у Дністрово-Бузькому районі (Проскурівський та Антонівський масиви) [12, 14]. Цікаво, що невеликі інтрузії лужно-ультраосновних порід у північно-західній частині Українського щита (УЩ), для яких

очевидними були гіпабісальні умови формування (Городницька і Болярківська, а також Покошівська зони дайок), характеризуються магнезійним складом клінопіроксенів (хромистий діопсид, егірін-діопсид) та олівіну (форстерит) [15, 19, 20].

Зовсім іншим петрогенетичним механізмом процес формування і геологічну будову лужно-ультраосновних (ійоліт-карбонатитових) інтрузивів Маймеча-Котуйської провінції пояснив Л.С. Єгоров [7], базуючись на маловідомому серед петрологів ефекті Соре. Важливого значення надавалося цьому ефекту і в формуванні анортозитових масивів та пов'язаних з ними Fe-Ti-оксидних родовищ [26, 28, 29].

Ефект Соре полягає в дифузії (переміщенні, міграції) компонентів у розплавах і розчинах за наявності термічного градієнта. При цьому, згідно з експериментальними даними, в розплавах легкоплавкі компоненти (Al, Fe,

© О.В. Дубина, С.Г. Кривдік, 2010

ISSN 0204-3548. *Мінерал. журн.* 2010. 32, № 4

51

Na, K) мігрують до більш розігрітого кінця ампули, а більш тугоплавкі (Mg, Cr) — до холоднішого [7, 22, 24—26, 28—30]. Це разом з іншими механізмами (кристалізаційна диференціація, ліквідація) призведе до неоднорідної будови інтрузивів. Експериментально було показано, що в результаті термодифузії (ефект Соре) відбувається навіть фракціонування ізотопів Mg [27]. На прикладі базальтів Місяця показано, що різниця в хімічному складі їхніх розплавів у гарячому та холодному кінцях ампули досягає досить великих значень, %: SiO₂ — 11; Al₂O₃ — 2,6; FeO — 3,6; MgO — 3,3 [30]. Деякі дослідники не без підстав вважають, що в розшарованих інтрузіях ефект Соре нівелюється конвекцією магматичного розплаву. Проте у крайових (охладжених) частинах цих інтрузій наявна так звана зворотна (*reversal*) щодо головної розшарованої серії послідовність виділення мінералів, яка пояснюється також ефектом Соре [24].

Виходячи з таких міркувань, авторами раніше було зроблено спробу коротко в тезисній формі [6] розглянути значення ефекту Соре у формуванні лужних комплексів УЩ.

Відмінності за залізистістю (магнезіальністю) мінералів виявляються і під час порівняння анортозит-рапаковігранітних плутонів Східно-Європейської платформи і УЩ [4, 9—11]. З-поміж цих порівнюваних об'єктів найбільш залізистими виявилися темноколірні мінерали в основних породах Корсунь-Новомиргородського плутону [4, 9, 11, 16]. Ще трохи більш залізистими є мінерали в мафітах та ультрамафітах Південно-Кальчицького масиву, який, згідно з уявленнями нашими і попередніх дослідників [8, 14], є суттєво сієнітовим аналогом таких плутонів. Ці особливості та відмінності також пояснювали [10—13] різною глибиною формування (ерозійного зрізу) порівнюваних плутонів і масивів основних порід.

У цій статті, не заперечуючи важливості впливу глибини розташування магматичних осередків на хімічний склад продуктів розкристалізації розплавів (порід і мінералів), зроблено спробу оцінити значення ефекту Соре у формуванні інтрузивів основних, ультраосновних і лужних порід (їхній будові, зональності, складу мінералів).

Деякі особливості лужно-ультраосновного магматизму УЩ. Масиви і прояви лужно-ультраосновної (її часто називають карбонатитовою) формації в межах УЩ досить широко розпов-

сюджені у Приазов'ї, відомі у Дністрово-Бузькому районі, а останнім часом виявлені в кількох пунктах як невеликі інтрузивні тіла (штоки, дайки) у північно-західній частині УЩ. Ці прояви лужно-ультраосновної формації порівняно добре вивчені, виявилися досить різноманітними за петрологічними, мінералогічними та геохімічними особливостями.

У Приазов'ї є чимало проявів цієї формації, проте найбільш повний набір, властивий їй масивам, виявлено тільки у Чернігівському масиві, де наявні (в різній відносній кількості) лужні піроксеніти, нефелінові та лужні сієніти, ійоліт-мельтейгіти, карбонатити, феніти та інші породи. В інших же невеликих проявах наявні феніти, жильні карбонатити або дайкові високотитанисті горнблендити (метаякупірангіти) [14].

Чернігівський карбонатитовий масив виявився по суті аномальним порівняно з типовими карбонатитовими комплексами інших регіонів, на чому неодноразово акцентовано увагу в попередніх публікаціях. Нагадаємо найбільш яскраві мінералогічні особливості цього масиву. В карбонатитах, у тому числі в їхніх кальцит-доломітових і доломітових різновидах (бефорситах), було виявлено більш залізисті, порівняно з іншими карбонатитами, олівіни (Fa₆₅), а в мельтейгітах — Fa₇₀. В карбонатитах, ійоліт-мельтейгітах і фенітах наявні також високозалізисті клінопіроксени (егірін-феросаліти), що не властиві аналогічним породам з інших карбонатитових комплексів або трапляються в них досить рідко [18]. В останніх випадках відзначено, що карбонатитові комплекси з такими високозалізистими клінопіроксенами (а саме, збагаченими геденбергітовим міналом) належать до абісальних фацій глибинності [18].

Подібні високозалізисті клінопіроксени характерні і для лужних порід Проскурівського та Антонівського масивів у Придністров'ї і Побужжі, що були відкриті значно пізніше від Чернігівського масиву. Практично відразу з початком докладного дослідження цих масивів було зроблено висновок про значний або досить глибокий ерозійний зріз цих масивів, найглибший (до 10—20 км) для Чернігівського. Наводилась низка доказів такого висновку [5, 12].

Значно пізніше у північно-західній частині УЩ було виявлено кілька невеликих проявів (штоки, дайки) лужно-ультраосновної формації, представленої переважно олівіновими яку-

пірангітами і мельтейгітами (Городницька, Глумчанська, Болярківська інтрузії і Покошівські дайки) або фенітами (Березова Гать). Найбільш детально вивченою є Городницька інтрузія, породи якої виявилися найбільш свіжими [15, 19, 20]. У всіх цих інтрузіях піроксени представлені магнезійними різновидами (хромистий діопсид, егіриновий діопсид, рідше егірин-діопсид, а олівін — форстеритом). Крім того, в них часто наявні хромшпінеліди, в тому числі і глибинні (алмазоносною фації) [19, 20].

Умови залягання цих інтрузій та їхні структурно-текстурні особливості (порфірові та порфіроподібні структури, наявність ендоконтактних зон закалу) свідчать про гіпабісальні умови формування.

Отже, лужно-ультраосновні інтрузії, що формувалися у приповерхневих (гіпабісальних) умовах, характеризуються магнезійними парагенезисами, як це властиво аналогічним породам більшості відомих карбонатитових комплексів [7, 18]. В той же час у породах із масивів цієї формації зі значним або глибоким ерозійним зрізом (Чернігівський, Проскурівський, Антонівський масиви) темноколірні мінерали виявилися незвично високозалізистими. До того ж окисненість заліза, як і слід було очікувати, в таких високозалізистих породах значно нижча, ніж у більшості типових карбонатитових комплексів. Це відображає також підпорядковану роль магнетиту та відсутність суттєво егіринових клінопіроксенів (максимальний вміст егіринового міналу не перевищує 30—35 %) та лужних натрієвих амфіболів у таких глибоко еродованих масивах.

Крім того, зі збільшенням глибини ерозійного зрізу в масивах лужно-ультраосновних порід спостерігається деяке підвищення концентрації таких несумісних елементів-домішок, як Sr, Nb, TR, P. Принаймні, це простежується під час порівняння північної (більш еродованої) і південної частин Чернігівського масиву, а також Городницької, Болярківської, Глумчанської інтрузій, з одного боку, і Проскурівського та Антонівського масивів — з другого.

Як видно з діаграми (рис. 1), результати хімічних аналізів лужних порід з різних карбонатитових комплексів у координатах $Mg/(Mg + Fe) - Ca/(Ca + Na)$ розташовуються у вигляді субгоризонтальних трендів одні над одними, субпаралельно трендам зміни складу

розплавів у експериментах, під час яких було задано значення термічного градієнта (гарячий і холодний кінці ампули) для перевірки ефекту Сорє.

Масиви габро-сієнітової формації УЩ. Раніше було виділено [14] два типи масивів цієї формації: 1 — розвиток яких завершується нефелін-сієнітовими, у тому числі агпайтовими диференціатами (Октябрський, Малотерсянський, частково Покрово-Київський); 2 — з кінцевими сієнітовими, кварц-сієнітовими або гранітовими диференціатами (Південно-Кальчицький, Давидківський та істотно сієнітові — Яструбецький і Великовисківський). Другий тип масивів просторово і, очевидно, генетично пов'язаний з анортозит-рапаківігранітними плутонами і разом з останніми розглядається нижче.

Щодо масивів першого типу, то вони не проявляють значної контрастності за петрохімічними та мінералогічними особливостями. Габро цих масивів містить більш залізисті темноколірні мінерали, ніж перидотити і піроксеніти, які можуть бути ранніми інтрузивними фазами (Покрово-Київський) або кумулятивними утвореннями в габро (Октябрський масив). Можна вважати, що названі габро-сієнітові масиви не відрізняються суттєво і за рівнем їхнього ерозійного зрізу (Октябрський і Покрово-Київський належать до гіпабісальних, дещо більш еродованим є Малотерсянський). Результати хімічних аналізів порід з цих масивів утворюють різні тренди або попадають у поле невизначеності (рис. 2). Так, породи Октябрського і Малотерсянського масивів мають тенденцію до розташування субпаралельно до кристалізаційних трендів, тоді як Покрово-Київського — субпаралельно тренду, зумовленому ефектом Сорє (рис. 2).

Позаяк ми не маємо достатньої кількості масивів такого типу й їхні породи не проявляють контрастних петрохімічних особливостей, то в подальшому не будемо розглядати їх з метою вивчення впливу ефекту Сорє. Зауважимо лише, що потужне тіло основних і ультраосновних порід у північно-східній крайовій частині Октябрського масиву є інтрузією з чітко вираженою ритмічною розшарованістю, утвореною в результаті акумуляції кристалів олівіну і клінопіроксену в магматичній камері, заповненій лужнобазальтовим розплавом. Тобто головну роль в даному випадку відіграло кристалізаційне фракціонування.

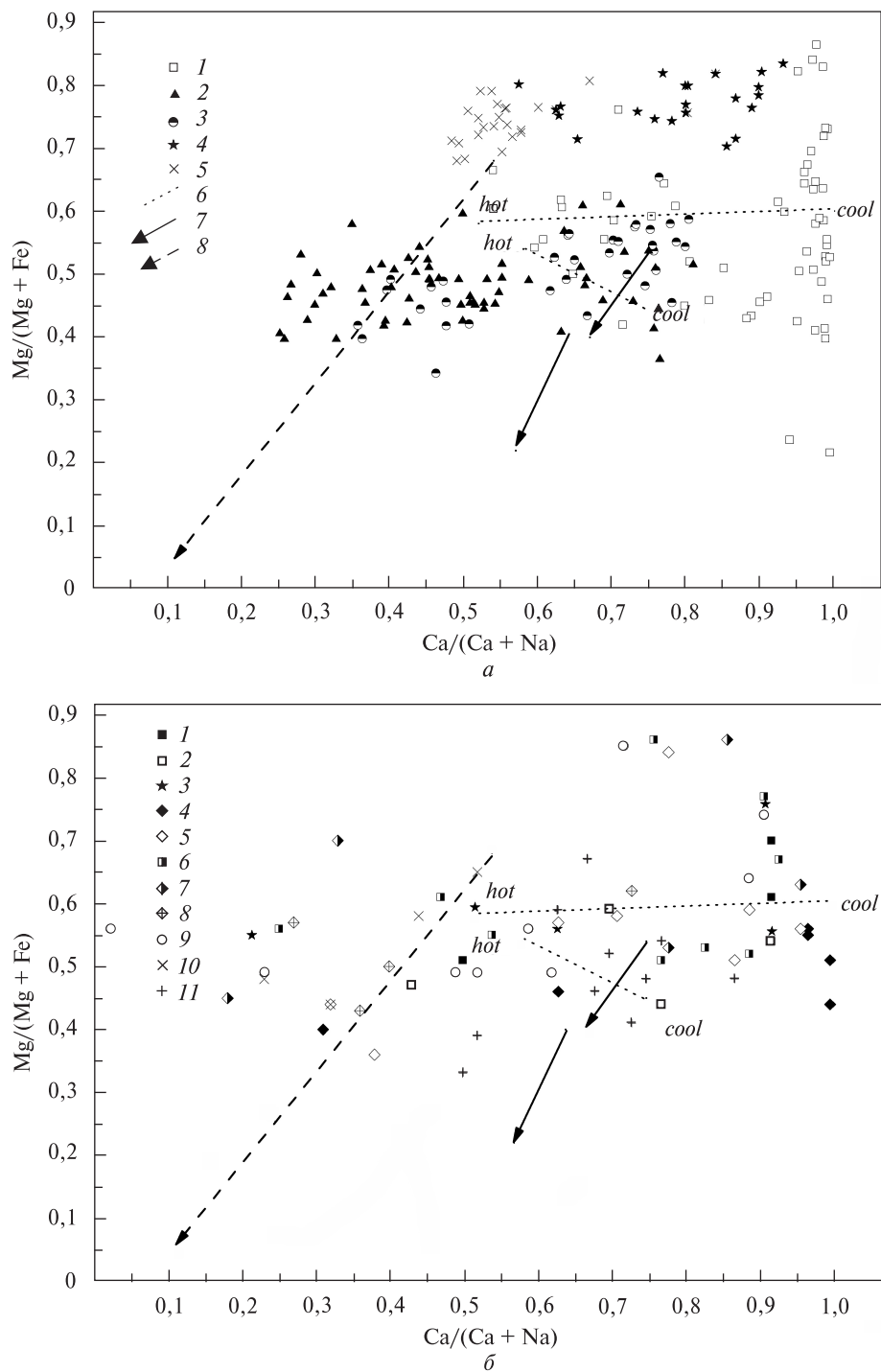


Рис. 1. Розташування лужно-ультраосновних порід і карбонатитів УЩ (а) та інших регіонів (б) відносно трендів кристалізаційної диференціації і термодифузійного ефекту Соре. Масиви і прояви: а: 1 – Чернігівський, 2 – Проскурівський, 3 – Антонівський, 4 – Городницька інтрузія, 5 – Глумчанська інтрузія. Тренди: 6 – розподілу туго- і легкоплавких компонентів у базальті в холодному (*cool*) і гарячому (*hot*) кінцях ампули, 7 – кристалізаційний тренд диференціації, за даними [28], 8 – гіпотетичний тренд диференціації базальтових магм з утворенням пантелерит-комендитових диференціатів, за [22]; б: 1 – Ально, 2 – Фен, 3 – Кольський п-ів, 4 – Східні Саяни, 5 – Гулінський [7], 6 – Кугда [7], 7 – Ковдор (Кухаренко і др., 1965; [18]), 8 – Маган [7], 9 – Одихінча [7], 10 – Дорова (Карбонатити, 1969), 11 – Напак (Карбонатити, 1969)

Fig. 1. Placement of alkaline ultrabasic rocks and carbonatites in the Ukrainian Shield (a) and others regions (b) with respect to the crystalline differentiation trends and Soret thermal-diffusion effect. Massifs and occurrences: a: 1 – Chernigovka, 2 – Proskurovka, 3 – Antonovka, 4 – Gorodnytsca intrusion, 5 – Glumcha intrusion. Trends: 6 – distribution of high- and low-melting components in basalt melt in cool and hot sections of vial, 7 – crystalline differentiation trends by [28], 8 – basalt melts differentiation hypothetical trend with pantelerite-comendite differentiates crystallization by [22]; б: 1 – Alnö, 2 – Fen, 3 – Kola peninsula, 4 – East Sayan, 5 – Guly [7], 6 – Kugda [7], 7 – Kovdor (Kukharensko et al., 1965) [18], 8 – Magan [7], 9 – Odyhincha [7], 10 – Dorova (Carbonatites, 1969), 11 – Napak (Carbonatites, 1969)

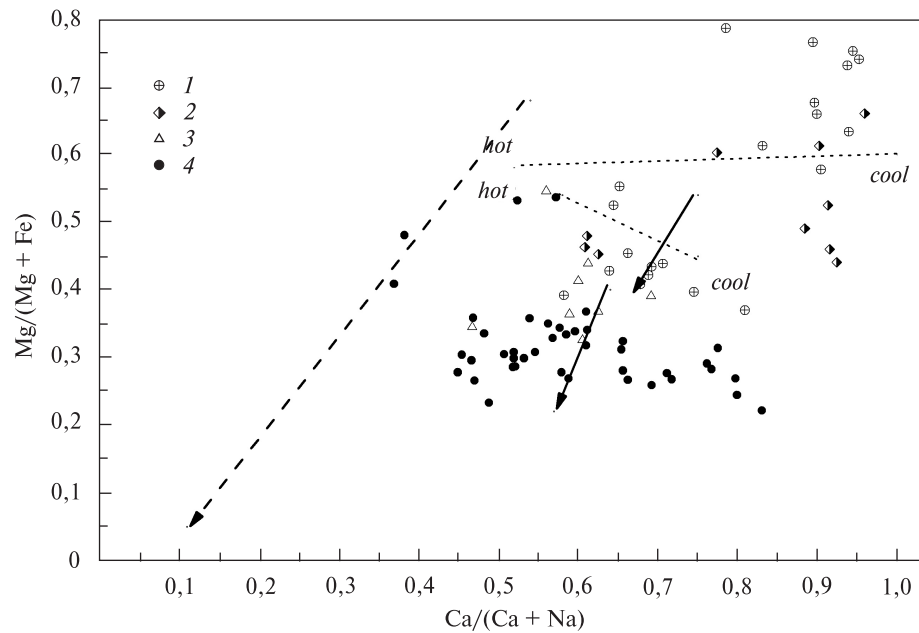


Рис. 2. Розташування основних і ультраосновних порід габро-сієнітової формації УЩ відносно трендів кристалізаційної диференціації та термодифузійного ефекту Соре. Масиви: 1 — Октябрський, 2 — Покрово-Київський, 3 — Малотерсянський, 4 — Давидківський

Fig. 2. Placement of basic and ultrabasic rocks of gabbro-syenitic complexes of the Ukrainian Shield with respect to the crystalline differentiation trends and Soret thermal-diffusion effect. Massifs: 1 — Oktyabrsky, 2 — Pokrovo-Kyreevo, 3 — Mala-Tersa, 4 — Davydky

Анортозит-рапаківігранітні плутони УЩ. У межах УЩ є тільки два таких плутони (Коростенський і Корсунь-Новомиргородський) і вони проявляють деякі особливості речовинного складу, що відрізняють їх від більшості плутонів цієї формації в інших регіонах світу, в тому числі у Східно-Європейській платформі. Крім того, як суттєво сієнітовий аналог таких плутонів нами і попередніми дослідниками розглядався Південно-Кальчицький масив [8]. На південно-західному схилі УЩ на території Молдови виділяється мало вивчений Реутський масив рапаківіподібних гранітів (його також називають Кам'янським або Дрокійським).

Анортозит-рапаківігранітні плутони, в тому числі і Південно-Кальчицький масив, загалом відрізняються від інших подібних плутонів досить значною насиченістю родовищами і проявами рудних габроїдів з ільменітом, титаномагнетитом та апатитом (в Коростенському плутоні їх близько 10). Ці плутони і пов'язані з ними фосфор-титанові рудопрояви також відзначаються, особливо Корсунь-Новомиргородський та Південно-Кальчицький, високою залізистістю темноколірних мінералів. Так, наприклад, піроксени з переважної більшості анортозит-рапаківігранітних плутонів

на діаграмі Хесса ($\text{CaSiO}_2 - \text{MgSO}_3 - \text{FeSiO}_3$) розташовуються головним чином в її лівій магnezіальній частині (в полях саліту, авгіту, піжоніту і гіперстену), тоді як піроксени з Корсунь-Новомиргородського плутону і Південно-Кальчицького масиву, за деякими винятками, — в правій (залізистій) частині (феросаліт, фероавгіт, піжоніт, ферогіперстен). Піроксени з основних порід та рудних габроїдів Коростенського плутону розміщуються як у лівій (переважна більшість), так і у правій частинах цієї діаграми. Проте піроксени з основних порід Коростенського плутону загалом більш залізисті, ніж в однотипних породах з анортозит-рапаківігранітних плутонів інших регіонів. Аналогічно в Корсунь-Новомиргородському плутоні і Південно-Кальчицькому масиві наявні і найбільш залізисті олівіни (до Fa_{85}). Крім того, ільменіти з основних порід і рудних габроїдів анортозит-рапаківігранітних плутонів УЩ вирізняються значно нижчим вмістом гематитового міналу, а також магнію порівняно з ільменітами інших подібних плутонів та деяких суттєво анортозитових масивів і пов'язаних з ними ільменітових родовищ [11, 13, 23]. До того ж у Носачівському апатит-ільменітовому родовищі (Корсунь-Новомирго-

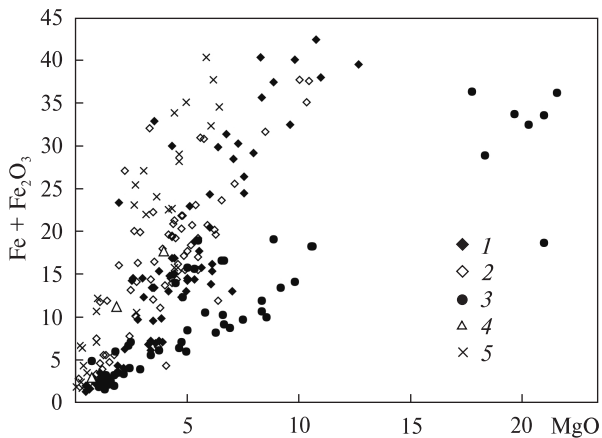


Рис. 3. Співвідношення значень вмісту заліза і магнію (мас. %) у основних породах анортозит-рапаківігранітних плутонів: 1 — Коростенський, 2 — Корсунь-Новомиргородський, 3 — Пилтенсько-Ризький, 4 — Салмінський, 5 — Південно-Кальчицький масив
Fig. 3. Correlation of iron and magnesium (mas. %) in basic rocks from anorthosite rapakivigranitic plutons: 1 — Korosten, 2 — Korsun-Novomyrgorod, 3 — Pilten-Riga, 4 — Salma, 5 — South-Kalchyk massif

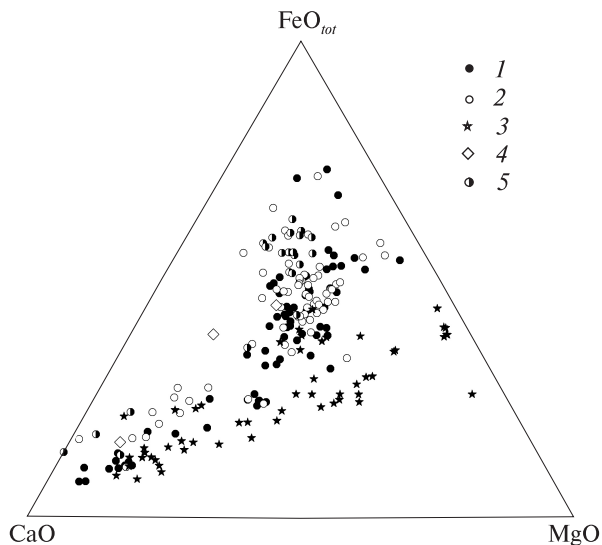


Рис. 4. Співвідношення CaO — FeO_{tot} — MgO (мол. кількості) в основних породах анортозит-рапаківігранітних плутонах: 1 — Коростенський, 2 — Корсунь-Новомиргородський, 3 — Пилтенсько-Ризький, 4 — Салмінський, 5 — Південно-Кальчицький масив
Fig. 4. Correlation CaO — FeO_{tot} — MgO (mol. quantity) in basic rocks of anorthosite rapakivigranitic plutons: 1 — Korosten, 2 — Korsun-Novomyrgorod, 3 — Pilten-Riga, 4 — Salma, 5 — South-Kalchyk massif

родський плутон) ільменіт практично близький за складом до стехіометричного, а первинний магнетит повністю відсутній. Разом з високотемпературним парагенезисом (ортопі-

роксен, клінопіроксен, олівін) рудних норитів Носачівського родовища, це свідчить про низьку фугітивність кисню в процесі його формування. Це підтверджується також наявністю графіту в габроїдах цього плутону загалом і Носачівського родовища зокрема. З відомих анортозит-рапаківігранітних плутонів найбільш магнезійні темноколірні мінерали виявлено в основних породах Пилтенсько-Ризького плутону [3, 4], досить магнезійними ці мінерали є також у масиві Сувалки (Польща) [23].

Згідно з попередніми нашими висновками [11, 13], що базуються на геологічних і петрологічних даних, Корсунь-Новомиргородський плутон і Південно-Кальчицький масив належать до найбільш еродованих (до 10 км і більше) інтрузивів анортозит-рапаківігранітної формації, тобто вони формувалися в абісальній зоні глибинності.

У даному випадку ми бачимо паралелі або аналогії між залежностями хімізму порід і мінералів від глибинності (ерозійного зрізу) їх формування для розглянутих вище масивів лужно-ультраосновної і анортозит-рапаківігранітної формації. Можна вважати, що найбільш еродованими в цих двох формаціях є Чернігівський карбонатитовий масив і Корсунь-Новомиргородський плутон (а також Південно-Кальчицький масив). Більше того, гіпабісальні масиви лужно-ультраосновної формації (Городницький, Глумчанський, Покошівський, Болярківський прояви) представлені олівіновими (форстеритовими) і магнезійними різновидами порід серії якупірангіт-ійоліт. Як відомо, ефузивні і дайкові нефеліти і мельтейгіт-порфіри найчастіше мають вкрапленики магнезійного олівіну (форстериту).

За аналогією і для більш магнезійних основних і ультраосновних порід (ультрамафітів) Пилтенсько-Ризького плутону характерними є олівінові різновиди (Fa₃₅₋₄₄), тоді як у Коростенському і Корсунь-Новомиргородському плутонах переважають залізисті піроксенові (орто- або клінопіроксен) різновиди основних порід з підпорядкованою роллю олівінових (Fa₆₉₋₇₅). У Південно-Кальчицькому масиві серед габроїдів, ультрамафітів і мафітів поширені головним чином олівін-клінопіроксенові різновиди порід, але ці темноколірні мінерали є найбільш залізистими (олівін — до Fa₈₅) порівняно з однойменними породами в анортозит-рапаківігранітних плутонах.

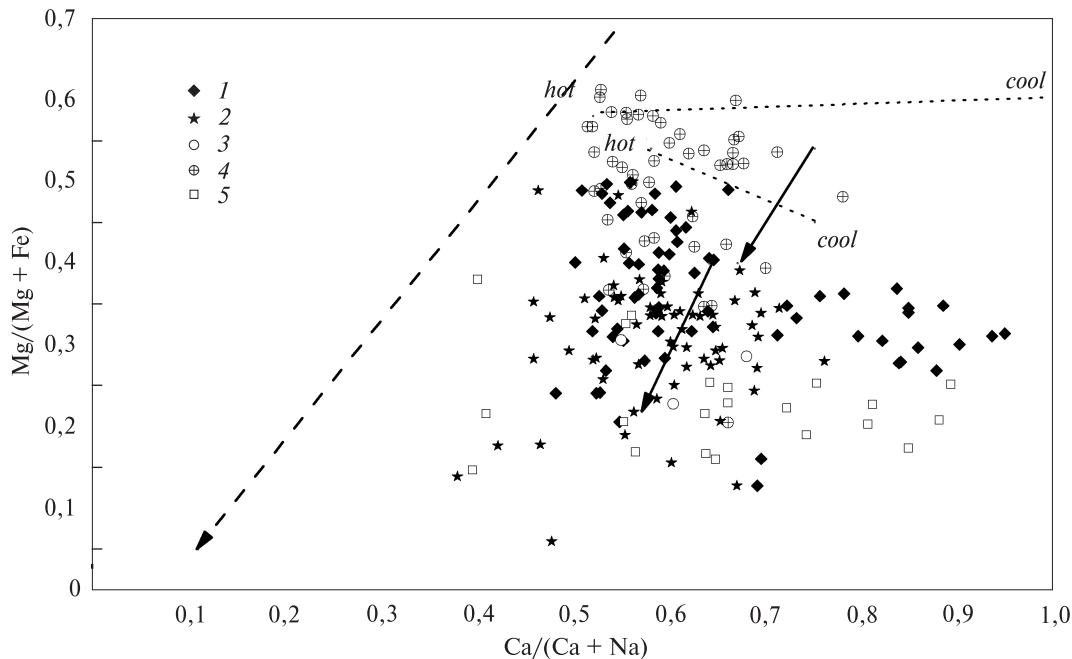


Рис. 5. Розташування основних порід анортозит-рапаківігранітних плутонів УЩ та інших регіонів відносно трендів кристалізаційної диференціації та термодифузійного ефекту Соре: 1 — Коростенський, 2 — Корсунь-Новомиргородський, 3 — Салмінський, 4 — Пилтенсько-Ризький, 5 — Південно-Кальчицький масив

Fig. 5. Placement of basic rocks from anorthosite rapakivigranitic plutons of the Ukrainian Shield and other regions with respect to the crystalline differentiation trends and Soret thermal-diffusion effect: 1 — Korosten, 2 — Korsun-Novomyrhorod, 3 — Salma, 4 — Pilten-Riga, 5 — South-Kalchyk massif

Такі особливості речовинного складу дали підставу попереднім дослідникам [3] дійти висновку про різні шляхи еволюції українських і латвійських комплексів габро-норит-анортозитів (пов'язаних з гранітами рапаківі): олівіновий або магнезіальний для другого і піроксеновий або залістий для першого (рис. 3, 4). Разом зі збільшенням залістості у габроїдах підвищується вміст титану і фосфору. Це проявляється у тому, що в українських анортозит-рапаківігранітних плутонах з'являються рудоносні габроїди, з якими пов'язано кілька родовищ. Особливо багато (близько 10) таких рудопроявів і родовищ у Коростенському плутоні.

На діаграмі $Mg/(Mg + Fe) - Ca/(Ca + Na)$ (рис. 5) основні породи Пилтенсько-Ризького плутону розташовуються у верхній частині, Південно-Кальчицького масиву і Корсунь-Новомиргородського плутону — в нижній, а Коростенського — займають проміжну область. Вони утворюють тренди, паралельні таким, що зумовлені ефектом Соре в експериментальних дослідженнях.

У даній статті автори намагаються розглянути ці відмінності українських і латвійських базитів з дещо інших позицій: з урахуванням

глибини їх формування (ерозійного зрізу) і впливу ефекту Соре на диференціацію розплавів у магматичних осередках. Не зупиняючись детально на доказах різного рівня ерозійного зрізу Пилтенсько-Ризького, Коростенського, Корсунь-Новомиргородського плутонів та Південно-Кальчицького масиву, відзначимо лише, що для перших двох характерними є порфірові (дайкові) фації гранітів і основних порід, а в Пилтенсько-Ризькому присутні також ефузивні аналоги основних (плагіоклазові порфірити) і кислих (кварцові порфіри) порід, що свідчить про незначний їхній ерозійний зріз. Крім того, поруч з Коростенським плутоном наявні збраньківські, овруцькі та вільчанські вулканіти. В той же час для Корсунь-Новомиргородського плутону і Південно-Кальчицького масиву порфірові дайкові фації споріднених порід не характерні або ж вони трапляються дуже рідко (наприклад, на південній окраїні Південно-Кальчицького масиву, б. Саса-Гулах). Деякі дослідники вважають, що відсутність (або невиявленість у значних масштабах) камерних пегматитів у Корсунь-Новомиргородському плутоні також зумовлена його значним ерозійним зрізом.

Враховуючи наявні геологічні та деякі мінералого-петрологічні дані, можна скласти такий ряд плутонів за збільшенням глибини ерозії: Пилтенсько-Ризький (а також Виборзький) — Коростенський — Корсунь-Новомиргородський. Ерозійний зріз останнього, на думку авторів, досягає 10 км, Коростенського — 3—5 км (в різних блоках різний). Очевидно, до 10 км або й глибше еродовано й Південно-Кальчицький масив (у центральній і північній частинах більше, на півдні — менше). До гіпабісальних з вулканічними фаціями (плагіоклазові порфірити і кварцові порфіри) належать Пилтенсько-Ризький і Виборзький плутони [3, 4]. Можливо, овруцькі, збраньківські та вільчанські вулканіти є поверхневими аналогами кислих та деяких основних порід Коростенського плутону.

Обговорення результатів та деякі петрогенетичні висновки. Отже, в лужно-ультраосновних та габро-норит-анортозитових комплексах УЩ (та деяких інших регіонів) проявляється така феноменальна особливість: зі збільшенням глибини ерозійного зрізу породи цих комплексів набувають вищої залізистості і збагачуються фосфором, титаном, а також такими рідкісними металами, як Nb, Zr, TR, Y. Останні властиві карбонатитам та сієнітам, які асоціюють з високозалізистими габроїдами (район Великої Виски в Корсунь-Новомиргородському плутоні, Південно-Кальчицький масив з Азовським родовищем, Яструбецький масив з однойменним родовищем, частково Давидківський масив). Проте не можна однозначно стверджувати, що існує пряма залежність між глибиною формування масивів (рівнем їхнього ерозійного зрізу в доступних для вивчення проявах або розбурених ділянках). Так, у Коростенському плутоні, як згадувалося вище, найбільше родовищ і рудопроявів ільменіту і апатиту, тоді як в Корсунь-Новомиргородському плутоні і Південно-Кальчицькому масиві відомо поки що по одному родовищу подібного типу. Останні два ми вважаємо найбільш еродованими. В той же час у Пилтенсько-Ризькому плутоні всі габроїди зовсім бідні на титан і фосфор [3, 4], не виявлено жодного рудопрояву цих елементів.

Те ж саме можна сказати і про лужно-ультраосновні комплекси. Прояви гіпабісальної фації мельтейгіт-якупірангітів північно-західної частини УЩ зовсім бідні на титан, фосфор і рідкісноземельні елементи. Глибоко або

значно еродовані масиви Побужжя і Придністров'я такого ж віку (Проскурівський і Антонівський) інтенсивно збагачені фосфором (до промислового вмісту апатиту) та мають підвищені значення вмісту TR. Подібна неоднорідність щодо рідкісних металів спостерігається в північній і південній частинах у межах лінійно витягнутого Чернігівського карбонатитового масиву в Приазов'ї. Разом з тим карбонатити Чернігівського масиву як найбільш (або одного з таких) еродованого не є багатими на ніобій, на відміну від відомих родовищ карбонатитових комплексів.

Очевидно, для габро-норит-анортозитових і карбонатитових комплексів існують певні оптимальні за глибиною умови формування, за яких відбувається максимальне накопичення тих або інших рудних компонентів. Можливо, це середні за глибиною (мезоабісальні) умови формування. Прикладом цього може бути Коростенський плутон, карбонатитові масиви Росії (Саян), Канади (Ока, Сант-Оноре), Бразилії (Араша) та інших регіонів. Як відомо, гіпабісальним карбонатитовим комплексам рудні родовища загалом не властиві.

Водночас механізм підвищення загальної залізистості і збагачення рудними компонентами (Ti, P, Zr, Nb, TR, Y) основних порід і карбонатитів залишається нез'ясованим. Схоже на те, що в абісальні або мезоабісальні глибини "стікаються" залізо, титан, фосфор та деякі рідкісні метали. Очевидно, це відбувається на магматичній стадії ще до закристалізованості розплавів. Два з найбільш відомих процесів диференціації магм — кристалізаційна диференціація (разом з конвективним механізмом) [21] або ліквіація не можуть задовільно пояснити це феноменальне явище. Як відомо, в значних за розміром розшарованих інтрузіях основних і ультраосновних порід (Бушвельд, Стилутер, Скергаард тощо) у придонній частині формуються найбільш магнезальні кумулятивні шари (хроміти, дуніти, троктоліти), вище за розрізом в цілому збільшується залізистість кумулятивних фаз — мінералів, а високозалізисті (наприклад гортонолітові) габроїди, мафіти і ультрамафіти утворюються на проміжних стадіях закристалізованості закритих магматичних камер [21]. Про можливу часткову кумуляцію магнезальних мінералів в абісальних магматичних камерах можуть свідчити досить рідкісні ксенолітоподібні виділення ортопіроксенових (з плагіоклазом і олі-

віном) мафітів у межах Носачівського ільменітового родовища [11]. Проте ці породи не досягають такої магнезійності, як так звані перидотити Пiлтенсько-Ризького плутону [3, 4]. Подібні більш магнезійні двопіроксенові (з олівіном) габроїди у вигляді ксенолітів було виявлено і у Південно-Кальчицькому масиві (б. Саса-Гулах). На діаграмі ці породи попадають у верхню (магнезійну) область.

Слід підкреслити, що в глибоко еродованих лужно-ультраосновних масивах УЩ (Чернігівський, Проскурівський, Антонівський) інтрузивні тіла лужних порід і карбонатитів мають загалом незначну потужність (не більше 100–200 м) і подібні до підвідних каналів, по яких магма проникала у верхні горизонти ближче до земної поверхні (де, можливо, ці масиви — нині еродовані — мали значно більшу площу розвитку).

Дещо більші за розмірами масиви основних порід в анортозит-рапаківігранітних плутонах, проте й вони незначні в порівнянні з Бушвельдським, Стилутерським, Скергаардським та іншими розшарованими інтрузіями основних і ультраосновних порід. Особливо порівняно незначною потужністю характеризуються габроїди Південно-Кальчицького масиву, що їх можна розглядати як дугоподібні підвідні магматичні канали основної магми (див. карту Південно-Кальчицького масиву [17]). Дещо більший, але також невеликий розмір мають масиви (інтрузії) основних порід у Корсунь-Новомиргородському плутоні [11]. Проте й вони, як і габроїди Південно-Кальчицького масиву, є найбільш залізистими серед подібних порід у габро-норит-анортозитових масивах інших регіонів (у тому числі Коростенського плутону).

Таким чином, зі збільшенням глибини формування масивів лужно-ультраосновних та основних порід збільшується загальна залізистість і збагачення P, Ti, Zr, Nb, TR, Y цих порід та, очевидно, зменшуються розміри їхніх тіл. При цьому деякі з масивів (наприклад, Чернігівський, Вишнево-Ільменогірський, Сангу, Силіньярві) набувають лінійно-втягнутої або дайкоподібної форми.

Як один з можливих варіантів пояснення цих, на перший погляд, неузгоджених особливостей речовинного складу порід і їхнього геологічного положення ми пропонуємо схему можливого розподілу туго- і легкоплавких компонентів у втягнутих магматичних осе-

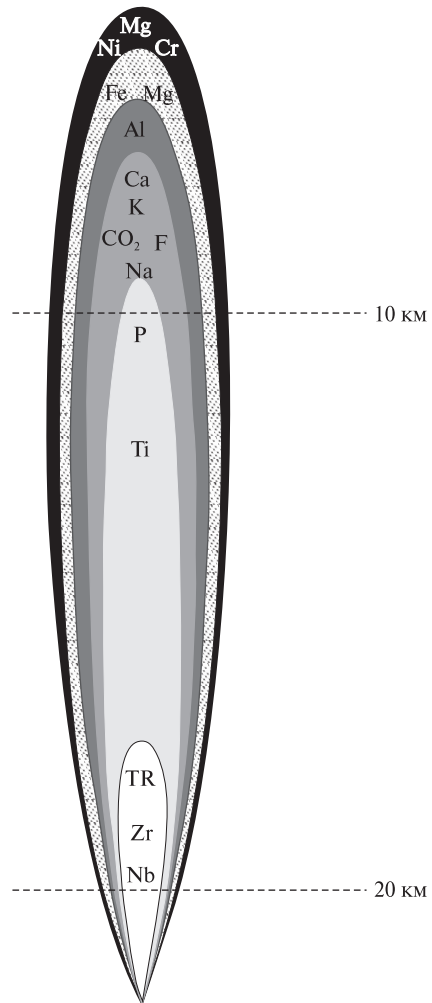


Рис. 6. Схема диференціації (міграції компонентів) розплавів у магматичній камері за наявності термічного градієнта (ефект Соре)

Fig. 6. The pattern of the melts differentiation (constituent migration) in magmatic chamber by thermal gradient availability (Soret effect)

редках (камерах) залежно від глибини залягання і, відповідно, термічного градієнта (рис. 6), виходячи зі згаданого ефекту Соре. На цій схемі показано, що тугоплавкі компоненти (Mg, Cr, Ni) переважають у більш охолодженій верхній частині магматичного осередку, а більш легкоплавкі і некогерентні (Fe, Ca, Al, Na, K, CO₂, F, Nb, Zr, TR, Y) — у нижній і центральній більш високотемпературних частинах. Ця схема подібна до наведеної Л.С. Єгоровим [7] для ійоліт-карбонатитових комплексів Маймеча-Котуйської провінції. Звичайно, такий розподіл відбувається на магматичній стадії ще до значної закристалізованості магми, але, очевидно, продовжується і в залишкових розплавах. Цей термодифузійний ефект

здійснюється паралельно з ліквідацією розплаву або його кристалізаційною диференціацією. Очевидно, він може відбуватися за умов повільного остигання розплавів (що характерно для лужних і сублужних магм). При цьому інтенсивність цього ефекту залежить від в'язкості магм та їхньої насиченості леткими компонентами, що сприяє більш повній дифузії та міграції компонентів. Такими розплавами можуть бути природні карбонатитові, меланефелінітові, мелілітитові, пікритові або навіть базальтові магми. На нашу думку, ефектом *Sore* досить задовільно пояснюється гомодромна послідовність формування багатьох магматичних комплексів. Ця ж послідовність найчастіше проявляється і під час виверження вулканів. Можливо, за умови виникнення ефекту *Sore* утворюються залізисті мафіти та ультрамафіти, а також феробазальти та феропікрити.

Дифузія та масоперенос компонентів відбуваються і в розплавах гранітоїдного складу, а також твердих (закристалізованих) породах в процесі їх метаморфізму [1]. Проте, як відомо, розплави гранітного складу нормальної лужності характеризуються високою в'язкістю, що, звичайно, суттєво обмежує дифузію компонентів (в катіонній і молекулярній формах). Незначний дифузійний ефект спостерігається

і в твердих породах в процесі їх метаморфізму за відсутності або незначної кількості летких компонентів (H_2O , CO_2 , F, Cl) [1, 2]. Проте в метасоматичних процесах (за участі флюїдів) масоперенос різних компонентів досягає значних масштабів, аж до утворення родовищ. Хоча, як відомо, в метасоматитах не виявлено родовищ титану, фосфору, які характерні для розглянутих вище рудоносних габроїдів. Тому проблема масопереносу в процесі метасоматозу не має прямого відношення до даної статті.

Разом з тим автори усвідомлюють, що їм не вдалося вичерпно або, принаймні, задовільно пояснити всі відзначені незвичні особливості речовинного складу лужних і основних магматичних порід УЩ. Проте ефект *Sore* є одним (але не єдиним) з важливих петрогенетичних факторів, який створює неоднорідності в магматичних розплавах і може призвести до деяких незвичних особливостей їх речовинного складу, які важко або й неможливо інтерпретувати, виходячи тільки з найбільш відомих нині механізмів диференціації магм — кристалізаційного фракціонування і ліквідації. Цю публікацію слід розглядати як одну з небагатьох спроб показати значення ефекту *Sore* в петрології магматичних порід.

1. Белевцев Р.Я., Дудко В.С., Спивак С.Д. и др. Коростенский плутон — петрогенезис, перспектива рудоносности, проблемы изоляции радиоактивных отходов // Минерал. журн. — 1996. — **18**, № 6. — С. 30—57.
2. Белевцев Р.Я., Дудко В.С., Белевцев А.Р. Диффузионный массоперенос при метаморфизме в докембрии. — Киев, 2001. — 204 с.
3. Богатиков А.О., Биркис А.П. Магматизм докембрия Западной Латвии. — М.: Наука, 1973. — 139 с.
4. Великославинский Д.А., Биркис А.П., Богатиков О.А. и др. Анортозит-рапакивигранитная формация Восточно-Европейской платформы. — Л.: Наука, 1978. — 296 с.
5. Глевасский Е.Б., Кривдик С.Г. Докембрийский карбонатитовый комплекс Приазовья. — Киев: Наук. думка, 1981. — 228 с.
6. Дубина А.В., Кривдик С.Г. Роль эффекта *Sore* в петрогенезисе щелочных пород (на примере Украинского щита) // Материалы Междунар. (стран СНГ) совещ. "Щелочной магматизм Земли и его рудоносность" (Донецк, 10—16 сент. 2007). — К., 2007. — С. 62—64.
7. Егоров Л.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм. — Л.: Недра, 1991. — 260 с.
8. Кармазин П.С. Приазовский батолит, його структурне та вікове положення // Геол. журн. — 1970. — № 5. — С. 137—143.
9. Кононов Ю.В. Габрові масиви Українського щита (центральна частина). — К.: Наук. думка, 1966. — 100 с.
10. Кривдик С.Г. Платформний магматизм Українського щита // Геохімія та рудоутворення. — 2009. — № 27. — С. 29—34.
11. Кривдик С.Г., Гуравський Т.В., Дубина О.В. та ін. Особливості речовинного складу Носачівського апатитильменітового родовища (Корсунь-Новомиргородський плутон, Український щит) // Мінерал. журн. — 2009. — **31**, № 3. — С. 55—78.
12. Кривдик С.Г., Дубина О.В. Типохімізм мінералів лужно-ультраосновних комплексів Українського щита як індикатор глибини їх формування // Там же. — 2005. — **27**, № 1. — С. 64—76.
13. Кривдик С.Г., Дубина О.В., Гуравський Т.В. Деякі мінералогічні та петрологічні особливості рудоносних (фосфор, титан) габроїдів анортозит-рапакивігранітних плутонів Українського щита // Там же. — 2008. — **30**, № 4. — С. 41—57.
14. Кривдик С.Г., Ткачук В.И. Петрология щелочных пород Украинского щита. — Киев: Наук. думка, 1990. — 408 с.

15. Кривдик С.Г., Цымбал С.Н., Гейко Ю.В. Протерозойский щелочно-ультраосновной магматизм северо-западной части Украинского щита как индикатор кимберлитобразования // *Мінерал. журн.* — 2003. — 25, № 5/6. — С. 57—69.
16. Личак И.Л. Петрология Коростенского плутона. — Киев : Наук. думка, 1983. — 248 с.
17. *Прогнозирование рудопроявлений редких элементов Украинского щита* / Е.М. Шермет, С.Н. Стрекозов, С.Г. Кривдик и др. — Донецк : Вебер, 2007. — 220 с.
18. Самойлов В.С. Карбонатиты (фации и условия образования). — М. : Наука, 1977. — 292 с.
19. Цымбал С.Н., Гейко Ю.В., Кривдик С.Г. и др. Болярковская интрузия щелочно-ультраосновных пород (северо-запад Украинского щита) // *Актуальные проблемы геологии Беларуси и смежных территорий : Материалы междунар. научн. конф. (Минск, 9—10 дек. 2008 г.)*. — Минск, 2008. — С. 35—40.
20. Цымбал С.Н., Шербаков И.Б., Кривдик С.Г., Лабунный В.Ф. Щелочно-ультраосновные породы Городницкой интрузии (северо-запад Украинского щита) // *Мінерал. журн.* — 1997. — 19, № 3. — С. 61—80.
21. Уэйджер Л., Браун Г. Расслоенные изверженные породы. — М. : Мир, 1970. — 551 с.
22. Avanzinelli R., Bindi L., Menchetti S. et al. Crystallization and genesis of peralkaline magmas from Pantelleria Volcano, Italy : an integrated petrological and crystal-chemical study // *Lithos.* — 2003. — 73. — P. 41—69.
23. Bernard Charlier. Petrogenesis of magmatic iron-titanium deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites. — Univ. de Liege, 2007. — 165 p.
24. Latypov R.M. The origin of marginal compositional reversals in basic-ultrabasic sills and layered intrusions by Soret fractionation // *J. Petrol.* — 2003. — 44, No 9. — P. 1579—1618.
25. Leshner C.E. Effects of silicate liquid composition on mineral-liquid element partitioning from Soret diffusion studies // *J. Geophys. Res.* — 1986. — 91, bd. 6. — P. 6123—6141.
26. Rao A.S.P. A unique model invoking Soret effect for the origins of the deformed Proterozoic anorthositic massifs and the associated Fe-Ti oxide deposits // 11th V.M. Goldschmidt Conf., Hot Spring, Virginia, USA.
27. Richter F.M., Watson E.B., Mendybaev A.R. et al. Magnesium isotope fractionation in silicate melts by chemical and thermal diffusion // *Geochim. et Cosmochim. acta.* — 2008. — 72. — P. 206—220.
28. Wolker D., DeLong S.E. Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma // *Contribs Mineral. Petrol.* — 1982. — 79. — P. 231—240.
29. Wolker D., DeLong S.E. A small Soret effect in spreading centre gabbros // *Ibid.* — 1984. — 85. — P. 203—208.
30. Wolker D., Leshner C.E., Hays J.F. Soret separation of lunar liquid // *Proc. Lunar Planet. Sci.* — 1981. — 12B. — P. 991—999.

Ин-т геохімії, мінералогії та рудоутворення
ім. М.П. Семененка НАН України, Київ

Надійшла 28.07.2010

РЕЗЮМЕ. Для объяснения непривычных петрологических и минералогических особенностей некоторых магматических комплексов Украинского щита предложено применить термодиффузионный эффект Сорэ. Среди таких особенностей выделяются значительно повышенная или весьма высокая железистость пород и минералов, а также обогащенность титаном, фосфором и редкими металлами некоторых щелочно-ультраосновных (карбонатитовых) комплексов Украинского щита (черниговский в Приазовье), Корсунь-Новомиргородский анортозит-рапакивигранитный плутон и Южно-Кальчикский габбро-сиенитовый массив (Приазовье). Высокая железистость характерна и для щелочно-ультраосновных пород Проскуровского и Антоновского массивов в Днестрово-Бугском районе. Эти особенности химического состава пород и минералов были выделены авторами ранее, на них акцентировалось внимание как на непривычных (отличных от таких в типичных магматических комплексах других регионов). Их образование объяснено абиссальными условиями формирования при низкой фугитивности кислорода. Это, по мнению авторов, глубоко (до 10—20 км) эродированные массивы магматических пород. Не отрицая важности влияния глубины расположения магматических камер на химический состав продуктов раскристаллизации расплавов (пород и минералов), считаем, что этого, очевидно, недостаточно для удовлетворительной петрогенетической интерпретации указанных и некоторых других петрохимических и минералогических особенностей. В данной статье высокожелезистые магматические породы отнесены, согласно эффекту Сорэ, к таким, которые кристаллизовались в зоне более высоких значений температуры (на большей глубине магматической камеры), тогда как высокомагнезиальные породы формировались в зоне с пониженной температурой (в гипабиссальных условиях), где могли накапливаться более тугоплавкие компоненты магмы. Конечно, этот процесс довольно сложен и в нем могут объединяться с эффектом Сорэ как механизмы кристаллизационного фракционирования (в силикатных расплавах), так и ликвация расплавов (в карбонатитовых комплексах). Возможно, термодиффузионный эффект Сорэ может интенсивнее проявляться в магматических расплавах с низкой вязкостью и насыщенными летучими компонентами (карбонатиты, мелилититы, пикриты, базальты).

SUMMARY. The Soret thermodiffusion effect is suggested to explain unusual petrological and mineralogical peculiarities of some magmatic complexes of the Ukrainian Shield. Amongst such unusual petrological and mineralogical peculiarities as an decreased low magnesity in rocks and minerals as well as the enriched in Ti, P and rare metals of some alkaline-ultrabasic (carbonatite) complexes of the Ukrainian Shield (Chernigovka in the Azov area), Korsun-Novomyrhorod

anorthosite rapakivi-granite pluton and South-Kalchyk gabbro-syenitic massif (Azov area) are distinguished. A low magnesity is also typical of alkali-ultrabasic rocks of Proskurovka and Antonovka massifs. At the same time the hypabyssal alkali-ultrabasic occurrences in North-West region of the Ukrainian Shield (Gorodnytsa, Glumcha, Bolyarka, Pokoshiv) have a high magnesity typical for those massifs. The rocks of those occurrences are predominantly presented by forsterite melteigite and jacupirangite. While in the deep eroded Chernigovka carbonatite complex olivine from melteigites is presented by varieties highly enriched in iron (Fa_{70}). Those peculiarities of chemical composition of rocks and minerals have been distinguished earlier by the authors. Those peculiarities were emphasized as untypical (different from such in typical magmatic complexes in other regions) and they are explained by abyssal conditions of crystallization at low oxygen fugacity. In the authors' opinion those massifs of magmatic rocks are deeply eroded (to 10–20 km) on the contemporary erosion cut. One cannot deny the significance and influence of the deep magmatic chambers on chemical composition of the melt crystallization products (rocks and minerals) but these factors are not enough for a satisfactory petrological interpretation of those and some another petrochemical and mineralogical peculiarities. In this paper the magmatic rocks enriched in iron are considered (according to the Soret effect) as such that were crystallized in the zone of higher temperatures (in the deeper part of the magmatic chamber) whereas the highly magnesian rocks are formed in the part with reduced temperature (in hypabyssal conditions) where more high-melting magma components could accumulate. Certainly this process is rather complicated and can join the Soret effect and crystallization fractionating mechanisms (in silicate melts) as well as melt liquation (in carbonatite complexes). Probably the Soret thermodiffusion effect can display more intensively in the magmatic melt with low viscosity and enriched by volatile components (carbonatites, melilitites, picrites, basalts).