

УДК: 550.93

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОМ ВОЗРАСТЕ МЕТАМОРФИЗМА ЕЛАБУЖСКОЙ ЗОНЫ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛГО-УРАЛИИ, ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКИЙ КРАТОН

А. А. Федотова^{1,2}, С. В. Богданова^{3,4}, С. Клаэссон⁵, М. О. Аносова¹,
А. В. Постников⁶, М. М. Фугзан¹, Т. И. Кириозова¹

Представлено академиком РАН Л.Н. Когарко 10.01.2018 г.

Поступило 17.01.2018 г.

Представлены данные о возрасте метаморфизма пород Елабужской зоны и детритового циркона из парагнейсов Елабужской зоны, их корреляция с ранее датированными породами Средневожского мегаблока. Геохимические особенности и степень метаморфизма пород Елабужской зоны и Средневожского блока сходны. Различие заключается в явном проявлении палеопротерозойского метаморфизма изученных пород Елабужской зоны, что контрастирует с ситуацией в Средневожском геоблоке, где метаморфизм такого возраста не проявлен. Изучение U–Pb-изотопной системы внешних зон циркона Елабужской зоны деформаций даёт основание считать, что метаморфическое преобразование пород происходило в два этапа, 1,99 и 1,95 млрд лет назад.

Ключевые слова: метаморфизм, циркон, U–Pb-, Sm–Nd-изотопные системы, архей, палеопротерозой, Восточно-Европейский кратон, Волго-Урاليا.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883307-312>

Зоны интенсивных деформаций и метаморфической переработки архейской коры широко развиты в Волго-Уральском сегменте литосферы Восточно-Европейского кратона (ВЕК), Волго-Уралии (рис. 1, врезка). Часть из них принадлежит палеопротерозойским окраинным орогенам, тогда как возраст и тектоническая природа внутренних зон неясны и не исключено, что они унаследуют скрытые сuture. Елабужская зона деформаций (ранее “Елабужско-Бондюжская” [1]), одна из наиболее известных и разбуренных структур Волго-Уралии, приуроченных к Прикамскому разлому. Она простирается с СВ на ЮЗ и разделяет два крупных архейских мегаблока Волго-Уралии, Средневожский и Токмовский (ранее “Волго-Камский” [1]). Главный правосторонний сдвиг вдоль юго-восточной границы зоны выражен чередованием узких линейных магнитных аномалий различной интенсивности. В целом структура Елабужской зоны определяется сочетанием сдвигов и

надвигов, осложненных разломами авлакогенного и платформенного этапов формирования ВЕК (рис. 1). Эндербито-гнейсы с включениями мафических гранулитов слагают серию блоков от 10 до 20 км шириной, трассирующих выдвинутые принадвиговые пластины среди пород амфиболитовой фации. В единичных случаях вскрыты эклогитоподобные, гранат-диопсид-амфибол-плаггиоклазовые породы. Амфиболиты, амфибол-биотитовые гнейсы и ассоциирующие парагнейсы слагают узкие полосы среди доминирующих гранитоидов и часто приурочены к сдвигам и надвигам (рис. 1).

Главными целями этого исследования было установление возраста метаморфизма пород и соответственно деформаций Елабужской зоны, а также возраста детритового циркона в парагнейсах Елабужской зоны для их корреляции с ранее датированными породами Средневожского мегаблока [3].

Для определения возраста метаморфизма были выбраны парагнейсы из скважин Усть-Икская 88 и Елабужская 253, расположенных в разных структурах Елабужской зоны. Парагнейсы мигматизированы и сложены минеральной ассоциацией биотит±гранат+кордиерит±силлиманит+плаггиоклаз+микроклин+кварц, образованной при ретроградном метаморфизме от гранулитовой к амфиболитовой фации при температурах 923–973 К и умеренных давлениях. Наиболее сильные ретроградные изменения и окварцевание характерны для пород Усть-Икская 88.

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской Академии наук, Москва

²Геологический институт Российской Академии наук, Москва

³Геологический Институт Лундского Университета, Швеция

⁴Казанский федеральный университет, Казань

⁵Шведский музей естественной истории, Швеция

⁶Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва

E-mail: masha_anosova@mail.ru, anosova@geokhi.ru

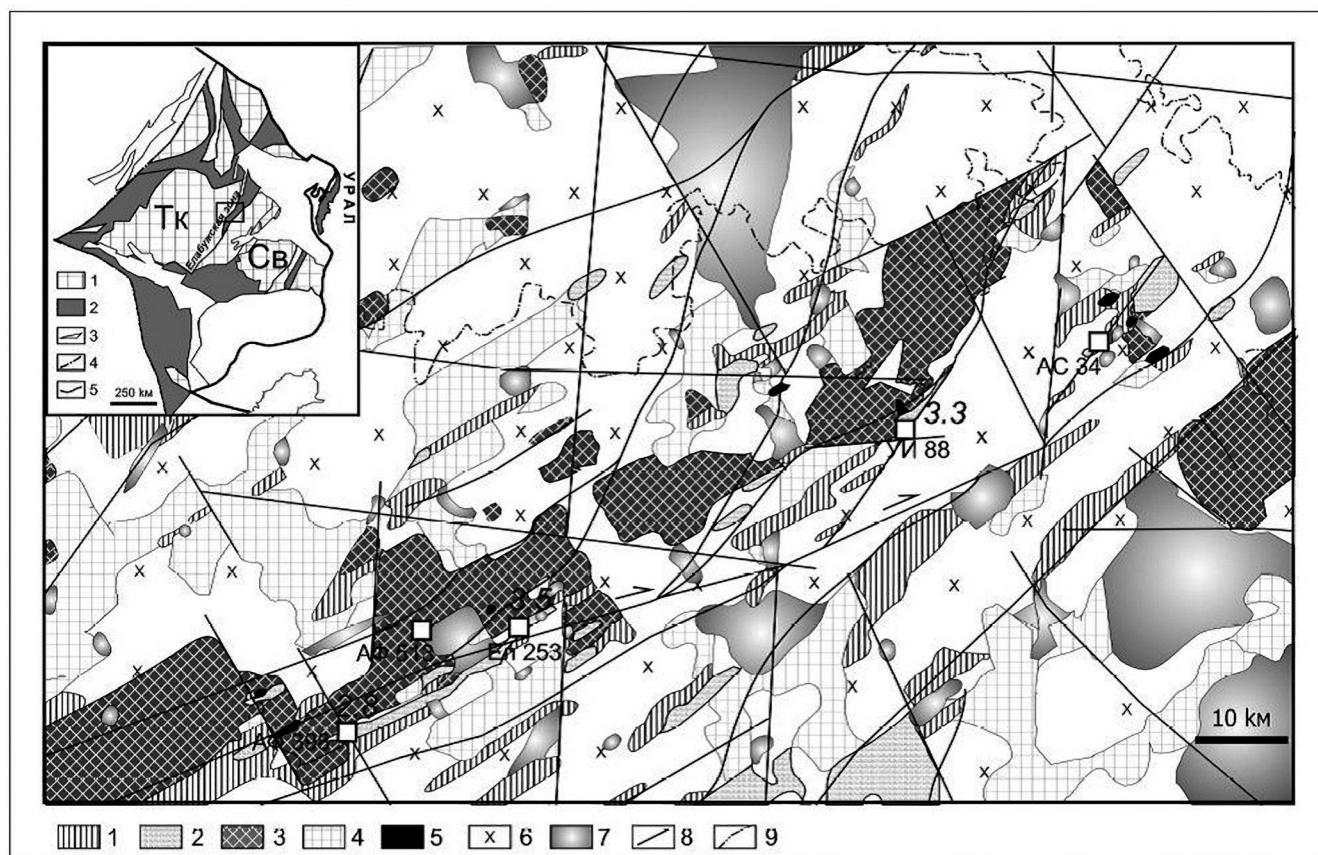


Рис. 1. Геологическая карта северной части Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейского кратона [2].

1, 2 – метаосадочно-вулканогенные породы и их мигматиты: 1 – амфиболиты и амфибол-содержащие гнейсы, 2 – высокоглинозёмистые и глинозёмистые гнейсы; 3 – комплекс основных и кислых гранулитов; 4 – ультрабазиты и габброиды; 5–7 – гранитоиды: 5 – диориты и гранодиориты, 6 – тоналиты и трондьемиты, 7 – микроклиновые граниты; 8 – разломы различного типа и возраста по геофизическим данным и бурения; 9 – граница Татарстана. Цифры курсивом показывают значения Sm–Nd-модельного возраста по породе в целом. Врезка в левом верхнем углу показывает общие черты структуры коры Волго-Уралии: 1 – архейские блоки, 2 – палеопротерозойские орогены и зоны интенсивных сдвиг-надвиговых деформаций и тектоно-термальной переработки архейской коры в палеопротерозое, 3 – рифейские авлакогены, 4 – граница Восточно-Европейского Кратона, 5 – границы Волго-Уралии. Прямоугольник соответствует главной карте.

По геохимическим характеристикам большинство парагнейсов Елабужской зоны (рис. 2) сходны с высокоглинозёмистыми породами большечеремшанской серии Средневолжского блока, образованными за счёт пород как среднего, кислого, так и основного состава [3]. На присутствие основных пород среди источников обломочного материала указывают, в частности, содержания Co, составляющие в породах Елабужской зоны 35–48 мкг/г, что достигает величины [4], принятой для архейских основных пород и превышает её. Отношение Ni/Co лежит в диапазоне 0,9–5,2, указывая на вариации пропорций основного и ультраосновного материала в источнике. Средние и кислые породы палеообласти денудации, по всей видимости, обеспечили принос легких лантаноидов и Th – концентрации этих элементов в породах Елабужской зоны достигают

значений, принятых для архейских аргиллитов [4]. В биотит-силлиманит-кордиеритовых гнейсах (Усть-Икская 88) заметно повышены содержания элементов-примесей, главным образом, средних и тяжёлых лантаноидов при низких содержаниях Co, Ni и V. На основании конфигурации спектра РЗЭ мы не можем исключить присутствия в составе тяжёлой фракции протолита парагнейса минерала-концентратора тяжёлых лантаноидов и Y-ксенотима, либо – перераспределения элементов в ходе метаморфических процессов.

Изотопный состав Nd был изучен в семи метаосадочных гнейсах Елабужской зоны, в том числе в образцах из скважин Усть-Икская 88 и Елабужская 253 (см. рис. 1). Анализ выполнен на масс-спектрометре TRITON (ГЕОХИ РАН), по методике, опи-

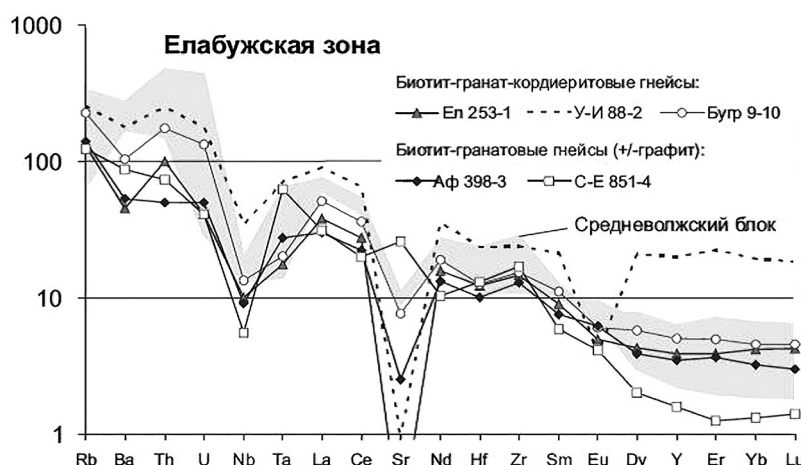


Рис. 2. Мультиэлементная диаграмма для метасадочных пород Елабужской зоны Волго-Уралии из скважин: Ел – Елабужская 253, У-И – Усть-Икская 88, Бугр. – Бугровская 9, Аф – Афанасовская 398, С-Е – Северо-Елтанская 851. Значения нормированы к примитивной мантии [4]. Серым показано поле составов метасадочных пород Средне-волжского блока по данным [3].

Таблица 1. Изотопные Sm–Nd-данные для пород Елабужской зоны Волго-Уралии

Образец	Тип породы	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения			Модельный возраст, млрд лет	
		[Sm]	[Nd]	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma^*$	T_{DM}	T_{DM2}
Елабужская, 253-1	Кристаллосланец Bt-Gr-кордиерит	2,96	14,16	0,1265	0,511150	0,000005	3,5	-
Усть-Икская, 88-2	Bt-Gr-кордиерит. гнейс	12,91	70,62	0,1105	0,510933	0,000005	3,3	3,4
Бугровская, 9-10	Bt-Gr-силлиманит– кордиерит. гнейс	4,91	27,35	0,1086	0,511120	0,000005	3,0	3,1
Афанасовская, 398-3	Bt-Gr-гнейс с графитом	5,94	36,40	0,0987	0,511033	0,000005	2,8	3,0
Привятская, 205	Кристаллосланец Bt-Gr-кордиерит	12,4	65,90	0,1136	0,510947	0,000007	3,4	3,5
Северо-Елтанская, 851-4	Bt-Gr-гнейс	2,20	12,50	0,1091	0,511181	0,000004	2,9	3,0
Уратминская, 725-1	Bt-Gr-гнейс	3,11	19,80	0,0946	0,510807	0,000004	3,0	3,3

Примечание. * Параллельные анализы стандартного образца изотопного состава Nd Japan 1 дали среднее значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0,512113 \pm 4 (2\sigma, N = 13)$. Расчёт погрешности величины $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ проведён с учётом воспроизводимости результатов анализа стандарта Japan 1.

санной в работе [3]. Модельные возрасты T_{DM2} рассчитаны по двустадийной модели в предположении что до 1,9 млрд лет изотопный состав протолитов отвечал величине $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0,12$ [5]. Данные представлены в табл. 1. Полученные значения модельных возрастов, рассчитанные по двустадийной модели, свидетельствуют о высокой доле архейского обломочного материала в составе исходных осадков.

Изотопное U–Th–Pb-датирование акцессорного циркона, выделенного из проб парагнейсов Елабужская 253-1 и Усть-Икская 88-2, было проведено локальным методом на масс-спектрометре вторичных ионов CAMECA 1280, NORDSIM (Шведский музей

естественной истории, Стокгольм). Наиболее прозрачные и наименее трещиноватые зёрна циркона были отобраны вручную и запечатаны в эпоксидную смолу вместе со стандартным цирконом 91500 [6]. Методика U–Th–Pb-измерений соответствовала изложенной в публикации [7]. Точность измерения изотопного состава свинца составила 0,1–0,3%, для U–Pb-изотопных отношений 1–3%. Интерпретация полученных возрастных данных осуществлялась с использованием программ ISOPLOT 3.02 [8].

Акцессорный циркон биотит-гранат-кордиеритовых гнейсов Елабужской 253-1, представлен призматическими удлинёнными (1:3–1:4) зёрнами,

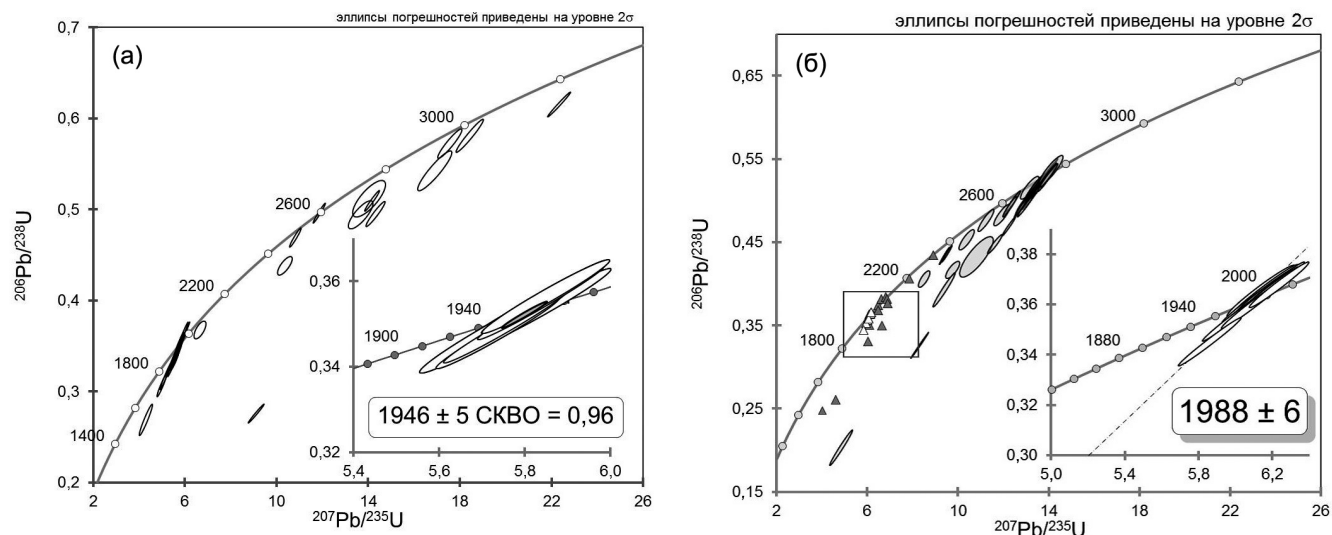


Рис. 3. Результаты изотопного U–Pb-анализа циркона на диаграммах с конкордиями: а – циркон из биотит-гранат-кордиеритовых гнейсов Елабужская 253-1, первичные и перекристаллизованные ядра кристаллов ($n = 64$), на врезке: конкордантные значения возраста оболочек циркона ($n = 12$), по которым рассчитано значение возраста метаморфизма парагнейсов из скважины Елабужская 253; б – циркон из биотит-силлиманит-кордиеритовых гнейсов Усть-Икская 88-2: ядра кристаллов – эллипсы, оболочки – треугольники, в том числе группа конкордантных значений (белые треугольники); на врезке: конкордантные значения ($n = 11$), определяющие время наиболее позднего метаморфического воздействия. При расчёте учтены погрешности значений констант распада.

слабо сглаженными до сглаженных, реже изометричными, а также игольчатыми сильно удлинёнными кристаллами. Для изотопного U–Pb-анализа выбраны зёрна размером 90–150 мкм. Католюминесцентные исследования показали, что большая часть кристаллов содержит ядра идиоморфных очертаний, изредка со слабо выраженной концентрической зональностью, реже встречаются ксеноморфные ядра, явно указывающие на первично обломочную природу ксеногенного циркона. Однородные оболочки шириной 20–30 мкм, реже до 50 мкм, образованы, вероятно, при метаморфизме. Удлинённые игольчатые кристаллы не содержат ядер.

Изотопная U–Pb-система циркона из образца Елабужская 253-1 была проанализирована в 74 зёрнах, из них в 15 кристаллах – ядра и оболочки. Множество ядер циркона характеризуются discordant значениями, вблизи интервала 1,95–2 млрд лет (рис. 3а). Эти ядра, по всей видимости, были частично или полностью перекристаллизованы во время метаморфизма. Для восьми ядер получен архейский возраст, из них для двух discordantность превышает 10%. Значения возраста оболочек циркона конкордантны, по ним (рис. 3а, врезка) определён возраст метаморфизма парагнейсов из скважины Елабужской 253.

Циркон из биотит-силлиманит-кордиеритовых гнейсов пробы Усть-Икская 88-2 представлен одно-

типными полупрозрачными и непрозрачными удлинёнными зёрнами (1:3–1:4). Для изотопного U–Pb-анализа отобраны наиболее прозрачные кристаллы размером 100–125 мкм. Католюминесцентное исследование показало, что подавляющее большинство зёрен содержит ядра и однородную оболочку шириной от нескольких мкм до 20–30, реже 50 мкм, более тёмную на изображениях. Изотопный U–Pb-состав циркона был проанализирован в 90 зёрнах, в 20 кристаллах для анализа выбраны участки не только в ядре, но и в оболочке. Полученные наиболее конкордантные значения возрастов для ядер указывают на то, что кристаллизация происходила 2,73 млрд лет назад (рис. 3б). Одиннадцать наиболее конкордантных значений определяют возраст метаморфических обрастаний в 1988 ± 6 млн лет (рис. 3б, врезка). Большинство discordant значений лежит в интервале между этими двумя группами точек, что связано, по всей видимости, с нарушением изотопной U–Pb-системы циркона в ходе метаморфизма.

Для оболочек циркона из парагнейса Усть-Икская 88-2, как и перекристаллизованных ядер и всех проанализированных оболочек из образца Елабужская 253-1, характерны исключительно низкие величины отношения Th/U (0,1–0,01), обусловленные высокими (850–1940 мкг/г) концентрациями урана при незначительных (< 60 мкг/г) – тория. Подобные геохимические характеристики могут быть связаны

с подвижностью урана в водных флюидах и обнаруживаются, в частности, и для циркона, образованного в ходе свекофеннских тектонических событий, воздействовавших на архейские породы Беломорского пояса Восточно-Европейского кратона [9]. Низкие отношения Th/U также могут объясняться кристаллизацией циркона в присутствии минералов с высоким содержанием Th и незначительным — U.

Полученные данные показывают, что в строении Елабужской зоны, отделяющей Средневожский мегаблок с северо-запада от Токмовского, принимают участие метаосадочные породы, образованные в неоархее и сопоставимые с ранее изученными высокоглинозёмистыми гнейсами Средневожского мегаблока [3].

Изотопный U—Pb-анализ циркона из биотит-гранат-кордиеритовых гнейсов Елабужская 253-1 показал широкий диапазон архейских возрастов детритовых ядер, тогда как ядра зёрен циркона из биотит-силлиманит-кордиеритовых гнейсов Усть-Икская 88-2 разновозрастные, кристаллизовавшиеся 2,73 млрд лет назад.

Геохимические особенности и степень метаморфизма [1] пород Елабужской зоны дислокаций и Средневожского блока сходны. Различие заключается в явном проявлении палеопротерозойского метаморфизма изученных пород Елабужской зоны, что контрастирует с ситуацией в Средневожском геоблоке, где метаморфизм такого возраста не проявлен [3]. Изучение изотопной U—Pb-системы внешних зон циркона Елабужской зоны деформаций дает основание считать, что метаморфическое преобразование пород происходило в два этапа, 1,99 и 1,95 млрд лет назад.

Благодарности. Авторы выражают благодарность профессору М. Вайтхаузу и Скандинавской Ассоциации NORDSIM за предоставленную возможность проведения изотопных анализов на масс-спектрометре вторичных ионов в Стокгольме. Работа выполнена с участием Е.В.Бибиковой.

Источники финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15–05–08125, Программы ОНЗ РАН №8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова С.В. Земная кора Русской плиты в раннем докембрии (на примере Волго-Уральского сегмента). Труды ГИН АН СССР 408. М.: Наука, 1986. С. 224.
2. Bogdanova S.V., Gorbatshev R., Garetsky R.G. EUROPE| East European Craton. In: Scott, E. (Editor), Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. L.: Elsevier. 2016. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10020-X
3. Бибикова Е.В., Богданова С.В., Постников А.В. и др. // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2. 2015. Т. 23. № 1. С. 3–26.
4. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора, ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. С. 384.
5. T.C. Liew, A.W. Hofmann // Contrib. to Mineral. and Petrol. 1988. V. 98. P. 129–138.
6. Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F. et al. // Geostandards Newslett. 1995. V. 19. P. 1–23.
7. Whitehouse M.J., Kamber B.S. // J. Petrol. 2005. V. 46. P. 291–318.
8. Ludwig K.R. Isoplot/Ex 3.00 // Berkeley Geochronology Center. Special Publication. 2003. № 4. P. 74.
9. Щипанский А.А., Ходоревская Л.И., Слабунов А.И. 2012. Геология и геофизика. Т. 53. № 3. С. 341–364.

NEW DATA REFER TO PALAEOPROTEROZOIC AGE OF THE ELABUGA DEFORMATION ZONE METAMORPHISM OF THE VOLGO-URALIA, EAST EUROPEAN CRATON

A. A. Fedotova^{1,2}, S. V. Bogdanova^{3,4}, S. Claesson⁵, M. O. Anosova¹,
A. V. Postnikov⁶, M. M. Fugzan¹, T. I. Kirnozova¹

¹*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

³*Department of Geology, Lund University, Lund, Sweden*

⁴*Kazan` State University, Kazan`, Russian Federation*

⁵*Swedish Museum of Natural History, Stockholm, Sweden*

⁶*Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS L.N. Kogarko January 10, 2018

Received January 17, 2018

This paper presents age data of the Elabuga zone rocks metamorphism and of the detrital zircon of the Elabuga zone paragneisses and their correlation with the age of Middle-Volga megablock rocks. The Elabuga zone rocks and the Middle-Volga megablock rocks have similar geochemical characteristics and degree of metamorphism. Difference is as follows: Paleoproterozoic metamorphism is occurred at the studied Elabuga zone rocks and such metamorphism age is not presented at the Middle-Volga megablock rocks. The study of U-Pb isotopic system in external zones in the Elabuga deformation zone zircon crystals suggests that rocks were underwent by metamorphism of two stages 1.99 and 1.95 Ga ago.

Keywords: Metamorphism, zircon, U–Pb isotopic system, Sm–Nd isotopic system, Archean, Paleoproterozoic, East European Craton, Volgo-Uralia.