

## ГЕОХРОНОЛОГИЯ КВАРЦЕВЫХ ДИОРИТОВ РОМАНОВСКОГО ПЛУТОНА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА

К. А. Савко, Р. А. Терентьев

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 5 апреля 2016 г.

**Аннотация:** в статье приведены данные по геохимии и изотопному U-Pb по цирконам возрасту порфиридных кварцевых диоритов Романовского массива в восточной части Воронежского кристаллического массива (ВКМ). Для кварцевых диоритов характерны обогащение легкими РЗЭ, фракционированные спектры тяжелых РЗЭ, слабо отрицательные аномалии Eu относительно хондрита; отрицательные аномалии Sr, Nb, Ti относительно примитивной мантии. Данные о возрасте кристаллизации кварцевых диоритов  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$   $2062 \pm 15$  млн лет и конкордантный U-Pb  $2058 \pm 11$  млн лет свидетельствуют о формировании Романовского плутона в период интенсивного постколлизийного магматизма в восточной части ВКМ. Возраст кристаллизации и геохимические особенности пород массива позволяют сопоставить их с интрузивными образованиями Новомеловатского массива.

**Ключевые слова:** палеопротерозой, Восточно-Сарматский ороген, кварцевые диориты, геохимия.

### THE GEOCHRONOLOGY OF QUARTZ DIORITES FROM ROMANOV PLUTON VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF

**Abstract:** here we present bulk chemistry and zircon U-Pb age of porphyreous quartz diorite from Romanovo pluton in eastern part of Voronezh Crystalline Massif (VCM). The quartz diorite exhibit enrichment in light REE, fractionated heavy REE patterns, weak negative Eu anomalies relatively to chondrite; negative Sr, Nb, Ti anomalies relatively to primitive mantle. SIMS crystallization age of the quartz diorite yielded an  $2062 \pm 15$  Ma ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) and  $2058 \pm 11$  Ma (concordant U-Pb), which is coeval with intense post-collision magmatism in the eastern part of VCM. Our new data, together with recently published data, enable us to correlate the generation of the Romanovo pluton with intrusive rocks of Novaya Melovatka pluton.

**Keywords:** Paleoproterozoic, East Sarmatian Orogen, quartz diorite, geochemistry.

#### Введение

Воронцовский террейн является частью палеопротерозойского Волго-Донского складчатого пояса, который разделяет архейские ядра Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона [1]. Он сложен палеопротерозойскими метатерригенными породами воронцовской серии и прорывающими их разнообразными интрузиями основного, среднего и кислого состава. В ряде мафитовых и ультрамафитовых массивов установлены рудопроявления и месторождения сульфидных медно-никелевых или существенно никелевых руд [2]. Один из типов рудоносных массивов представлен гипабиссальными телами биотит-ортопироксеновых пород от меланоритов до мелагранодиоритов и роговообманково-биотитовых кварцевых диорит-тоналит-гранодиоритов еланского комплекса [2, 3]. Схожие по своим минералогическим особенностям с породами еланского никеленоносного комплекса интрузивные образования Новомеловатского массива [4] отличаются более молодым возрастом, химизмом и стерильно-

стью в отношении сульфидной минерализации.

С целью установления формационной принадлежности и потенциальной рудоносности Романовского массива, относимого на современных картах к еланскому комплексу (рис. 1), осуществлено геохимическое и геохронологическое исследование, слагающих его кварцевых диоритов.

#### Геологическая позиция и строение массива

Романовский массив локализован в пределах восточной части ВКМ среди поля палеопротерозойских метатерригенных образований воронцовской серии и предположительно (юго-западная часть) среди метапсаммитов воронежской свиты (рис. 2). Он расположен рядом с Некрыловским массивом аналогичного состава. Оба массива хорошо выражены максимумами гравитационного поля и слабо выражены в магнитном поле. В эрозионном срезе докембрийского фундамента Романовский массив имеет изометричную форму и занимает площадь около  $15 \text{ км}^2$ . Массив состоит из биотит-ортопироксеновых меладиоритов, кварцевых

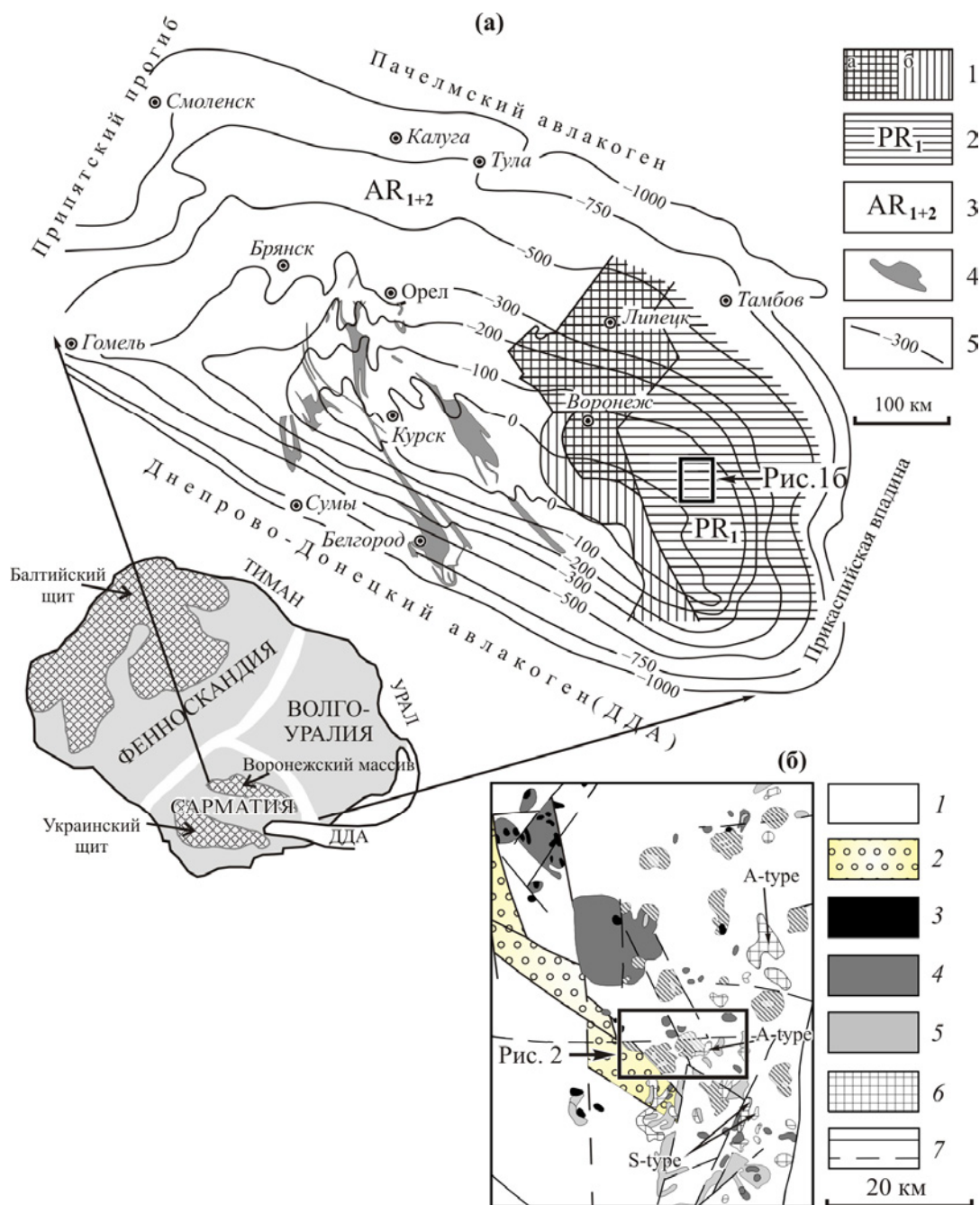


Рис. 1а. Схема структурно-тектонического районирования докембрийского фундамента Воронежского кристаллического массива: 1 – образования Лосевского (а) и Донского (б) террейнов, 2 – палеопротерозойские породы Воронцовского террейна, 3 – архейские образования Курского террейна, 4 – синклиновые структуры, выполненные палеопротерозойскими породами, 5 – изогипсы абсолютных отметок поверхности докембрийского фундамента. Рис. 1б. Схема расположения интрузивных тел: 1 – вмещающие породы воронцовской серии; 2 – грабен, предположительно сложенный метатерригенными породами воронцовской свиты; интрузивные тела: 3 – ультрамафитовые, 4 – мафитовые, 5 – диорит-гранитные, 6 – граниты S- и А-типов; 7 – разломы. Заштрихованы массивы еланского мафит-гранитоидного комплекса. Конфигурация блоков Восточно-Европейского кратона на врезке по [5].

диоритов в краевой части и из биотит-рогово-обманковых кварцевых диоритов, тоналитов и гранодиоритов в центре массива. Две группы пород вскрыты скважиной 8458, однако характер контактов между ними не установлен. В юго-западной части массива скважиной 8456 вскрыт контакт с вмещающими породами воронцовской серии, которые здесь представлены кристаллическими сланцами с биоти-

том, амфиболом или ставролитом и силлиманитом. Плутонические породы массива содержат ксенолиты вмещающих метатерригенных пород размером 0,3–0,5 см до 10 см. В приконтактовой зоне (скв. 8456) присутствуют более крупные фрагменты (мощностью до 10 м) воронцовской серии. Вмещающие породы часто ороговикованы.



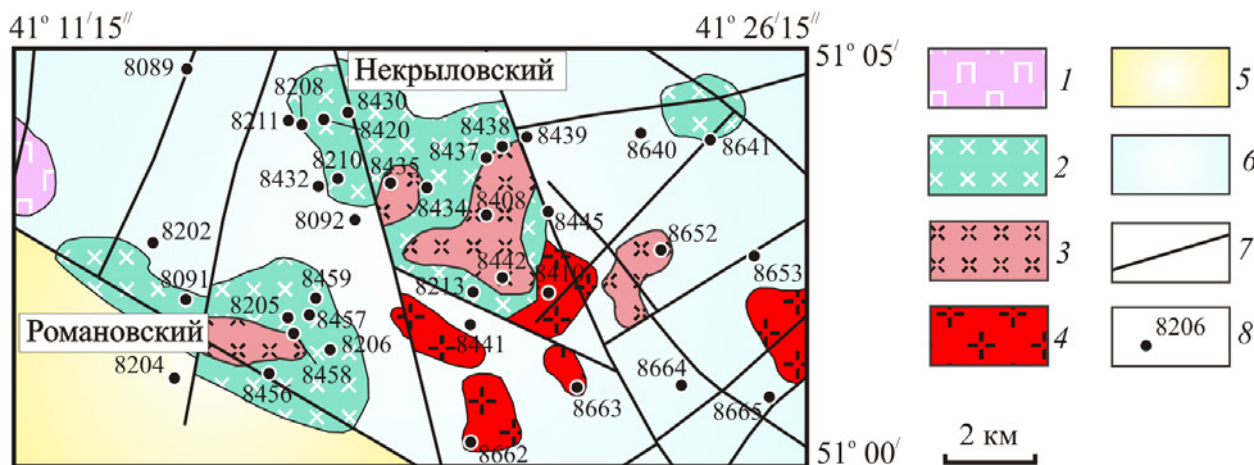


Рис. 2. Геологическая схема Романовского и Некрыловского массивов: 1 – перидотиты, пироксениты; 2 – биотит-ортопироксеновые меладiorиты и кварцевые диориты; 3 – биотит-рогообманковые кварцевые диориты, тоналиты и гранодиориты; 4 – биотитовые граниты (бобровский комплекс); 5 – предположительно метатерригенные породы воронежской свиты; 6 – воронцовская серия; 7 – разломы; 8 – положение и номер скважин.

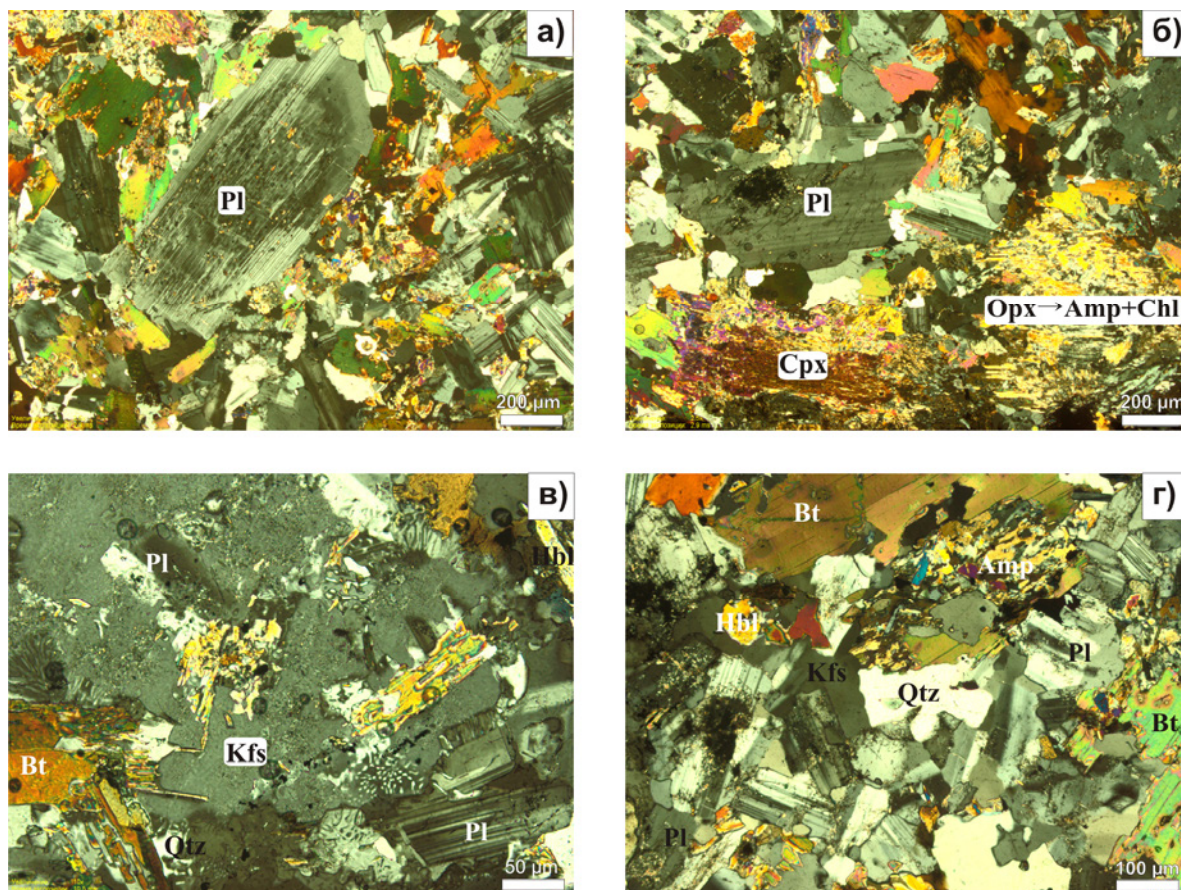


Рис. 3. Фотографии кварцевых диоритов под микроскопом (скв. 8206): (а) – фенокристалл плагиоклаза (глубина 329,7 м); (б) – фенокристаллы плагиоклаза, клинопироксена и ортопироксена, замещенного амфиболом и хлоритом (глубина 325,2 м); (в) – интерстиция калиевого полевого шпата (глубина 325,2 м); (г) – основная масса (глубина 317,9 м).

### Описание образцов

Опробован керн из скважины 8206, вскрывающей восточную часть Романовского массива (рис. 3). Кварцевые диориты характеризуются порфировидной структурой, состоят из андезина-лабрадора (50–55 %), ортопироксена, замещенного хлоритом (10–20 %),

роговой обманки (2 %), биотита (7–12 %), кварца (3–10 %), калиевого полевого шпата (1,5–5 %), авгита, замещенного актинолитом (до 7 %). Фенокристаллы представлены преобладающим плагиоклазом (около 20 % от объема породы), реже хлоритизированным ортопироксеном и амфиболизированным авгитом.

**Аналитические методы**

**Анализ химического состава** проб производили на спектрометре последовательного действия PW-2400 производства компании Philips Analytical B.V в ИГЕМ РАН. При калибровке спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород и минерального сырья (14 ОСО, 56 ГСО). Подготовка препаратов для анализа породообразующих элементов выполнена путем плавления 0,3 г порошка пробы с 3 г тетрабората лития в индукционной печи с последующим отливом гомогенного стеклообразного диска. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 0,5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0,5 мас. %. Малые и редкие элементы определяли методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в Аналитическом сертификационном исследовательском центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов (АСИЦ ИПТМ РАН). Разложение образцов пород, в зависимости от их состава, проводили путем кислотного вскрытия как в открытой, так и в закрытой системах. Пределы обнаружения для REE, Hf, Ta, Th, U составляли 0,02–0,03 ppm, для Nb, Be, Co – 0,03–0,05 ppm, для Li, Ni, Ga, Y – 0,1 ppm, для Zr – 0,2 ppm, для Rb, Sr, Ba – 0,3 ppm, для Cu, Zn, V, Cr – 1–2 ppm. Правильность анализа контролировалась путем измерения международных и российских стандартных образцов GSP-2, BM, СТД-1А, СТ-1. Ошибки определения концентраций составляли от 3 до 5 мас. % для большинства элементов.

**U-Pb изотопное датирование.** Проба весом около

1,5 кг отбиралась из керна наименее измененных пород, затем дробилась до крупности 0,5 мм, промывалась до серого шлиха и разделялись в бромформе. Кристаллы циркона отбирались под биноклем из фракции с  $d > 2,9 \text{ г/см}^3$ . Монофракции цирконов в количестве в количестве 10 зерен выделены из кварцевых диоритов Романовского плутона (скважина 8206) в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). Выбранные индивиды совместно со стандартами 91500 и TEMORA [6] были зафиксированы смолой EpiFix в пределах шайбы диаметром 25 мм, которая шлифовалась абразивом до выведения кристаллов на поверхность. С помощью сканирующего электронного микроскопа CamScan MX2500 были получены катодолюминесцентные изображения, что позволило выбрать подходящие, с точки зрения методологии U-Pb датирования, координаты точек локального микрозондового исследования в пределах изучаемых кристаллов цирконов. Подготовленные таким способом цирконы анализировались с помощью мультиколлекторного вторично-ионного масс-спектрометра высокого разрешения SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург, по стандартной методике, следуя процедуре, описанной [7] (Аналитик к.г.-м.н. А.Н. Ларионов). Вычисление U-Pb возрастов и соответствующих параметрических величин производилось с помощью программы Isoplot Ex ver. 3.6 [8].

**Результаты исследования**

**Геохимия.** Химические составы изученных образцов Романовского массива приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Химические составы (мас.%) и концентрации редких и рассеянных элементов (ppm) кварцевых диоритов Романовского массива (скважина 8206)*

Глуб., м	317,9	325,2	329,7		317,9	325,2	329,7
SiO <sub>2</sub>	55,77	56,27	56,36	Nb	6,4	6,5	7,7
TiO <sub>2</sub>	0,77	0,73	0,73	Mo	1,4	1,2	1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,33	14,15	14,46	Sn	7,3	1,3	1,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,11	8,92	8,79	Cs	29,9	6,8	6,8
MnO	0,127	0,12	0,116	Ba	380	436	484
MgO	6,78	6,62	6,25	La	20,1	20,5	24,4
CaO	6,6	6,67	6,67	Ce	40,5	41,6	50,2
Na <sub>2</sub> O	2,47	2,55	2,68	Pr	4,8	5,0	5,7
K <sub>2</sub> O	2,22	2,08	2,12	Nd	18,6	18,0	22,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,19	0,2	Sm	3,8	3,7	4,4
ППП	1,53	0,88	0,77	Eu	0,98	0,94	1,1
Сумма	99,927	99,180	99,146	Gd	4,0	3,9	4,1
Be	1,4	1,1	1,1	Tb	0,58	0,58	0,60
Sc	21,0	21,1	26,1	Dy	2,6	2,6	3,5
V	138	139	138	Ho	0,60	0,66	0,69
Cr	454	442	402	Er	1,9	1,9	2,1
Co	30,2	29,7	28,7	Tm	0,27	0,25	0,29
Ni	65,0	64,3	68,6	Yb	1,6	1,6	2,0
Cu	21,6	39,1	33,6	Lu	0,27	0,27	0,29
Zn	73,9	74,6	81,0	Hf	3,4	3,6	4,3
Ga	15,7	15,7	19,5	Ta	0,47	0,46	0,52
Rb	98,1	81,0	97,0	W	0,61	0,71	0,70
Sr	256	249	319	Th	4,3	4,5	5,2
Y	16,1	16,0	20,4	U	1,4	1,4	1,8
Zr	120	139	173	Pb	6,6	6,9	8,1



Порфириновые кварцевые диориты являются наиболее меланократовыми породами Романовского массива. Они характеризуются высокими содержаниями  $Fe_2O_3t$  (8,9–9,3 мас.%) и  $MgO$  (6,35–6,9 мас.%) с  $Mg\#$  (около 60) и низкими, для диоритов,  $SiO_2$  (56,7 to 57,3 мас.%) и очень высокими  $Na_2O$  (2,5–2,7 мас.%) и  $K_2O$  (2,1–2,3 мас.%). По ретроспективным данным ООО «Воронежгеология» вариации петрогенных оксидов еще более широкие (от мелодиоритов до гранодиоритов центральной части):  $SiO_2$  (55,1 до 65,9 мас.%),  $MgO$  (10,0–2,9 мас.%) с  $Mg\#$  (70–43),  $Na_2O$  (2,3–3,6 мас.%) и  $K_2O$  (1,9–3,2 мас.%). Порфириновые кварцевые диориты имеют относительно повышенные содержания  $TiO_2$  (около 0,75 мас.%).

Порфириновые кварцевые диориты обогащены относительно хондрита легкими редкоземельными элементами (РЗЭ) и слабо фракционированы в области тяжелых РЗЭ с отношениями:  $La/Yb$  (12,4–12,8),  $La/Sm$  (5,3–5,6),  $Gd/Yb$  (2,1–2,5) (рис. 4а). Наблюдаются отчетливые отрицательные аномалии европия

( $Eu/Eu^* = 0,75–0,80$ ). Все образцы обогащены относительно примитивной мантии  $Rb$ ,  $Ba$ ,  $U$  и деплетированы  $Ti$ ,  $Sr$ ,  $Nb$ ,  $Ta$  (рис. 4б).

**U-Pb изотопный возраст.** Аналитические данные, полученные на масс-спектрометре SHRIMP-II для кварцевых диоритов Романовского массива, приведены в таблице 2. Цирконы демонстрируют признаки магматической кристаллизации с типичной осцилляционной зональностью роста (рис. 5а). Цирконы в кварцевых диоритах представлены прозрачными идиоморфными кристаллами или их обломками различного габитуса: от изометричного ( $l/m=1,03–1,69$ ; четырнадцать зерен) длиной 87–125 и шириной 63–103  $\mu m$  до удлиненно-призматического ( $l/m=2,43–5,88$ ; двадцать четыре зерна) длиной 145–347 и шириной 43–131  $\mu m$ . По интенсивности люминесцентного свечения в катодных лучах во всех кристаллах циркона хорошо проявлена тонкая ритмичная концентрическая (осцилляционная) зональность роста (рис. 5а).

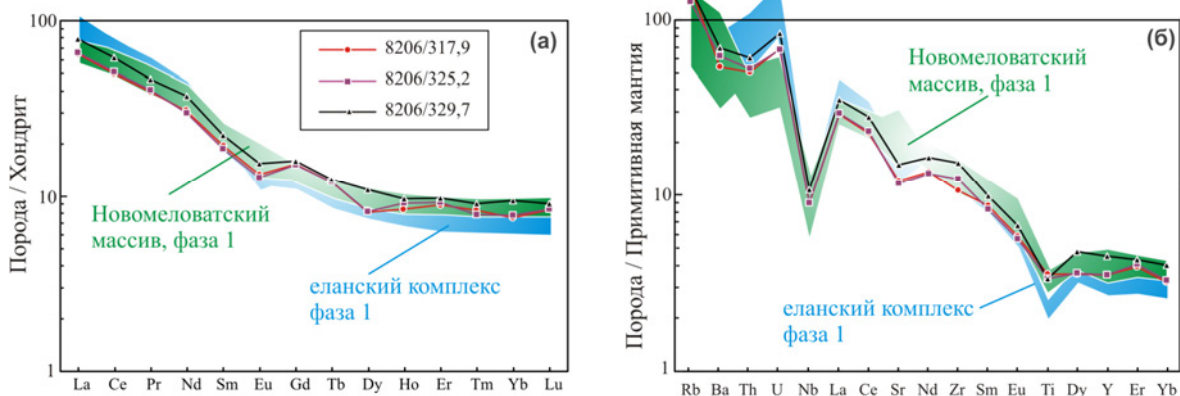


Рис. 4. Распределение редких и редкоземельных элементов в кварцевых диоритах Романовского массива. Хондрит С1, примитивная мантия по [9]. Составы биотит-ортопироксеновых диоритов первой фазы еланского комплекса и Новомеловатского массива по [10].

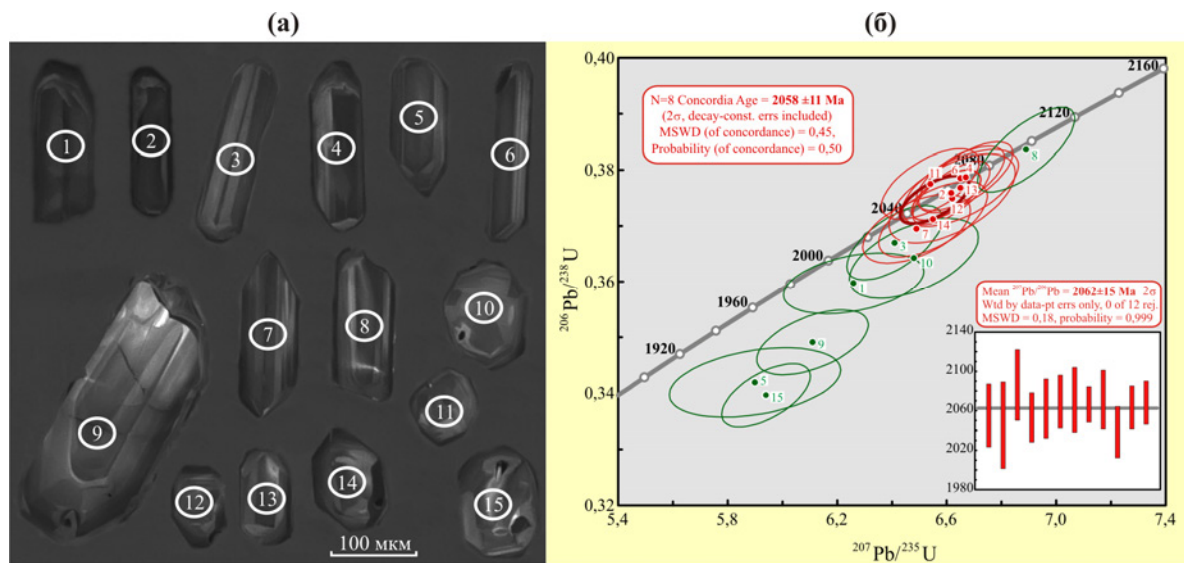


Рис. 5. Катодолуминесцентные фотографии зерен цирконов из кварцевого диорита Романовского массива и U-Pb изотопная диаграмма.

Таблица 2

Результаты U-Rb исследований цирконов

Spot	% <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	ppm U	ppm Th	<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	ppm <sup>206</sup> Pb*	(1) <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U Age	(1) <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb Age	% Dis-cordant	(1) <sup>238</sup> U/ <sup>206</sup> Pb* ±%	(1) <sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb* ±%	(1) <sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U ±%	(1) <sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U ±%	err cont
15	0,00	151	88	0,60	44,2	1885 ±18	2054 ±26	9,0	2945	0,1268	5,94	0,3396	0,601
5	0,53	159	91	0,59	47,0	1896 ±20	2031 ±57	7,1	2921	0,1251	5,90	0,3419	0,355
9	0,39	156	83	0,55	47,0	1930 ±19	2055 ±32	6,5	2862	0,1269	6,11	0,3491	0,532
1	0,34	255	177	0,72	79,2	1981 ±18	2045 ±44	3,3	2778	0,1262	6,26	0,3597	0,382
10	0,38	115	59	0,53	36,1	2002 ±22	2086 ±36	4,2	2744	0,1291	6,48	0,3642	0,527
3	0,11	139	73	0,55	43,9	2015 ±20	2053 ±25	1,9	2724	0,1267	6,41	0,3670	0,641
7	0,22	178	110	0,64	56,6	2027 ±19	2062 ±30	1,7	2705	0,1274	6,49	0,3695	0,540
14	--	197	127	0,66	62,8	2035 ±21	2069 ±27	1,7	2694	0,1279	6,55	0,3712	0,617
12	0,05	133	67	0,52	42,7	2053 ±24	2071 ±33	0,9	2667	0,128	6,62	0,3749	0,585
2	0,00	216	133	0,64	69,6	2057 ±17	2066 ±18	0,5	2661	0,1277	6,617	0,3759	0,700
13	0,08	178	109	0,63	57,7	2062 ±22	2071 ±30	0,4	2653	0,128	6,65	0,3768	0,588
11	0,00	146	78	0,55	47,2	2065 ±20	2038 ±26	-1,3	2649	0,1257	6,54	0,3775	0,618
6	0,15	190	112	0,61	62,0	2069 ±19	2063 ±22	-0,3	2641	0,1275	6,65	0,3785	0,644
4	--	234	141	0,62	76,0	2070 ±20	2068 ±22	-0,1	2642	0,1278	6,67	0,3787	0,681
8	0,00	158	93	0,61	52,0	2093 ±22	2103 ±20	0,5	2607	0,1304	6,89	0,3836	0,732

Примечания: ошибки приведены для интервала ±1σ; Rb и Rb\* – нерадиоактивный и радиоактивный свинец соответственно; (1) – коррекция на Rb; по измеренному <sup>204</sup>Pb; D, % – дискордантность 100×[(возраст <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb)/(возраст <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U) – 1]. Ошибки калибровки 0,33.

Пятнадцать зерен циркона были проанализированы и демонстрируют <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb возраста в интервале от 2031 до 2103 млн лет, высокое отношение Th/U = 0,52–0,72. Большинство изотопно-геохронологических данных конкордантны с U-Pb возрастом 2058±11 млн лет (СКВО = 0,45; вероятность конкордантности = 0,50; рис 5б), который совпадает со средневзвешанным <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb возрастом 2062±15 млн лет.

### Обсуждение и выводы Формационная принадлежность

Вопрос, определяющий потенциальную никеленосность Романовского плутона, заключается в том, к какому типу гипабиссальных интрузивов он относится: (а) еланский никеленосный комплекс или (б) новомеловатский тип массивов с неясными перспективами? Оба типа интрузий имеют близкие геохимические особенности, такие как дифференцированные спектры РЗЭ, обогащенность элементами с крупными ионными радиусами и отрицательные аномалии Nb, Ti относительно примитивной мантии (рис. 4). Однако, породы первой фазы новомеловатского типа, относительно их аналогов в еланском комплексе, обогащены тяжелыми РЗЭ, деплетированы Th и U. Аналогичные новомеловатским спектры редких и рассеяных элементов, плюс отрицательная европиевая аномалия, наблюдаются в изученных кварцевых диоритах Романовского плутона. Отрицательная аномалия европия согласуется с фракционированием плагиоклаза и обилием его фенокристаллов (иногда преобладанием над мафическими фенокристаллами) в породах ранних фаз как Новомеловатского, так и Романовского плутонов. Кроме петрографических особенностей, петрохимические данные позволяют относить кварцевые диориты и связанные с ними породы Романовского

массива к новомеловатскому типу интрузий (рис. 6). Контрастные отличия стерильных, в отношении никеля, интрузий по сравнению с никеленосными, заключаются как в повышенной титанистости (рис. 4), так и в более железистом составе пород (рис. 6) и минералов.

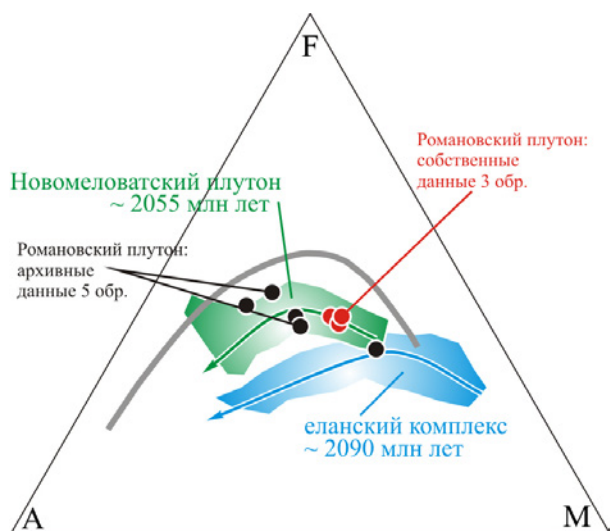


Рис. 6. Положение составов кварцевых диоритов Романовского плутона на диаграмме А (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) – F (FeO + 0.9 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) – М (MgO) [11]. Поля составов еланского комплекса и Новомеловатского массива по [10].

### Обсуждение и выводы Тектоническая позиция

Полученные значения возраста кварцевых диоритов совпадают со временем кульминации постколлизийного гранитоидного магматизма А и S типов [12] и постколлизийного мафитового магматизма [10] Воронцовского террейна. Особенности состава, свидетельствующие о генерации магмы в результате плавления пород мантии обогащенного типа, время кристаллизации кварцевых диоритов и их рвущие контакты с вмещающими метаморфизованными породами воронцовской серии служат основанием для отнесения внедрения Романовского плутона в постколлизийный период формирования Волго-Донского складчатого пояса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bogdanova, S. V. The Volga-Don orocline stitching Volgo-Sarmatia / S. V. Bogdanova, A. V. Postnikov, E. V. Bibikova // Geophysical Research Abstracts 14. 2012. EGU 2012–11762.

Воронежский государственный университет

Савко Константин Аркадьевич, д. г.-м. н., профессор, зав. кафедрой полезных ископаемых и недропользования  
E-mail: ksavko@geol.vsu.ru; Тел.: 8-915-544-21-64

Терентьев Роман Анатольевич, ведущий научный сотрудник НИИ Геологии ВГУ, кандидат геолого-минералогических наук  
E-mail: terentiev@geol.vsu.ru; Тел.: 8 (473) 222-73-63

2. Чернышов, Н. М. Еланский тип сульфидных медно-никелевых месторождений и геолого-генетическая модель их формирования (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов // Геология рудных месторождений, 1995. – Т. 37 (3). – С. 220–236.

3. Терентьев, Р. А. Высокомагнезиальные низкотитанистые габбро–гранитные серии в палеопротерозое восточной Сарматии: геохимия и условия формирования / Р. А. Терентьев, К. А. Савко // Геология и геофизика, 2016. – № 6 [в печати]

4. Кременецкий, А. А. Воронежская параметрическая скважина – новый этап познания глубинного строения Воронежского кристаллического массива / А. А. Кременецкий, В. Ю. Скрябин, Р. А. Терентьев, Т. Н. Полякова, В. М. Ненахов, Г. С. Золотарева, А. Н. Ларионов // Разведка и охрана недр, 2006. – № 9–10. – С.109–117.

5. Bogdanova, S. V. Segments of the East European Craton / S. V. Bogdanova // In Gee, D. G., and Beckholmen, M., (eds.) EUROPROBE in Jablonna 1991: Polish Academy of Sciences, Publications of the Institute of Geophysics, 1993. – V. A-20. – P. 33–38.

6. Black, L. P. TEMORA1: a New Zirconstandard for Phanerozoic U-Pb Geochronology / L. P. Black, S. L. Kamo, C. M. Allen, J. N. Aleinikoff, D. W. Davis, R. J. Korsch, C. Foudoulis // Chemical Geology, 2003. – V. 200. – P. 155–170.

7. Larionov, A. N. The Vendian alkaline igneous suite Northern Timan: zircon ages of gabbros and syenites. In: Gee, D. G., Pease, V. (Eds.) The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica / A. N. Larionov, V. A. Andreichev, D. G. Gee– Geological Society, London, Memoirs. – 2004. – V. 30. – P. 69–74.

8. Ludwig, K. R. Isoplot/Ex ver. 3.6. / K. R. Ludwig // Berkeley Geochronology Center. Special Publications. – 2008. – No 4. – 77 p.

9. Sun, S.-S. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes / Sun, S.-S., W.F. McDonough // Journal of the Geological Society of London, Special Publications. – 1989. – V. 42. – P. 313–345.

10. Terentiev, R.A. U–Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic magmatic suite from East Sarmatian Orogen: tectonic implications on Columbia supercontinent / R. A. Terentiev, V. Yu. Skryabin, M. Santosh // Precambrian Research. – 2016. – V. 273. – P. 165–184.

11. Irvine, T. N. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks / T. N. Irvine, W. R. A. Baragar // Canadian J. Earth Sci. – 1971. – V. 8. – P. 523–548.

12. Савко, К. А. Палеопротерозойские граниты А- и S-типа востока Воронежского кристаллического массива: геохронология, петрогенезис и тектоническая обстановка формирования / К. А. Савко, А. В. Самсонов, А. Н. Ларионов, Ю. О. Ларионова, Н. С. Базиков // Петрология, 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 235–264.

Voronezh State University

Savko K. A., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of the Mineral Resource Department  
E-mail: ksavko@geol.vsu.ru; Тел.: 8-915-544-21-64

Terentiev R. A., leading researcher of Scientific Research Institute of Geology of the VSU, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences  
E-mail: terentiev@geol.vsu.ru; Тел.: 8 (473) 222-73-63