

Що відбувалося з ранньодокембрійськими гранулітовими комплексами Побужжя (Український щит) та поясу Лімпопо (Південна Африка) та як їх стратифікувати? Погляд тектоніста

О.Б. Гінтов, 2022

Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
Надійшла 12 жовтня 2021 р.

На прикладі двох гранулітових поясів — Побузького (Український щит) і поясу Лімпопо (Південна Африка) розглянуто два альтернативні підходи (стратигенно-метаморфогенний і деформаційно-метаморфогенний) до геологічного вивчення та картування найдавніших порід земної кори, метаморфізованих в *PT*-умовах гранулітової фації. Показано досить хорошу кореляцію складу і ступеня метаморфізму (в тому числі динамометаморфізму) породних комплексів обох поясів і, щонайменше, триетапне їх утворення—перетворення. Процеси гранулітового метаморфізму в межах обох поясів відбувалися раніше 3,0 млрд років тому, 2,6—2,8 і близько 2,0 млрд років тому. За структурно-метаморфічними перебудовами гранулітових комплексів, формуванням їх нових структурних планів з руйнуванням попередніх (архейських) наступними (протерозойськими) не можна доказово стратифікувати архейські гранулітові комплекси на рівні світ і детальніше в межах стратигенно-метаморфогенного підходу. Для Побузького гранулітового поясу реальним є виділення тільки дністровсько-бузької і бузької серій. Один із важливих процесів розвитку поясів — деформування гірських порід в умовах стиснення і зсуву, утворення в гранулітових комплексах субвертикально-шаруватого середовища, зсувної складчастості із субвертикальними шарнірами і крилами складок. В обох поясах ці процеси почалися в неоархеї, тобто тектонічні процеси вже почали зазнавати дію механізмів тектоніки плит. Загальним для обох поясів є формування shear zone лінійного типу від мікро- до макророзмірів і накладання їх на деформаційні структури гранулітових комплексів попередніх етапів розвитку. На їх основі сформувались внутрішня структура поясів і їх взаємозв'язок із сусідніми блоками земної кори. Передбачається, що архейські чарнокітоїди і ТТГ-гранітоїди, догляду на їх геохімічну подібність і близький вік, складають єдиний структурний поверх земної кори — фундамент зеленокам'яних поясів. За мінеральним складом, *PT*-умовами метаморфізму і віком порід гранулітових поясів, що визначений на підставі вивчення U—Pb, Lu—Hf, Sm—Nd ізотопних систем, ізотопного складу кисню в зернах циркону, можна дійти такого висновку — вже в еоархейській і палеоархейській мантії і корі мали бути великі об'єми речовини середнього—кислого складу, що обумовило утворення ТТГ комплексів.

Ключові слова: Український щит, Побужжя, пояс Лімпопо, архей, грануліти, тектоніка, стратиграфія, методи вивчення.

Вступ. Аналіз матеріалів геологічної зйомки Українського щита, зокрема території розвитку ранньодокембрійських гранулітових комплексів, і власний польовий досвід призводить до впевненої думки

про те, що при вивченні та картуванні цих комплексів необхідно відмовитися від конформістського підходу — мислення категоріями фанерозойської геології.

Сратиграфія порід раннього докембрію,

в першу чергу гранулітових комплексів архею, — це відповідь на питання не «що на чому лежить», а «що древніше, а що молодше». Це — категоричне заперечення ще не так давно висловленої відомим докембрістом В.З. Негруцею методологічної тези про необхідність «...єдиного историко-геологического подхода к изучению докембрия по канонам фанерозойской стратиграфии и выборочным определениям изотопного возраста реперных образований» [Негруца, 2011, с. 4]. У термін «стратиграфія» в цій статті вкладено поділ гранулітових комплексів архею на стратони як найбільшого масштабу (наприклад, поверхи), так і малі, — типу світ, підсвіт і горизонтів, які приймаються в деяких роботах з стратиграфії раннього докембрію Українського щита.

Площі розвитку гранулітових комплексів більшості кратонів світу мають багато рис подібності як в петрологічному, так і в тектонічному відношенні. Це цілком зрозуміло, тому що, за широко відомими уявленнями [Condie, 2004a; Eriksson et al., 2012; Ernst et al., 2005, 2016], в гадеї до межі близько 4,2 млрд років тому на місці сучасної літосфери існував магматичний океан, швидше за все, хондритового складу. Низька в'язкість магматичного океану підтримувалася інтенсивним метеоритним бомбардуванням, що призводило до перемішування речовини, швидкої її дифузії на кислу і ультраосновну складові, відділення води і газів. У проміжку 4,2—4,0 млрд років тому формувалися гаряча атмосфера і гідросфера. Передбачається, що до рубежу близько 4,0 млрд років тому на Землі утворилася базальтоїдна протокірка і більше 90 % сучасного обсягу океанів [Eriksson et al., 2012], які були досить глибокими. Метеоритне бомбардування Землі, поступово затихаючи, тривало до межі близько 3,7 млрд років тому. Це, разом з потужними глибинними тепловими потоками, викликало активні океанічні течії, цунамі, руйнування підводних базальтових підняття, утворення крайових грубоуламкових товщ.

Існування на Землі єдиних світових

магматичного і потім гідросферного океанів пояснює вирівнювання і єдність умов формування первинної континентальної кори. Важливо відзначити, що поряд з базальтоїдною корою всередині літосфери практично одночасно формувалася і шар порід середнього-кислого складу, який перемішувався із залягаючими вище базальтоїдами. Механізм розшарування магматичного океану і перемішування шарів обговорюється багатьма вченими [Гамилтон, 2007; Eriksson et al., 2012; Wiemer et al., 2018; Latypov et al., 2019; Усенко, 2021].

Спільність і єдність фізико-хімічних процесів утворення ео-палеоархейської кори на всій території Землі дозволяє проводити порівняння типових древніх тектонічних структур і породних комплексів різних материків для з'ясування підходів учених різних наукових шкіл до методів їх вивчення і геологічного, в тому числі структурного, картування. Такими типовими і порівнюваними тектонічними регіонами є гранулітові пояси Українського щита і Південної Африки, зокрема Побузький гранулітовий пояс (ПГП) і гранулітовий пояс Лімпопо (ГПЛ).

Загальні відомості про геологічну будову ПГП і ГПЛ. У цих поясів, як і багатьох інших гранулітових поясів Землі, багато спільних структурно-тектонічних і петрологічних рис. Відмінності, скоріше, в термінології і поглядах, ніж в петрографії гранулітових комплексів і суті геологічних процесів, що відбувалися.

Пояси не сильно відрізняються за розмірами: ПГП — 460×140 км, ГПЛ — 650××280 км. Обидва пояси обмежені і перетинаються численними зсувними зонами розломів (shear zone), які відіграли одну з основних ролей в їх формуванні.

ПГП (рис. 1) обмежений Подільською зоною розломів на південному заході, Первомайською — на сході, Тетерівською і Сарненсько-Варварівською на півночі, а на заході занурюється під чохол Волино-Подільської монокліналі. Пояс перетинається великими повздовжніми Хмільницькою, Летичівською, Ободівською, Ємилівською, Врадіївською зонами зсуву північ-

но-західного простягання (296—318°), широтними Хмельницькою, Гайворонською і Заваллівською, субмеридіональними Звіздаль-Заліською і Тальнівською, північно-східними Немирівською, Берестягівською, Піщансько-Жакчикською і багатьма меншими зсувними зонами. Більшість зон мають ранньопротерозойський вік закладання від 2,45 до 1,8 млрд років тому. Архейськими, під питанням, є Летичівська, Ободівська, Ємилівська і Врадіївська (>2,5 млрд років тому) [Гінтов, 2005, 2014]. Всі перераховані зони мають ширину не менше 10 км, закладалися як крутого падіння праві або ліві і активізувалися як ліві чи праві зсуви при стисненні. Немирівська зона розділяє ПГП на Подільський і Бузький мегаблоки, а Тальнівська відокремлює на сході крайову зону ПГП, так звану Голованівську шовну зону, яка відноситься нами [Гінтов і др., 2018] до Інгульського мегаблоку УЩ.

ГПЛ (рис. 2) обмежений на півдні правозсуво-насувною зоною Hout River, на півночі — правозсуво-насувною зоною Umlali. Обидві зони, як і весь пояс, мають простягання ~ СВ 65°, ширину — не менше 10 км. Пояс січеться великими повздожніми правозсувними зонами Triangle (ширина зони до 50 км, падіння круте в південних румбах) і Palala-Zoetfontain (ширина більше 10 км, падіння круте в північних румбах), які ділять ГПЛ на три зони (мегаблоки) — Північну Крайову, Центральну і Південну крайову [Mason, 1973; McCourt, & Vearncombe, 1987, 1992; McCourt, & Armstrong, 1998; Kröner et al., 1998; Boshoff et al., 2006; Zeh et al., 2007 та ін.]. Всі три мегаблоки порушені численними дрібнішими зонами зсуву і мікрозсуву, які січуть давніші гнейси і формують нові [Табатабаеиманеш, 2006]. Зона розломів Umlali відокремлює Північну зону ГПЛ від кратона Зімбабве, а Hout River shear zone відокремлює Південну зону ГПЛ від кратона Каапвааль. Обидва древніх кратони складені породами ТТГ формації (фундамент віком, відповідно, 3,7—3,8 і 3,6 млрд років) і зеленокам'яних поясів віком ~3,5 млрд років. Вік закладання поздовжньої системи розломів визначається часом насування

комплексів ГПЛ на кратони і знаходиться між 2,6 і 2,7 млрд років тому. Помітні переміщення по розломах завершилися близько 1,97—1,98 млрд років тому [Геря, 1999].

Для непетролога зіставлення породних комплексів ПГП і ГПЛ являє досить важке завдання, особливо з огляду на термінологічні відмінності при їх описі. Західні геологи-докембристи, вживаючи іноді термін «стратиграфія», нерозривно пов'язують його з таблицями цифр ізотопного віку порід, а не з аналізом нашарувань (що, швидше за все, правильно). Термін «світа (suite)» гірських порід у них асоціюється з нашим терміном «комплекс» (наприклад, «світа дайок» або «ТТГ світа», «світа гранітоїдів Сенд-Рівер», «світа порфірових калієвих гранітів Разі» [Zeh, Gerdes, 2007]). В роботах [Barton et al., 1994; Van Reenen & Smit, 1996; Zeh, Gerdes, 2007; Gerdes, Zeh, 2009.] ендербіти і чарнокіти ГПЛ розглядаються як інтрузії, що прорвали гнейсові серії, тому в ГПЛ вони, за площею, займають менше місця, ніж гнейси і, в принципі, не більше цікаві, ніж інші гранітоїди. Крім цього, при описі геологічної будови ГПЛ не використовувалося детальне формаційне розчленування гранулітового комплексу з систематизацією формацій за їх структурно-речовими ознаками та виділенням структурно-формаційних комплексів (СФК), як це зроблено в межах ПГП [Кирилюк, 1982а,б, 2005, 2010]. Тому зіставлення довелося робити лише на підставі опису порід гнейсових серій та характеру їх деформацій.

Однак, не зіставивши породи обох поясів, не можна перейти до обговорення питання, поставленого в назві статті. При досить грубому узагальненні та зведенні термінології «до спільного петрографічного знаменника» можна побачити велику схожість мінерального складу гнейсових серій цих регіонів.

Побузький гранулітовий пояс. В межах Бузького мегаблоку і Голованівської шовної зони ПГП (рис. 1) породні комплекси найкраще вивчені по р. Південний Буг і його притоках в районі міст Гайворон — Первомайськ [Лучіцький, 1927; Безбо-

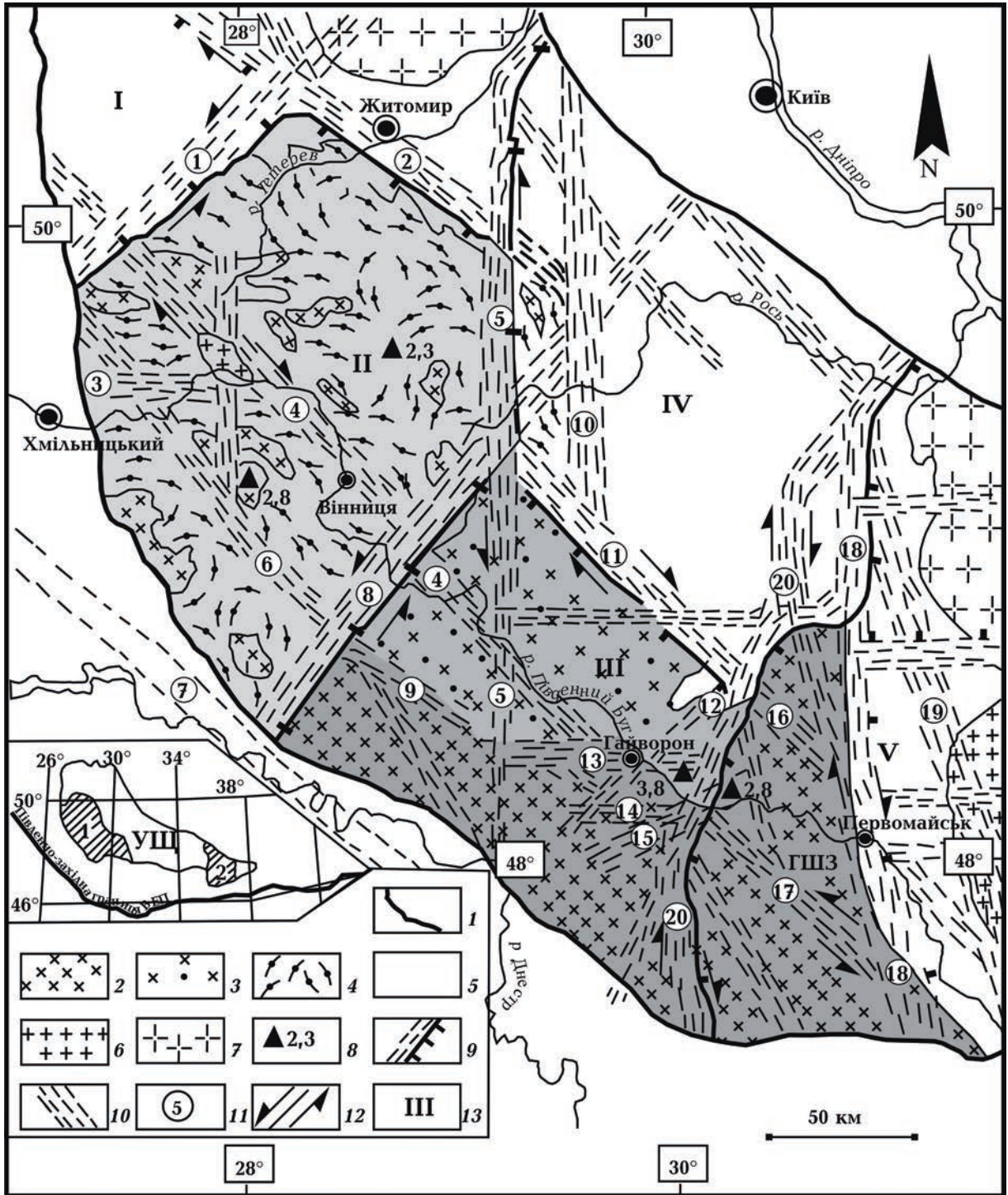


Рис. 1. Геологічна карта Побузького гранулітового поясу (ПГП): 1 — контур західної частини Українського щита; породні комплекси ПГП: 2 — чарнокітоїди (ендербіто-гнейси, чорно-ендербіти, чарнокіти) з включеннями кристалосланців і гнейсів дністровсько-бузької і бузької серій; 3 — діафторіти по чарнокітоїдах (граніти гайсинського комплексу, собіти); 4 — гранітоїди бердичівського комплексу (гранат-кордієрит-біотитові граніти і мігматити) з включеннями гнейсів гранат-біотитових; 5 — палеопротерозойські гнейсові серії і гранітоїди сусідніх районів (амфіболітова фація метаморфізму, контури і умовні знаки не показані); тетерівська, росинсько-тікичська, інгуло-інгулецька серії, ультраметаморфічні гранітоїди житомирського, звенигородського, ставищанського, кіровоградського комплексів; 6 — гранітні масиви інтрузивного типу; 7 — рапаківі-габро-анортозитові масиви коростенського комплексу; 8 — пункти, в яких отримані найбільш древні U-Pb значення віку цирконів в породних комплексах ПГП (округлено в млрд років); зони I, II, III, IV, V.

родько, 1935; Налівкина, 1964; Віноградов, 1970; Лазько та ін., 1975; Кірилюк, 1982 і посилання; Довгань та ін., 1989; Костюченко, Зюльде та ін., 1990; Степанюк, 2000 і посилання; Кислюк, Зюльде та ін., 2011; Степанюк та ін. 2017; Степанюк, 2018 та ін.].

Гнейсові серії представлені тут кристалосланцями двопіроксеновими, ортопіроксеновими, біотит-ортопіроксеновими, гранат-ортопіроксеновими, магнетит-двопіроксеновими, плагіогнейсами і гнейсами гранат-біотитовими з ортопіроксеном (дністровсько-бузька серія); кварцитами польовошпатовими, часто з силіманітом і гранатом, плагіогнейсами і гнейсами силіманіт-гранат-кордієрит-біотитовими, плагіогнейсами біотит-графітовими (часто з силіманітом і гранатом), кальцифірами доломіт-кальцитовими, кальцитовими, кварцитами залістими, в основному магнетит-двопіроксеновими, кальцифірами магнетитовими рудними, плагіогнейсами амфібол-біотитовими, гнейсами гранат-біотитовими (*бузька серія*), гнейсами біотитовими. Гнейси обох серій містять міжпластові і січні тіла базит-гіпербазитів — амфіболітів, габроїдів, перідотитів, піроксенітів, серпентинітів, коматітів (під

питанням) та ін.

Гнейси і кристалосланці дністровсько-бузької серії складають ксеноліти, скіаліти, невеликі смуги і іноді дайки серед ендербіто-гнейсів, чарно-ендербітів і чарнокітів, що займають основну площу описуваної території і які утворилися в результаті метасоматичної та ультраметаморфічної переробки кристалосланців і гнейсів, з якими, як правило, мають поступові переходи [Щербаков, 2005, Лісна, Касьяненко, 2015; Усенко, 2021 та ін.]. Всі породи сформувалися в РТ умовах гранулітової фації. Вік найдавнішої частини порід дністровсько-бузької серії древніший, мабуть, 3,8 млрд років, так як для циркону з ендербіто-гнейсів гайворонського комплексу в кар'єрі Козачий Яр за допомогою вивчення U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd ізотопних систем отримана максимальна цифра 3,78 млрд років [Бібікова, 2004]. Пункти, в яких отримані максимальні для конкретних комплексів U-Pb цифри віку цирконів, показані на рис. 1.

Породи бузької серії мають розтягнутий в часі вік від 2,7—2,8 до 2,06 млрд років [Степанюк, 2000; Щербак та ін., 2008; Степанюк та ін., 2010]. Вони складають внутрішньо- і прирозломні моноклінали або

розломів (shear zone): 9 — міжмегаблокові, 10 — внутрішньомегаблокові; 11 — номери зон розломів; 12 — напрямок зсувів; 13 — номери мегаблоків. Зони розломів: 1 — Тетерівська, 2 — Сарненсько-Варварівська, 3 — Хмельницька, 4 — Хмельницька, 5 — Звездаль-Заліська, 6 — Летичівська, 7 — Подільська, 8 — Немірівська, 9 — Ободівська, 10 — Брусилівська, 11 — Дашівська, 12 — Берестягівська, 13 — Гайворонська, 14 — Заваллівська, 15 — Піщансько-Жакчикська, 16 — Ємилівська, 17 — Врадіївська, 18 — Первомайська, 19 — Звенигородсько-Братська, 20 — Тальнівська. Мегаблоки: I — Волинський, II — Подільський, III — Бузький, IV — Росинський, V — Інгульський; ГШЗ-Голованівська шовна зона. *На вставці*: 1 — ППП-Побузький гранулітовий пояс, 2 — Приазовський гранулітовий пояс, УЩ — Український щит.

Fig. 1. Geological map of the Bug granulite belt (BGB): 1 — contour of the western part of the Ukrainian Shield; rock complexes of the BGB: 2 — charnokitoids (enderbite-gneisses, charno-enderbites, charnokites) with inclusions of crystalline schists and gneisses of the Dniester-Bug and Bug series; 3 — diaporites over charnokitoids (granites of the Gaisyn complex, sobites); 4 — granitoids of the Berdichev complex (garnet-cordierite-biotite granites and migmatites) with inclusions of gneisses of garnet-biotites; 5 — paleoproterozoic gneiss series and granitoids of neighbouring areas (amphibolite facies of metamorphism, outlines and codes are not shown): Teterev, Ros-Tikich, Ingul-Ingulets series, ultrametamorphic granitoids of Zhitomir, Zvenigorod, Stavishche, Kirovograd complexes; 6 — granite massifs of intrusive type; 7 — rapakivi-gabbro-anorthosite massifs of the Korosten complex; 8 — sites where the most ancient U-Pb values of zircon age in rock complexes of the GBB were obtained (rounded in billions of years); shear zones: 9 — intermegablocks, 10 — intramegablocks; 11 — shear zones (1 — Teterev, 2 — Sarny-Varvarovka, 3 — Khmelnytsk, 4 — Khmelnyk, 5 — Zvezdal-Zalessy, 6 — Letichev, 7 — Podolia, 8 — Nemirov, 9 — Obodov, 10 — Brusilov, 11 — Dashevka, 12 — Berestyagovka, 13 — Hayvoron, 14 — Zavalye, 15 — Peschansk-Zhakchiksk, 16 — Yemilov, 17 — Vradiyevka, 18 — Pervomaysk, 19 — Zvenigorod-Bratsk, 20 — Talnovka); 12 — direction of shifts; 13 — megablocks (I — Volyn, II — Podolye, III — Bug, IV — Ros, V — Ingul); ГШЗ — Golovanevsk suture zone. *In the box*: 1 — Bug granulitic belt, 2 — Azov granulitic belt, УЩ — Ukrainian Shield.

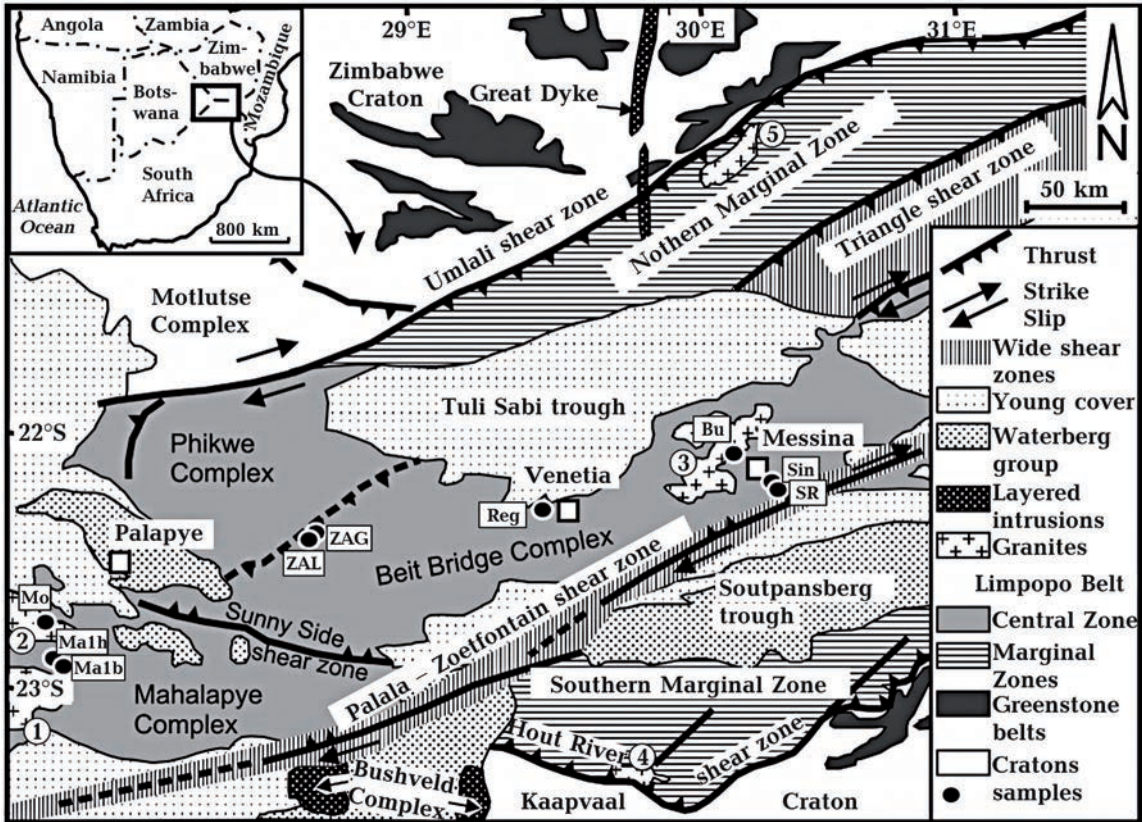


Рис. 2. Геологічна карта поясу Лімпопо з приблизним розташуванням місць відбору проб для петрологічного та ізотопно-геохронологічного аналізу гранітів Махалапье (1); гранітів Мокгваре (2); гранітів Булай (3); гранітів Маток (4); гранітів Разі (5), за [Zeh et al., 2007].

Fig. 2. Geological map of the Limpopo belt with the approximate location of sampling sites for petrological and isotopic-geochronological analysis Mahalapye (1), Mokgware (2), Bulay (3), Matok (4), Razi (5). According to [Zeh et al., 2007].

призсувні складки волочиння з субвертикальними шарнірами [Гінтов и др., 2016, 2018; Гінтов та ін., 2020]. Спроби їх стратифікувати завжди зустрічають труднощі, тому що в різних виходах окремі їх складові розташовуються в різних поєднаннях.

Другими за площею поширення в районі є ультраметаморфічні та інтрузивні (в набагато меншій мірі) гранітоїди побузького комплексу, представлені рожевими і сірувато-рожевими біотитовими, гранат-біотитовими і апліт-пегматоїдними гранітами. Як правило, граніти цього типу утворюють лінійно витягнуті тіла природного і внутрішньоразломного характеру, хоча зустрічаються й масиви ізометричної форми. Ізотопний вік цих гранітоїдів від 2,38 до 1,98 млрд років [Щербак и др., 2008; Степанюк та ін., 2016].

В межах *Подільського мегаблоку* пере-

важають гнейси гранат-біотитові дністровсько-бузької серії (так звана березинська товща), перетворені в гранітоїди (граніти і мігматити) бердичівського комплексу, котрі й складають основний петрографічний фон мегаблоку. Ізотопний вік гранітоїдів 2,08—2,00 млрд років, вік гранат-біотитових гнейсів також ранньопротерозойський [Степанюк та ін., 2015]. Гнейси, а також чарнокітоїди літинського комплексу, розвинені в гранітоїдах бердичівського комплексу у вигляді ксенолітів, смуг і рідкісних невеликих масивів, самим вивченим з яких є Літинський масив чарнокітоїдів віком $2,815 \pm 0,035$ млрд років (~30 км завширшки, пункт з цифрою 2,8 показано в західній частині рис. 1) [Лісна, Касьяненко, 2004; Щербак и др., 2005]. Однак чітких взаємовідносин цього масиву з оточуючими гранітоїдами бердичівського

комплексу не встановлено, так як гранітизація близько 2 млрд років тому призвела до його переробки, особливо крайових частин.

Не вирішеною залишається проблема гранітоїдів бердичівського комплексу і вихідних для них гранат-біотитових гнейсів. Ні в одному з багатьох визначень ізотопного віку цих порід за монацитом і цирконом (в тому числі кластогенним) не одержано архейських датувань [Степанюк, 2000; Степанюк та ін., 2015].

Гранулітовий пояс Лімпопо. Породні комплекси ГПЛ описані, починаючи з [Mason, 1973], в не меншій кількості робіт. Крім вже згадуваних, відзначимо дослідження Л.Л. Перчука та його колег [Перчук и др., 2000 і посилання; Геря, 1999 і посилання; Perchuk et al., 2006; Табатабаиманеш, 2006 і посилання]. Автор використовує, в основному, російськомовні роботи, так як в деяких з них вже зроблена спроба приведення термінології «до спільного петрографічного знаменника».

Породи поясу представлені: кристалосланцями двопіроксен-плагіоклаз-гранат-амфіболовими, біотит-кордієрит-гранатовими, флогопіт-сапфірин-кордієрит — ортопіроксеновими, ортопіроксен-кордієрит-гранат-кварцовими; кварцитами і мармурами, гнейсами графітизованими кварц-гранат-силіманіт-кордієритовими, кварц-магнетит-гранат-піроксеновими. Гнейси містять в підпорядкованій кількості тіла амфіболітів і ультрабазитів [Геря, 1999; Табатабаиманеш, 2006]. Розвинений в межах Центральної зони гнейсовий комплекс Бейт Бридж вельми нагадує бузьку серію ПГП. Весь комплекс гнейсів ГПЛ сформований в кілька етапів в *PT*-умовах гранулітової фації (див. далі). Його протоліт древніший за 3,65 млрд років.

Чарнокіти, чарно-ендербіти і ендербіти займають в ГПЛ значно меншу територію, ніж гнейси, і складають в основному інтрузії, що «проривають» гнейсові серії [Boshoff et al., 2006; Zeh, Gerdes, 2007; Gerdes, Zeh, 2009.]. Їх вік в Південній крайовій зоні (масив Маток) становить 2,64—2,67 млрд років, в Центральній зоні (масив

Булаї) 2,65 млрд років. Найбільш широко чарнокітоїди розвинені в межах Північної крайової зони, де їх вік оцінюється в 2,58—2,71 млрд років. При описі гнейсів Північної зони вжито термін «ендербітові і чарно-ендербітові ортогнейси», що може відповідати нашим ендербіто-гнейсам. Тоді, можливо, площа розвитку чарнокітоїдів ГПЛ може бути розширена за рахунок порід, що відносяться до гнейсової серії.

Значне місце в межах ГПЛ займають інтрузії гранітоїдів, такі як масиви гранодіоритів і гранітів Mahalapye (2023±7), Mokgware, Goha, Razi (2627±7), Singelele (2582±3 млн років) та інші.

Глибинна будова ГПЛ і ПГП. Якщо геолого-геофізичне вивчення приповерхневих горизонтів обох поясів свідчить про важливу роль в їх формуванні зсувних процесів з утворенням shear zone, то глибинні геофізичні розрізи відображають таку ж важливу роль стиснення земної кори у вигляді насувів і підсувів.

На рис. 3, а показано глибинний сейсмічний розріз уперек ГПЛ, за [van Reenen and Smit, 1996], на якому видно насуди поясу на сусідні кратони Зімбабве і Каапвааль і Центральної зони на Північну і Південну. На рис. 3, б наведено фрагмент магнітної моделі Інгульського мегаблоку уздовж сейсмічного профілю ГСЗ VIII. Фрагмент охоплює південне продовження ПГП під осадовим чохлам Південноукраїнської монокліналі (профіль ГСЗ проходить декілька південніше району, показаного на рис. 1, в напрямку ПдЗ — ПнС). Видно зону насунання Голованівської шовної зони в південно-західному напрямку або підсуву Бузького мегаблоку в північно-східному. Такий же насув-підсув між Голованівською шовною зоною і Бузьким мегаблоком отриманий в сейсмічній моделі по широтному профілю ГСЗ IV [Trypolsky et al., 2019].

Якщо в межах ГПЛ насуди задокументовані геологічно, то в межах ПГП — тільки геофізично (враховуючи значну закритість території), тому тут точно не можна визначити, який процес був провідним: насунання Голованівської шовної зони в західному

напрямку, чи підсув Бузького мегаблоку — в східному. Однак в будь-якому випадку ці структурні особливості свідчать про етапи стиснення земної кори в неoarхеї та палеопротерозої.

У Південній Африці стиснення було викликано косим (СПнС — ЗПДЗ) зближенням кратонів Зімбабве і Каапвааль, що й сформувало праві зсуво-насуви у всій системі повздовжніх розломів ГПЛ [Van Reenen et al., 1987; Smit, Van Reenen, 1997]. В межах центральної і західної частини УЩ встановлено принаймні два етапи стиснення літосфери: а) неoarхеї-ранньопротерозойське стиснення у напрямку ПнС — ПДЗ, що викликало праві зсуво-насуви-підсуви в системі субмеридіональних розломів центральної частини щита; б) ПнПнЗ — ПДПДС стиснення при зближенні кратонів Сарматія і Фенноскандія (близько 2,0 млрд років тому), з яким пов'язане формування лівих зсувів по зонах розломів західної частини щита — Тетерівській, Немирівській, Звиздаль-Заліській та ін. [Гінтов, 2015; Мичак, 2019] (рис. 1).

Обговорення різних підходів до вивчення гранулітових поясів і отриманих результатів. Як бачимо, в макроструктурному і петрографічному відношенні ПГП і ГПЛ подібні між собою. Однак подібність на цьому закінчується, якщо мати на увазі різні підходи фахівців, які вивчають і картують обидва розглянутих пояси. Зіставлення ускладнюється тим, що увагу геологів, які вивчають ГПЛ, вже давно привертають вікові співвідношення тектонічних, магматичних і метаморфічних процесів на основі даних ізотопної геохронології, які викликають у них велику довіру, тоді як в українській геологічній науці все ще багато часу йде на суперечки, що важливіше — стратигенно-метаморфогенний чи ізотопно-геохронологічний підхід до вивчення гранулітових комплексів.

В українській геології при вивченні ранньодокембрійських гранулітових комплексів довгий час превалював стратигенно-метаморфогенний підхід, найдокладніше сформульований у роботах В.П. Кирилюка [Кирилюк, 1982, 2005, 2007, 2010 2013, Ки-

рилюк и др., 2020].

В.П. Кирилюк вважає, що монофаціальні гранулітові комплекси є найбільш древніми з відомих на УЩ еoarхеїськими комплексами, що складають найнижчий його структурний поверх. Метаморфізм гранулітової фації товщ осадово-вулканогенних порід, які накопичувалися і прогиналися в еoarхеї, обумовлений, за автором, більш високою, ніж в палео — неoarхеї, температурою земної кори, в тому числі її поверхні, і пов'язаними з цим субаеральними «сухими» умовами формування вихідних товщ. У мезoarхеї накопичення верхніх товщ вулканітів і осадків відбувалося вже в термогіросферних водних умовах, що призвело до утворення монофаціальних амфіболіто-гнейсових комплексів (амфіболітова фація регіонального метаморфізму), які перекривали гранулітові. Тому автор впевнений, що вихідний вік гранулітових комплексів УЩ не може бути молодшим еoarхеїського і реперні ізотопні дані з цифрами, меншими 3,8 млрд років, відображають не новостворені комплекси, а процеси ендогенного перетворення (омолодження) еoarхеїських, що завершилися 1,9—2,0 млрд років тому.

Головні риси складу і структури нижньеоarхеїських комплексів УЩ успадковані, за В.П. Кирилюком, від вихідних стратотипічних товщ, які розрізнялися від початку їх формування і перетворювалися в умовах квазіізохімічного метаморфізму, зберігаючи, як правило, своє положення в розрізі. Складчаста структура таких комплексів у цілому не складніша складчастості товщ фанерозою і представлена, на рівні світ і формацій, нормальними син- і антиформами, дещо ускладненими на крилах деформаціями шаруватості, смугастості та кристалізаційної сланцюватості гірських порід. Смугастість порід різного складу має в основному успадкований стратигенний характер.

Стратигенно-метаморфогенний підхід покладений в основу побудованих в масштабах 1:200 000 і 1:50 000 державних геологічних карт УЩ, в тому числі районів розвитку гранулітових комплексів. При

цьому, на жаль, взяв гору принцип «вище або нижче», поділ кристалосланців і гнейсів гранулітової фації на світи, хоча точних доказів такого поділу, за субвертикального залягання порід і сумнівності їх стратигенного походження, не може бути. На Побужжі ранньодокембрійські породні комплекси поділені на сім світ і підсвіт, не рахуючи горизонтів [Кирилюк, 1982, 2010].

П'ять з них у вигляді світ і товщ увійшли в КХС України [Єсіпчук та ін., 2004] і офіційні геологічні карти цього регіону. Всі вони віднесені до архею (3,7—2,6 млрд років). На картах показані розломи, але, як правило, на більшості з них немає кінематичної інформації, тому що їй не надавалося раніше великого значення.

Тут слід зазначити, що майже пів-сто-

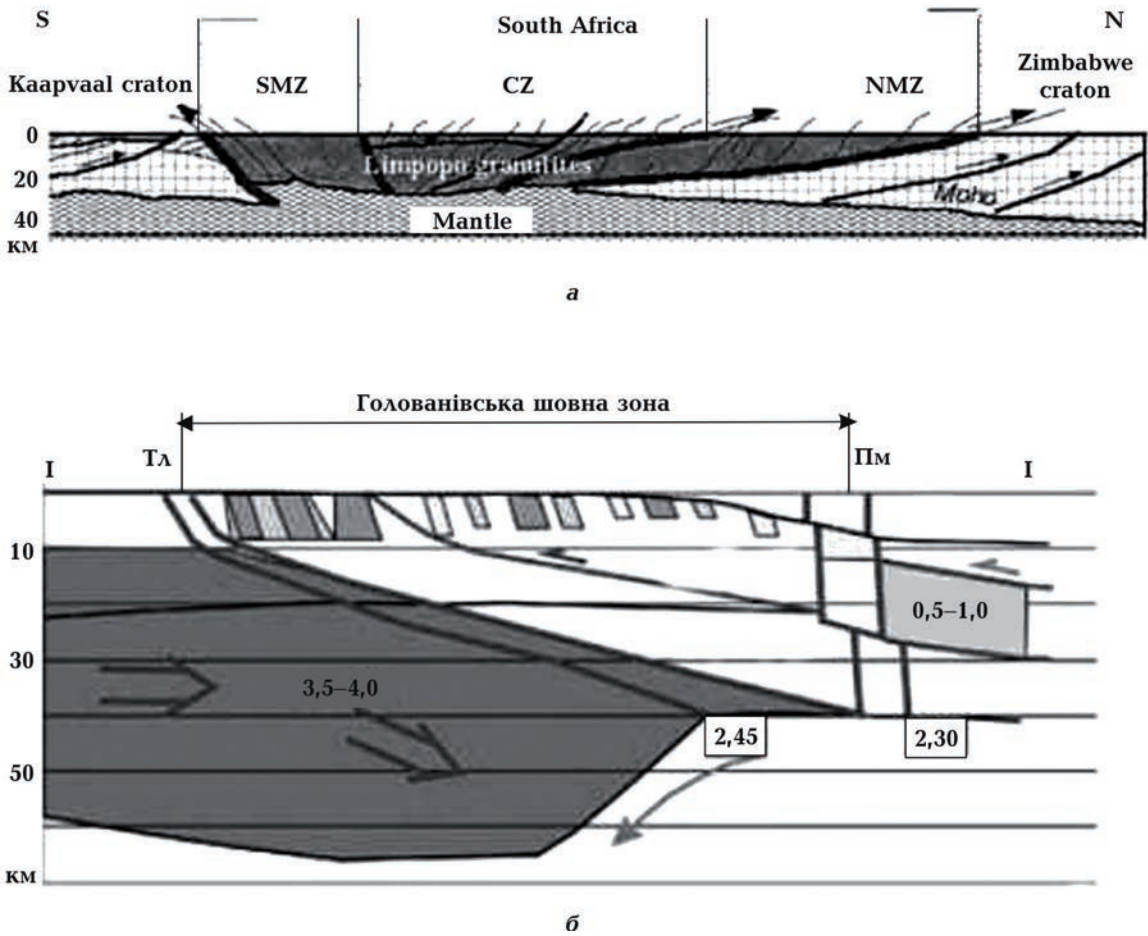


Рис. 3. Глибинні геолого-геофізичні розрізи: *a* — перетин упоперк пояса Лімпопо на основі інтегрованих структурних, геологічних і сейсмічних даних [van Reenen and Smit, 1996] (SMZ — Південна крайова зона, CZ — Центральна зона, NMZ — Північна крайова зона); *б* — магнітна модель глибинної будови Голованівської шовної зони ПГП, побудована І.К. Пашкевич і М.І. Бакаржієвою [Нариси..., 2018, с. 398] з урахуванням сейсмічних даних по VIII профілю ГСЗ [Чекунов і др., 1989]. Тл — Тальнівська зона розломів, ПМ — Первомайська зона розломів; цифри в не залитих прямокутниках — вік закладання розломів; цифри в зафарбованих тілах — намагніченість в А/м; стрілки — напрям переміщення блоків.

Fig. 3. Deep geological and geophysical sections: *a* — Cross section of the Limpopo belt based on integrated structural, geological and seismic data [Van Reenen, Smit, 1996] (SMZ — Southern Margin Zone, CZ — Central Zone, NMZ — Northern Margin Zone); *b* — Magnetic model of the deep structure of the Golovanivsk suture zone of the BGB constructed by I.K. Pashkevich and M.I. Bakarzhieva [Essays..., 2018, p. 398] taking into account the seismic data on the VIII profile of the DSS [Chekunov et al., 1989]. Тl — Talnivka fault zone, Pm — Pervomay fault zone; figures in non-filled rectangles — age of faulting; figures in painted bodies — magnetization in A/m; arrows — direction of blocks movement.

ліття тому радянськими геологами-докембристами висловлювалися й інші уявлення про характер розвитку земної кори в ранньому докембрії. У книзі «Докембрій континентів. Основные черты тектоники» [Борукаев и др., 1977] щодо ранньоархейських утворень (таке званий «алданського структурного поверху») писалося: «В большинстве случаев алданские образования несут на себе отпечаток многофазных деформаций. Особенно отчетливо они проявляются в поясах дисхизиса, где, как правило, обнаруживается чрезвычайно сложная складчатость вплоть до перекрестной. На территориях Канадского, Каапваальского щитов и щита Йилгарн структурный рисунок алданского этажа практически «стерт» кенорской и соответствующими ей складчатостями рубежа киватиния и афебия, на Балтийском и Украинском щитах — афебскими складчатостями» (с. 218).

Серед багатьох українських геологів і геофізиків також вже порівняно давно існує переконання, що стратигенно-метаморфогенний підхід для вивчення та картування гранулітових комплексів УЩ неприйнятний.

О.І. Слензак, за результатами вивчення порід Побужжя, писав, що смугастість і пластова форма залягання порід кристалічного фундаменту утворені тут процесами метаморфічної диференціації речовини первинної земної кори в умовах переважно тангенціального стиснення, що призводить до формування вертикальношаруватого середовища [Слензак, 1965].

Структуро-породоутворююча і породоперетворююча роль розломів Побужжя детально досліджена в роботах [Гінтов, Ісай, 1984, 1988; Єнтін, 1987; Гінтов, 2005; Лукиєнко та ін., 2008; Гінтов и др., 2016, Гінтов та ін., 2018, 2020; Гінтов, Шевчук 2017; Пономаренко и др., 2018; Мичак та ін., 2018, 2021; Мичак, 2019; Нечаєв и др., 2019]. У цих же роботах показано, що в неоархеї — ранньому протерозої гранулітовий пояс Побужжя зазнав декілька етапів субгоризонтального стиснення при право- і ліворотонних зсувах.

В роботі [Мичак та ін., 2021] наведені результати тектонофізичного і магнітометричного вивчення ділянки р. Південний Буг між м. Гайворон і селищем Завалля, відслонення якого послуговували свого часу матеріалом для побудови геологічного розрізу побужзького гранулітового комплексу, поділеного на згадувані вище світи метаморфізованих осадово-вулканогенних порід. Було показано, що в моноклінально і круто падаючій шаруватості і смугастості гранулітів гайворонського комплексу в вертикальних стінках не спостерігаються замки антиклиналей і синкліналей. Замки складок з субвертикальними шарнірами видно лише в горизонтальних зрізах (фото і замальовки наведені в [Гінтов та ін., 2020]). У багатьох випадках породи деформовані до стадії бластомілонітів і мілонітів (рис. 4). Це не дає змогу об'єктивно встановлювати вище — і нижчезалягаючі шари. Крім того, були наведені докази накладання одна на одну смугастості різних етапів деформації, тобто без застосування ізотопних методів залишається не з'ясованим, до якого часового етапу відноситься формування структурно-текстурних елементів вивчених гранулітів.

Наведені спостереження підтверджуються й іншими дослідниками, що працювали в цьому районі. Зокрема, в роботі [Лобач-Жученко и др., 2014, с. 16] зазначається: «Отличительной особенностью этих этапов деформаций является развитие крутой (местами до вертикальной) минеральной и агрегатной линейности. Это указывает на широкое проявление здесь процессов пластического сдвигового течения с образованием серии сдвиговых зон (shear zones) с высокой степенью деформации, когда все линейные элементы в процессе деформации переориентируются вдоль направления сдвигового течения».

У. Гамільтон, описуючи гнейси Акаста (до 4,2 млрд років, кратон Слейв) і Капуска-сінг (кратон Верхній, Онтаріо), приводить їх фото (див. [Гамільтон, 2007]) і називає перші мілонітизованими мігматитами, а другі мілонітами гранулітової фації («прямими гнейсами»). Ці породи він відносить

до гранульованих ТТГ, що не *стратифікуються*. Нижче наведені фотографії типових гранулітів ділянки Гайворон — Завалля, які вельми нагадують такі гнейси (рис. 5, 6).

У роботах Л.М. Степанюка та його колег по району Голованівської шовної зони [Степанюк, 2000; Степанюк та ін., 2020а,б] і по району Літинського блоку [Лісна, Касьяненко, 2015] показано, що чарно-ендербітоїди Побужжя сформувалися щонайменше на двох плутоно-метаморфічних етапах $3,65 \pm 0,25$ (гайворонський комплекс) і $2,815 \pm 0,035$ (літинський комплекс) млрд років тому і були структурно-метаморфічно перероблені в палеопротерозої 2,0—2,1 млрд років тому. Це практично повністю узгоджується з даними робіт [Шумлянський, 2012; Лобач-Жученко та ін., 2013] по району Гайворон — Завалля (Одеський кар'єр) про три етапи утворення і метаморфізму порід гранулітового комплексу: формування гнейсо-ендербітів 3,65—3,6 млрд років тому; неоархейська структурно-метаморфічна переробка — метаморфізм і ультраметаморфізм гнейсо-ендербітів 2,9—2,8 млрд років тому; палеопротерозойська структурно-метаморфічна переробка — деформації, що призвели до формування shear zone, гранулітовий метаморфізм ~2 млрд років тому.

Переходячи до ГПЛ, відзначимо, що в 1973 р. Р.Мейсон сформулював уявлення про ГПЛ як про зону «високодисперсних метаморфічних тектонітів», утворену в результаті ранньопротерозойської переробки архейського граніт-зеленокам'яного фундаменту, що виходить на поверхню в кратонах Зімбабве і Каапвааль. Пояс був зоною повторюваних зсувних деформацій, інтрузій і екструзій, що завершилися «потужною тектоно-термічною реактивацією близько 1900 млн років тому» [Mason, 1973, р. 463].

Ця теза підтверджується і уточнюється вже згаданими дослідженнями Л.Л. Перчука та його колег, які вивчали гранулітові комплекси поясу Лімпопо методами геотермометрії досить довгий час, а також у роботах [Boshoff et al., 2006; Zeh et al., 2005;

Zeh, Gerdes, 2007; Gerdes, Zeh, 2009 та ін.].

За отриманими з використанням комплексу U-Pb і Lu-Hf систем даними, ГПЛ одновіковий або кілька молодший сусідніх ТТГ-кратонів [Kröner et al., 1998]. Він закладений ~3,65 млрд років тому (хоча є і цифри U-Pb віку 3,8) в результаті виплавлення з деплетованої мантії і частково переплавлений 3,28 млрд років тому, а 3,14 млрд років тому метаморфізований у гранулітовій фації [Zeh, Gerdes, 2007]. Вважається, що породи поясу відносяться до нижньої частини шару порід ТТГ формації. Близько 2,7 млрд років тому вони підняті досить швидко (за термогравітаційною моделлю протягом декількох млн років — у багато разів швидше процесів накопичення, ерозії та зносу осаdkів з поверхні) з нижньої кори на рівень 12—13 км, де деформувалися разом з породами крайових частин кратонів [Перчук, 1997; Perchuk et al., 2006; Табатабаиманеш, 2006; Van Reenen et al., 2008] і повторно метаморфізовані в умовах гранулітової фації.

Зупинка порід поясу, що піднімалися, на глибині середньої кори пояснюється співвідношенням товщини кори і обсягу знесених при ерозії осаdkів ($\geq 5:1$), а невелика товщина кори (35—40 км) — відсутністю в гранулітах ультрависокобарних включень [Перчук, 1996, 1997]. Деформації порід ГПЛ, на відміну від порід кратонів, носили стиснуто-зсувний характер. Пік неоархейського метаморфізму в умовах гранулітової фації в комплексі Лімпопо досягався в різних його частинах 2,69—2,57 млрд. років тому [van Reenen et al., 2008].

Процес докембрійського формування ГПЛ найкраще вивчено на часовому відтинку 2,7—2,0 млрд. років тому, коли пояс зазнав щонайменше трьох метаморфічних подій:

1) ~2,67—2,63 млрд років тому, глибина 12—13 км — охолодження ГПЛ, поперекове стиснення, гранулітовий метаморфізм і насування гранулітових комплексів на північний кратон Зімбабве по зоні розломів Umlali і південний кратон Каапвааль по зоні розломів Hout River. Обидві зони розломів і насунені частини поясу включають

в себе лінзовидні, деформовані, повернені локальні тіла зеленокам'яних порід кратонів. Насування завершилося 2627 ± 7 млн років тому, коли зона розломів Umlali була «залікована» порфіровими калієвими гранітами Разі.

2) $\sim 2,62$ — $2,5$ млрд років тому, глибина 12—13 км — регресивна стадія гранулітового метаморфізму, подальше охолодження ГПЛ, чарнокітизація гнейсових комплексів, численні інтрузії гранітів, післяпіксове накладання на насувні деформації правозсувних рухів, що охопили весь пояс. В результаті цього в ГПЛ сформувалася зсувна «футлярovidна» складчастість з субвертикальними осями (шарнірами).

3) На етапі $\geq 2,0$ млрд років тому перед або підчас третьої деформаційної події в Центральній зоні ГПЛ стався розігрів земної кори і новий метаморфізм докембрійських комплексів в умовах гранулітової фації з утворенням поліметаморфічних гранулітів [Табатабаиманеш, 2006; van

Reenen et al., 2008]. При цьому сформувалася велика кількість лінійних бластомілітових структур — так званих «прямих гнейсів», петрографічні особливості яких детально описані в роботі [Табатабаиманеш, 2006]. Автор називає їх «мікроширзонами», тому що їх найкраще видно під мікроскопом (ширина < 200 мікрон), але вони складають зони високотемпературних пластичних деформацій потужністю до декількох сотень метрів, які не завжди в полі можна відрізнити від нормальних гнейсів. Мікроширзони зазвичай складені біотитом, кварцом і силіманітом. Вони січуть футлярovidні складки гнейсів попереднього етапу деформації і мінерали, що складають гнейси.

Черговий гранулітовий метаморфізм в корі на глибині 12—13 км автор імовірно пояснює пластичною зсувною деформацією і в'язким тертям порід, формуванням густої мережі мікроширзон за участю просочування високотемпературного флюїду.

Багато авторів, що описують породи ГПЛ, відзначають круте, субвертикальне залягання шаруватості гнейсів. Виняток становлять зсуво-насувні зони Umlali і Hout River, в районі яких шаруватість гней-



Рис. 4. Деформація ендербітоїдів гайворонського комплексу до ступеню гнейсифікації та мілонітизації. Правий беріг р. Південний Буг, Хашуватська зона сколювання (shear zone) Гайворонської зони розломів загальною шириною більш 10 км. Фото С.В. Мичака.

Fig. 4. Deformation of enderbite of the Gaivoron Complex to the degree of gneissification and mylonitization. Right bank of the South Bug river, Khoshchevatka shear zone of the Gaivoron fault zone with a total width of more than 10 km. Photo by S.V. Mychak.



Рис. 5. Бластомілонітизований гіперстен-плагіоклазовий гнейс (субгоризонтальна площина). Лівий беріг р. Південний Буг, північна околиця с. Салькове. Фото С.В. Мичака.

Fig. 5. Blastomylonitized hyperstene-plagioclase gneiss (subhorizontal plane). Left bank of the Yuzhni Bug river, northern outskirts of the village of Salkovo. Photo by S.V. Mychak.



Рис. 6. Деформований ендербіто-гнейс гайворонського комплексу з вузькими зонами мілоніта. Правий беріг р. Південний Буг, південна околиця с. Солгутове. Фото С.В. Мичака.

Fig. 6. Deformed enderbite gneiss of the Gaivoron complex with narrow zones of mylonite. Right bank of the Yuzhni Bug River, southern outskirts of the village of Solgutovo. Photo by S.V. Mychak.

сів падає похило, паралельно насувним площинам, хоча і в цих зонах шаруватість в окремих місцях зберігає субвертикальне падіння (наприклад, в зоні Hout River — фото в книзі [Kröner, Hofmann, 2019]).

Цікаве також питання про час ексгумації ГПЛ з глибини 12—13 км після другого етапу деформації, тому що з цим пов'язана проблема гранулітового метаморфізму поясу на третьому етапі.

За основною версією, до межі ~2000 млн років тому ГПЛ не піднімався, залишаючись 650 млн років на глибині 12—13 км, тому що після етапу 2) охолов і придбав високу в'язкість [van Reenen et al., 2008]. При цьому термобарометричні дослідження порід Центральної зони віком ~2,67 і ~2,0 млрд років показали, що вони формувалися в ізобарних умовах, відповідних глибині 12—13 км, але при більш високій температурі для порід віком ~2,0 млрд років [Табатабаиманеш, 2006]. Після розігріву на третьому етапі пояс придбав знижену в'язкість і почав підніматися до поверхні.

Однак існують дані, наведені в роботі [Геря, 1999], що сателіти Великої дайки (вік 2460 млн років) на південному її продовженні перетинають породи Північної

крайової зони зі збереженням магматичної структури і зон загартування, тобто до цього рубежу ГПЛ, можливо, був піднятий в приповерхневі шари земної кори.

При обох варіантах підйому ГПЛ до поверхні незмінним залишається третій етап деформації в умовах гранулітової фації метаморфізму, який проявився лише в поліметаморфічній Центральній зоні $\geq 2,0$ млрд років тому. Більш вірогідною є основна версія підйому, так як на глибинах 12—13 км, з урахуванням явищ зсувної деформації і в'язкого тертя, метаморфізм гранулітової фації легше обґрунтувати, ніж для приповерхневих умов.

Вивчення гранітів Mahalapye (2023 \pm 7 млн) в західній частині Центральної зони показало [McCourt, & Armstrong, 1998], що ці граніти є посторогенними, тобто третій етап деформації ГПЛ до цього часу вже завершився.

Дискусія. Принцип «вище або нижче» приводив прихильників стратигенного підходу до необхідності чіткого поділу грануліто-гнейсових і амфіболіто-гнейсових комплексів на два структурних поверхи: перші — глибші і древніші, другі — відкладалися на перших, хоча прямих контактів і структурних співвідношень між цими комплексами в межах УЩ не спостерігалось.

Грануліто-гнейсовий комплекс Славгородської «брили» (~500 км²), розміщений серед порід ТТГ формації Середньопрідніпровського мегаблоку УЩ, вносить великі сумніви в «поверхове» розташування зазначених комплексів. Славгородська гнейсо-кристалосланцьова і базавлуцька амфібол-кристалосланцьова товщі, чорноендербіти славгородського комплексу, плагіограніти, плагіомігматити, діорити і тоналіти дніпропетровського комплексу, інтрузивні плагіограніти сурського комплексу розташовуються тут спільно, перебуваючи в складних взаєминах. За даними U-Pb ізотопії процес завершення формування чорноендербітів, мігматизації гранітоїдів дніпропетровського і інтрузії сурського комплексів суббізохронний (2,99—3,014 млрд років) [Бобров та ін., 2010; Войновській та ін., 2011].

Малопереконливе пояснення цього явища дане в роботі [Кирилюк та ін., 2020, с. 74]: «Такое положение обусловлено длительным совместным эндогенным развитием гранулитогнейсовых и амфиболитогнейсовых комплексов, которое привело к структурно-метаморфическому согласованию контактов комплексов, возникновению между ними видимых постепенных переходов и, как следствие, к исчезновению первичных стратиграфических границ».

Але якщо виходити з уявлень про структурні поверхи, то все це повинно бути характерне й для взаємин гранулітогнейсових і амфіболітогнейсових комплексів взагалі. Крім того, вони геохімічно подібні, а за мінеральним складом відрізняються від всіх більш молодих комплексів [Войновський та ін., 2011; Усенко, 2021]. Останні дані ізотопії показують, що і з віком не все однозначно: якщо найбільш древні детритові циркони з ендербітогнейсів Побужжя мають вік 3,78 млрд років [Білибіна, 2004; Щербак и др., 2005], то в метатрахіандезитах Гуляйпільського блоку (Західне Приазов'я), що залягають серед архейських плагіогранітоїдів ТТГ формації, вперше на УЩ зустрінуто популяція ксеногенного циркону з U-Pb віком 3,95 млрд років [Артеменко та ін., 2020].

Виходить, ми поступово наближаємося до цифр віку цирконів з гнейсів Канадського щита (причому ТТГ-гнейсів) Акаста і кумінгтонітів Нуввуагітук (4,28 млрд років, Квебек [O'Neil et al., 2008]), тіло яких розташовується серед тоналітів віком 3,66 млрд років. Щоправда, в роботі [Шумлянський, 2012] на підставі ізотопно-геохімічного вивчення ендербітогнейсів, основних та ультраосновних кристалосланців Гайворон-Завалівського району стверджується, що ці породи були виплавлені з деплетованої мантиї близько 3,8 млрд років тому.

Наведені дані не означають, що автор пропонує помістити породи ТТГ формації, метаморфізовані в амфіболітовій або гранулітовій фації, нижче, в структурному і віковому відношенні, формації ендербі-

тоїдів. З точки зору автора, вони приблизно одновікові і складають загальний структурний поверх, що є фундаментом для зеленокам'яних поясів. Основна відмінність між ними — переважання тієї чи іншої фації метаморфізму. Але зараз вже не вважається, що ступінь метаморфізму гірських порід залежить тільки від глибини. Важливими чинниками є стресові навантаження, мантийно-корові флюїдні і мантийні теплові потоки як глобального і регіонального, так і локального характеру. Тому в різних блоках земної кори розглянутий структурний поверх може бути представлений породами як гранулітової, так і амфіболітової фації, а також діафторитами по перших.

Значно більш широкий розвиток чарнокітоїдів в Побузькому гранулітовому комплексі УЩ, ніж в гранулітовому комплексі поясу Лімпопо, з точки зору автора, також не є принциповим. На УЩ в гранулітовому комплексі Приазов'я чарнокітоїдів зовсім небагато [Лисак, Бобров, 2010]. У ГПЛ чарнокітоїди відносяться до метатоналітів, що утворилися при метаморфізмі порід ТТГ формації на регресивній стадії гранулітового метаморфізму при температурі 750—600 °C і тискові 6—3,5 кбар [Геря, 1999].

Фахівці, що вивчають ГПЛ та інші райони розвитку порід ТТГ формації, приходять до висновку, що ці породи, метаморфізовані в амфіболітовій і гранулітовій фації, формують верхню і середню кору докембрійських кратонів, тобто більше 30 км її потужності. Виплавку такого обсягу кислих порід із базитової протокори пояснити неможливо. Тому вчені все частіше звертаються до думки про існування значної кількості кислого матеріалу в еопалеоархейській мантиї і первинній корі.

Однією з недавніх запропонована термодинамічна модель формування кратону Пілбара [Wiemer et al., 2018] на основі рішення задачі нестійкості Релея-Тейлора і використання геохронологічних даних. Вчені прийшли до висновку, що 3,7—3,65 млрд років тому в Західній Австралії існувала диференційована по вертикалі на основну, кислу і ультраосновну скла-

дові низьков'язка кора товщиною близько 43 км. В інтервалі 3,6—3,413 млрд років тому відбувся процес обернення речовини, коли протягом трьох циклів кислі маси піднялися до поверхні, утворивши масиви порід ТТГ формації, а перекиваючі їх базальтоїди занурювалися донизу, формуючи зеленокам'яні пояси. Остаточне затвердіння кори і ерозія завершилися близько 3,2 млрд років тому.

Пам'ятаючи про інтенсивне метеоритне бомбардування Землі в хадеї та еоархеї, звернімо увагу ще на один можливий механізм розшарування верхньої частини мантії або кори на ультраосновну, основну і кислу складові, подібний імовірному способу формування розшарованого комплексу Садбері (Канада) в результаті косоного метеоритного удару 1,85 млрд років тому [Laturov et al., 2019]. Було показано, що удар метеорита Садбері призвів до утворення озера однорідного перегрітого (1700—2000 °С) розплаву гранодіоритового складу глибиною більше 5 км і об'ємом до 10 км³. При охолодженні розплав диференціювався на норити, кварцові габро і гранофіри, а потім гравітаційно розшарувався по вертикалі і розкристалізувався. Базити одразу після удару виявилися біля поверхні, а потім занурилися на дно. Розміри астероїда становили біля одного км, а сучасні розміри структури Садбері 60×25 км. Розміри хадейських і еоархейських астроблем склали (судячи з місячних) сотні-перші тисячі км, тому глибина утворених астероїдами магматичних басейнів могла досягати декількох десятків км. Якщо вірна модель формування розшарованого комплексу Садбері, запропонована в роботі [Laturov et al., 2019], то можна припускати, що в кінці хадею і еоархею практично повсюдно на деякій глибині був присутній шар частково розкристалізованої кислої речовини гранітного складу. У період 3,8—3,7 млрд років тому сталося виплавлення з мантії гранітоїдів і ортогнейсів ТТГ формації, що становлять фундамент зеленокам'яних поясів на всіх материках.

Про величезний або навіть вирішальний вплив метеоритного бомбардування Землі

в період 4,4—3,6 млрд років тому на утворення ТТГ, еклогітів та гранулітів з протоліту базальтового складу та розшарування літосфери (зокрема кори) йдеться у роботі [Блюман, 2015, с. 70—96], що базується на аналізі великого обсягу експериментального матеріалу.

Висновки. Розглянувши особливості будови і розвитку ППП і ГПЛ на основі близьких поглядів і методик, можна бачити багато рис подібності обох поясів і зробити деякі узагальнення.

1. Як і на глобальному рівні, для гранулітових поясів УЩ та ГПЛ припускається: а) >>3,8 млрд років тому формування протокори — продуктів кристалізації слабо диференційованих базальтових розплавів; б) 4,4—3,6 млрд років тому — імпактні процеси, що призводять до виникнення великих площ зверхтисків та теплових аномалій; в) >3,8 млрд років тому утворення в умовах гранулітової фації метаморфізму, насамперед, гіперстеневих та двошпорок-сенових кристалічних сланців, а також підйом з мантії (в межах GPL та окремих районів УЩ) ТТГ-розплавів і подальший метаморфізм в умовах гранулітової або амфіболітової фацій; г) ~3,6 та 2,8 (ППП), ~2,6 (GPL) млрд років тому формування масивів ендербітів та чарнокітів внаслідок процесів ультраметаморфізму та гранітизації, рідше інтрузивного магматизму.

2. Щонайменше трьохетапне утворення-перетворення і гранулітовий метаморфізм. ППП: 3,8—3,6 млрд років тому — формування і гранулітовий метаморфізм; 2,8 млрд років тому — формування і гранулітовий метаморфізм; 2,1—2,0 — структурна переробка і гранулітовий метаморфізм. GPL: ~3,65 млрд років тому закладання і 3,15 млрд років тому гранулітовий метаморфізм; 2,6—2,7 млрд років тому — гранулітовий метаморфізм; ≥2,0 млрд років тому — тектонічна переробка в Центральній зоні, гранулітовий метаморфізм і бласто-мілонітизація порід.

3. Досить добра кореляція складу і метаморфізму (в тому числі динамометаморфізму) гнейсових серій обох поясів дозволяє, слідом за Р. Мейсоном, назвати

їх «високодисперсними метаморфічними тектонітами».

4. Структурно-метаморфічні перебудови, накладання один на одного структурних планів і руйнування попередніх осадово-вулканогенних структур наступними (архейських — протерозойськими) не дозволяє доказово стратифікувати архейські гранулітові комплекси в рамках стратигенно-метаморфогенного підходу на рівні світ і детальніше. Для ПГП реальним є виділення тільки дністровсько-бузької і бузької серій. Подальше більш детальне вікове розчленування гранулітових комплексів УЩ ефективно лише шляхом вивчення співвідношення тектонічних, магматичних і метаморфічних процесів на основі даних ізотопної геохронології.

5. Деформування в умовах стиснення і зсуву — як один з головних процесів. Формування субвертикальношаруватого середовища, зсувної складчастості з субвертикальними шарнірами і крилами складок (в ГПЛ вона називається футляровидною, в ПГП — зсувного волочіння). В обох поясах ці процеси почалися в неoarхеї. Це

доводить, що в неoarхеї тектонічні процеси вже багато в чому почали підкорятися механізмам тектоніки плит.

6. Формування shear zone лінійного типу від мікро- до макророзмірів і накладання їх на структури попередніх етапів деформації. На їх основі була сформована внутрішня структура поясів і взаємозв'язок з сусідніми блоками земної кори. На жаль, при вивченні ГПЛ таким широким приділялося більше уваги, ніж під час геологічного картування ПГП.

7. Архейські чарнокітоїди і ТТГ-гранітоїди, враховуючи їх геохімічну схожість і близький вік, становлять єдиний структурний поверх земної кори, який є фундаментом для зеленокам'яних поясів.

8. Мінеральний склад, РТ-умови метаморфізму і вік порід гранулітових поясів, що встановлюється на основі вивчення U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd ізотопних систем, ізотопного складу кисню в зернах циркону, веде до висновку, що в ео- і палеoarхейській мантії та корі вже повинні були знаходитися великі обсяги речовини кислого складу, з якої утворилися ТТГ комплекси.

Список літератури

- Артеменко Г.В., Шумлянський Л.В., Беккер А.Ю. Первые данные об эоархейских (3,95 млрд лет) породах в фундаменте Приазовского блока Украинского щита. *Материалы III Тектонического совещания*. Москва, 2020. С. 20—24.
- Безбородько М.І. Петрогенезис і петрогенетична карта кристалічної смуги України. Київ: Вид-во АН УРСР, 1935. 389 с.
- Бибикова Е.В. Древнейшие породы Земли: изотопная геохронология и геохимия изотопов. *Минерал. журн.* 2004. Т. 26. № 3. С. 13—20.
- Блюман Б.А. Эволюция событий в истории развития Земли от 4,5 до 0,9 миллиардов лет. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. 312 с.
- Бобров А.Б., Степанюк Л.М., Лысак А.М., Лысенко А.А. Славгородский гранулитовый комплекс. В кн.: Гранулитовые структурно-формационные комплексы Украинского щита — европейский стратотип. Львов: ЗУГЦ, 2010. С. 64—78.
- Борукаев Ч.Б., Башарин А.К., Берзин Н.А. Докембрий континентов. Основные черты тектоники. Новосибирск: Наука, 1977. 263 с.
- Виноградов Г.Г. О генезисе пироксеновых гнейсов и некоторых вопросах стратиграфии докембрия Среднего Побужья. В кн.: Петрография докембрия Русской платформы. Киев: Наук. думка, 1970. С. 352—357.
- Войновський А.С., Жужома В.М., Бобров О.Б., Меркушин І.Є. Кореляція ендербітоїдів західної та центральної частин Українського щита за геохімічними критеріями. *Мінеральні ресурси України*. 2011. № 2. С. 16—19.
- Гамильтон У.Б. Первые два миллиарда лет Земли — эпоха внутренней подвижности коры. В кн.: Структура континентальной коры. Материалы Геологического общества Америки 200, 2007. С. 233—296.
- Геря Т.В. Тенденции Р-Т и модель формирования докембрийских гранулитовых комплексов

- сов: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Москва, 1999. 354 с.
- Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применения при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б. Проблемы геодинамики Украинского щита в докембрии. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 3—22. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111142>.
- Гинтов О.Б. Схема периодизации этапов разломообразования в земной коре Украинского щита — новые данные и следствия. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 1. С. 3—18.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Некоторые закономерности разломообразования и методика морфокинематического анализа сколовых разломов. 1. *Геофиз. журн.* 1984. Т. 6. № 3. С. 3—10.
- Гинтов О.Б., Исая В.М. Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. Киев: Наук. думка, 1988. 228 с.
- Гинтов О.Б., Ентин В.А., Мычак С.В., Павлюк В.Н., Зюльцде В.В. Структурно-петрофизическая и тектонофизическая основа геологической карты кристаллического фундамента центральной части Голованевской шовной зоны Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 3—28. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777>.
- Гинтов О.Б., Ентин В.А., Мычак С.В., Фарфуляк Л.В. Побужский гірничорудний район Українського щита. Структурно-петрофізична карта кристалічного фундаменту та деякі питання геології раннього докембрію. *Геофиз. журн.* 2020. Т. 42. № 3. С. 16—48. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204699>.
- Гинтов О.Б., Орлюк М.І., Ентин В.А., Пашкевич І.К., Мычак С.В., Бакаржієва М.І., Шимків Л.М., Марченко А.В. Структура західної і центральної частини Українського щита. Спирні питання. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 6. С. 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>.
- Гинтов О.Б., Шевчук В.В. Структурованість Українського щита та особливості ранньодокембрійського розломоутворення на прикладі Голованіської шовної зони. Київ: ТОВ «НВП Інтерсервіс», 2017. 162 с.
- Довгань Р.М., Зюльцде В.В., Ентин В.А. Геологическое строение и полезные ископаемые Завальевского геологического района. Отчет о глубинном геологическом картировании листа М-35-144-Б, совместно с геологической съемкой листа М-35-132-Г. Т. 1. Киев: Укргеолфонд, 1989. 256 с.
- Ентин В.А. Структурно-тектонические особенности кристаллического фундамента и прогнозная оценка на магнетитовые руды месторождений Среднего Побужья (по геолого-геофизическим данным): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев, 1987. 32 с.
- Ентин В.А., Гинтов О.Б., Мычак С.В., Юшин А.А. Структура Молдовского железорудного месторождения (Украинский щит) по геолого-геофизическим данным и его возможная эндогенная природа. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 4. С. 3—18. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111118>.
- Єсипчук К.Ю., Бобров О.Б., Степанюк Л.М., Щербак М.П., Глеваський Є.Б., Скобелев В.М., Дранник А.С., Гейченко М.В. Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита (пояснювальна записка). НСК України. Вид. УкрДГРІ, 2004. 31 с.
- Кирилюк В.П. Головні підсумки морфопарагенетичних геолого-формаційних досліджень нижнього докембрію. *Вісник ЛНУ. Сер. геол.* 2005. Вип. 19. С. 52—74.
- Кирилюк В.П. Особенности стратиграфических исследований нижнего докембрия. Статья 1. Особенности традиционного стратиграфического расчленения. *Геол. журн.* 2013. № 3. С. 101—115.
- Кирилюк В.П. Побужский гранулитовый комплекс. В кн.: Гранулитовые структурно-формационные комплексы Украинского щита — европейский стратотип. Львов: ЗУГЦ, 2010. С. 8—63.
- Кирилюк В.П. Стратиграфия докембрия западной части Украинского щита (на формационной основе). 1. Стратиграфические комплексы докембрия и формации раннего архея. *Геол. журн.* 1982а. Т. 42. № 3. С. 88—103.
- Кирилюк В.П. Стратиграфия докембрия западной части Украинского щита (на формационной основе). 2. Формации позднего

- архея и протерозоя и сводная стратиграфическая схема. *Геол. журн.* 1982б. Т. 42. № 4. С. 30—42.
- Кирилюк В.П. Тектонічна карта України. Масштаб 1:1000 000. Ч. II. Тектоніка фундаменту Українського щита. Пояснювальна записка до «Тектонічної карти фундаменту Українського щита» масштабу 1:2000 000. Київ: УкрДГРІ, 2007. 87 с.
- Кирилюк В.П., Лысак А.М., Сиворонов А.А. Стратиграфия гранулитовых комплексов Украинского щита и их геолого-формационная корреляция Ст. 3. Стратиграфия гранулитовых комплексов инфраструктуры мегаблоков и сводная корреляция. *Геол. журн.* 2020. № 1. С. 70—85.
- Кислюк В.В., Зюльцле В.В., Нікіташ Л.П. Геологічна будова та корисні копалини вододілу річок Південний Буг і Дністер. Звіт про ГДП-200 території аркуша М-35-XXXVI (Гайворон). Київ: Геолфонди, 2011. 460 с.
- Костюченко В.С., Зюльцле В.В., Выходцев Н.К., Федоров А.В. Геологическое строение и полезные ископаемые Среднего Побужья. Отчет о глубинном геологическом картировании масштаба 1:200 000 листа М-36-XXXI. Т. 1. Киев: Укргеолфонд, 1990. 338 с.
- Лазько В.М., Кирилюк В.П., Сиворонов А.А., Яценко Г.М. Нижний докембрий западной части Украинского щита (возрастные комплексы и формации). Львов: Вища школа, 1975. 239 с.
- Лесная И.М., Касьяненко Е.О. Акцессорный циркон (состав, изотопный возраст) из эндритов Литинского блока (УЩ). *Геохімія та рудоутворення*. 2015. Вип. 35. С. 29—36.
- Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Степанюк Л.М., Пономаренко А.Н., Лохов К.И., Корешкова М.Ю., Юрченко А.В., Егорова Ю.С., Сукач В.В., Бережная Н.Г., Богомоллов Е.С. Этапы формирования Побужского гранулитового комплекса по данным изотопно-геохронологических исследований (Среднее Побужье, Украинский щит). *Минерал. журн.* 2013. Т. 36. № 2. С. 86—98.
- Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Артеменко Г.В., Богомоллов Е.С., Юрченко А.В., Степанюк Л.М., Сукач В.В. Метаморфизованные осадочные породы днестровско-бугской серии палеоархея Украинского щита: состав, возраст, источники. *Литология и полезные ископаемые*. 2014. № 5. С. 1—18.
- Лукієнко О.І., Кравченко Д.В., Сухорада А.В. Дислокаційна тектоніка та тектонофації докембрію Українського щита. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2008. 279 с.
- Лущицкий В.И. Кристаллические известняки, чарнокитовые граниты и киндигиты северной части Украины. *Записки Киев. об-ва естествоиспытателей*. 1927. Т. 27. Вып. 2. С. 7—27.
- Лысак А.М., Бобров А.Б. Приазовский гранулитовый комплекс. В кн.: Гранулитовые структурно-формационные комплексы Украинского щита — европейский стратотип. Львов: ЗУГЦ, 2010. С. 79—81.
- Мичак С.В. Структурні особливості і кінематичний розвиток земної кори західної частини Українського щита: автореф. ... д-ра геол. наук. Київ, 2019. 38 с.
- Мичак С.В., Бакаржієва М.І., Марченко А.В., Решетнік М.М., Фарфуляк Л.В., Орлюк М.І., Гинтов О.Б. Ділянка Гайворон—Завалля Середнього Побужжя — найбільш репрезентативна частина гранулитового комплексу Українського щита. Результати структурно-тектонічних і магнітометричних досліджень. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 4. С. 42—75. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i4.239958>.
- Мичак С.В., Муровська Г.В., Поляченко Є.Б., Бельський В.Н. Напружено-деформований стан земної кори побужського гірськорудного району на ділянці Гайворон—Завалля. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 2. С. 95—107. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128933>.
- Наливкина Э.Б. Чарнокиты юго-западной части Украинского кристаллического массива и их генезис. Москва: Недра, 1964. 124 с.
- Негруца В.З. Проблемы стратиграфии нижнего докембрия России (историкометодологический анализ). *Литасфера*. 2011. № 1. С. 3—19.
- Нечаев С.В., Гинтов О.Б., Мичак С.В. О связи редкоземельной, редкометалльной и золоторудной минерализации с разломно-бло-

- ковой тектоникой Украинского щита. 1. *Геофиз. журн.* 2019. Т. 41. № 1. С. 3—32.
- Очерки геодинамики Украины. Под. ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: ВІ ЕН ЕЙ, 2018. 466 с.
- Перчук Л.Л. Геотермобарометрия и перемещение кристаллических пород в коре и верхней мантии Земли. *Сорос. образов. журн.* 1997. № 7. С. 64—72.
- Перчук Л.Л. Фазовое соответствие и геологическая термобарометрия. *Сорос. образов. журн.* 1996. № 6. С. 74—82.
- Перчук Л.Л., Геря Т.В., ван Ринен Д.Д., Кротов А.В., Сафонов О.Г., Смит К.А., Шур М.Ю. Сравнительная петрология и метаморфическая эволюция богатых ландшафтов Лимпопо (Южная Африка) и Лапландии (Фенноскандия). *Минералогия и петрология.* 2000. № 69. С. 69—107.
- Половинкина Ю.Ир., Наливкина Э.Б. Генезис чарнокитов Украины. В кн.: *Доклады советских геологов. Проблема 13 «Чарнокиты».* Москва: Наука, 1964. С. 7—11.
- Пономаренко А.Н., Гинтов О.Б., Степанюк Л.М. О так называемой «лейкогранулитовой формации» и «зеленолевадовской свите» раннего докембрия Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 5. С. 47—70.
- Слензак О.И. Про структуру українського докембрію (на прикладі південно-західної частини Українського кристалічного щита). Київ: Наук. думка, 1965. 139 с.
- Степанюк Л.М. Геохронологія докембрію західної частини Українського щита (архей-палеопротерозой): дис. ... д-ра геол. наук. Київ, 2000. 290 с.
- Степанюк Л.М. Гранулітова асоціація Побужжя: стратиграфія чи геохронологія: *Збірник тез Міжнародної наукової конференції «Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність».* Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка Національної академії наук України, 22—24 вересня 2020. С. 26—29.
- Степанюк Л.М. Проблеми стратиграфії та геохронології Українського щита. *Мінерал. журн.* 2018. Т. 40. № 1. С. 16—31. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.01.016>.
- Степанюк Л.М., Довбуш Т.І., Курило С.І., Зюльце О.В., Яськевич Т.Б. Уран-свинцевий вік монацитів біотитових гнейсів Середнього Побужжя Українського щита. *Мінерал. журн.* 2017. Т. 39. № 2. С. 46—56. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.046>.
- Степанюк Л.М., Довбуш Т.І., Курило С.І., Лісна І.М. Фінальний етап гранітоїдного магматизму в Дністровсько-Бузькому мегаблоці Українського щита. *Геохімія та рудоутворення.* 2016. Вип. 36. С. 72—81.
- Степанюк Л.М., Пономаренко О.М., Петриченко К.В., Курило С.І., Довбуш Т.І., Сергєєв С.А., Родіонов М.В. Уран-свинцева ізотопна геохронологія гранітоїдів бердичівського типу Побужжя (Український щит). *Мінерал. журн.* 2015. Т. 37. № 3. С. 51—66.
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Пономаренко О.М., Довбуш Т.І., Висоцький О.Б., Дьюйм Бр. До питання про викові межі формування кошаро-олександрівської світи бузької серії Побужжя. *Геохімія та рудоутворення.* 2010. № 28. С. 4—10.
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Уайльд С.А., Немчин А.А. Уран-свинцевий вік за цирконом кристалічних порід нижньої течії р. Ятрань (Середнє Побужжя). *Збірник тез Міжнародної наукової конференції «Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність».* Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка Національної академії наук України, 22—24 вересня 2020а. С. 29—32.
- Степанюк Л.М., Шумлянський Л.В., Уайльд С.А., Немчин А.А. Уран-свинцева LA-ISP-MS геохронологія за цирконом ендеогенних геологічних процесів в породах гранулітової асоціації Середнього Побужжя (Чаусівська група кар'єрів). *Збірник тез Міжнародної наукової конференції «Докембрій: породні асоціації та їхня рудоносність».* Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка Національної академії наук України, 22—24 вересня 2020б. С. 32—34.
- Табатабаеиманеш С.М. Петрологія поліметаморфических гранулитов центральной зоны комплекса Лимпопо, Южная Африка: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Москва, 2006. 21 с.
- Усенко О.В. Тоналит-трондjemит-гранодио-

- ритовая формация архея. Особенности состава и условия образования на примере Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2021. Т. 43. № 1. С. 38—68. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225541>.
- Чекунов А.В., Соллогуб В.Б., Галецкий Л.С., Курлов Н.С. Геодинамическая модель центральной части Украинского щита и Криворожская сверхглубокая скважина. *Геофиз. журн.* 1989. Т. 11. № 4. С. 3—13.
- Шумлянський Л.В. Геохімія піроксенових плагіогнейсів (ендербітів) Побужжя та ізотопний склад гафнію в цирконах. *Мінерал. журн.* 2012. Т. 34. № 2. С. 64—79.
- Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей. Киев: Наук. думка, 2005. 243 с.
- Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н., Шумлянський Л.В. Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Киев: Наук. думка, 2008. 239 с.
- Щербак І.Б. Петрологія Українського щита. Львов: ЗУПЦ, 2005. 366 с.
- Barton Jr., J.M., Holzer, L., Kamber, B., Doig, R., Kramers, J.D. & Nyfeler, D. (1994). Discrete metamorphic events in the Limpopo belt, southern Africa: implications for the application of P-T paths in complex metamorphic terranes. *Geology*, 22(11), 1035—1038. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<1035:DMEITL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<1035:DMEITL>2.3.CO;2).
- Boshoff, R., Van Reenen, D.D., Kramers, J.D., Smit, C.A., Perchuk, L.L., & Armstrong, R. (2006). Geologic history of the Central zone of the Limpopo complex: the West Alldays area. *Journal of Geology*, 114(6), 699—716. <https://doi.org/10.1086/507615>.
- Condie, K.C. (2004). Precambrian superplume events. In P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller, O. Catuneanu, (Eds.), *The Precambrian Earth: Tempos and Events* (pp. 163—173). Elsevier, Amsterdam.
- Eriksson, P.G., Catuneanu, O., Nelson, D.R., Rigby, M.J., Bandopadhyay, P.C., & Altermann, W. (2012). Events in the Precambrian history of the Earth; challenges in discriminating their global significance. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1), 8—25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.01.009>.
- Ernst, R.E., Buchan, K.L., & Campbell, I.H. (2005). Frontiers in Large Igneous Province research. *Lithos*, 79(3-4), 271—297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.004>.
- Ernst, W.G., Sleep, N.H., & Tsujimori, T. (2016). Plate-tectonic evolution of the Earth: bottom-up and top-down mantle circulation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11) 1103—1120. <https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0126>.
- Gerdes, A., & Zeh, A. (2009). Zircon formation versus zircon alteration — new insights from combined U-Pb and Lu-Hf in-situ LA-ICP-MS analyses, and consequences for the interpretation of Archean zircon from the Central Zone of the Limpopo Belt. *Chemical Geology*, 261, 230—243. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.005>.
- Kröner, A., Jaekel, P., Brandl, G., Hofmann, A., & Nemchin, A.A. (1998). Field relationships and age of supracrustal Beit Bridge Complex and associated granitoid gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa. *South African Journal of Geology*, 101(3), 201—213.
- Kröner, A., & Hofmann, A. (2019). *The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa*. Springer, 305 p.
- Latypov, R., Chistyakova, S., Grieve, R.A.F., & Huhma, H. (2019). Evidence for igneous differentiation in Sudbury Igneous Complex and impact-driven evolution of terrestrial planet proto-crusts. *Nature Communications*, 10(1), 1—12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08467-9>.
- Mason, R. (1973). A Discussion on the evolution of the Precambrian crust — The Limpopo mobile belt — Southern Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 273, 463—485. <https://doi.org/10.1098/rsta.1973.0012>.
- McCourt, S. & Vearncombe, J.R. (1987). Shear zones bounding the central zone of the Limpopo mobile belt, southern Africa. *Journal of Structural Geology*, 9, 127—137. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90021-6).
- McCourt, S. & Vearncombe, J.R. (1992). Shear

- Zones of the Limpopo Belt and adjacent granitoid-greenstone terranes, implications for late Archaean collision tectonics in Southern Africa. *Precambrian Research*, 55(1-4), 553—570. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90045-P](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90045-P).
- McCourt, S. & Armstrong, R.A. (1998). SHRIMP U-Pb geochronology of granites from the Central Zone, Limpopo Belt, southern Africa: implications for the age of the Limpopo Orogeny. *South African Journal of Geology*, 101, 329—338.
- O'Neil, J., Carlson, R.W., Francis, D., Stevenson, R.K. (2008). Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust. *Science*, 321, 1828—1831. <https://doi.org/10.1126/science.1161925>.
- Smit, C.A., & Van Reenen, D.D. (1997). Deep Crustal Shear Zones, High-Grade Tectonites, and Associated Metasomatic Alteration in the Limpopo Belt, South Africa: Implications for Deep Crustal Processes. *The Journal of Geology*, 105(1), 37—57. <https://doi.org/10.1086/606146>.
- Trypolsky, O.A., Topoliuk, O.V., & Gintov, O.B. (2019). The structure of the earth's crust of the central part of the Holovanivsk suture zone according to the reinterpretation of materials of IV geotraverse of NHS (PK 295-400). *Геофіз. журн.* Т. 41, № 1. 172—179.
- Zeh, A., Klemd, R., & Barton, Jr., J.M. (2005). Petrological evolution in the roof of the high-grade metamorphic Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa. *Geological Magazine*, 142(3), 229—240. <https://doi.org/10.1017/S001675680500052X>.
- Zeh, A., & Gerdes, A., Klemd, R., & Barton, Jr., J.M. (2007). Archaean to Proterozoic Crustal Evolution in the Central Zone of the Limpopo Belt (South Africa-Botswana): Constraints from Combined U-Pb and Lu-Hf Isotope Analyses of Zircon. *Journal of Petrology*, 38(8), 1605—1639. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm032>.
- Van Reenen, D.D., Barton, J.M., Roering, C., Smit, C.A., & Van Schalkwyk, J.F. (1987). Deep crustal response to continental collision: the Limpopo Belt of southern Africa. *Geology*, 15(1), 11—14. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1987\)15<11:DCRTCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1987)15<11:DCRTCC>2.0.CO;2).
- Van Reenen, D.D., Boshoff, R., Smit, C.A., Perchuk, L.L., Kramers, J.D., McCourt, S., & Armstrong, R.A. (2008). Geochronological problems related to polymetamorphism in the Limpopo Complex, South Africa. *Gondwana Research*, 14, 644—662. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.013>.
- Van Reenen, D.D., Perchuk, L.L., Smit, C.A., Varlamov, D.A., Boshoff, R., Huizenga, J.M., & Gerya, T.V. (2004). Structural and P-T evolution of a major cross fold in the Central Zone of the Limpopo high-grade terrain, South Africa. *Journal of Petrology*, 45(7), 1413—1439.
- Van Reenen, D.D., & Smit, C.A. (1996). The Limpopo metamorphic complex, South Africa 1. Geological setting and relationships between the granulite complex and the Kaapvaal and Zimbabwe cratons. *Petrology*, 4(6), 562—570.
- Wiemer, D., Schrank, C.E., Murphy, D., & Wenham, L. (2018). Earth's oldest stable crust in the Pilbara Craton formed by cyclic gravitational overturns. *Nature Geoscience*, 11(5), 357—361. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0105-9>.

What happened to the Early Precambrian granulite complexes of the Bug region (Ukrainian shield) and the Limpopo belt (South Africa) and how to stratify them? A tectonist's view

O.B. Gintov, 2022

S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

The author reviews two alternative approaches (stratigenic-metamorphogenic and deformation-metamorphogenic) to the geology and mapping of the Earth's oldest crust rocks that were metamorphized in *PT*-conditions of the granulite facies, on the examples of two granulite belts — the Bug area complex (Ukrainian shield) and Limpopo belt (Southern Africa).

There was shown a fairly good correlation of the composition and metamorphism (including the dynamometamorphism) of the rock complexes of both belts and their at least three-stage origin and transformation. The granulitic metamorphism processes within both belts happened before 3,0 b.y.a., 2,6—2,8, and c. 2,0 b.y.a. The structural-metamorphic transformations of the granulitic complexes, formation of their new structural plans with the destruction of the former (archean) by the following (proterozoan) do not allow falsifiably stratifying the archean granulitic complexes within the stratigenic-metamorphogenic approach already at the facies level. For the Bug area granulitic belt it is feasible only to isolate the Dniester-Bug and Bug series. Two of the important processes of the belt development are rock deformation in the compression and slip conditions and formation within the granulitic complexes of the sub-vertically-layered medium, slip folds with sub-vertical folds' joints and wings. In both belts these processes began in the Neoproterozoic. This shows that in that time the tectonic processes were already to some significant degree propelled by plate tectonics mechanisms. Both belts had in common the formation of the linear-type shear zones at micro- to macroscale and their superimposition onto the deformation structures of the granulitic complexes of the preceding developmental stages. On their basis there formed the internal structure of the belts' and their interconnections with the adjacent blocks of crust. Presumably, the archean charnokitoids and TTG-granitoids form the same structural layer of the crust, given their geochemical similarity and close age, and this layer is the base for the greenstone belts. The mineral composition, *PT*-metamorphism conditions and age of granulitic belt rocks based on their U-Pb, Lu-Hf, Sm-Nd isotope systems compositions and oxygen isotope composition in Zirconium grains suggest that in the eo- and paleoarchean mantle and crust there should have already been amassed large quantities of medium-acidic matter which gave rise to the TTG complexes.

Key words: Ukrainian shield, Bug area, Limpopo area, Archean, granulites, tectonics, stratigraphy, study methods.

References

- Artemenko, G.V., Shumlyanskiy, L.V., & Bekker, A.Yu. (2020). The First Data of the Eoarchean (3.95 Ga) rocks in the basis of the Azov Block of the Ukrainian Shield. *Proceedings of the LII Tectonic Meeting, Moscow* (pp. 20—24) (in Russian).
- Bezborodko, M.I. (1935). *Petrogenesis and Petro-*

- genetic Map of the Crystalline strip of Ukraine*. Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic, 389 p. (in Ukrainian).
- Bibikova, E.V. (2004). The Ancient Earth Rocks: Isotopic Geochronology and Geochemistry of Isotopes. *Mineralohichnyy Zhurnal*, 26(3), 13—20 (in Russian).
- Bluman, B.A. (2015). *The evolution of events in the history of the development of the Earth from 4.5 to 0.9 billion years*. St. Petersburg: VSEGEI Publ., 312 p. (in Russian).
- Bobrov, A.B., Stepanyuk, L.M., Lysak, A.M., & Lysenko, A.A. (2010). Slavgorod granulite complex. In *Granulite Structural and Formational Complexes of the Ukrainian Shield — European Stratotype* (pp. 64—78). Lviv: ZUGC (in Russian).
- Borukaev, Ch.B., Basharin, A.K., & Berzin, N.A. (1977). *Pre-Cambrian continents. The main features of tectonics*. Novosibirsk: Nauka, 342 p. (in Russian).
- Vinogradov, G.G. (1970). On the genesis of the pyroxene gneisses and some questions of the stratigraphy of Precambrian of the Middle Bug area. In *Petrography of Pre-Cambrian Russian Platform* (pp. 352—357). Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Voynovskyy, A.S., Zhuzhoma, V.M., Bobrov, O.B., & Merkushev, I.E. (2011). Correlation of the Enderbitoids of the Western and Central Parts of the Ukrainian Shield by Geochemical Criteria. *Mineral'ni resursy Ukrayiny*, (2), 16—19 (in Ukrainian).
- Gamilton, W.B. (2007). The First Two Billion Years of the Earth — the Epoch of Crustal Internal Mobility. In *Structure of Continental Crust. Proceedings of Geological Society of America 200*. (pp. 233—296) (in Russian).
- Gerya, T.V. (1999). Trends of P-T and the model of formation of Precambrian granulite complexes. *Doctor's thesis*. Moscow, 354 p. (in Russian).
- Gintov, O.B. (2005). *Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine*. Kiev: Feniks, 572 p. (in Russian).
- Gintov, O.B. (2015). Problems of geodynamics of the Ukrainian shield in Precambrian. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 37(5), 3—22. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111142> (in Russian).
- Gintov, O.B. (2014). Scheme of Periodization of Stages of Faulting in the Earth's Crust of the Ukrainian Shield — New Data and Implications. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(1), 3—18 (in Russian).
- Gintov, O.B., & Isay, V.M. (1984). Some regularities of faulting and methodology of morphokinematic analysis of faults. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 6(3), 3—10 (in Russian).
- Gintov, O.B., & Isay, V.M. (1988). *Tectonophysical investigations of Consolidated Crust Fractures*. Kiev: Naukova Dumka, 228 (in Russian).
- Gintov, O.B., Entin, V.A., Mychak, S.V., Pavlyuk, V.N., & Zyuultsle, V.V. (2016). Structural-petrophysical and tectonophysical base of geological map of crystalline basement of the central part of Golovanevsk suture zone of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 38(3), 3—28. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107777> (in Russian).
- Gintov, O.B., Entin, V.A., Mychak, S.V., & Farfuliak, L.V. (2020). The Bug mining area of the Ukrainian shield. Structural-petrophysical map of the crystalline basement and some problems of the Early Precambrian geology. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 42(3), 16—46. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204699> (in Ukrainian).
- Gintov, O.B., Orlyuk, M.I., Entin, V.A., Pashkevich, I.K., Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Shimkiv, L.M., & Marchenko, A.V. (2018). The structure of the Western and Central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(6), 3—29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000> (in Ukrainian).
- Gintov, O.B., & Shevchuk, V.V. (2017). *Structuralization of the Ukrainian Shield and Peculiarities of the Early Cambrian Faulting in the Golovanevsk Suture Zone*. Kyiv: NVP Interservice, 162 p. (in Ukrainian).
- Dovgan, R.M., Zyuultsle, V.V., & Entin, V.A. (1989). *Geological structure and minerals of the Zavaliev geological area. Report on the deep*

- geological mapping of the sheet M-35-144-B, jointly with the geological survey of the sheet M-35-132-G. Vol. 1. Kiev: Ukrgeolfund, 256 (in Russian).*
- Entin, V.A. Structural and tectonic features of the crystalline basement and predictive assessment for magnetite ores of deposits of the Middle Bug region (according to geological and geophysical data). *Extended abstract of candidate's thesis. Kiev, 1987. 32 p. (in Russian).*
- Entin, V.A., Gintov, O.B., Myschak, S.V., & Yushin, A.A. (2015). The structure of the Moldovan iron ore deposit (The Ukrainian shield) according to geological-geophysical data and its possible endogenous nature. *Geofizicheskii Zhurnal*, 37(4), 3—18. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i4.2015.111118> (in Russian).
- Esipchuk, K.Yu., Bobrov, O.B., Stepanyuk, L.M., Scherbak, M.P., Glevasky, Ye.B., Skobelyev, V.M., Drannik, A.S., & Geychenko, M.V. (2004). *Correlated Chronostratigraphic Scheme of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield (Explanatory Note). NSK of Ukraine. Publishing House of UkrDGRI, 31 (in Ukrainian).*
- Kirilyuk, V.P. (2005). The main results of morphoparagenetic geological and formational studies of the Lower Precambrian. *Visnyk L'viv's'koho Universytetu. Seriya heolohichna*, (19), 52—74 (in Ukrainian).
- Kirilyuk, V.P. (2013). Features of stratigraphic studies of the Lower Precambrian. Article 1. Features of traditional stratigraphic dissection. *Geologicheskii Zhurnal*, (3), 101—115 (in Russian).
- Kirilyuk, V.P. (2010). The Bug area granulite complex. In *Granulitic Structural and Formational complexes of the Ukrainian Shield — European Stratotype* (pp. 8—630). Lviv: ZUGC (in Russian).
- Kirilyuk, V.P. (1982a). Stratigraphy of the Precambrian of the Western Part of the Ukrainian Shield (on the Formation Basis). 1. Stratigraphic Complexes of the Precambrian and Early Archean Formations. *Geologicheskii Zhurnal*, 42(3), 88—103 (in Russian).
- Kirilyuk, V.P. (1982b). Stratigraphy of the Precambrian of the Western Part of the Ukrainian Shield (on the Formation Basis). 2. Formations of the Late Archean and Proterozoic, and a composite stratigraphic scheme. *Geologicheskii Zhurnal*, 42(4), 30—42 (in Russian).
- Kirilyuk, V.P. (2007). *Tectonic Map of Ukraine. Scale 1:1000 000. Part II. Tectonics of the Ukrainian Shield foundation. Scale 1:2 000 000. Explanatory note to the «Tectonic map of the foundation of the Ukrainian Shield» scale 1:2 000 000. Kyiv: UkrDGRI Publication, 87 p. (in Russian).*
- Kirilyuk, V.P., Lysak, A.M., & Sivoronov, A.A. (2020). Stratigraphy of granulite complexes of the Ukrainian Shield and their geologic and formational correlation. Article 3. Stratigraphy of granulite complexes of megablock infrastructure and consolidated correlation. *Geologicheskii Zhurnal*, (1), 70—85 (in Russian).
- Kislyuk, V.V., Zyuultsle, V.V., & Nikitash, L.P. (2011). *Geological structure and minerals of the Southern Bug and Dnister rivers water bodies. Report on the GDP-200 area of the M-35-XXXVI (Gaivoron). Kyiv: Geofunds, 460 p. (in Ukrainian).*
- Kostyuchenko, V.S., Zyuultsle, V.V., Vykhodtsev, N.K., & Fedorov, A.V. (1990). *Geological Structure and Mineral Resources of the Middle Bug area. Report of the In-Depth Geological Mapping on a Scale of 1:200 000 sheet M-36-XXXI. Vol. 1. Kiev: Ukrgeolfund, 338 p. (in Russian).*
- Lazko, V.M., Kirilyuk, V.P., Sivoronov, A.A., & Yatsenko, G.M. (1975). *Lower Precambrian of the Western Part of the Ukrainian Shield (Age Complexes and Formations). Lvov: Vyshcha Shkola, 239 p. (in Russian).*
- Lesnaya, I.M., & Kasyanenko, E.O. (2015). Accessory zircon (composition, isotopic age) from the enderbites of the Litin block (USh). *Heokhimiya ta rudoutvorenniya*, (35), 29—36 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko, S.B., Balaganskiy, V.V., Baltybayev, Sh.K., Stepanyuk, L.M., Ponomarenko, A.N., Lohov, K.I., Koreshkova, M.Yu. Yurchenko, A.V., Egorova, Yu.S., Sukach, V.V., Berezhnaya, N.G., & Bogomolov, E.S. (2013). Stages of formation of the Bug area granulite complex by the data of isotopic-geochronological investigations (the Middle Bug area, Ukrainian Shield). *Mineralohichnyi Zhurnal*, 36(2), 86—98 (in Russian).
- Lobach-Zhuchenko, S.B., Balaganskiy, V.V., Baltybaev, Sh.K., Artemenko, G.V., Bogomo-

- lov, E.S., Yurchenko, A.V., Stepanyuk, L.M., & Sukach, V.V. (2014). Metamorphosed sedimentary rocks of the Dniester-Bug series of the Paleoproterozoic of the Ukrainian Shield: composition, age, sources. *Litologiya i poleznye iskopyayemye*, (5), 1—18 (in Russian).
- Lukienko, O.I., Kravchenko, D.V., & Sukhorada, A.V. (2008). *Dislocation Tectonics and Tectonofacies of the Precambrian of the Ukrainian Shield*. Kyiv: VPC «Kyiv University», 279 p. (in Ukrainian).
- Luchitskiy, V.I. (1927). Crystalline Limestones, Charno-kyte Granites and Kinzigites of the Northern part of Ukraine. *Zapiski Kiyevskogo obshchestva yestestvoispytateley*, 27(2), 7—27 (in Russian).
- Lysak, A.M., & Bobrov, A.B. (2010). Periazov Granulite Complex. In *Granulite Structural and Formational Complexes of the Ukrainian Shield of European Stratotype* (pp. 79—81). Lviv: ZUGC (in Russian).
- Mychak, S.V. (2019). Structural peculiarities and kinematic development of the Earth's crust of the western part of the Ukrainian shield. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv. 38 p. (in Ukrainian).
- Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Marchenko, A.V., Reshetnyk, M.M., Farfuliak, L.V., Orlyuk, M.I., & Gintov, O.B. (2021). Gaivoron—Zavallia section of the Middle Pobuzhzhia is the most representative part of the granulite complex of the Ukrainian Shield (structural-tectonophysical results and magnetometric studies). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(4), 42—75. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i4.239958> (in Ukrainian).
- Mychak, S.V., Murovskaya, G.V., Polyachenko, E.B., & Belskiy, V.M. (2018). Stress-deformed state of the Earth crust of the Bug mining area in the section Gayvoron—Zavalye. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(2), 95—107. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128933> (in Ukrainian).
- Nalivkina, E.B. (1964). *Charnokites of the south-western part of the Ukrainian crystalline massif and their genesis*. Moscow: Nedra, 124 p. (in Russian)
- Negrutsa, V.Z. (2011). Stratigraphic Problems of the Lower Precambrian Russia (Historical and Methodological Analysis). *Litasfera*, (1), 3—19 (in Russian).
- Nechaev, S.V., Gintov, O.B., & Mychak, S.V. (2019). On the relation between the rare-earth — rare-metal and gold ore mineralization and fault-block tectonics of the Ukrainian Shield. 1. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(1), 3—32. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i1.2019.158861> (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2018). *Essays on the geodynamics of Ukraine*. Kyiv: VI EN EY, 466 p. (in Russian).
- Perchuk, L.L. (1997). Thermo-Barometry and Moving Crystalline Rocks in the Crust and Upper Mantle of the Earth. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, (7), 64—72 (in Russian).
- Perchuk, L.L. (1996). Phase matching and geological thermo-barometry. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, (6), 74—82 (in Russian).
- Perchuk, L.L., Gerya, T.V., van Rinen, D.D., Krotov, A.V., Safonov, O.G., Smith, K.A., & Schur, M.Yu. (2000). Comparative petrology and metamorphic evolution of the rich landscapes of Limpopo (South Africa) and Lapland (Fennoscandia). *Mineralogiya i petrologiya*, (69), 69—107 (in Russian).
- Polovinkina, Yu.Ir., & Nalivkina, E.B. (1964). Genesis of Charnokites of Ukraine. In *Reports of Soviet geologists. Problem 13 «Charnokites»* (pp. 7—11). Moscow: Nauka (in Russian).
- Ponomarenko, A.N., Gintov, O.B., & Stepanyuk, L.M. (2018). On the so-called «leukogranulite formation» and «greenlevada suite» of Early Precambrian of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(5), 47—70. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i5.2018.147474> (in Russian).
- Slenzak, O.I. (1965). *The Structure of the Ukrainian Pre-Cambrian (on the example of the south-western part of the Ukrainian Crystalline Shield)*. Kyiv: Naukova Dumka, 139 p. (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M. (2000). Geochronology of the Precambrian of the Western part of the Ukrainian Shield (Archean-Paleoproterozoic). *Doctor's thesis*. Kyiv, 290 p. (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M. (2020). Granulite association of the Bug area: stratigraphy or geochronology. *Collection of Theses of International Scientific*

- Conference «Precambrian: rock associations and their ore-bearing capacity». M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, September 22—24 (pp. 26—29) (in Ukrainian).*
- Stepanyuk, L.M. (2018). Problems of stratigraphy and geochronology of the Ukrainian Shield. *Mineralohichnyy Zhurnal*, 40(1), 16—31. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.01.016> (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M., Dovbush, T.I., Kurylo, S.I., Zyuulsle, O.V., Yaskevich, T.B. (2017). Uranium-lead age of monazites from biotitic gneisses of the Middle Bug area of the Ukrainian Shield. *Mineralohichnyy Zhurnal*, 39(2), 46—56. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.046> (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M., Dovbush, T.I., Kurilo, S.I., & Lisna, I.M. (2016). The final stage of granitoid magmatism in the Dnister-Bug megablock of the Ukrainian Shield. *Heokhimiya ta rudoutvorenniya*, (36), 72—81 (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M., Ponomarenko, O.M., Petrichenko, K.V., Kurilo, S.I., Dovbush, T.I., Sergeev, S.A., Rodionov, M.V. (2015). Uranium-lead isotopic geochronology of granitoids of the Berdychiv type of the Bug area (Ukrainian Shield). *Mineralohichnyy Zhurnal*, 37(3), 51—66 (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M., Shumlyansky, L.V., Ponomarenko, O.M., Dovbush, T.I., Visotsky, O.B., & Djum, Br. (2010). Age limits of the formation of Koshar-Olexandrivka suite of the Bug series of the Bug area. *Heokhimiya ta rudoutvorenniya*, (28), 4—10 (in Ukrainian).
- Stepanyuk, L.M., Shumlyansky, L.V., Wilde, S.A., & Nemchin, A.A. (2020a). The U-Pb zircon age of the crystalline rocks in the area of Yatran River (the Middle Buh area). *Collection of theses of the International Scientific Conference «Precambrian: Rock Associations and their Ore-formation Capacity». M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore-formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, 22—24 September (pp. 29—32) (in Ukrainian).*
- Stepanyuk, L.M., Shumlyansky, L.V., Wilde, S.A., & Nemchin, A.A. (2020). The U-Pb LA-ICP-MS zircon geochronology of endogeneous geological processes in rocks of the granulite association of the Middle Buh area (Chausove open-pits). *Collection of theses of the International Scientific Conference «Precambrian: Rock Associations and their Ore-formation Capacity». M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore-formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, 22—24 September (pp. 32—34) (in Ukrainian).*
- Tabatabaeymanesh, S.M. (2006). Petrology of polymetamorphic granulites of the central zone of Limpopo complex, South Africa. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow, 21 p. (in Russian).
- Usenko, O.V. (2021). Tonalite-trondjemite-granodiorite formation of the Archaean. Special features of composition and conditions of formation, Ukrainian Shield as an example. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(1), 38—68. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225541> (in Russian).
- Chekunov, A.V., Sollogub, V.B., Galetskiy, L.S., & Kurlov, N.S. (1989). Geodynamic Model of the Central Part of the Ukrainian Shield and Kri-voy Rog Superdeep Borehole. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 11(4), 3—13 (in Russian).
- Shumlyansky, L.V. (2012). Geochemistry of pyroxene plagiogenesis (enderbits) Pobuzhya and hafnium isotopic composition in zircons. *Mineralohichnyy Zhurnal*, 34(2), 64—79 (in Ukrainian).
- Shcherbak, N.P., Artemenko, G.V., Lesnaya, I.M., & Ponomarenko, A.N. (2005). *Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Archaea*. Kiev: Naukova Dumka, 243 p. (in Russian).
- Shcherbak, N.P., Artemenko, G.V., Lesnaya, I.M., Ponomarenko, A.N., & Shumlyanskiy, L.V. (2008). *Geochronology of the Early Precambrian of the Ukrainian Shield. Proterozoic*. Kiev: Naukova Dumka, 239 p. (in Russian).
- Shcherbakov, I.B. (2005). *Petrology of the Ukrainian Shield*. Lvov: ZUGC, 366 p. (in Russian).
- Barton Jr., J.M., Holzer, L., Kamber, B., Doig, R., Kramers, J.D. & Nyfeler, D. (1994). Discrete metamorphic events in the Limpopo belt, southern Africa: implications for the application of P-T paths in complex metamorphic terranes. *Geology*, 22(11), 1035—1038. <https://doi.org/10.1130/G01035a1>

- org/10.1130/0091-7613(1994)022<1035:DMEITL>2.3.CO;2.
- Boshoff, R., Van Reenen, D.D., Kramers, J.D., Smit, C.A., Perchuk, L.L., & Armstrong, R. (2006). Geologic history of the Central zone of the Limpopo complex: the West Alldays area. *Journal of Geology*, 114(6), 699—716. <https://doi.org/10.1086/507615>.
- Condie, K.C. (2004). Precambrian superplume events. In P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller, O. Catuneanu, (Eds.), *The Precambrian Earth: Tempos and Events* (pp. 163—173). Elsevier, Amsterdam.
- Eriksson, P.G., Catuneanu, O., Nelson, D.R., Rigby, M.J., Bandyopadhyay, P.C., & Altermann, W. (2012). Events in the Precambrian history of the Earth; challenges in discriminating their global significance. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1), 8—25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.01.009>.
- Ernst, R.E., Buchan, K.L., & Campbell, I.H. (2005). Frontiers in Large Igneous Province research. *Lithos*, 79(3-4), 271—297. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.09.004>.
- Ernst, W.G., Sleep, N.H., & Tsujimori, T. (2016). Plate-tectonic evolution of the Earth: bottom-up and top-down mantle circulation. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 53(11) 1103—1120. <https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0126>.
- Gerdes, A., & Zeh, A. (2009). Zircon formation versus zircon alteration — new insights from combined U-Pb and Lu-Hf in-situ LA-ICP-MS analyses, and consequences for the interpretation of Archean zircon from the Central Zone of the Limpopo Belt. *Chemical Geology*, 261, 230—243. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.03.005>.
- Kröner, A., Jaekel, P., Brandl, G., Hofmann, A., & Nemchin, A.A. (1998). Field relationships and age of supracrustal Beit Bridge Complex and associated granitoid gneisses in the Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa. *South African Journal of Geology*, 101(3), 201—213.
- Kröner, A., & Hofmann, A. (2019). *The Archaean Geology of the Kaapvaal Craton, Southern Africa*. Springer, 305 p.
- Latypov, R., Chistyakova, S., Grieve, R.A.F. & Huhma, H. (2019). Evidence for igneous differentiation in Sudbury Igneous Complex and impact-driven evolution of terrestrial planet proto-crusts. *Nature Communications*, 10(1), 1—12. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08467-9>.
- Mason, R. (1973). A Discussion on the evolution of the Precambrian crust — The Limpopo mobile belt — Southern Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 273, 463—485. <https://doi.org/10.1098/rsta.1973.0012>.
- McCourt, S. & Vearncombe, J.R. (1987). Shear zones bounding the central zone of the Limpopo mobile belt, southern Africa. *Journal of Structural Geology*, 9, 127—137. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(87\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(87)90021-6).
- McCourt, S. & Vearncombe, J.R. (1992). Shear Zones of the Limpopo Belt and adjacent granitoid-greenstone terranes, implications for late Archaean collision tectonics in Southern Africa. *Precambrian Research*, 55(1-4), 553—570. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90045-P](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90045-P).
- McCourt, S. & Armstrong, R.A. (1998). SHRIMP U-Pb geochronology of granites from the Central Zone, Limpopo Belt, southern Africa: implications for the age of the Limpopo Orogeny. *South African Journal of Geology*, 101, 329—338.
- O'Neil, J., Carlson, R.W., Francis, D., Stevenson, R.K. (2008). Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust. *Science*, 321, 1828—1831. <https://doi.org/10.1126/science.1161925>.
- Smit, C.A., & Van Reenen, D.D. (1997). Deep Crustal Shear Zones, High-Grade Tectonites, and Associated Metasomatic Alteration in the Limpopo Belt, South Africa: Implications for Deep Crustal Processes. *The Journal of Geology*, 105(1), 37—57. <https://doi.org/10.1086/606146>.
- Trypolsky, O.A., Topoliuk, O.V., & Gintov, O.B. (2019). The structure of the earth's crust of the central part of the Holovanivsk suture zone according to the reinterpretation of materials of IV geotraverse of NHS (PK 295-400). *Геофиз. журн.* Т. 41, № 1. 172—179.
- Zeh, A., Klemd, R., & Barton, Jr., J.M. (2005). Petrological evolution in the roof of the high-grade metamorphic Central Zone of the Limpopo Belt, South Africa. *Geological Magazine*

- ne, 142(3), 229—240. <https://doi.org/10.1017/S001675680500052X>.
- Zeh, A., & Gerdes, A., Klemd, R., & Barton, Jr., J.M. (2007). Archaean to Proterozoic Crustal Evolution in the Central Zone of the Limpopo Belt (South Africa-Botswana): Constraints from Combined U-Pb and Lu-Hf Isotope Analyses of Zircon. *Journal of Petrology*, 38(8), 1605—1639. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm032>.
- Van Reenen, D.D., Barton, J.M., Roering, C., Smit, C.A., & Van Schalkwyk, J.F. (1987). Deep crustal response to continental collision: the Limpopo Belt of southern Africa. *Geology*, 15(1), 11—14. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1987\)15<11:DCRTCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1987)15<11:DCRTCC>2.0.CO;2).
- Van Reenen, D.D., Boshoff, R., Smit, C.A., Perchuk, L.L., Kramers, J.D., McCourt, S., & Armstrong, R.A. (2008). Geochronological problems related to polymetamorphism in the Limpopo Complex, South Africa. *Gondwana Research*, 14, 644—662. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.01.013>.
- Van Reenen, D.D., Perchuk, L.L., Smit, C.A., Varlamov, D.A., Boshoff, R., Huizenga, J.M., & Gerya, T.V. (2004). Structural and P-T evolution of a major cross fold in the Central Zone of the Limpopo high-grade terrain, South Africa. *Journal of Petrology*, 45(7), 1413—1439.
- Van Reenen, D.D., & Smit, C.A. (1996). The Limpopo metamorphic complex, South Africa 1. Geological setting and relationships between the granulite complex and the Kaapvaal and Zimbabwe cratons. *Petrology*, 4(6), 562—570.
- Wiemer, D., Schrank, C.E., Murphy, D., & Wenham, L. (2018). Earth's oldest stable crust in the Pilbara Craton formed by cyclic gravitational overturns. *Nature Geoscience*, 11(5), 357—361. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0105-9>.