

## ЭТАПЫ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВОГО МАГМАТИЗМА САРМАТИИ ОТ ПАЛЕОАРХЕЯ ДО ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ

С.Б. Лобач-Жученко<sup>1</sup>, Ш.К. Балтыбаев<sup>1,2</sup>, Ю.С. Егорова<sup>1</sup>, С.А. Сергеев<sup>3</sup>,  
Т.В. Каулина<sup>4</sup>, Т.Е. Салтыкова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,  
199106, Санкт-Петербург, Средний просп., 74, Россия

<sup>4</sup>Геологический институт РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

Ранние этапы базит-ультрабазитового магматизма Сарматии характеризуются появлением ультрабазитов с нетипичной повышенной железистостью мантии, что делает важным их изучение как источника информации об этапах, причинах активности мантии и ее возможном составе. Этот магматизм фиксируется в Сарматии с начала эоархея. Реликты эо- и палеоархейских базитов и ультрабазитов выявлены в Днестровско-Бугской, Курской и Приазовской провинциях, которые испытали тектоническую переработку в мезоархее и палеопротерозое. Мезоархейский базит-ультрабазитовый магматизм развит во всех провинциях Сарматии и представлен эффузивной и интрузивной фациями. Мезоархейские зеленокаменные пояса, сложенные коматитами и базальтами, хорошо сохранились в Среднеприднепровской провинции, тогда как в других они сильно деформированы и образуют узкие линейные структуры. Палеопротерозойская эндогенная активность Сарматии отличается почти полным отсутствием магматизма в интервале 2.5—2.3 млрд лет и его значительным проявлением 2.0—2.1 млрд л. н. Магматизм Сарматии этого этапа по соотношениям базит-ультрабазитовых и гранитоидных комплексов сходен с магматизмом Южной Африки, но отличается от Фенноскандии и Канады: объем гранитоидов, синхронных с базитами, превышает объемы мантийного магматизма. Изверженные комплексы этапа 2.1—2.0 млрд лет Сарматии и Южной Африки сближает также присутствие норитов и обогащенность Ni, элементами платиновой группы, а также близкое соотношение гранитоидов и базит-ультрабазитов. Магматическая активность и прежде всего базит-ультрабазитовый магматизм на древних кратонах — явление не синхронное в планетарном масштабе и сильно различается по объему продуцируемого материала в пределах одинаковых временных интервалов. Источником базит-ультрабазитовых пород раннего докембрия (вулканитов зеленокаменных поясов, интрузий больших изверженных провинций, расслоенных массивов) являются плюмы, производные которых формируются в пределах нижней и верхней мантии и/или верхней мантии и коры, что обуславливает гетерогенность состава магматических образований. Пространственная гетерогенность и несинхронность базит-ультрабазитового магматизма могла быть обусловлена тем, что триггерами возникновения плюмов являлись импактные события.

*Докембрий, кратон, возраст, магматизм, корреляция, базиты, ультрабазиты, Сарматия*

## STAGES OF PALEOARCHEAN TO PALEOPROTEROZOIC BASIC-ULTRABASIC MAGMATISM IN THE SARMATIAN CRATON

S.B. Lobach-Zhuchenko, Sh.K. Baltybaev, Yu.S. Egorova, S.A. Sergeev, T.V. Kaulina, T.E. Saltykova

The early stages of basic-ultrabasic magmatism in Sarmatia are characterized by the appearance of ultrabasic rocks formed from the mantle with an abnormally high iron content. Therefore, it is important to study them as the source of information about the stages and causes of the activity of the mantle and its possible composition. This magmatism has been recorded in Sarmatia since the beginning of the Eoarchean. The relics of Eo- and Paleoarchean basic and ultrabasic rocks were found in the Dniester-Bug, Kursk, and Azov provinces, which underwent tectonic reconstruction in the Mesoarchean and Paleoproterozoic. Mesoarchean basic-ultrabasic magmatism is manifested in all provinces of Sarmatia and is represented by effusive and intrusive facies. The Mesoarchean greenstone belts composed of komatiites and basalts have been well preserved in the Middle Dnieper province; in other provinces, they are strongly deformed and form narrow linear structures. The Paleoproterozoic endogenous activity in Sarmatia differs from that in other regions in the almost complete absence of magmatism in the period 2.5–2.3 Ga and its significant manifestation 2.1–2.0 Ga. The magmatism in Sarmatia at this stage is similar in the ratios of basic-ultrabasic and granitoid complexes to the magmatism in South Africa but differs from that in Fennoscandia and Canada: The volume of granitoids coeval with basic rocks is larger than the volume of mantle magmatism. The igneous complexes formed 2.1–2.0 Ga in Sarmatia and South Africa

are also similar in the presence of norites, the enrichment in Ni and platinum group elements, and the ratio of granitoids and basic-ultrabasic rocks. Magmatic activity (first of all, basic-ultrabasic magmatism in ancient cratons) is not a synchronous phenomenon on a planetary scale and varies greatly in the volume of produced material within the same time intervals. Early Precambrian basic-ultrabasic rocks (volcanics of greenstone belts, intrusions of large igneous provinces, and layered massifs) resulted from plumes, whose derivatives formed within the lower and upper mantle and/or the upper mantle and crust, which determined the heterogeneous composition of igneous rocks. The spatial heterogeneity and nonsynchronous occurrence of basic-ultrabasic magmatism might have been due to impact events serving as the triggers of plumes.

*Precambrian, craton, age, magmatism, correlation, basic and ultrabasic rocks, Sarmatia*

## ВВЕДЕНИЕ

Базит-ультрабазитовые породы занимают незначительную часть древней континентальной коры, но без их изучения нельзя обойтись для полного понимания происхождения и эволюции древних кратонов [O'Neil et al., 2011; Van Kranendonk et al., 2018]. Решать вопросы эволюции кратонов, в частности, периодизации раннедокембрийского<sup>1</sup> ювенильного магматизма в них, стало возможным с развитием изотопных методов определения возраста пород. В данной статье предлагается анализ и интерпретация преимущественно новых изотопных данных, полученных для базитов и ультрабазитов Днестровско-Бугской провинции — наиболее древней части Сарматского кратона, а также для палеопротерозойских базит-ультрабазитовых пород Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Цель работы заключается в характеристике базит-ультрабазитового магматизма Сарматии от палеоархея до палеопротерозоя на основе геохронологических данных и проведении корреляции с другими регионами для выявления пространственно-временных особенностей проявления этого магматизма. Но корреляция геологических событий раннего докембрия затруднена из-за фрагментарности сохранившихся древних комплексов. К тому же большинство этих комплексов испытали наложенные преобразования, что усложняет многократно возможности реконструкции событий прошлого. Поэтому расшифровка древней истории Земли должна опираться как на общетеоретические представления, так и основываться на петрологических и изотопно-геохимических данных о вещественном и структурном парагенезисе древних пород.

В строении Днестровско-Бугской провинции принимают участие многократно метаморфизованные и деформированные эо- и палеоархейские породы побужского гранулитогнейсового комплекса (ПГТК), наименее изученного по сравнению с другими комплексами Сарматского кратона. Изучение этого комплекса позволило охарактеризовать самые ранние этапы базит-ультрабазитового магматизма и показало, что большая часть ультрабазитов обладает повышенной железистостью [Лобач-Жученко и др., 2018a], не типичной для мантии. Таким образом, данные об ультраосновных породах ПГТК важны не только как источник информации об этапах активности мантии, но и о ее составе. Отметим также, что базит-ультрабазиты вмещают такие крупнейшие Cu-Ni месторождения мира, как Норильск [Криволюцкая, 2014] и Садбери [Wang et al., 2018]. Новые геохронологические данные по базитам и ультрабазитам палеопротерозоя ВКМ (дополнительные материалы: <https://sibran.ru/upload/medialibrary/3f3/3f3ab5b27a38e9fc27adc1afec56eb83.pdf>) вместе с литературными данными демонстрируют весьма активный мантийный магматизм на этом этапе и нуждаются в детальном обсуждении.

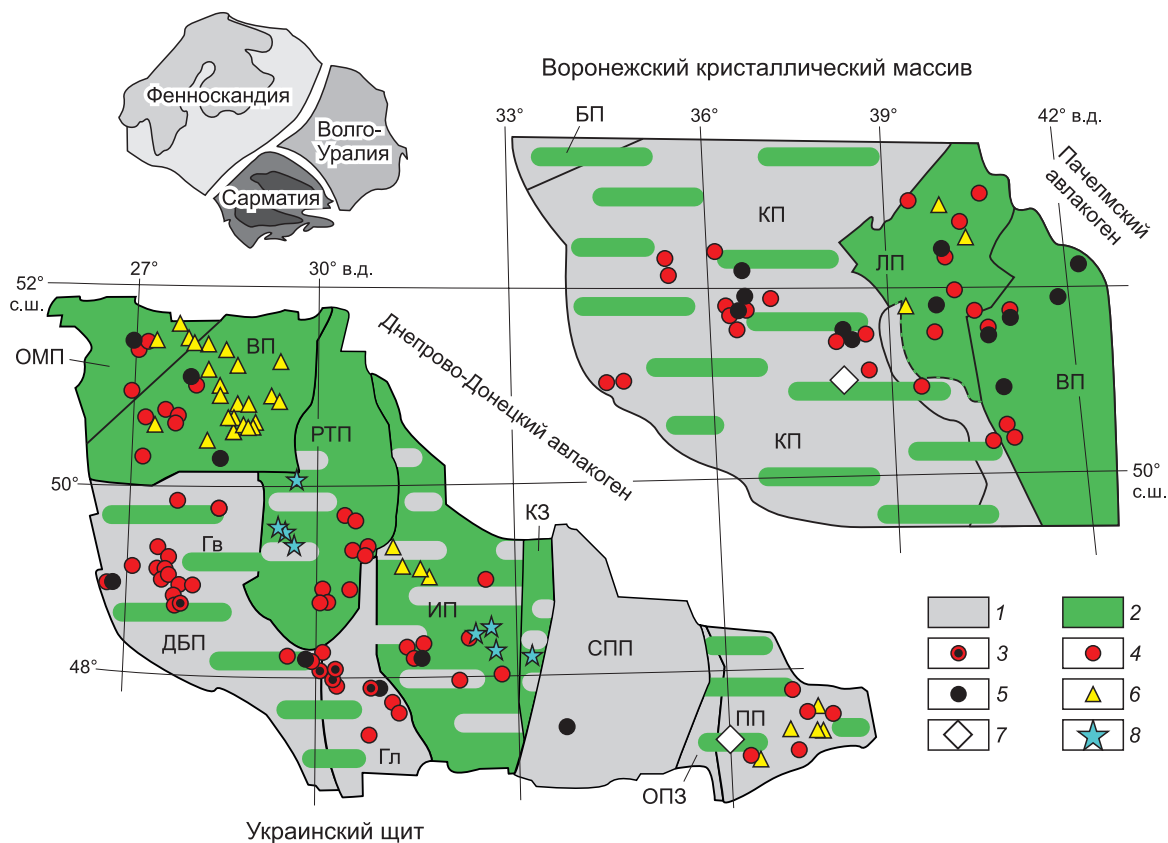
## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КРАТОНА САРМАТИЯ ЭО- И ПАЛЕОАРХЕЙСКИЙ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ. ЭТАП 3.65—3.40 МЛРД ЛЕТ

Сарматия представляет собой южный фрагмент фундамента Восточно-Европейской платформы [Bogdanova, 1991], состоящий из Воронежского кристаллического массива и Украинского шита (УЩ), разделенных Днепровско-Донецким авлакогеном. Эо- и палеоархейские базиты сохранились на юге Днестровско-Бугской провинции в побужском гранулитовом комплексе и в Приазовской провинции УЩ, а также в Курской провинции ВКМ.

Побужский гранулитогнейсовый комплекс вытянут в северо-западном направлении и занимает южную и центральную части Днестровско-Бугской провинции, расположенной на юго-западе Сарматского кратона (рис. 1).

В строении Днестровско-Бугской провинции выделяются Гайвороновский и Голованевский домены [Степанюк, 2000]. Гайвороновский домен представляет собой крупную структуру, центральная часть которой является древнейшей и более чем на 70 % сложена гнейсоэндербитами с небольшими

<sup>1</sup> В статье используется хроностратиграфическая шкала раннего докембрия, предложенная комиссией по стратиграфии Международного союза геологических наук [Cohen et al., 2013].



**Рис. 1. Схематическая геологическая карта Сарматского кратона.**

Украинский щит, ОМП — Осницко-Микашевичский пояс; провинции: ВП — Волынская, РТП — Рос-Тикическая, ИП — Ингульская, ДБП — Днестровско-Бугская (Гв — Гайвороновский домен, Гл — Голованевский домен), СПП — Среднеприднепровская, ПП — Приазовская. КЗ — Криворожская зона, ОПЗ — Орехово-Павлоградская зона. Воронежский кристаллический массив, провинции: БП — Брянский пояс, КП — Курская, ЛП — Лосевская, ВП — Воронцовская. Границы фрагментов кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы даны по [Vogdanova, 1991], границы провинций и зон по [Щербак и др., 2008], границы Лосевской провинции по [Terentiev et al., 2017]. 1 — архейские образования, 2 — протерозойские образования (зеленой штриховкой показаны области развития протерозойских эндогенных процессов; интенсивность штриховки соответствует интенсивности процесса); 3 — гранитоиды 2.1—2.2 млрд лет; 4 — гранитоиды <math><2.1</math> млрд лет; 5 — базиты-ультрабазиты 2.15—1.95 млрд лет; 6 — базиты-ультрабазиты <math><1.90</math> млрд лет; 7 — щелочно-ультраосновные (карбонатитовые) интрузии 2.09—2.04 млрд лет; 8 — места, где найдены и датированы реликты архейских образований.

включениями метаосадков, метавулканитов и базит-ультрабазитовых пород [Степанюк, 1996, 2000; Щербаков, 2005; Щербак и др., 2005; и др.]. Древнейшие породы вскрыты в карьерах: Гайвороновском, Завальевском, Одесском, Казачий Яр и Кошаро-Александровском, а также обнажены по берегам р. Южный Буг. Супракрустальные породы относятся к палеоархейской днестровско-бугской [Есипчук и др., 2004] и неоархейской бугской [Есипчук и др., 2004; Shumlyansky et al., 2015] сериям. Они слагают узкие с крутым падением толщ структуры, метаморфизованные в амфиболитовой или гранулитовой фации. В центре Гайвороновского домена породы бугской серии местами имеют пологое залегание. Кора этого домена имеет мощность 45 км и плоскую границу Мохо [Структура..., 1980].

Голованевский домен расположен к юго-востоку от Гайвороновского домена и также сложен гнейсоэндритами и супракрустальными породами днестровско-бугской и бугской серий, метаморфизованными в гранулитовой и амфиболитовой фациях. Существенным отличием от Гайвороновского домена является присутствие в нем многочисленных интрузий ультраосновных и основных пород [Анцифириков и др., 2008] и большая мощность (65 км) земной коры [Структура..., 1980]. Структурными исследованиями в карьерах Одесский и Казачий Яр установлено несколько этапов деформаций в гнейсоэндритах. Наиболее ранние деформации сохранились в отдельных небольших блоках гнейсоэндритов, в которых присутствует циркон с наиболее древними  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возрастaми (3.75—3.65 млрд лет). Более поздние деформации привели к формированию субширотных и запад-северо-западных плоскостных структур. Время их возникновения оценивается примерно в 2.8 млрд лет [Лобач-Жученко и др., 2017]. Более мо-

лодые деформации привели к образованию узких зон рассланцевания северо-восточного простирания, к которым приурочены палеопротерозойские дайки базитов [Lobach-Zhuchenko et al., 2017]. Кроме того, в палеопротерозое были сформированы локальные субширотные и субмеридиональные маломощные зоны пластического течения, сопровождавшиеся кристаллизацией граната: Sm-Nd возраст, определенный для мафических гранулитов по паре порода—гранат, составляет  $1741 \pm 130$  млн лет [Балтыбаев и др., 2014]. Установленная структурно-возрастная шкала способствовала определению относительного возраста основных и ультраосновных пород; кроме того, для оценки их возраста использован изотопный состав Nd и Hf, а в ряде случаев был определен возраст циркона U-Pb SIMS методом.

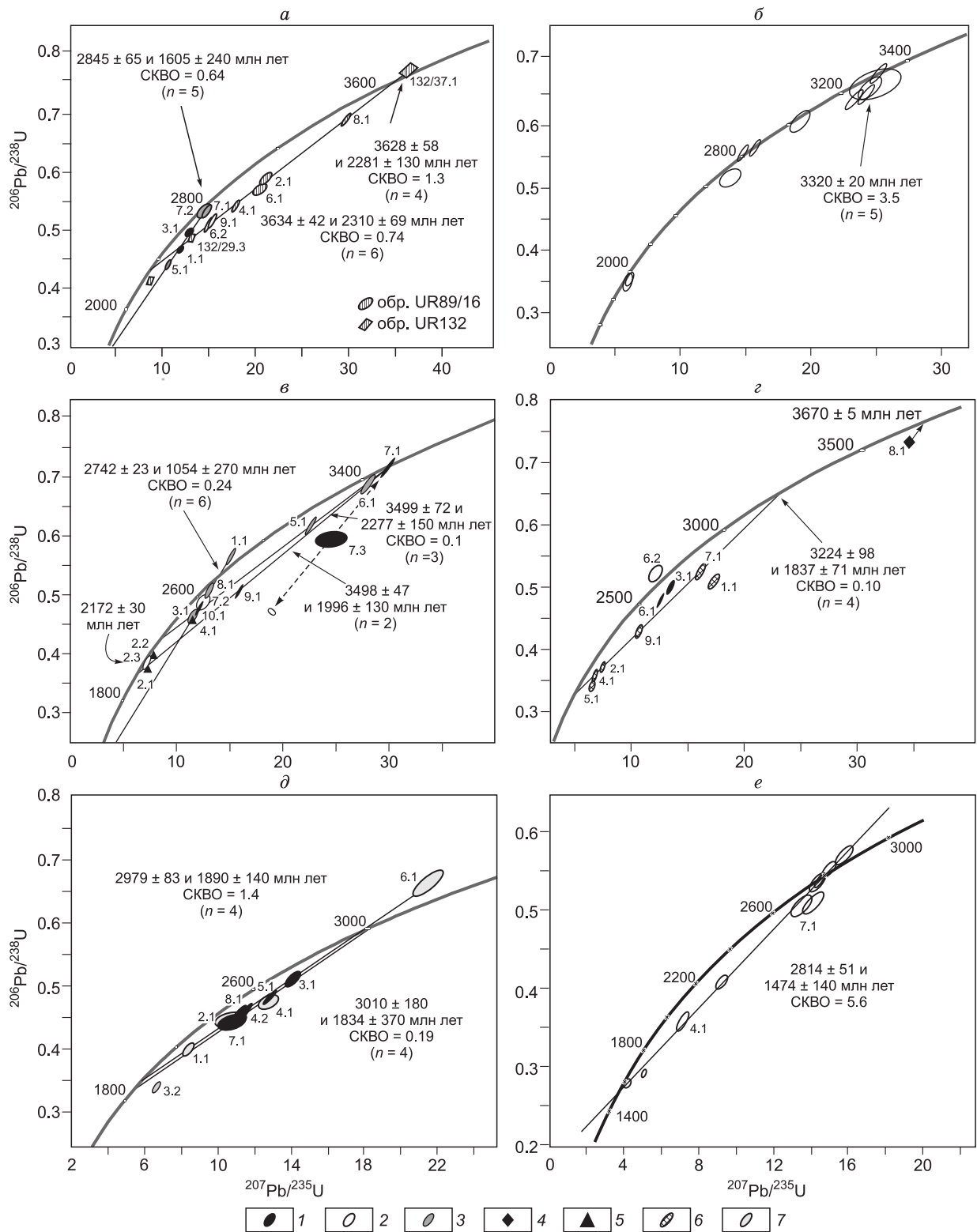
Наиболее древними представителями базит-ультрамафитового магматизма в Побужье являются двупироксеновые гранулиты (метавулканыты) и включения перидотитов. Первые в виде полос и линз различной мощности перемежаются с гнейсоэндробитами [Фомин, Каневский, 1975; Ярошук, 1983; Лесная, 1988; Белевцев и др., 1992; Степанюк, 1996; Щербаков, 2005; и др.]. В стратиграфических схемах мафические гранулиты относятся к днестровско-бугской серии раннего архея [Есипчук и др., 2004] и рассматриваются как метаморфизованные метавулканыты коматиит-базальтового состава [Фомин и др., 1980; Фомин, 1984; Балтыбаев и др., 2014; Лобач-Жученко и др., 2014а], и, частично, как метаморфизованные дайки [Степанюк, 1996, 2000]. Мафические гранулиты испытали многократные деформации, о чем свидетельствует линзовидное строение фрагмента гранулитов в северной части Одесского карьера. Размер фрагмента более  $100 \times (10-20)$  м, он сложен мафическими гранулитами, перемежающимися с осадками (кварцитами, железистыми и гранатовыми кварцитами), и содержит полосы гнейсов, возможно, кислых метавулканытов [Балтыбаев и др., 2014; Лобач-Жученко и др., 2014а, б].

Мафические гранулиты базальтового состава состоят из  $\text{Cpx}^2$ , Орх, Pl, Amph,  $\pm$  Grt, содержат редкие зерна Qtz, Kfs, рудного минерала, а гранулиты метакоматиитового состава содержат амфибол-двупироксеновые парагенезисы [Балтыбаев и др., 2014; Lobach-Zhuchenko et al., 2017]. По химическому составу мафические гранулиты отвечают толеитовым базальтам, коматиитовым базальтам и коматиитам. Сложная история мафических гранулитов нашла отражение в данных об их изотопном возрасте (рис. 2). U-Pb возраст циркона определен в ЦИИ ВСЕГЕИ на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-II по методике, описанной в [Lobach-Zhuchenko et al., 2017] для трех образцов: UR132, UR89/16, UR82/4.

Гиперстен-плаггиоклазовый гранулит UR132 содержит пять генераций циркона, отражающих различные события, охарактеризованные ранее [Lobach-Zhuchenko et al., 2017]. Возраст магматического протолита установлен равным  $3659 \pm 19$  млн лет по конкордантному циркону 1-й группы, имеющему геохимические и морфологические черты, типичные для основных пород, и значение  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.66) = -0.1$  [Lobach-Zhuchenko et al., 2017]. Коровая контаминация первичного базальтового расплава, предшествующая кристаллизации циркона, обеспечила низкое отношение  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i = 0.28031-0.28043$  и значения  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.66) = -3.4... +0.8$  в магматических цирконах UR132, близкие к таковым ксеногенного циркона 2-й группы [Lobach-Zhuchenko et al., 2017] и циркона палеоархейских ортогнейсов побужского комплекса [Shumlyansky et al., 2012].

Образец UR89/16 взят из включения мафического гранулита из зоны брекчий, цементом которой является гнейсоэндробит. По химическому составу он отвечает коматиитовому базальту, сложен клино- и ортопироксеном, плаггиоклазом, содержит амфибол. U-Pb изотопные данные для циркона из UR89/16 аппроксимируются двумя дискордиями (см. рис. 2, а) с верхними пересечениями  $3628 \pm 58$  и  $2845 \pm 65$  млн лет [Лобач-Жученко и др., 2019]. На рисунке 3, а показано строение цирконов в катодолуменесценции. Возраст  $3628 \pm 58$  млн лет в пределах погрешности соответствует возрасту генерации магматического циркона из гранулита UR132. При совместном расчете аналитических данных для обр. UR89/16 и двух точек UR132 (<https://sibran.ru/upload/medialibrary/3f3/3f3ab5b27a38e9fc27adclafec56eb83.pdf>) верхнее пересечение дискордии дает значение возраста  $3634 \pm 42$  млн лет. Циркон характеризуется обычным для циркона базальтов умеренным содержанием РЗЭ ( $180-390$  г/т). Характер распределения РЗЭ, высокая аномалия  $\text{Ce}^* = 34-67$  типичны для циркона магматического происхождения [Velousova et al., 2002; Hoskin, Shaltegger, 2003]. Циркон древней генерации UR89/16 имеет значения  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.63) = +0.1... +1.9$  [Егорова и др., 2019], которые согласуются со значением  $\epsilon_{\text{Nd}}(3.63) = -0.5$  для породы в целом (рис. 4, е), что указывает на равновесие составов циркона и мафического гранулита и их первичную (магматическую) кристаллизацию из общего расплава базальтового состава, возможно, незначительно контаминированного, судя по пониженным значениям  $\epsilon_{\text{Hf}}(3.63)$  и  $\epsilon_{\text{Nd}}(3.63)$  относительно деплетированной мантии (см. рис. 4, а; 3, д). Возраст последующих генераций циркона отражает время наложенных метаморфических процессов. Образец UR82/4 взят из фрагмента гранулитов, претерпевших многократные деформации, приведшие к его сложному линзовидному строению [Балтыбаев и др.,

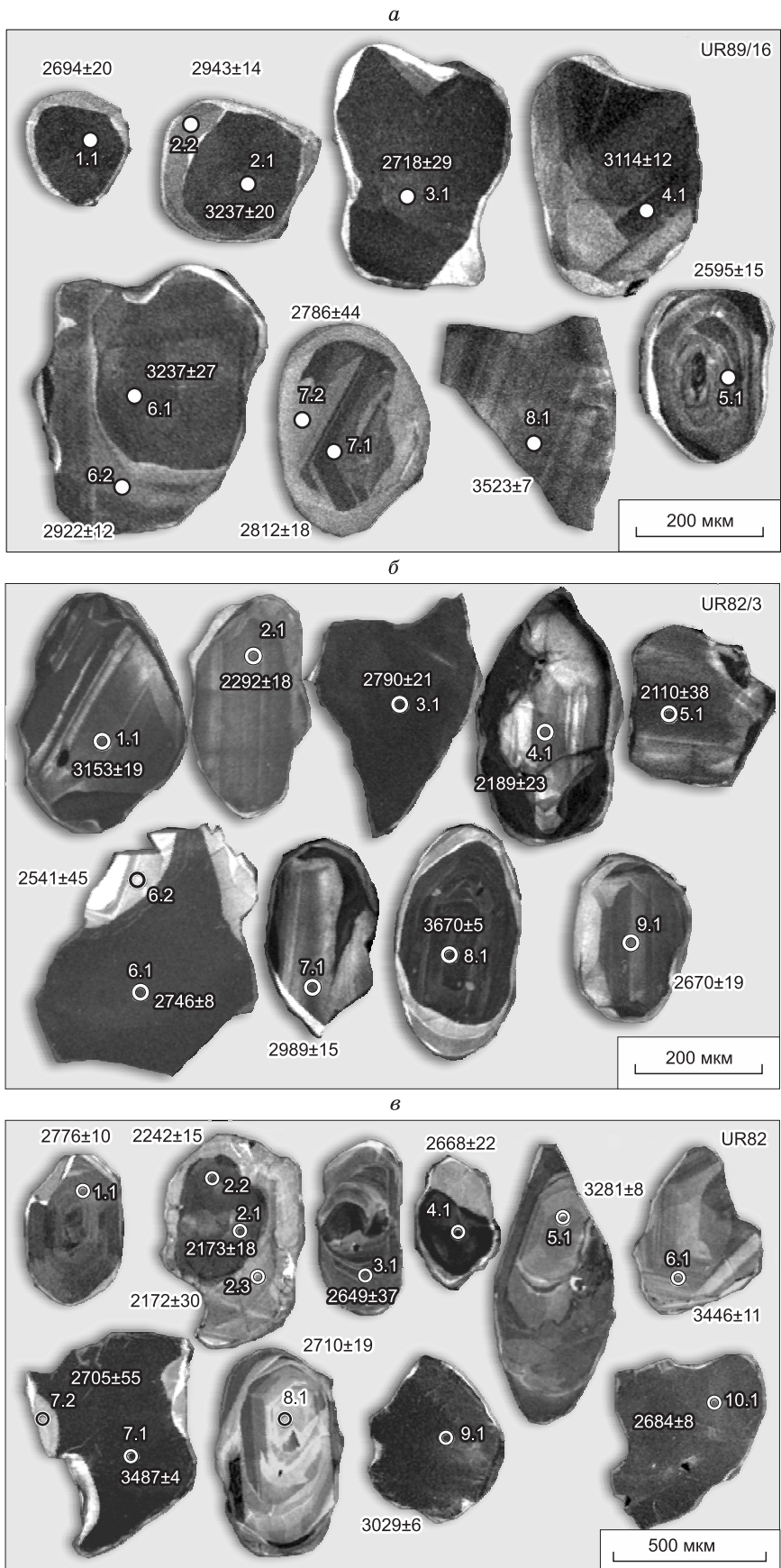
<sup>2</sup> Сокращенные названия минералов: Amph — амфибол, Cpx — клинопироксен, Crb — карбонат, En — энстатит, Fo — форстерит, Fs — ферросилит, Gem — гематит, Grt — гранат, Kfs — калиевый полевой шпат, Mag — магнетит, Ol — оливин, Орх — ортопироксен, Pl — плаггиоклаз, Qtz — кварц, Spl — шпинель, Srp — серпентин.



**Рис. 2.** Диаграммы с конкордией (U-Pb SHRIMP-II) для циркона из базит-ультрабазитовых пород архея Днестровско-Бугской провинции Сарматии.

*а* — двупироксеновый гранулит UR89/16, *б* — ортопироксенит UR107, *в* — метаортопироксенит UR82, *г* — метаортопироксенит UR82/3, *д* — гранат-двупироксеновый гранулит UR82/4, *е* — ортопироксенитовая кайма гарцбургита UR17/2. Особенности циркона: 1 — высоко-U ядра, 2 — светлые в CL каймы, 3 — зональные зерна, 4 — древнее ядро Zrn из эндербита, 5 — темные в CL ядра с низким Th,U, 6 — высоко-Th Zrn (Th/U = 3—6), 7 — гранулитовый Zrn.

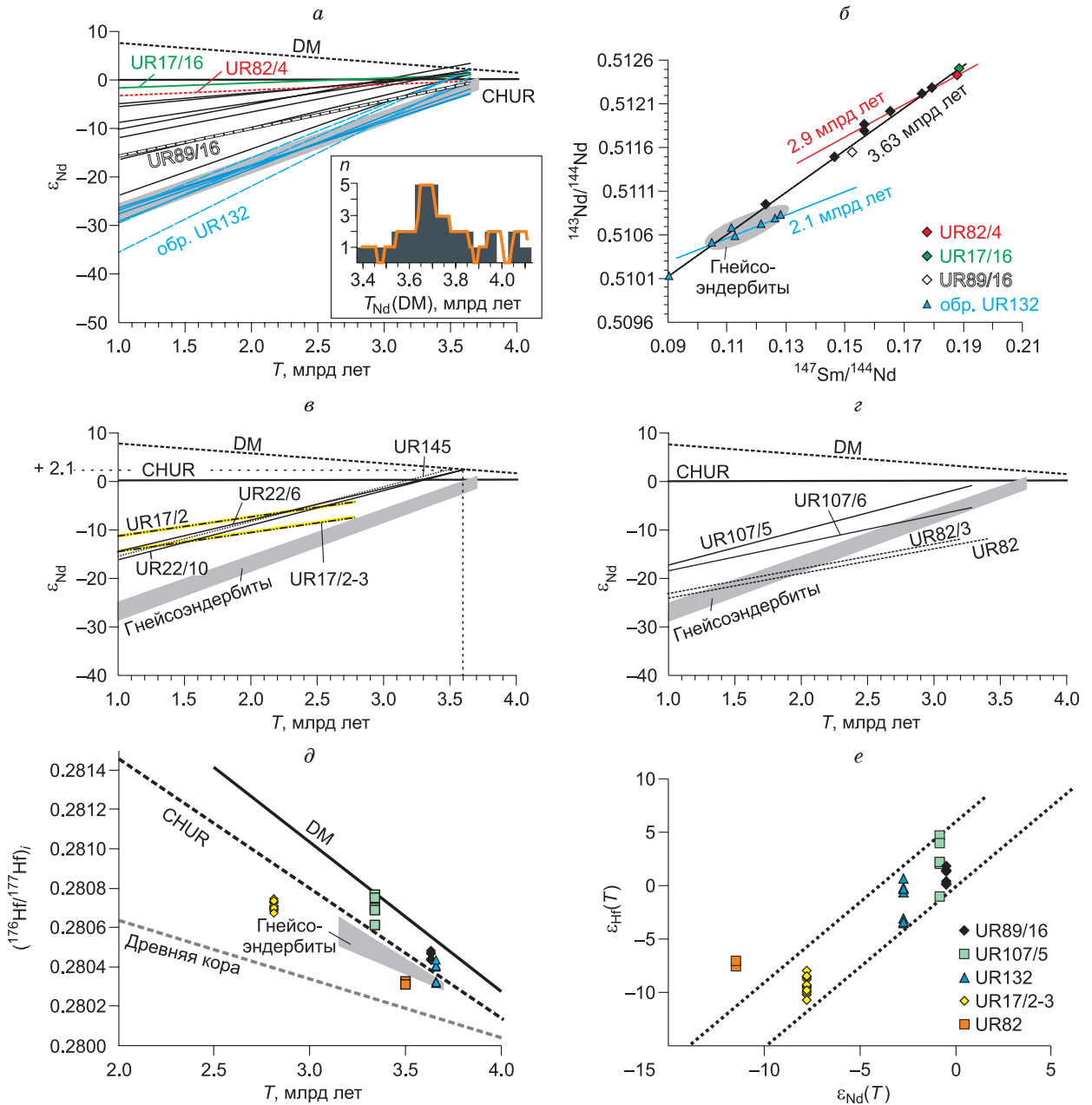




**Рис. 3. Фотографии цирконов в катодолюминесценции.**

Пробы: *a* — UR89/16, *б* — UR82/3, *в* — UR82. Значения возраста в млн лет.

2014; Лобач-Жученко и др., 2014а]. Порода сложена пироксенами, плагиоклазом и гранатом, по химическому составу отвечает толеитовому базальту. В монофракции преобладают мелкие, светло-розовые округлые гранулитового типа зерна, а также оболочки вокруг менее распространенных полупрозрачных трещиноватых ядер. Циркон дискордантен, 4 точки, определяющие дискордию с верхним пересечением конкордии у  $2979 \pm 83$  млн лет и нижним пересечением у  $1890 \pm 140$  млн лет (см. рис. 2, б), характери-



**Рис. 4.** Диаграммы, характеризующие изотопный состав Nd и Hf изученных пород.

а–б — мафические гранулиты (метакоматииты и metabазальты, а также метаандезитобазальты обр. UR132 (голубые линии)): а — линии эволюции изотопного состава Nd в координатах  $\epsilon_{Nd}(T)$  — возраст, врезка — гистограмма значений  $T_{Nd}(DM)$  с учетом абсолютных ошибок; б — положение аналитических точек относительно модельных изохрон, рассчитанных для магматического (3.63 млрд лет) и метаморфических (2.9 и 2.1 млрд лет) возрастов по U-Pb системе циркона; в, з — линии эволюции изотопного состава Nd в координатах  $\epsilon_{Nd}(T)$  — возраст для включений ультрамафитов: в — перидотиты UR22/6, 22/10, UR145, UR17/2 и ортопироксениты UR17/2-3; з — ортопироксениты UR107/5, 107/6, метаортопироксениты UR82 и UR82/3; д — отношение  $(^{176}Hf/^{177}Hf)$  в цирконе, рассчитанное на магматическое время кристаллизации, предполагаемое по U-Pb данным; обозначение образцов такое же, как на рисунке е; е — сопоставление значений  $\epsilon_{Nd}(T)$  породы и  $\epsilon_{Hf}(T)$  циркона с областью составов земных пород «terrestrial magma»:  $\epsilon_{Hf}(T) = 1.36 \cdot \epsilon_{Nd}(T) + 2.95$ , при ширине  $\epsilon_{Hf}(T) \pm 3$ , по [Vervoort, Patchett, 1996]. Линия эволюции деплетированной мантии (DM) (а, в, з), по [Goldstein, Jacobsen, 1988], (д), по [Griffin et al., 2000]. Серые поля отвечают вариациям изотопного состава вмещающих гнейсоэндербитов.

зуются секториальной зональностью, низкими концентрациями U (26—145 г/т), Th (4—36 г/т), PЗЭ (34—62 г/т), низким Th/U (0.12—0.18), высоким содержанием Hf (1.0—1.35 мас. %), типичными для метаморфического циркона. Определенная по содержанию титана температура гранулитовых зерен циркона ~750 °С соответствует температуре, полученной по породообразующим минералам [Балтыбаев и др., 2014]. Реликты ядер отличаются от гранулитового циркона высоким (1000—4000 г/т) содержанием U и более высокой (>800 °С) температурой.

Для 17 образцов мафических гранулитов (метавулканитов) определен изотопный состав Nd. Для всех образцов сосчитаны значения  $\epsilon_{Nd}(T)$  и модельные возрасты  $T_{Nd}(DM)$  — для образцов с отношением  $^{147}Sm/^{144}Nd < 0.18$  (таблица). Гистограмма модельных возрастов (см. рис. 4, а, врезка) свидетельствует об эопалеоархейском источнике для протолита гранулитов, а пик значений  $T_{Nd}(DM) \sim 3.7$  млрд лет близок к магматическому возрасту циркона образцов UR132 и UR89/16. Среди изученных мафических гранулитов наименее измененным является метакоматиит UR17/16, поскольку он имеет высокое Sm/Nd отношение (0.31), низкое содержание PЗЭ и их плоское распределение [Лобач-Жученко и др., 2014а], свидетельствующие о малом влиянии на его состав пород коры [Костицын, 2004]. В координатах  $^{147}Sm/^{144}Nd$ — $^{143}Nd/^{144}Nd$  (см. рис. 4, б) точка UR17/16 и семь точек других гранулитов лежат около линии с наклоном, отвечающим возрасту 3.63 млрд лет (времени раннего этапа базитового магматизма, определенного U-Pb методом для циркона UR89/16 и UR132). Эти образцы характеризуются сходными в пределах погрешности положительными значениями  $\epsilon_{Nd}(3.63) = +1.3 \pm 0.5$  и модельными возрастными  $T_{Nd}(DM) \sim 3.7$  млрд лет (см. таблицу). Смещение на рис. 4, б части точек с линии 3.63 млрд лет, вероятно, отражает влияние наложенных процессов и/или контаминации (для этих образцов рассчитанные параметры  $\epsilon_{Nd}(T)$  и  $T_{Nd}(DM)$  в таблице приведены курсивом). Часть точек метавулканитов коматиит-базальтового состава смещены в сторону линии, угол наклона которой соответствует возрасту метаморфизма ~2.9 млрд лет, определенного по циркону для образцов UR82/4 и UR89/16 (см. рис. 4, б). Часть точек гранулитов обр. UR132 смещаются к линии, угол наклона которой отвечает 2.1 млрд лет — U-Pb возрасту самой поздней генерации циркона UR132 [Lobach-Zhuchenko et al., 2017]. Другое объяснение нарушения Sm-Nd системы части образцов обр. UR132 — контаминация вмещающими гнейсоэндритами, так как на рисунках 4, а и 3, б их поля перекрываются. В пользу этого свидетельствуют низкие значения  $\epsilon_{Hf}(3.66)$  цирконов и их корреляция со значением  $\epsilon_{Nd}(3.66)$  мафического гранулита из обр. UR132 в области отрицательных значений (см. рис. 4, е).

Таким образом, изотопные данные по сохранившимся цирконам в мафических гранулитах UR132 и UR89/16 датируют эопалеоархейский возраст базит-ультрабазитового вулканизма, а циркон гранулита UR84/2 и вторая генерация циркона UR89/16 датируют архейский этап метаморфизма, в то время как минеральная ассоциация фиксирует протерозойский этап гранулитового метаморфизма, определенный Sm-Nd методом и отраженный в возрасте нижнего пересечения дискордии U-Pb системы UR82/4. С этим выводом согласуются Sm-Nd (по породе в целом) и Lu-Hf (циркон) изотопные данные, которые позволяют предположить происхождение первичных коматиит-базальтовых расплавов из слабодеплетированного мантийного источника с параметрами  $\epsilon_{Nd}(3.63) = 1.3 \pm 0.5$  и  $\epsilon_{Hf}(3.63) = 1.0 \pm 0.9$ . Учитывая полиметаморфическую историю изученных гранулитов, интерпретацию изотопных данных следует рассматривать как одну из возможных.

К палеоархею условно отнесены включения нескольких шпинельсодержащих серпентинизированных и амфиболитированных гарцбургитов. Древний возраст гарцбургитов предполагается исходя из их структурного положения [Лобач-Жученко и др., 2018б]. Кроме того, косвенным признаком древнего возраста части включений гарцбургитов является то, что они рассеяны метаморфизованными дайками основного состава (двупироксеновыми гранулитами), геохимические характеристики которых идентичны таковым мафических гранулитов, охарактеризованных выше. Некоторые включения перидотитов, судя по единой ориентировке плоскостных текстур внутри включений и их контактов с гнейсоэндритами, могут быть моложе гарцбургитов, описанных выше, и близки по времени к этапу ранних деформаций. Включения серпентинизированных гарцбургитов сложены крупнозернистой породой, состоящей из Ol ( $Fo_{86}$ ), Орх ( $En_{86-84}Fs_{14-45}$ ), Spl; вторичные — Amph, Srp, Mag, Hem, Crb. Они сильно серпентинизированы и карбонатизированы [Лобач-Жученко и др., 2018а]. На диаграмме Mg/Si—Al/Si [Лобач-Жученко и др., 2018а] составы наименее измененных образцов занимают поле вблизи состава примитивной мантии, что не согласуется с низким содержанием в них CaO и  $Al_2O_3$ , указывающим на деплетированность источника. Особенностью химического состава всех гарцбургитов ПГК является их повышенная железистость ( $FeO = 10.7$ — $11.7$  мас. %,  $mg\# = 0.85$ — $0.87$ ). Для одного включения (UR22) определен возраст двух зерен циркона, который по отношению  $^{207}Pb/^{206}Pb$  равен 1805 и 2015 млн лет (см. доп. материалы). На диаграмме с конкордией четыре точки из пяти, как это очевидно из данных таблицы, располагаются в нижней части дискордии с пересечением конкордии у значения  $1880 \pm 58$  млн лет, отмечая нарушение U-Pb системы в палеопротерозое. Изотопный состав Nd двух образцов гарцбургита этого



**Sm-Nd изотопные данные для архейских основных-ультраосновных пород  
и вмещающих их гнейсоэндрбитов Украинского щита**

Образец	Порода	Sm	Nd	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	2σ	ε <sub>Nd</sub> (T)	T	T <sub>DM</sub>
		г/г						млрд лет	
<b>Метавулканыты (кристаллосланцы)</b>									
UR17/6	Метакоматит	3.05	15.0	0.1232	0.510950	8	+1.5	3.63	3.68 ± 0.03
UR17/10	»	1.94	7.50	0.1566	0.511865	8	+3.7	3.63	3.41 ± 0.05
UR17/12	»	1.93	6.95	0.1794	0.512297	8	+1.5	3.63	3.77 ± 0.10
UR17/16	»	0.99	3.18	0.1887	0.512510	8	+1.3	3.63	—
UR82/11	»	1.71	6.59	0.1566	0.511792	6	+2.3	3.63	3.60 ± 0.05
UR82/12	»	2.97	10.8	0.1654	0.512015	6	+2.5	3.63	3.56 ± 0.06
UR82/14	Метабазальт	2.25	9.29	0.1464	0.511490	4	+1.2	3.63	3.73 ± 0.04
UR82/4	»	5.41	17.4	0.1879	0.512436	7	+0.2	3.63	—
UR89/16	Метакоматитовый базальт	2.98	11.8	0.1525	0.511551	12	-0.5	3.63	3.95 ± 0.06
BG06-37	Мафический гранулит	2.10	7.21	0.1759	0.512219	5	+1.6	3.63	3.73 ± 0.09
UR132	Метаандезитовый базальт	6.19	30.0	0.1262	0.510794	4	-2.7	3.66	4.07 ± 0.03
UR132/1	»	6.36	30.0	0.1281	0.510840	4	-2.7	3.66	4.08 ± 0.03
UR132/3	»	5.30	27.3	0.1115	0.510681	6	+2.1	3.66	3.66 ± 0.02
UR132/5	»	4.82	25.8	0.1128	0.510595	8	-0.7	3.66	3.83 ± 0.02
UR132/11	»	5.05	25.1	0.1215	0.510731	6	-1.2	3.66	3.97 ± 0.03
UR132/13	»	2.79	18.6	0.0903	0.510129	5	+1.3	3.66	3.70 ± 0.02
UR132/16	»	3.91	22.6	0.1048	0.510517	6	+2.1	3.66	3.66 ± 0.02
<b>Включения ультрамафитов</b>									
UR22/6	Гарцбургит	0.430	1.77	0.1470	0.511556	23	—	—	3.62 ± 0.06
UR22/10	»	0.377	1.61	0.1412	0.511430	25	—	—	3.59 ± 0.06
UR145	»	0.517	2.22	0.1408	0.511454	12	—	—	3.52 ± 0.04
UR17/2	Phl-гарцбургит	1.15	4.22	0.1652	0.511833	19	-4.3	2.81	4.11 ± 0.09
UR17/2-3	Phl-ортопироксенит	1.18	4.32	0.1649	0.511650	15	-7.8	2.81	—
UR107/5	Ортопироксенит	1.70	7.28	0.1414	0.511381	18	-0.7	3.32	3.70 ± 0.05
UR107/6	Измененный на контакте ортопироксенит	3.96	15.7	0.1524	0.511390	10	-5.4	3.32	—
UR82	Метаортопироксенит	1.69	6.52	0.1562	0.511131	6	-11.2	3.5	—
UR82/3	»	3.32	12.7	0.1574	0.511194	7	-12	3.22	—
<b>Вмещающие гнейсоэндрбиты</b>									
UR17/2-1	Гнейсоэндрбит	3.70	16.9	0.1320	0.511154	8	—	—	3.70 ± 0.03
UR22/1	»	2.96	15.3	0.1166	0.510726	4	-1.0	3.51*	3.77 ± 0.02
UR82/1	»	2.81	13.2	0.1289	0.510900	8	—	—	4.01 ± 0.03
UR82/1a	»	2.37	17.6	0.0815	0.509919	5	+0.8	3.62*	3.70 ± 0.01
06-BG38	»	3.29	18.9	0.1050	0.510573	8	+2.7	3.63*	3.59 ± 0.02
UR108	»	4.12	22.3	0.1117	0.510545	5	-0.6	3.67*	3.86 ± 0.02
186	»	3.13	16.2	0.1167	0.510622	4	-0.6	3.75*	3.94 ± 0.02

Примечание. Для расчета значений модельного возраста  $T_{DM}$  использованы параметры для DM по [Goldstain, Jacobson, 1988], значение ошибки вычислено по формуле для абсолютной погрешности косвенных величин; возрасты, для которых  $2\sigma > 100$  млн лет, не приводятся. Все породы метаморфизованы в различной степени. Курсивом выделены значения  $\epsilon_{Nd}(T)$  и модельные возрасты тех образцов, для которых предполагается частичное нарушение Sm-Nd системы во время метаморфизма. Приставка «мета» используется для полностью перекристаллизованных пород.

\* Данные о возрасте пород, по [Лобач-Жученко и др., 2013].

включения (см. таблицу UR22/6 и UR22/10) близок и отличается низким содержанием Nd (< 2 мкг/г), а значение модельного возраста  $T(DM) \sim 3.6$  млрд лет (параметры модели по работе [Goldstain, Jacobson, 1988]) позволяет их отнести к эопалеоархейскому этапу базит-ультрабазитового магматизма. Близкий изотопный состав Nd имеет и другое включение гарцбургита (см. рис. 4, в; UR145).

Реликты палеоархейских базит-ультрабазитовых пород в Сарматии, помимо Побужья, датированы в гнейсах обоянского комплекса ВКМ и на западе Приазовской провинции в Орехово-Павлоградской зоне УЩ. В первом случае они представлены включением амфиболита (3.67 млрд лет, по [Лохов и др., 2009]), во втором — включением пироксенита (3.66 млрд лет, по [Bibikova, Williams, 1990]). Оба региона характеризуются сильными и неоднократно проявленными деформациями и метаморфизмом.

О проявлении базит-ультрабазитового магматизма в Сарматии после 3.65 млрд лет можно предполагать исходя из присутствия в молодых интрузиях Воронежского массива ксеногенного циркона с возрастными 3.6–3.5 млрд лет (см. доп. материалы в [Лобач-Жученко и др., 2017a]), состав которого позволяет относить их к цирконам базитов.

### ПАЛЕОАРХЕЙСКИЙ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ САРМАТИИ. ЭТАП 3.4—3.2 МЛРД ЛЕТ

Магматизм этапа 3.4—3.2 млрд лет на территории Сарматии датирован в побужском гранулитогнейсовом комплексе Днестровско-Бугской провинции УЩ, где сохранились включения ортопироксенитов.

Ортопироксениты встречаются как самостоятельные тела и как части сложнопостроенных включений перидотитов. Наиболее крупное включение (UR107) имеет форму, близкую к пластине, и сложное внутреннее строение, определяемое его структурно-метаморфическими преобразованиями [Лобач-Жученко и др., 2017б]. Включение расположено в западной части субширотной зоны пластического сдвигового течения. Наиболее сохранившаяся часть включения UR107 сложена плагиоклазовым высокомагнезиальным ортопироксенитом с отношением  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3=0.67$  и высокими концентрациями Co, Ni и Cr. На контакте с гнейсоэндербитом ортопироксенит превращен в жедрит-антофиллит-флогопитовый сланец.

**Изотопный возраст ортопироксенита UR107.** В популяции циркона, выделенного из участка, сохранившего магматическую ассоциацию породообразующих минералов, преобладают удлиненные призматические с осцилляторной зональностью кристаллы (I тип). На контакте с жедрит-антофиллит-флогопитовой породой преобладают округлые и овальные зерна циркона (II тип). Присутствуют редкие удлиненные зерна, по морфологии сходные с цирконом I типа, но с очень слабым свечением в катодолюминесценции, отнесенные к III типу [Лобач-Жученко и др., 2017б]. Циркон I типа субконкордантен ( $d < 5\%$ ) и образует дискордию, пересекающую конкордию у значения  $3320 \pm 20$  млн лет (см. рис. 2, б). Для четырех зерен циркона II типа по  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  получены значения возраста в интервале 2.79—3.00 млрд лет, а для двух зерен циркона III типа — 2 млрд лет (см. доп. материалы). Анализ Lu-Hf системы циркона показал, что величина  $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$  для субконкордантных зерен I типа определяется интервалом от  $-0.4$  до  $+5.2$  и находится в балансе с начальным изотопным составом Nd ортопироксенита (см. рис. 4, е), что отвечает магматическому происхождению циркона I типа и его кристаллизации из расплава ортопироксенита [Лобач-Жученко и др., 2017б]. Расчетный модельный возраст  $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$  соответствует  $T_{\text{Hf}}(\text{DM2})$  и составляет  $\sim 3.7$  млрд лет [Лобач-Жученко и др., 2017б]. Жедрит-антофиллит-флогопитовый сланец из зоны контакта с гнейсоэндербитом (обр. UR107/6) отличается повышенным содержанием Nd и его менее радиогенным изотопным составом. Судя по всему, его Sm-Nd система была нарушена в результате коровой контаминации или наложенных процессов (см. таблицу). Таким образом, на основе изотопных данных устанавливаются три события: кристаллизация ортопироксенита 3.32 млрд л. н., деформации и метаморфизм около 2.8 млрд лет и проявление протерозойского метаморфизма  $\sim 2$  млрд л. н.

В восточной части зоны пластического сдвигового течения находится серия небольших включений метаортопироксенитов, представленных образцами UR82 и UR82/3. Небольшие включения UR82/3 и UR82 полностью метаморфизованы в гранулитовой фации, сложены ортопироксеном (70—75%), клинопироксеном ( $\sim 15$ —20%), плагиоклазом ( $\sim 10$ —15%); в небольшом количестве присутствуют амфибол, биотит, кварц, Cr-магнетит. Циркон обр. UR82/3 гетерогенен (см. рис. 3, б). Выделяются зерна с высоким отношением  $\text{Th}/\text{U} = 3.4$ —5.9 и зерна с  $\text{Th}/\text{U} < 1$ . Расчет по четырем наиболее хорошо сохранившимся зернам первой группы (см. доп. материалы) дает возраст по верхнему пересекающей дискордии с конкордией  $3224 \pm 98$  млн лет (см. рис. 2, в). Судя по включениям различных ассоциаций минералов в цирконе: 1) Qtz, Kfs, Pl, Bt, Ap — в одних зернах и 2) Орх (mg# 64) и Amph (mg#  $\sim 60$ ) — в других, источник циркона отвечает как кислым, так и основным породам. К первым принадлежит зерно 8.1 с возрастом 3680 млн лет, которое имеет пойкилитовое строение, содержит включения Qtz, Pl, Bt. Его возраст близок к возрасту циркона из гнейсоэндербитов (3.62—3.57 млрд лет [Лобач-Жученко и др., 2013]), участвующих в строении данной зоны деформации. Состав минералов из вторых — идентичен минералам ортопироксенита, что позволяет связать их кристаллизацию с гранулитовым метаморфизмом. Монофракция циркона UR82 (см. рис. 3, в) состоит из крупных непрозрачных зерен округло-овальной формы (тип I) и прозрачных округлых розовых, образующих самостоятельные зерна и оболочки на цирконе первого типа (тип II). Единичные зерна циркона первого типа образуют две дискордии с пере-

сечением конкордии у значений 3499 и 3498 млн лет (см. рис. 2, в, доп. материалы) и характеризуются низким отношением  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} \sim 0.28031$  (см. рис. 4, д) [Лобач-Жученко и др., 2013]. В зернах циркона, образующих дискордии, содержание редких элементов (U, Th/U, Hf, LREE,  $(\text{Lu}/\text{La})_n$ , Y, Yb) различается и отвечает источникам гранитного и основного состава [Belousova et al., 2002]. Нижние пересечения дискордий указывают на протерозойский этап перестройки U-Pb системы (см. рис. 2, в). Фигуративные точки зерен циркона II типа аппроксимируются дискордией с верхним пересечением конкордии  $2742 \pm 23$  млн лет. Этот возраст близок к возрасту мигматизации вмещающего включение гнейсоэндербита [Лобач-Жученко и др., 2013]. Крайне низкое изотопное отношение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в метаортопироксенитах UR82 и UR82/3 свидетельствует о нарушении первичного изотопного состава Nd, что подтверждается отсутствием корреляции  $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$  с  $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$  (см. рис. 4, е). По положению линий эволюции Nd этих образцов и вмещающих гнейсоэндербитов (см. рис. 4, з) можно предполагать, что перестройка Sm-Nd изотопной системы произошла во время палеопротерозойского этапа метаморфизма в результате изотопного обмена с метаморфическим флюидом.

Данные для циркона включений UR82 и UR82/3 демонстрируют их сложную геологическую историю, частично предшествующую их попаданию в зону брекчий и совместную метаморфическую историю, начиная с  $\sim 2.8$  млрд лет.

В других регионах Сарматии к магматизму, синхронному с формированием ортопироксенитов Побужья (3.4—3.3 млрд лет), могут быть отнесены амфиболиты Приазовья, в которых соответствующий возраст получен для отдельных зерен циркона.

## МЕЗОАРХЕЙСКИЙ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ САРМАТИИ.

### ЭТАП 3.2—2.8 МЛРД ЛЕТ

#### Ранний мезоархей 3.2—3.0 млрд лет

Активный базит-ультрабазитовый магматизм в раннем мезоархее установлен на большей части Сарматии: в Курской провинции ВКМ, в Среднеприднепровской и Приазовской провинциях УЩ.

**Курская провинция ВКМ.** Магматизм представлен базальт-коматитовыми сериями зеленокаменных поясов и синхронными с ними интрузиями, приуроченными к энсиалическим рифтам [Крестин, 1985; Бочаров, Фролов, 1993; Чернышов и др., 1997; Ненахов и др., 2007; Чернышов, Ненахов, 2010]. Состав коматит-толеитовых серий охарактеризован во многих работах [Фомин и др., 1980; Крестин, 1985; Чернышов и др., 2014]. Интрузивный магматизм представлен сергиевским дунит-перидотитовым комплексом, расположенным в ассоциации с Михайловско-Белгородским зеленокаменным поясом. Датирован серпентинизированный ультрабазит сергиевского комплекса, конкордантный возраст циркона которого  $3136 \pm 10$  млн лет [Лобач-Жученко и др., 2017a]. Серпентиниты сергиевского комплекса характеризуются низким содержанием РЗЭ и их плоским распределением, сходным с таковыми коматитов, в связи с чем принадлежность датированного образца к интрузивной фации неоднозначна.

**Среднеприднепровская провинция УЩ.** Зеленокаменные ассоциации в Среднеприднепровской провинции были сформированы в два этапа: в первый (3.19—3.14 млрд лет, т. е. в раннем мезоархее), образованы вулканические серии Высокопольской, Верховцевской и Чертомлыкской структур [Сукач, 2016]. В этой провинции, в отличие от других регионов Сарматии, хорошо сохранились структура и стратиграфия зеленокаменных поясов, в разрезах которых выделены нижний, преимущественно вулканогенный с джеспилитами, и верхний осадочный уровни [Сукач, 2014]. Интрузивные породы представлены габброидами, расположенными в тесной ассоциации с вулканитами, а также несколькими комплексами ультраосновного состава.

**Приазовская провинция.** Зеленокаменные структуры Приазовской провинции — Сорокинская, Косивцевская, Новогоровская, расположенные в центральной, северной и западной частях провинции соответственно, сильно деформированы, образуют узкие линейные структуры, метаморфизованы в амфиболитовой и гранулитовой фации. Преобладающими являются коматит-базальтовые ассоциации с широким спектром геохимических характеристик, свидетельствующих о различных источниках и условиях образования [Артеменко и др., 2009]. Возраст зеленокаменных поясов определен только по циркону из пород среднего и кислого составов методом TIMS:  $3095 \pm 43$  — метаандезит Новогоровской структуры и  $3157 \pm 130$  млн — метапорфирит, прорывающий породы Сорокинской структуры [Щербак и др., 2005]. Интрузивные базит-ультрабазитовые породы этого периода выделить сложно, поскольку породы Приазовья испытали неоднократную структурно-метаморфическую переработку. В ряде районов Западного Приазовья сохранились реликты базитов с наложенными на них деформациями ( $D_2$ ) с формированием субширотной пологой линейности (неопубликованные данные авторов). Последовательность деформаций, аналогичная таковой в Орехово-Павлоградской зоне [Lobach-Zhuchenko et al., 2014], может указывать на возможное присутствие раннемезоархейских базитов в Западном Приазовье.

### Поздний мезоархей (3.0—2.8 млрд лет)

Геологические события, фиксируемые для позднего мезоархея в Курской провинции ВКМ и Приазовской провинции УЩ, указывают, что становление базит-ультрабазитового магматизма от раннего мезоархея отделено деформациями и метаморфизмом.

**Курская провинция ВКМ.** Время метаморфизма, разделяющего ранний и поздний мезоархей, датировано по метаморфическому циркону амфиболита михайловской свиты Белгородского зеленокаменного пояса Курской провинции как  $3028 \pm 10$  млн лет [Лобач-Жученко и др., 2017а]. Последующий магматизм в Курской провинции проявлен излиянием содержащих муассанит [Чернышов и др., 1978] вулканитов основного состава, вошедших в состав тимской серии. Интрузивный базит-ультрабазитовый магматизм представлен штоками, дайками, пластовыми телами, распространенными как в Курской провинции, так и восточнее, на юге Лосевской зоны (белогорьевский комплекс, по [Чернышов и др., 2015]). Значительная часть интрузий этого этапа представлена метаморфизованными в условиях зеленосланцевой фации штоками, дайками, сложенными габброноритами с повышенной железистостью ( $mg\# = 0.36—0.38$ ). Для нескольких массивов получены конкордантные значения возраста —  $2885 \pm 12$ ,  $2856 \pm 17$ ,  $2920 \pm 12$  млн лет (Информационный ресурс Изотопного центра ВСЕГЕИ «Геохронологическая карта РФ»).

Интрузии белогорьевского комплекса имеют дайкообразную, пластообразную форму и незначительные размеры в плане ( $0.3—0.8$  км<sup>2</sup>), сложены крупнокристаллическими горнблендитами, амфиболитизированными габбро и габбро-амфиболитами, обогащенными титаномагнетитом и апатитом. Возраст  $2882 \pm 12$  млн лет, полученный для массива оливинового габбронорита белогорьевского комплекса [Лобач-Жученко и др., 2017а], сходен с возрастом базитов, расположенных западнее, в Курской провинции.

**Среднеприднепровская провинция УЩ.** В Среднеприднепровской провинции в позднем мезоархее продолжались излияния мафических лав (второй этап вулканизма:  $3077—2954$  млн лет), представленных вулканитами Сурского и Белозерского поясов [Сукач, 2016; Лобач-Жученко и др., 2017а]. Не исключено, что образование пород верхнего уровня (белозерской серии) происходило синхронно с бугской серией [Лобач-Жученко и др., 2017а]. Ко второму этапу относится софиевский интрузивный комплекс, который расположен внутри Софиевской зеленокаменной структуры. Интрузивный комплекс, варьирующий по составу от низкомагнезиальных меланогаббро и габброноритов до диоритов, представлен небольшими массивами. Возрасты меланогаббро и габбронорита по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  равны соответственно  $3087$  и  $3091$  млн лет [Щербак и др., 2005]. К этому периоду, судя по геологическим данным, относится расслоенная Александровская интрузия. Она, предположительно, имеет воронкообразную форму, внешнее кольцо которой сложено ультрабазитами и базитами; ультрамафиты представлены дунитами, перидотитами, пироксенитами; а мафиты — норитами, габброноритами, габбро [Самборская, 2008].

**Приазовская провинция УЩ.** В Приазовской провинции базит-ультрабазитовый магматизм раннего—позднего мезоархея разделен, как это отмечено выше, геологическими событиями, выделение которых осложнено наложением зон палеопротерозойских деформаций и метаморфизма. На юге Центрального Приазовья выделен Саксаганский антиклинорий, под центральной частью которого, согласно геофизическим данным, фиксируется сводовое поднятие поверхности Мохо [Насад и др., 2001], а в центре антиклинория на поверхности находятся многочисленные массивы габбро, габбро-диоритов и диоритов обиточненского комплекса. Возраст интрузий находится в интервале  $2.92—2.91$  млрд лет [Бибикова и др., 2008]. Интрузии сложены массивными породами, главными минералами которых являются плагиоклаз и амфибол. Местами породы рассланцованы и мигматизированы. По химическому составу габбро представлены разновидностями как пониженной магнезиальности ( $mg\# 0.44—0.45$ ), так и повышенной ( $mg\# 0.57—0.66$ ). Вблизи обиточненского комплекса расположены рои даек, в виде двух генераций, разделенных этапом интенсивных деформаций. Возраст дайки второй генерации, сложенной низкомагнезиальным горнблендитом, равен  $2.91$  млрд лет [Бибикова и др., 2008].

**Днестровско-Бугская провинция УЩ.** Наиболее активный базит-ультрабазитовый магматизм на территории Сарматии в позднем мезоархее имел место в Голованевском домене Днестровско-Бугской провинции. Более 60 массивов основных и ультраосновных пород интрузируют гнейсоэндербиты, породы днестровско-бугской и бугской серий [Анциферов и др., 2008]. Породы бугской серии образуют протоплатформенный осадочный чехол, сложенный главным образом зрелыми кварцитами и карбонатными породами, из чего следует, что интрузивный базит-ультрабазитовый магматизм имел место в протоплатформенных (квазикратонных, по В.П. Бухареву [1991]), условиях. Среди ультрабазитов Голованевского домена выделяют две формации: 1) гипербазитовую, с преобладанием клинопироксена и хромита, 2) дунит-перидотит-габброноритовую, с преобладанием ортопироксена и обогащенную никелем. Ультрабазиты сильно серпентинизированы. Для хромита Капитанского массива Голованевского домена определен Re-Os модельный возраст, который равен  $\sim 3$  млрд лет и рассматривается как возраст



массива [Gornostayev et al., 2004]. В Голованевском домене имеют место значительные вариации mg# мафитов и ультрамафитов, что указывает на различные источники расплавов, определивших перидотит-норитовую и гипербазитовую формации, аналогично магматизму комплексов Бушвельд и Стиллиотер [Irvine, Sharpe, 1982]. В большей, сложенной гнейсоэндербитами части провинции (Гайвороновский домен) базит-ультрабазитовый магматизм проявлен незначительно. К этому этапу относится становление флогопитовых гарцбургитов и, вероятно, излияния базальтов в районе с. Хашеватое [Балтыбаев и др., 2014]. Флогопитовые гарцбургиты представлены фрагментом будинированной дайки (включение UR17/2) и Немировской интрузией; они сложены шпинельсодержащим флогопитовым гарцбургитом, состоящим из Ol, Орх, Срх, Phl, Cr-Spl; порода содержит сульфиды, магнетит и апатит, серпентинизация слабая [Цымбал и др., 1996; Лобач-Жученко и др., 2017в, 2018а,б]. Гарцбургит UR17/2 на контакте с эндербитом имеет узкую гибридную зону, сложенную ортопироксенитом [Лобач-Жученко и др., 2017в, 2018а]. Особенностью флогопитовых гарцбургитов ПГК является высокое содержание  $K_2O$ , в соответствии с чем они относятся к субщелочным ультраосновным породам. Они так же, как и часть ультрабазитов Голованевского домена, характеризуются повышенной железистостью ( $FeO > 8$  мас. %) и пониженной магнезиальностью ( $mg\# = 0.85—0.87$ ) в сравнении с составом архейской сублитосферной континентальной мантии [Pearson, Nowell, 2002; Carlson et al., 2005]. Определен U-Pb SHRIMP-II возраст циркона из фрагмента дайки UR17/2, равный  $2814 \pm 51$  млн лет (см. рис. 2, е).

Циркон содержит включения породообразующих минералов, указывающих на синхронность кристаллизации циркона с кристаллизацией ультрамафитового расплава [Лобач-Жученко и др., 2018б]. Ортопироксенит гибридной зоны имеет низкое значение  $\epsilon_{Nd}(2.8) = -7.8$ , которое соответствует изотопному составу Hf циркона ( $\epsilon_{Hf}(2.8)_{Zr}$  от  $-8.5$  до  $-10.7$  [Лобач-Жученко и др., 2017в]), что свидетельствует о контаминации ультраосновного расплава древним коровым материалом.

### НЕОАРХЕЙ САРМАТИИ. ЭТАП 2.8—2.5 МЛРД ЛЕТ

Этап неoarхея на территории Сарматии в целом был амагматичным и, в частности, базит-ультрабазитовый магматизм не зафиксирован, но выявлены отдельные проявления кислого магматизма: массив гранитов салтыковского комплекса ВКМ ( $2669 \pm 14$  млн лет) [Лобач-Жученко и др., 2017а], граниты Анновской зоны Приднепровья [Щербак и др., 2008] и калиевые риолиты Курской провинции ВКМ ( $2612 \pm 10$  млн лет) [Савко и др., 2015]. На присутствие неoarхейских пород в Сарматии указывают также детритовые цирконы в осадках Федоровской структуры Приазовья [Бибикова и др., 2012].

### ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ САРМАТИИ. ЭТАП 2.5—1.9 МЛРД ЛЕТ

Палеопротерозойский магматизм в Сарматском кратоне проявлен повсеместно, исключая Среднеприднепровскую провинцию УЩ. Характерными особенностями этого магматизма являются его приуроченность к узкому интервалу времени (2.14—1.93 млрд лет), синхронность базитового и гранитоидного магматизма и неравномерное проявление на территории кратона (см. рис. 1).

**Украинский щит.** В *Волынской провинции УЩ* (юго-запад кратона) базит-ультрабазитовый магматизм проявлен широко. Здесь выделяются два корообразующих этапа — 2.10—2.05 и 2.00—1.95 млрд лет [Shumlyansky et al., 2012], во время которых наряду с появлением гранитоидов происходило становление базитов и ультрабазитов. Они представлены вулканитами, интрузиями [Щербаков, 2005] и дайками [Elming et al., 2010]. Интрузии образуют серию штокообразных тел и многофазных массивов, из которых датированы массивы Букинский ( $1987 \pm 6$  млн лет) и Кишинский ( $1992 \pm 5$  млн лет) [Щербак и др., 2008]. Присутствуют интрузии и дайки щелочно-ультраосновного состава с возрастом 2.1—2.0 млрд лет. На западе провинции располагается того же возраста (2.1—2.0 млрд лет) Осницко-Миклашевичский магматический пояс [Claesson et al., 2001]. В этом поясе выделены две возрастные группы мафических даек — догранитные ( $> 2.0$  млрд лет) и постгранитные ( $< 2$  млрд лет) [Elming et al., 2010]. В центре Волынской провинции широко развиты субщелочные дайки, более древние, чем Коростенский плутон, имеющий возраст 1765 млн лет [Щербак и др., 2008; Омельченко, Митрохин, 2012].

Геологические события периода 2.1—1.9 млрд лет на юго-западе Сарматского кратона связываются с коллизией Сарматии и Фенноскандии [Shumlyansky et al., 2012]. Другие исследователи [Цымбал и др., 2011] рассматривают щелочно-ультраосновные породы этого времени как результат внедрения глубинных (порядка 140 км) мантийных магм, не связанных с коллизией.

Южнее, в *Днестровско-Бугской провинции*, базит-ультрабазитовый магматизм в палеопротерозое проявлен меньше и представлен главным образом дайками. Дайки юга этой провинции относятся к двум близким по возрасту, но разным сериям: (мета)базальтового и (мета)трахиандезитобазальтового составов [Степанюк и др., 2013]. В Одесском карьере метатрахиандезитобазальты образуют рой даек северо-восточного простирания при крутом до вертикального падении [Lobach-Zhuchenko et al., 2017].

Базальтовые дайки имеют толеитовый состав, трахиандезитобазальтовые — известково-щелочной. По соотношению  $\text{SiO}_2$  и  $\text{K}_2\text{O}$  [Le Maitre et al., 1989] трахиандезитобазальты принадлежат высоко-К породам; серии различаются содержанием и распределением РЗЭ [Степанюк и др., 2013]. Дайки обеих серий метаморфизованы в условиях гранулитовой фации [Степанюк и др., 2013; Lobach-Zhuchenko et al., 2017].

Дайки базальтового состава датированы по циркону, извлеченному из продукта селективного плавления вмещающего эндробита и проникающего в дайку (эффект Седерхольма). Этот факт предполагает внедрение даек в разогретые породы и их метаморфизм почти сразу же после их кристаллизации. Возраст циркона равен  $1993 \pm 2$  млн лет [Степанюк и др., 2013]. Время кристаллизации трахиандезитобазальтов определено по циркону, выделенному из двух даек, и равно  $1988 \pm 4$  млн лет [Степанюк и др., 2013]. Близкий возраст —  $2024 \pm 24$  млн лет [Степанюк и др., 2017] — имеет циркон из амфиболита в Капитанском массиве Голованевского домена. Геологические данные не противоречат предположению, что амфиболит представляет собой дайку, секущую ультрамафиты. В работе [Кривдик и др., 2003] описаны два массива щелочно-ультраосновных пород с карбонатитами с возрастом 2 млрд лет. Значительно шире в Днестровско-Бугской провинции проявлен гранитоидный магматизм. Возраст гранитоидов определен по циркону и монациту и лежит в интервале 2.06—1.95 млрд лет [Степанюк, 2000; Степанюк и др., 2013].

В *Ингульской и Рос-Тикичской провинциях*, как и на западе Днестровско-Бугской провинции, магматизм палеопротерозоя представлен в основном гранитоидами, а базит-ультрабазитовые породы развиты умеренно (см. рис. 1). Мафические породы в Ингульской провинции представлены габбро-монцонитами Новоукраинского массива с возрастом 2.04—2.03 млрд лет [Щербак и др., 2008]. Возраст гранитоидов Ингульской и Рос-Тикичской провинций ограничен интервалом 2.08—1.98 млрд лет [Степанюк, 1996, 2000; Щербак и др., 2008; Степанюк и др., 2017], более древний возраст 2.14 млрд лет получен для гранитов Звенигородского массива [Щербак и др., 1989].

В *Среднеприднепровской провинции* палеопротерозойский магматизм неизвестен. Датирована лишь одна дайка амфиболита, возраст которой составляет ~2 млрд лет [Elming et al., 2010].

В *Приазовской провинции* ультрабазитовый магматизм этого этапа развит в западной части провинции, представлен Черниговским щелочно-ультраосновным карбонатитовым массивом, имеющим возраст  $2090 \pm 47$  млн лет [Загнитко и др., 1993], и серией субщелочных ультраосновных пород — лампроитов [Раздорожный и др., 1999], одновременно с образованием которых 2.09—2.03 млрд л. н. имели место деформации, метаморфизм, становление гранитов и сиенитов [Щербак и др., 2008].

Щелочно-основной магматизм, развитый на востоке этой провинции, более молодой (<1.8 млрд лет) [Загнитко и др., 1993].

**Воронежский кристаллический массив.** В палеопротерозое территория ВКМ рассматривается как Восточно-Сарматский ороген, формирование которого определялось коллизией Сарматского и Волго-Уральского кратонов [Чернышов и др., 1997; Ненахов и др., 2007; Щипанский и др., 2007; Савко и др., 2017; Terentiev et al., 2017a]. На территории орогена палеопротерозойский магматизм, в том числе и базит-ультрабазитовый, проявлен во всех трех традиционно выделяемых блоках (здесь — провинциях): Курской (см. рис. 1), Воронцовской (или Хоперском блоке) и в разделяющих их Лосевской провинции (Липецко-Лосевский вулканоплутонический пояс или Лосевская шовная зона) [Чернышов и др., 1997; Ненахов и др., 2007; и др.].

В *Курской провинции* базит-ультрабазитовый магматизм представлен вулканитами, варьирующими по составу от пикритов до толеитов и субщелочных базальтов [Чернышов, 2004] и интрузивными образованиями, которые включают золотухинский и смородинский базит-гипербазитовые комплексы, стойло-николаевский габбро-диорит-гранодиоритовый комплекс и Дубравинский щелочно-ультраосновной (карбонатитовый) массив [Ненахов и др., 2007]. Интрузии золотухинского комплекса двухфазные. Состав первой фазы включает перидотиты, большей частью серпентиниты, и пироксениты. Вторая фаза представлена амфиболизированными габбро, габброноритами, габбро-долеритами. Определен возраст для метапироксенитов, соответствующий интервалу 2.11—2.07 млрд лет (см. доп. материалы, рис. 5, а). Возраст вмещающего плагиоклаз-актинолит-хлоритового сланца, часть циркона которого сохраняет архейский возраст, определен как 2.1 млрд лет (см. доп. материалы, рис. 5, б). Датированные образцы стойло-николаевского комплекса взяты из небольших изометричных интрузий первой фазы комплекса, сложенной метагаббро и метагабброноритами. Определен возраст циркона из габбронорита: 2068 и 2063 млн лет (см. доп. материалы, рис. 5, д, е). Силлы и дайки оливиновых габбро-долеритов смородинского комплекса, секущие породы золотухинского и стойло-николаевского комплексов, менее метаморфизованы, сложены лабрадор-битовнитом, титан-авгитом, диопсидом, серпентинизированным оливином (до 5 %). Возраст определен как 2.06—2.05 млрд лет (см. доп. материалы, рис. 5, в, г). Дубравинский щелочно-ультраосновной (карбонатитовый) массив имеет конкордантный U-Pb возраст апатита 2.07 млрд лет [Альбеков и др., 2017]. Синхронно с базит-ультрабазитовыми породами и карбонатитами в Курской провинции формировались граниты (см. рис. 1), в том числе атаманского ( $2059 \pm 35$  млн лет),

малиновского, шебекинского ( $2042 \pm 45$  млн лет) и лискинского ( $2070 \pm 6$  млн лет) комплексов (Информационный ресурс Изотопного центра ВСЕГЕИ «Геохронологическая карта РФ»). Многие как основные, так и кислые породы этих комплексов содержат архейские ксеногенные цирконы [Лобач-Жученко и др., 2017a] и имеют отрицательные величины  $\epsilon_{Nd}$  [Бойко и др., 2014]. Таким образом, в Курской провинции синхронно имело место становление базит-ультрабазитовых ( $2.10\text{—}2.05$  млрд лет), щелочно-ультраосновных ( $2.07$  млрд лет) и гранитоидных ( $2.07\text{—}2.04$  млрд лет) комплексов.

В *Воронцовской провинции* базит-ультрабазитовый магматизм представлен сульфидным медно-никелевым мамонским перидотит-габброноритовым, никеленосным еланским и троктолит-габбродоле-ритовым новогольским комплексами. Мамонский комплекс сложен серпентинизированными дунитами, гарцбургитами, лерцолитами, амфиболовыми габброноритами [Ненахов и др., 2007].

Возраст циркона из Большемартыновского массива мамонского комплекса равен  $2.08$  и  $1.98$  млрд лет [Лохов и др., 2009]. Такой же возраст ( $2080 \pm 15$  млн лет) получен ранее методом TIMS для циркона из мамонского комплекса для Еланского массива [Чернышов и др., 1990]. Возраст циркона из норита еланского комплекса равен  $2071 \pm 6$  млн лет, а гранодиорита —  $2084 \pm 9$  млн лет (см. рис. 5, ж; доп. материалы). Для циркона из Новомеловатского массива, сходного с еланским комплексом, получен возраст  $2052 \pm 10$  (1-я фаза) и  $2057 \pm 12$  млн лет (2-я фаза) [Кременецкий и др., 2006]. Андезитобазальты из Калачского грабена, расположенного в Воронцовской провинции, имеют возраст  $2050 \pm 11$  млн лет [Терентьев, Скрябин, 2014]. Из приведенных данных следует, что в Воронцовской провинции в интервале  $2.08\text{—}2.05$  млрд лет одновременно имели место проявления габброперидотитового и габброноритового магматизма, и в том же интервале ( $2.07\text{—}2.05$  млрд лет) происходило становление гранитов [Савко и др., 2014].

Ультрабазиты-базиты мамонского комплекса образуют мелкие и крупные сложнопостроенные массивы. Датированный Большемартыновский массив этого комплекса включает в себя серпентинизированные дуниты, гарцбургиты и лерцолиты, оливиновые пироксениты, горнблендиты, роговообманковые перидотиты, пироксениты, габбро, габбронориты, габбро-диориты и диориты; массив с юга окаймляется зоной брекчирования. Еланский комплекс также представлен многочисленными небольшими интрузиями, сложенными неупорядоченным чередованием варьирующих по мафичности норитов и диоритов, а также гранодиоритов и тоналитов, фиксируемыми на поверхности [Плаксенко, 1991; Терентьев, Савко, 2016] и в разрезе (Новомеловатская интрузия, вскрытая Воронежской параметрической скважиной) [Кременецкий и др., 2006; Терентьев, 2015]. Особенностью строения пород еланского комплекса является их минералогическая неординарность и неоднородность (сочетание оливина и ортоклаза, значительные вариации железистости оливина и ортопироксена в одной породе), а также присутствие пород — от меланоритов до тоналитов в пределах одного небольшого тела, например, в массиве Елка площадью  $\sim 10$  км<sup>2</sup> [Терентьев, Савко, 2016]. Для интрузий характерно присутствие многочисленных ксенолитов, в том числе ультраосновного состава [Гирнис, 1991; Кременецкий и др., 2006; Терентьев, 2015]. Особенностью химического состава ультрамафитов, принимающих участие в строении массивов, является сочетание высокой магнезиальности с повышенной общей железистостью и щелочностью [Ненахов и др., 2007].

*Лосевская провинция*, расположенная между Курской и Воронцовской провинциями, сложена палеопротерозойской лосевской серией, в которой располагаются интрузии мафитов рождественского комплекса. Южная часть зоны занята донской серией архейского возраста [Терентьев, 2016]. Возраст базитов лосевской серии определен как  $2.05$  млрд лет [Терентьев, Скрябин, 2014]. Возраст  $2.18$  млрд лет получен для метаплагиориолита этой серии [Терентьев и др., 2014]. Возраст Рогачевского массива (линза габбронорита в амфиболитах) рождественского комплекса равен  $2.13$  млрд лет (см. доп. материалы, рис. 5, з). Породы лосевской серии и интрузии рождественского комплекса прорваны усманскими и павловскими гранитоидами. Циркон из трех проб мигматитов павловского комплекса имеет возраст  $2070 \pm 10$ ,  $2070 \pm 5$  и  $2074 \pm 9$  млн лет (Информационный ресурс Изотопного центра ВСЕГЕИ «Геохронологическая карта РФ»). На породах лосевской серии и прорывающих ее гранитах в центре провинции залегает воронежская толща конгломератов, гравелитов, вулканомиктовых песчаников, сланцев с прослоями вулканитов. Формирование воронежской свиты относится к этапу «постколлизии коллапса» и датируется как  $\sim 2065$  млн лет [Савко и др., 2014; Terentiev et al., 2016a,b, 2017b]. По геофизическим данным, для области развития воронежских отложений характерны кольцевые, изометрично-округлые структуры, рассматриваемые как вулканы центрального типа [Бондаренко, 2009]. В поле развития воронежской свиты расположена Ольховская кольцевая интрузия, возраст внешнего диорит-монцитонитового кольца которой  $2077$  млн лет, а внутреннего трондьемитового —  $2044$  млн лет [Terentiev et al., 2017a]. К югу от Ольховской кольцевой интрузии располагается Байгоровская вулканоплутоническая структура [Terentiev et al., 2016a], которая представляет собой кальдеру размером  $10$  км. Ее внешнее кольцевое обрамление сложено вулканогенными породами, а в центральной части расположена интрузия гранитоидов. На востоке разрез этой структуры представлен эффузивными и пирокластическими

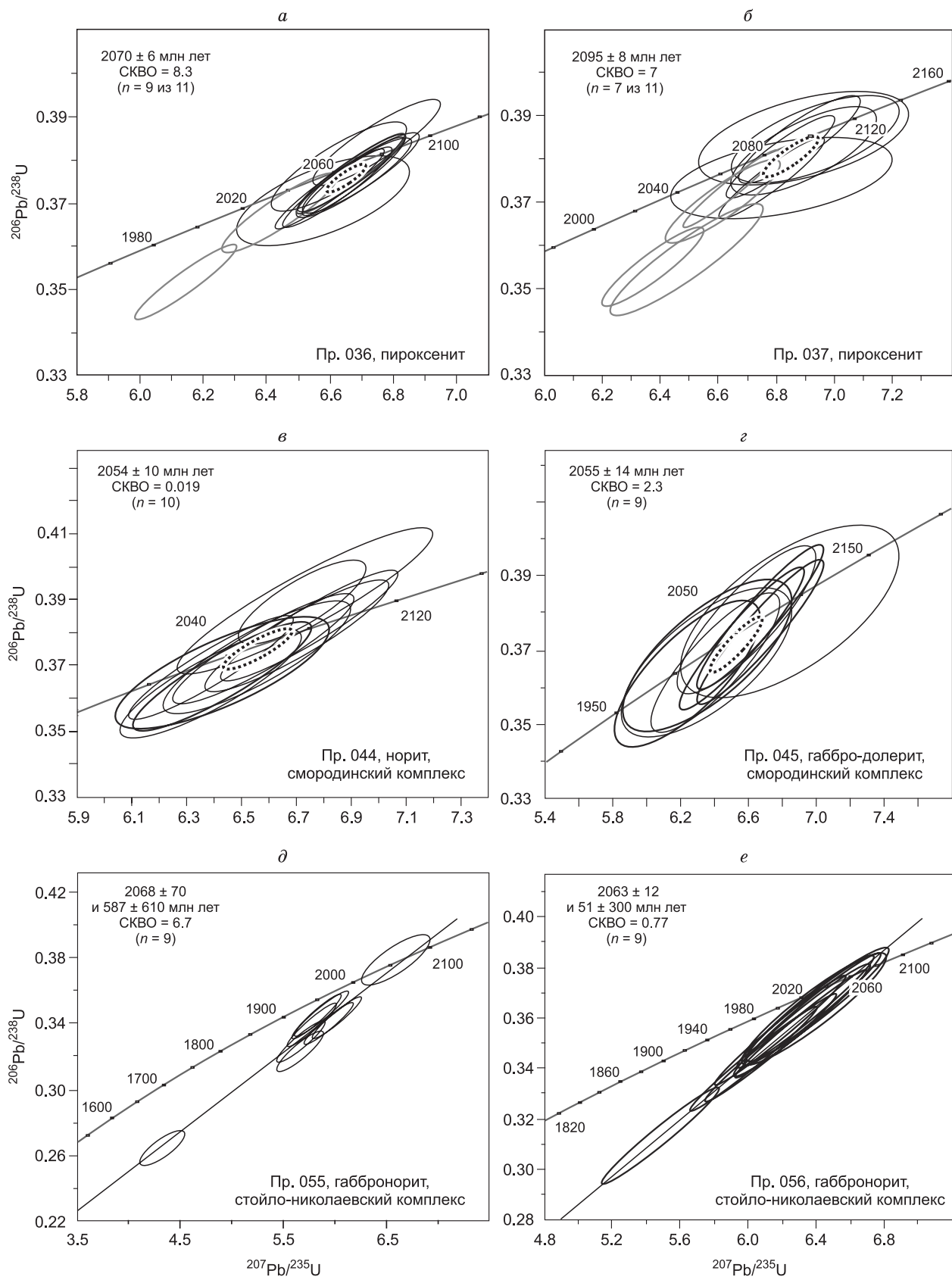
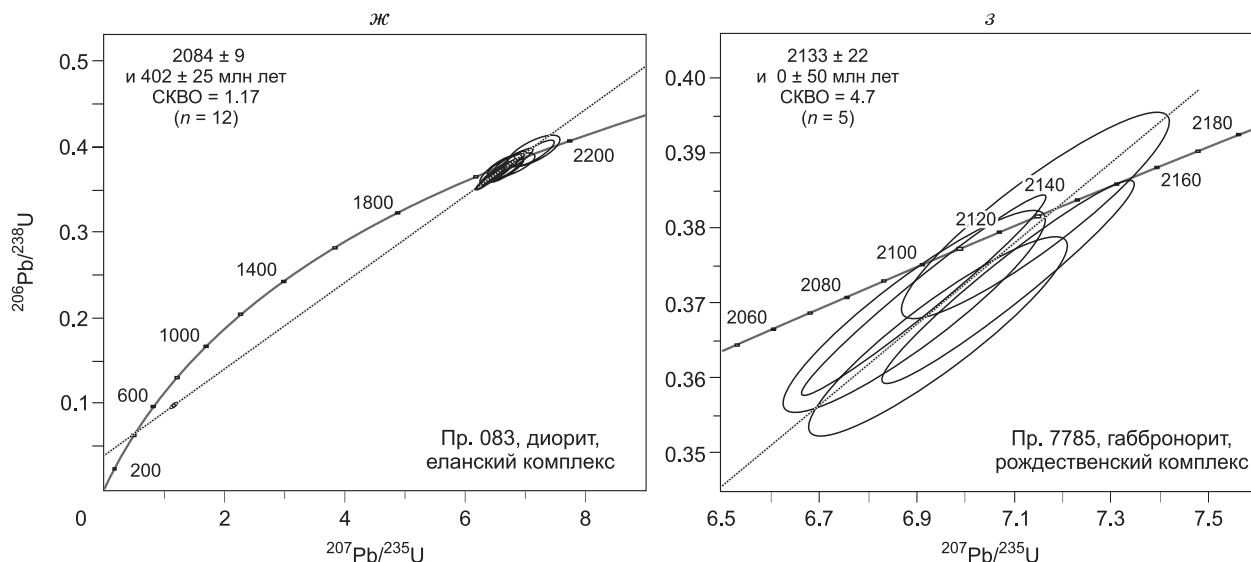


Рис. 5. (Начало).





**Рис. 5. Диаграммы с конкордией (U-Pb SHRIMP-II) для циркона из базит-ультрабазитовых пород палеопротерозоя Воронежского массива.**

*а, б* — пироксениты, золотухинский комплекс, *в* — норит, смородинский комплекс, *г* — габбро-долерит, смородинский комплекс, *д, е* — габбронориты, стойло-николаевский комплекс, *ж* — гранодиорит, еланский комплекс, *з* — габбронорит, рождественский комплекс.

породами, дайками и субвулканическими телами основного состава [Бондаренко, 2009]. Определен возраст андезитобазальта данной постройки, который равен 2047—2040 млн лет; в пробе присутствует ксеногенный циркон с возрастом  $2909 \pm 13$  млн лет [Terentiev et al., 2016a]. В соответствии с этими данными в Лосевской провинции датируются два этапа магматизма: ~2.20—2.15 млрд лет — образование бимодальной вулканической лосевской серии, мигматитов и тоналитов и 2.07—2.05 млрд лет — проявление мафического магматизма, мигматизация, граниты в Лосевской зоне, а также формирование воронежской свиты и многофазных кольцевых структур. Первый этап в геодинамических построениях относится к коллизионному этапу, магматизм второго периода — к постколлизионному магматизму.

Из геохронологических данных следует, что основной объем базитовых интрузий и гранитоидный магматизм во всех трех провинциях Восточно-Сарматского орогена — Курской, Лосевской и Воронцовской — происходили одновременно в интервале 2.07—2.04 млрд лет.

### ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ БАЗИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВОГО МАГМАТИЗМА РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ САРМАТИИ

Базит-ультрабазитовый магматизм в Сарматии зафиксирован начиная с границы эо- и палеоархея и далее на протяжении архея и раннего протерозоя. Реликты древнейших базитов-ультрабазитов и тоналитов установлены в областях мезо- и неархейской тектонической переработки в Курской, Приазовской и Днестровско-Бугской провинциях. В Днестровско-Бугской провинции палеоархейские базиты и ультрабазиты располагаются в гнейсоэндербитах с возрастом ~3.75 млрд лет [Claesson et al., 2015], в Курской провинции реликты базитов находятся среди обоянского комплекса ортогнейсов с возрастом 3.55—3.50 млрд лет [Лобач-Жученко и др., 2017а], а в Приазовской провинции пироксениты располагаются среди близких по возрасту тоналитов с возрастом 3.65 млрд лет [Bibikova, Williams, 1990; Lobach-Zhuchenko et al., 2014]. Реликты древнейших метавулканитов Днестровско-Бугской провинции несут следы контаминации коровым материалом и характеризуются сопряженностью со зрелыми осадками, аналогично древнейшим вулканитам формации Варавуна блока Пилбара в Австралии.

Мезоархейский базит-ультрабазитовый магматизм в период 3.2—3.0 млрд лет развит во всех провинциях Сарматии. Главной особенностью этого этапа является формирование зеленокаменных поясов в условиях рифтогенеза континентальной коры, которое сопровождалось контаминацией корового материала, что происходило, по мнению ряда исследователей, под влиянием плюмов [Чернышов и др., 1997, 2014; Ненахов и др., 2007; Бибикина и др., 2008].

Базит-ультрабазитовый магматизм позднего мезоархея проявлен также на всей территории Сарматии, но был значительно менее интенсивен. Он отделен, за исключением Среднеприднепровской про-

винции, где продолжались излияния лав и формирование 2-й генерации зеленокаменных поясов, от более древних ультрамафитов периодом структурно-метаморфической переработки ~3 млрд л. н. Характерной особенностью ультрамафитов этого периода является широкое развитие интрузивных высокомагнезиальных, обогащенных железом и щелочами пород, мафические члены которых представлены норитами и габброноритами. Базит-ультрабазитовый магматизм Сарматии в позднем мезоархее отличается от магматизма другого фрагмента фундамента Восточно-Европейской платформы — Фенноскандинавии, где в интервале 3.0–2.7 млрд лет была образована преобладающая часть коматиит-базальтовых серий зеленокаменных поясов.

Строение Сарматского кратона, в котором Среднеприднепровская провинция, сложенная мезоархейскими породами, находится в центре кратона и окружена более древними комплексами, имеет аналогию со строением Фенноскандинавского щита, где выделяется Центральнo-Карельский домен — фрагмент неархейской коры — окруженный террейнами с реликтами мезо- и палеоархейских пород [Лобач-Жученко и др., 2000; Чекулаев и др., 2009, 2018]. С.В. Богдановой с соавторами [Bogdanova et al., 2016] высказаны два предположения о тектоническом строении УЩ и положении Среднеприднепровской прокинции: формирование Среднеприднепровского блока соединило две независимо развивавшиеся территории — западную часть щита и Приазовье, второе предположение — формирование Среднеприднепровской провинции произошло после раздвига в мезоархее ранее единой плиты. Черты сходства геологических событий и базит-ультрабазитового магматизма в палеоархее Приазовской и Днестровско-Бугской провинций свидетельствуют о большей вероятности второй модели. Характер базит-ультрабазитового магматизма на территории Сарматии в мезоархее поддерживает точку зрения о существовании инертной (stagnant) оболочки, которая нарушалась внедрением мантийных магм [Bedard, 2018].

Последующий активный базит-ультрабазитовый магматизм в Сарматии происходил после длительного перерыва, в палеопротерозое (см. рис. 1) основная часть магматической активности приходится на интервал 2.09—2.05 млрд лет, что существенно отличает геологическую историю Сарматии от северной части фундамента Восточно-Европейской платформы — Фенноскандии, что отмечалось ранее [Турченко, 2014]. Магматизм этапа 2.09—2.05 на территории ВКМ связывается с постколлизийным растяжением, т. е. коллапсом Восточно-Сарматского орогена [Савко и др., 2014; Терентьев, Савко, 2016]. В то же время следующие особенности магматизма этого периода могут указывать на более сложный механизм, обусловивший его проявление: 1) одновременное внедрение в провинциях ВКМ разноглубинных пород — от мантийных муассанитсодержащих базальтов и габброноритов [Чернышов и др., 1978] до коровых гранитоидов; 2) синхронное внедрение двух типов базит-ультрабазитовых серий: перидотит-габбровой и перидотит-норитовой, сходных с «А» и «U» типами магм, различающихся источниками [Barnes, Naldrett, 1986]. С породами норитовой серии связано в Сарматии никелевое сульфидное оруденение, для которого предположен «садберийский» механизм формирования сульфидных руд [Чернышов, 1985]; 3) нориты, характеризующиеся повышенной магнезиальностью, обогащенные железом при одновременной повышенной кремнекислотности и обогащении щелочами и LILE, представляют особый тип магматических пород, для которых установлено размещение в условиях платформенного режима [Hall, Hughes, 1991]; 4) присутствие многочисленных мелких интрузий с гетерогенным составом — от перидотитов и оливиновых и оливин-ортоклазовых габброноритов и норитов до лейконоритов-гранодиоритов-тоналитов в пределах одного массива. Подобные вариации составов в небольшом объеме возникают при высокотемпературном хаотичном смешении и хаотичной динамике различных по составу пород [De Campos et al., 2011]; 4) разнообразие составов пород в узком интервале времени: базальты, андезиты, дациты, вулканические брекчии, породы дунит-перидотит-габброноритовой и ортопироксенит-норит-диоритовой формаций [Чернышов и др., 1990], граниты, аплиты, сиениты, гранодиориты, щелочно-ультраосновные породы и карбонатиты; 5) разнообразие геологических форм: многофазные и расслоенные массивы, кольцевые интрузии, дайки, силлы, лавы, вулканические и интрузивные брекчии; 6) размещение гранитов этого возраста на площади Сарматского кратона много превышает территорию Восточно-Сарматского орогена. Отметим, что в целом указанные характеристики палеопротерозойского магматизма Сарматии не типичны для постколлизийного магматизма: более вероятным механизмом мог быть магматизм над зонами «mantle overturns», по [Bedard, 2018]. Развитие норитов, типичных для импактных расплавов комплекса Садбери и других [Koeberl et al., 2012], и ряд геохимических характеристик норитов, сходных с KREEP — базальтами Луны, а также с экспериментальными составами, полученными при плавлении при скоростном ударе [Яковлев, Люль, 1992], совместно с другими отмеченными особенностями магматизма этого периода дают основание предполагать возможную роль импакта как триггера магматизма. Принципиальная вероятность этого предположения поддерживается работами Д. Аббота и А. Исли [Abbot, Isley, 2002], в которых показана синхронность проявления плюмов и импактов на Земле, рассмотрены возможные типы влияния импактов

от образования трещин — подводящих каналов для плюмов до нарушения температурного режима в слое D<sup>11</sup>, обуславливающего их возникновение.

## ВЫВОДЫ

1. Базит-ультрабазитовый магматизм на территории Сарматии проявлен с разной интенсивностью от палеоархея до палеопротерозоя за исключением периода от неоархея (< 2.5 млрд лет) до раннего палеопротерозоя (до ~ 2.2 млрд лет). Отсутствие ювенильного магматизма в неоархее—раннем палеопротерозое отличает Сарматский кратон от кратонов Фенноскандии и ряда других кратонов.

2. Возраст метавулканитов побужского комплекса Сарматии фиксирует древнейший базит-ультрабазитовый магматизм на территории фундамента Восточно-Европейской платформы.

3. Впервые на Сарматском кратоне описаны и датированы ультрамафиты, сформированные в палеоархее на этапе 3.4—3.2 млрд л. н.

4. В раннем мезоархее на территории Сарматии, в провинциях УЩ и в Курской провинции ВКМ, имело место излияние коматиит-базальтовых лав и формирование гранит-зеленокаменных областей. В конце мезоархея мантийный магматизм носил локальный характер, а наиболее мощный магматизм происходил на юго-западе Сарматии, в Голованевском домене.

5. Особенностью состава многих базит-ультрабазитовых комплексов Сарматии является повышенная железистость и развитие пород норитовой формации.

6. Источником базит-ультрабазитовых пород архея Сарматии являются плюмы, производные которых формируются в пределах нижней и верхней мантии и/или верхней мантии и коры, что обуславливает гетерогенность состава магматических образований.

Авторы выражают искреннюю благодарность В.В. Балаганскому за вклад в изучение геологии днестровско-бугского комплекса, а также за внимательное прочтение рукописи, многочисленные комментарии и обсуждение дискуссионных вопросов. С признательностью авторы благодарят рецензентов за весьма ценные замечания и поставленные вопросы, работа над которыми значительно улучшила содержание рукописи.

Работа выполнена за счет финансирования темы НИР ИГГД РАН (FMUW-2022-0002) Минобрнауки России.

## ЛИТЕРАТУРА

**Альбеков А.Ю., Чернышов Н.М., Рыборак М.В., Кузнецов В.С., Сальникова Е.Б., Холин В.М.** Изотопный U-Pb возраст апатитоносных карбонатитов Курского блока Воронежского кристаллического массива (Центральная Россия) // ДАН, 2017, т. 473, № 3, с. 320—321.

**Анциферов А.В., Шерemet Е.М., Глевасский Е.Б., Кулик С.Н., Есипчук К.Е., Пигулевский П.И., Кривдик С.Г., Бурахович Т.К., Анциферов В.А., Сетая Л.Д., Николаев Ю.И., Николаев И.Ю., Цымбал С.Н., Клочков В.М., Шварц Г.А., Безвинный В.П., Гаценко В.А.** Геолого-геофизическая модель Голованевской шовной зоны Украинского щита. Донецк, Вебер (Донецкое отделение), 2008, 308 с.

**Артеменко Г.В., Самборская И.А., Демидюк В.В.** Геохимическая характеристика метабазитов коматиит-базальтовой ассоциации зеленокаменных структур Приазовского и Среднеприднепровского мегаблоков УЩ // Минералогический журнал, 2009, вып. 31, № 4, с. 60—68.

**Балтыбаев Ш.К., Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Юрченко А.В., Егорова Ю.С., Богомоллов Е.С.** Возраст и метаморфизм кристаллосланцев побужского гранулитового комплекса Украинского щита — древнейших вулканитов фундамента Восточно-Европейской платформы // Региональная геология и металлогения, 2014, № 58, с. 33—44.

**Белевцев Г.И., Белевцев Я.Н., Гречишников Н.П., Дроздовская А.А., Занкевич Б.А., Ивантишина О.М., Каляев Г.И., Коваль В.Б., Коржнев М.Н., Крятов Б.М., Кулик Д.А., Кушеев В.В., Лазько Е.М., Науменко В.В., Пирогов Б.И., Плаксенко Н.А., Савченко Л.Т., Сиворонов А.А., Стебновская Ю.М., Черновский М.И., Щеголев И.Н., Щербак Н.П., Ярошук М.А.** Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Железонакопление в докембрии. Киев, Наук. думка, 1992, 236 с.

**Бибикова Е.В., Лобач-Жученко С.Б., Артеменко Г.В., Клаэссон С., Коваленко А.В., Крылов И.Н.** Позднеархейские магматические комплексы Приазовского террейна Украинского щита: геологическое положение, изотопный возраст, источники вещества // Петрология, 2008, т. 16, № 3, с. 227—247.

**Бибикова Е.В., Федотова А.А., Клаэссон С., Артеменко Г.В., Аносова М.О.** Ранняя кора Приазовского домена Украинского щита: изотопно-геохронологическое и геохимическое изучение терригенных цирконов метаосадочных пород федоровской структуры // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2012, т. 20, № 2, с. 1—14.

**Бойко П.С., Альбеков А. Ю., Рыборак М.В.** Петролого-геохимические особенности габброидов золотухинского комплекса Курского блока ВКМ как индикаторы геодинамической обстановки его формирования // Вестник ВГУ, Серия геология, 2014, № 1, с. 47—53.

**Бондаренко С.В.** Геология, вещественный состав и палеогеодинамическая природа воронежской свиты и сопряженных с ней комплексов (Воронежский кристаллический массив): Автореф. дис.... к.г.-м.н. Саратов, Саратовский гос. университет, 2009, 18 с.

**Бочаров В.Л., Фролов С.М.** Апатитоносные карбонатиты КМА. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1993, 123 с.

**Бухарев В.П.** Квазикратонный гипербазитовый магматизм позднего архея Украинского щита (Среднее Побужье) // Геологический журнал, 1991, № 6, с. 92—99.

**Гирнис А.В., Плаксенко А.Н., Рябчиков И.Д., Саддэби П.** Геохимические особенности ультрамафических ксенолитов из норитовых интрузий Воронежского кристаллического массива // Геохимия, 1991, № 4, с. 451—460.

**Егорова Ю.С., Лобач-Жученко С.Б., Адамская Е.В., Богомолов Е.С., Каулина Т.В., Сергеев С.А.** Изотопный состав Hf циркона архейского метабазальта (мафического гранулита), побужский комплекс, Украинский щит // Расширенные тезисы докладов XXII симпозиума по геохимии изотопов им. ак. А.П. Виноградова. М., 2019, с. 168—174.

**Есипчук К.Ю., Бобров А.Б., Степанюк Л.М., Щербак М.П., Глеваський Э.Б., Скобелев В.М., Дранник А.С., Гейченко М.В.** Корреляционная хроностратиграфическая схема раннего докембрия Украинского щита. Киев, Южукргеология, 2004, 37 с.

**Загнитко В.Н., Кривдик С.Г., Легкова Г.В., Бартницкий Е.Н.** Геохронология, петрология и рудоносность щелочных массивов Украинского щита // Изотопное датирование эндогенных рудных формаций. М., Наука, 1993, с. 27—38.

**Костицын Ю.А.** Sm-Nd и Lu-Hf системы Земли: отвечают ли они хондритам? // Петрология, 2004, т. 12, № 5, с. 451—466.

**Кременецкий А.А., Скрыбин В.Ю., Терентьев Р.А., Полякова Т.Н., Ненахов В.М., Золотарева Г.А., Ларионов А.Н.** Воронежская параметрическая скважина — новый этап познания глубинного строения коры ВКМ // Разведка и охрана недр, 2006, № 9—10, с. 109—117.

**Крестин Е.М.** Строение и потенциальная рудоносность архейских зеленокаменных поясов Курско-Воронежского кристаллического массива // Докембрийские троговые структуры Байкало-Амурского региона и их металлогения. Материалы совещ. (Новосибирск, 19—21 апр., 1983). Новосибирск, 1985, с. 170—176.

**Кривдик С.Г., Безсмолова Н.В., Дубина А.В.** Щелочной магматизм Приазовья // Научные труды научно-исследовательского маркшейдерского института НАН Украины, 2003, № 5, с. 158—161.

**Криволюцкая Н.А.** Эволюция траппового магматизма и Pt-Cu-Ni рудообразование в Норильском районе. М., 2014, 305 с.

**Лесная И.М.** Геохронология чарнокитоидов Побужья. Киев, Наук. думка, 1988, 136 с.

**Лобач-Жученко С.Б., Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Левский Л.К., Коваленко А.В.** Архейские террейны Карелии: их геологическое и изотопно-геохимическое обоснование // Геотектоника, 2000, № 6, с. 26—42.

**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., Богомолов Е.С.** Этапы формирования побужского гранулитового комплекса по данным изотопно-геохронологических исследований (Среднее Побужье, Украинский щит) // Минералогический журнал, 2013, т. 35, № 4, с. 86—98.

**Лобач-Жученко С.Б., Арестова Н.А., Вревский А.Б., Егорова Ю.С., Балтыбаев Ш.К., Балаганский В.В., Богомолов Е.С., Степанюк Л.М., Юрченко А.В.** Происхождение кристаллосланцев побужского гранулитового комплекса Украинского щита // Региональная геология и металлогения, 2014а, № 59, с. 15—27.

**Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Артеменко Г.В., Богомолов 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, 2014б, № 5, с. 406—423.

**Лобач-Жученко С.Б., Рыборак М.В., Салтыкова Т.Е., Сергеев С.А., Лохов К.И., Боброва Е.М., Сукач В.В., Скублов С.Г., Бережная Н.Г., Альбеков А.Ю.** Формирование континентальной коры Саматии в архее // Геология и геофизика, 2017а, т. 58 (12), с. 1886—1914.

**Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Корешкова М.Ю., Лохов К.И., Балтыбаев Ш.К., Степанюк Л.М., Егорова Ю.С., Сергеев С.А., Капитонов И.Н., Галанкина О.Л., Богомолов Е.С., Бе-**



- режная Н.Г., Сукач В.В.** Палеоархейские ортопироксениты Побужской гранулитогнейсовой области Украинского щита // ДАН, 2017б, т. 474, № 6, с. 731—736.
- Лобач-Жученко С.Б., Балтыбаев Ш.К., Глебовицкий В.А., Сергеев С.А., Лохов К.И., Егорова Ю.С., Балаганский В.В., Скублов С.Г., Галанкина О.Л., Степанюк Л.М.** U-Pb-SHRIMP-II-возраст и происхождение циркона из лерцолита побужского палеоархейского комплекса (Украинский щит) // ДАН, 2017в, т. 477, № 5, с. 567—571.
- Лобач-Жученко С.Б., Егорова Ю.С., Балтыбаев Ш.К., Балаганский В.В., Степанюк Л.М., Юрченко А.В., Галанкина О.Л., Богомолов Е.С., Сукач В.В.** Перидотиты в палеоархейских ортогнейсах Побужской гранулитогнейсовой области Украинского щита: геологическое положение, особенности состава, генезис // Эволюция вещественного и изотопного состава докембрийской литосферы / Под ред. В.А. Глебовицкого, Ш.К. Балтыбаева. СПб, Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений. 2018а, с. 164—192.
- Лобач-Жученко С.Б., Скублов С.Г., Егорова Ю.С., Прищепенко Д.В., Галанкина О.Л.** Особенности строения и состава циркона из включения гарцбургита в побужском комплексе Украинского щита // Зап. РМО, 2018б, ч. CVLVII, № 6, с. 22—40.
- Лобач-Жученко С.Б., Каулина Т.В., Марин Ю.Б., Юрченко А.В., Скублов С.Г., Егорова Ю.С., Галанкина О.Л., Сергеев С.А.** Палеоархейский U-Pb (SIMS SHRIMP II) возраст мафических гранулитов побужского комплекса Украинского щита // ДАН, 2019, т. 484, ч. 1, с. 101—104.
- Лохов К.И., Салтыкова Т.Е., Капитонов И.Н., Богомолов Е.С., Шевченко С.С., Сергеев С.А.** Корректная интерпретация U-Pb возраста по цирконам на основе изотопной геохимии гафния и неодима (на примере некоторых магматических комплексов фундамента Восточно-Европейской платформы) // Региональная геология и металлогения, 2009, № 38, с. 62—72.
- Насад А.Г., Пигулевский П.И., Кичурчак В.М., Берзенин Б.З.** К вопросу комплексирования геофизических материалов при построении среднemasштабных карт докембрийских образований (на примере Среднеприднепровского и Приазовского геоблоков УЩ) // Регіональні геологічні Дослідження в Україні і питання створення Держгеолкапти-200. Тез. допов. I Наук.- виробн. Народи геологів-зйомщиків (17—22 верес., м. Гурзуф). Киев, 2001, с. 64—66.
- Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Трегуб А.И., Холин В.М., Шабалин М.И.** Минерагенические исследования территорий с двухъярусным строением на примере Воронежского кристаллического массива. М., Геокарт, ГЕОС, 2007, 284 с.
- Омельченко А., Митрохин А.** Возрастные группы субщелочных базитовых даек восточной части Волынского мегаблока Украинского щита // Геолог Украины, 2012, № 3(39), с. 56—65.
- Плаксенко А.Н.** Ультрамафические ксенолиты в докембрийских норитах Воронежского кристаллического массива // Геология и геофизика, 1991 (12), с. 57—66.
- Раздорожный В.Ф., Кривдик С.Г., Цымбал С.Н.** Калиевые ультрабазиты Западного Приазовья — аналоги лампроитов // Минералогический журнал, 1999, т. 21, № 2, с. 79—96.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н., Ларионова Ю.О., Базиков Н.С.** Палеопротерозойские граниты A- и S-типов востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования // Петрология, 2014, т. 22, № 3, с. 235—264.
- Савко К.А., Холина Н.В., Холин В.М., Ларионов А.М.** Возраст неоархейских ультракалиевых риолитов — важный геохронологический репер эволюции раннедокембрийской коры Воронежского кристаллического массива // Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии. СПб, Изд-во Springer, 2015, с. 247—249.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С.** Мегаблок Сарматия как осколок суперконтинента Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2017, т. 25, № 2, с. 3—26.
- Самборская И.А.** Геохимия расслоенных магматических пород Александровской интрузии (Среднеприднепровский мегаблок Украинского щита). Автореф. дис.... к.г.-м.н. Институт геохимии, минералогии и рудообразования АН Украины, 2008, 20 с.
- Степанюк Л.М.** Кристаллогенезис и возраст цирконов из пород мафит-ультрамафитовой ассоциации Среднего Побужья // Минералогический журнал, 1996, т. 18, № 4, с. 10—19.
- Степанюк Л.М.** Геохронология докембрия западной части Украинского щита (архей—палеопротерозой): Автореф. дис.... д.г.-м.н. Киев, 2000, 34 с.
- Степанюк Л.М., Гаценко В.А., Лобач-Жученко С.Б., Балаганский В.В., Балтыбаев Ш.К., Довбуш Т.И., Юрченко А.В.** Калиевые мафитовые дайки побужского гранулитового комплекса: геологическое положение, вещественный состав, петрогенезис, возраст // Минералогический журнал, 2013, т. 35, № 3, с. 73—82.

**Степанюк Л.М., Бобров А.Б., Курило С.И., Сергеев С.А., Ларионов А.Х.** Изотопный возраст циркона Капитанского массива, Среднее Побужье, Украинский щит // Минеральные ресурсы Украины, 2017, № 3, с. 27—31.

**Структура** земной коры Центральной и Восточной Европы по данным геофизических исследований / Под ред. В. Сологуба, А. Гутерхи, Д. Просены. Киев, Наук. думка, 1980, 206 с.

**Сукач В.В.** Петрология Среднеприднепровского кратона: Автореф. дис.... д.г.-м.н., Киев. Институт геохимии, минералогии и рудообразования АН Украины, 2008, 44 с.

**Сукач В.В.** Мезоархейские зеленокаменные структуры Среднего Приднепровья Украинского щита: стратиграфические разрезы, вещественный состав и возрастная корреляция // Минералогический журнал, 2014, т. 36, № 2, с. 76—91.

**Терентьев Р.А.** Природа ксенолитов из Новомеловатской интрузии Воронежского кристаллического массива // Геохимия, 2015, № 12, с. 1069—1093.

**Терентьев Р.А., Скрябин В.Ю.** Калачская постколлизийная структура Воронежского кристаллического массива // Труды ВГУ, 2014, Серия геология, т. 3, с. 14—34.

**Терентьев Р.А., Савко К.А.** Высокомагнезиальные низкотитанистые габбро-гранитные серии в палеопротерозое Восточной Сарматии: геохимия и условия формирования // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (6), с. 1155—1183.

**Терентьев Р.А., Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н.** Геохронология и геохимия кислых метавулканитов лосевской серии Воронежского кристаллического массива // ДАН, 2014, т. 454, № 5, с. 575—578.

**Турченко С.И.** Раннедокембрийская геология и металлогения Украинского щита — корреляция с Балтийским щитом // Региональная геология и металлогения, 2014, т. 60, № 6, с. 60—78.

**Фомин А.Б.** Геохимия гипербазитов Украинского щита. Киев, Наук. думка, 1984, 232 с.

**Фомин А.Б., Каневский А.Я.** О металлоносности ультраосновных пород Первомайско-Голованевского синклинали // Докл. АН УССР, сер. Б, 1975, № 12, с. 1091—1095.

**Фомин О.Б., Егоров О.С., Когут К.В.** О коматиитах Украинского щита // Докл. АН УССР, сер. Б, 1980, № 2, с. 33—37.

**Цымбал С.Н., Каневский А.Я., Кривдик С.Г.** Ультрамафиты Немировской интрузии (Украинский щит) // Минералогический журнал, 1996, т. 18, № 1, с. 39—47.

**Цымбал С.Н., Степанюк Л.М., Цымбал Ю.С., Гейко Ю.В.** Возраст щелочно-ультраосновных пород Болярковской интрузии (северо-западная часть Украинского щита) // Минералогический журнал, 2011, т. 33, № 2, с. 66—71.

**Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Лобач-Жученко С.Б., Сергеев С.А.** Возраст даек в древних тоналитах Водлозерского террейна — ключ к эволюции базитового магматизма в архее Фенноскандинавского щита // ДАН, 2009, т. 428, № 4, с. 508—510.

**Чекулаев В.П., Арестова Н.А., Егорова Ю.С., Кучеровский Г.А.** Изменение условий формирования континентальной коры Карельской провинции Балтийского щита при переходе от мезо- к неогархею: результаты геохимических исследований // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2018, т. 26, № 3, с. 3—23.

**Чернышов Н.М.** Новый тип сульфидного никелевого оруденения Воронежского кристаллического массива // Геология рудных месторождений, 1985, № 3, с. 34—35.

**Чернышов Н.М., Ненахов В.М.** Главнейшие типы геодинамических и минерагенических рядов в общей модели формирования докембрийской литосферы (на примере ВКМ) // Вестник ВГУ, серия Геология. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 2010, № 2, с. 47—58.

**Чернышов Н.М., Багдасарова В.В., Алехина А.С.** Муассанит в основных породах Воронежского кристаллического массива // Вопросы геологии КМА, вып. 2, Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 1978, с. 71—75.

**Чернышов Н.М., Пономаренко А.М., Бартницкий Е.Н.** Новые данные о возрасте никеленосных дифференцированных плутонов Воронежского кристаллического массива // Докл. АН УССР, Серия Б, 1990, № 6, с. 34—37.

**Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Стрик Ю.Н., Лебедев И.П.** Модель геодинамического развития ВКМ в раннем докембрии // Геотектоника, 1997, № 3, с. 21—30.

**Чернышов Н.М., Рыборак М.В., Альбеков А.Ю.** Изотопно-геохимические свидетельства процессов мантийно-корового взаимодействия при формировании позднеархейских зеленокаменных поясов Курского блока Сарматии // Минералогический журнал, 2014, т. 36, № 2, с. 92—101.

**Чернышов Н.М., Чернышова М.Н., Рыборак М.В., Боброва Е.М.** Минерагения высокомагнезиальных вулканоинтрузивных комплексов раннеархейского геодинамического цикла формирования

коры континентального типа ВКМ // Вестник ВГУ, Серия геология. Воронеж, Изд-во Воронеж. ун-та, 2015, № 4, с. 66—74.

**Щербак Н.П.** Сравнительная геохронология архейских мегаблоков Украинского, Западно-Австралийского и Южно-Африканского щитов // Минералогический журнал, 2004, т. 26, № 3, с. 21—33.

**Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Баргницкий Е.Н., Верхогляд В.М., Комаристый А.А., Лесная И.М., Мицкевич Н.Ю., Пономаренко А.Н., Скобелев В.М., Щербак Д.Н.** Геохронологическая шкала докембрия Украинского щита. Киев, Наук. думка, 1989, 144 с.

**Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н.** Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Архей. Киев, Наук. думка, 2005, 241 с.

**Щербак Н.П., Артеменко Г.В., Лесная И.М., Пономаренко А.Н., Шумлянский Л.В.** Геохронология раннего докембрия Украинского щита. Протерозой. Киев, Наук. думка, 2008, 240 с.

**Щербаков И.Б.** Петрология Украинского щита. Львов, ЗУКЦ, 2005, 366 с.

**Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О.** Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника, 2007, № 1, с. 43—70.

**Яковлев О.И., Люль А.Ю.** Геохимия микроэлементов в ударном процессе // Геохимия, 1992, № 3, с. 323—337.

**Ярошук М.А.** Железистые формации Белоцерковско-Одесской металлогенической зоны. Киев, Наук. думка, 1983, 224 с.

**Abbott D.H., Isley A.E.** Extraterrestrial influences on mantle plume activity // Earth Planet. Sci. Lett., 2002, v. 205, p. 53—62.

**Barnes S.J., Naldrett A.J.** Geochemistry of the J-M Reef of the Stillwater Complex, Minneapolis adit area. II. Silicate mineral chemistry and petrogenesis // J. Petrol., 1986, v. 27, p. 791—825.

**Bedard J.H.** Stagnant lids and mantle overturns: Implications for Archaean tectonics, magma genesis, crustal growth, mantle evolution, and the start of plate tectonics // Geosci. Front., 2018, v. 9, p. 19—49.

**Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I.** Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // Contrib. Mineral. Petrol., 2002, v. 143, p. 602—622.

**Bibikova E.V., Williams I.S.** Ion microprobe U–Th–Pb isotopic studies of zircons from three Early Precambrian areas in the USSR // Precambrian Res., 1990, v. 48, p. 203—221.

**Bogdanova S.** Segments of the East European craton // Europrobe Symposium. Publ. of the Institute of Geophysics. Polish Academy of Science, 1991, A–20, p. 33—38.

**Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G.** East European Craton reference module in Earth systems and environmental sciences, 2016, 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X.

**Campbell I.H.** Testing the plume theory // Chem. Geol., 2007, v. 241, p. 153—176.

**Carlson R.W., Pearson D.G., James D.E.** Physical, chemical and chronological characteristics of continental mantle // Rev. Geophys., 2005, v. 43, RG1001.

**Claesson S., Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatshev R.** Isotopic evidence for Palaeoproterozoic accretion in the basement of the East European Craton // Tectonophysics, 2001, v. 339, p. 1—18.

**Claesson S., Bibikova E., Shumlyansky L., Dhuiml B., Hawkesworth C.J.** The oldest crust in the Ukrainian Shield — Eoarchaean U–Pb and Hf–Nd constrains from enderbites and metasediments // Geol. Soc. London Spec. Publ., 2015, v. 389, p. 227—253.

**Cohen K.M., Finney S.C., Gibbard P.L., Fan J.–X.** The ICS International Chronostratigraphic Chart // Episodes, 2013, v. 36, p. 199—204.

**De Campos C.P., Perugini D., Ertel-Ingrisch W., Dingwell D., Poli G.** Enhancement of magma mixing efficiency by chaotic dynamics: an experimental study // Contrib. Mineral. Petrol., 2011, v. 161, p. 863—881.

**Elming S.A., Shumlyansky L., Kravchenko S., Layer P., Soderlund U.** Proterozoic basic dykes in the Ukrainian Shield: A palaeomagnetic, geochronologic and geochemical study — the accretion of the Ukrainian Shield to Fennoscandia // Precambrian Res., 2010, v. 178, p. 119—135.

**Goldstein S.J., Jacobsen S.B.** Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material — implications for crustal evolution // Earth Planet. Sci. Lett., 1988, v. 87, p. 249—265.

**Gornostayev S.S., Walker R.J., Hanski E.J., Popovchenko S.E.** Evidence for the emplacement of ca. 3.0 Ga mantle-derived mafic-ultramafic bodies in the Ukrainian Shield // Precambrian Res., 2004, v. 132, p. 349—362.

**Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E., Jackson S.E., Van Achtebergh E., O'Reilly S.Y., Shee S.R.** The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites // Geochim. Cosmochim. Acta, 2000, v. 64, p. 133—147.

**Hall R.P., Hughes D.J.** Noritic magmatism / Eds. R.L. Hall, D.J. Hughes // Early Precambrian basic magmatism. 1991, Blackie & Son Ltd., p. 83—110.

**Hoskin P.W.O., Schaltegger U.** The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Rev. Mineral. Geochem.*, 2003, v. 53, p. 27—62.

**Irvine T.N., Sharpe M.R.** Source-rock compositions and depth of origin of Bushveld and Stillwater magmas // *Carnegie Inst. Washington*, 1982, Yearbook 81, p. 294—303.

**Le Maitre R.W., Bateman P., Dudek A.J., Keller M.J.** A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford, 1989, 193 p.

**Lobach-Zhuchenko S.B., Balagansky V.V., Baltybaev Sh.K., Bibikova E.V., Chekulaev V.P., Yurchenko A.V., Arestova N.A., Artemenko G.V., Egorova Yu.S., Bogomolov E.S., Sergeev S.A., Skublov S.G., Presnyakov S.L.** The Orekhov–Pavlograd Zone, Ukrainian Shield: Milestones of its evolutionary history and constraints for tectonic models // *Precambrian Res.*, 2014, v. 252, p. 71—87.

**Lobach-Zhuchenko S.B., Kaulina T.V., Baltybaev S.K., Balagansky V.V., Egorova Yu.S., Lokhov K.I., Skublov S.G., Sukach V.V., Bogomolov E.S., Stepanyuk L.M., Galankina O.L., Berezhnaya N.G., Kapitono I.N., Antonov A.V., Sergeev S.A.** The long (3.7—2.1 Ga) and multistage evolution of the Bug Granulite–Gneiss Complex, Ukrainian Shield, based on the SIMS U–Pb ages and geochemistry of zircons from a single sample // *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 2017, v. 449, p. 175—203.

**Lowe D.R., Byerly G.R., Kyte F.T., Shukolyukov A., Asaro F., Krull A.** Spherule beds 3.47—3.34 Ga-old in the Barberton greenstone belt, South Africa: a record of large meteorite impacts and their influence on early crustal and biological evolution // *Astrobiology*, 2003, v. 3, p. 7—48.

**O’Neil J., Fransis D., Carlson R.W.** Implications of the Nuvvuagittuq Greenstone Belt for the Formation of Earth’s Early Crust // *J. Petrol.*, 2011, v. 53 (5), p. 985—1009.

**O’Neil J., Carlson R.W., Paquette J.-L., Francis D.** Formation, age and metamorphic history of the Nuvvuagittuq greenstone belt // *Precambrian Res.*, 2012, v. 220, p. 23—44.

**Pearson D.G., Nowell G.M.** The continental lithospheric mantle: characteristics and significance as a mantle reservoir // *Phil. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 2002, v. 360, p. 2383—2410.

**Shumlyansky L., Billström K., Hawkesworth C., Elming S.-A.** U–Pb age and Hf isotope compositions of zircons from the north-western region of the Ukrainian shield: mantle melting in response to post-collision extension // *Terra Nova*, 2012, v. 24, p. 373—379.

**Shumlyansky L., Hawkesworth C., Dhuimec B., Billström K., Claesson S., Storey C.**  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages and Hf isotope composition of zircons from sedimentary rocks of the Ukrainian shield: Crustal growth of the south-western part of East European craton from Archaean to Neoproterozoic // *Precambrian Res.*, 2015, v. 260, p. 39—54.

**Terentiev R.A., Savko A.K., Santosh M.** Paleoproterozoic crustal evolution in the East Sarmatian Orogen: Petrology, geochemistry, Sr–Nd isotopes and zircon U–Pb geochronology of andesites from the Voronezh massif, Western Russia // *Lithos*, 2016a, v. 246—247, p. 61—80.

**Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M., Korish E.H., Sarkisyan L.S.** Paleoproterozoic granitoids of the Losevo terrane, East European Craton: age, magma source and tectonic implications // *Precambrian Res.*, 2016b, 287, p. 48—72.

**Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M.** Post-collisional two-stage magmatism in the East Sarmatian Orogen, East European Craton: evidence from the Olkhovsky ring complex // *J. Geol. Soc.*, 2017a, v. 175, p. 86—99. <https://doi.org/10.1144/jgs2017-017>.

**Terentiev R.A., Savko K.A., Santosh M.** Paleoproterozoic evolution of the arc–back-arc system in the East Sarmatian Orogen (East European Craton): zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of the Losevo volcanic suite // *Am. J. Sci.*, 2017b, v. 317, p. 707—753.

**Van Kranendonk M.J., Bennett V., Smithies H.R.H.** Earth’s oldest rocks. Amsterdam, Elsevier, 2018, 1307 p.

**Vervoort J.D., Patchett P.J.** Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, v. 60 (19), p. 3713—3733.

**Wang Y., Leshner M.C., Lightfoot P.C., Pattison E.F., Golightly J.P.** Shock metamorphic features in mafic and ultramafic inclusions in the Sudbury Igneous Complex: Implications for their origin and impact excavation // *Geology*, 2018, v. 46 (5), p. 443—446.

*Поступила в редакцию 2 сентября 2020 г.,  
принята в печать 22 марта 2021 г.*