

ГАББРОДИОРИТ-ТОНАЛИТ-ТРОНДЪЕМИТОВАЯ И МОНЦОДИОРИТ-КВАРЦДИОРИТОВАЯ АССОЦИАЦИИ МАКАРЬЕВСКИХ ИНТРУЗИВОВ (ВОРОНЕЖСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАССИВ)

Р. А. Терентьев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 31 января 2014 г.

Аннотация: рассмотрены особенности геологического строения макарьевских массивов. Даны количественно-минеральная и петрохимическая характеристики пород, которые позволили выделить две ассоциации: раннюю габбродиорит-тоналит-тронджемитовую и позднюю монцодиорит-кварцдиоритовую. Выявлены отличающиеся в каждой ассоциации тренды кристаллизационной дифференциации. Предложено выделить габбродиорит-тоналит-тронджемитовую ассоциацию в самостоятельный макарьевский интрузивный комплекс. Установлено, что продукты ранней ассоциации комагматичны известково-щелочной метаплагиобазальт-андезит-плагиодацитовой формации подгоренской толщи лосевской серии.

Ключевые слова: Воронежский кристаллический массив, палеопротерозой, габбродиорит, кварцевый диорит, тоналит, монцодиорит, известково-щелочная серия, геохимия.

Abstract: the geological features of Makar'ye intrusions are discussed. Wall rock of Makar'ye intrusions are Losevo series of Paleoproterozoic eon. The quantitative-mineral and petrochemical properties are identified, prompting separations that early gabbrodiorite-tonalite-trondhjemite and late monzodiorite-quartzdiorite associations. The crystal differentiation trend lines of each several associations are different. New Makar'ye magmatic complex is offered for gabbrodiorite-tonalite-trondhjemite rock series. Rocks of early gabbrodiorite-tonalite-trondhjemite association are comagmatic rocks of calc-alkali metaplagiobasalt-andesite-plagioclase assemblage of Podgornoe thicknesses of Losevo series. Gabbrodiorite-tonalite-trondhjemite association in concordance with its material composition and injection relative time (about 2110–2090 ma ages) are distinguished closing phase of active margin evolution in geodynamical chain of Losevo structural-formational zone.

Key words: Voronezh Crystal Massif, Paleoproterozoic, gabbrodiorite, quartz diorite, tonalite, monzodiorite, calc-alkali series, geochemistry.

В пределах Лосевской структурно-формационной зоны (ЛСФЗ) Воронежского кристаллического массива (ВКМ) установлены и описаны интрузивные образования усманского тронджемит-гранодиоритового (неопубликованные данные В. Ю. Скрыбина, Р. А. Терентьева), рождественского габброидного, нововоронежского метагаббро-диабазового [1] и ольховского габбронорит-кварцмонзонит-гранитного [2] комплексов, прорывающие палеопротерозойские [3] образования лосевской серии (первые три) и воронежской свиты (ольховский).

Традиционно все не гранитоидные массивы в поле развития лосевской серии объединяются в рождественский комплекс, а в пределах наложенной на ЛСФЗ Ольховско-Шукавской структуры – в первую фазу ольховского комплекса. Считается, что вмещающими для массивов ольховского комплекса являются слабо метаморфизованные груботерригенные об-

разования воронежской свиты, которая с размывом и структурным несогласием перекрывает лосевскую серию [4]. Таким образом, согласно действующей легенде докембрия Воронежской серии листов в поле распространения лосевской серии не предполагается обнаружение интрузий, сложенных породами семейства диоритов. Однако по результатам глубинного бурения (В. М. Богданов, 1986) в центральной части ЛСФЗ была вскрыта группа диоритсодержащих так называемых макарьевских массивов, не соответствующих по своему вещественному составу петротипическому Ольховскому кольцевому массиву.

С целью выяснения геолого-структурной позиции (относительного возраста) и вмещающих пород, вещественного состава и трендов дифференциации, формационной принадлежности и возможных палеоэффузивных комагматов пород макарьевских массивов выполнена настоящая работа с применением петрографических и петрогеохимических методов исследования.

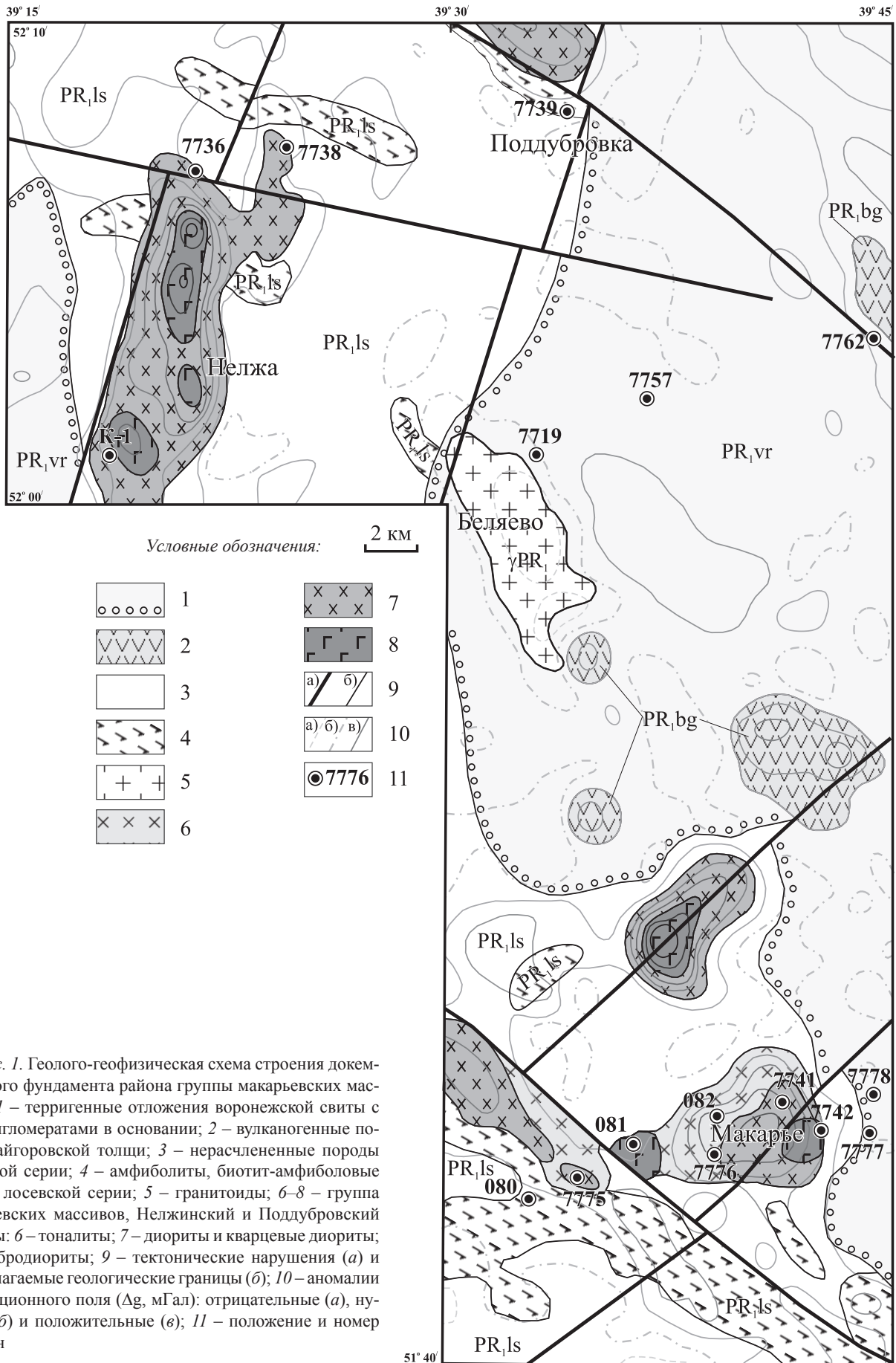


Рис. 1. Геолого-геофизическая схема строения докембрийского фундамента района группы макарьевских массивов: 1 – терригенные отложения воронежской свиты с метаконгломератами в основании; 2 – вулканогенные породы байгоровской толщи; 3 – нерасчлененные породы лосевской серии; 4 – амфиболиты, биотит-амфиболовые сланцы лосевской серии; 5 – гранитоиды; 6–8 – группа макарьевских массивов, Нелжинский и Поддубровский массивы: 6 – тоналиты; 7 – диориты и кварцевые диориты; 8 – габбродиориты; 9 – тектонические нарушения (а) и предполагаемые геологические границы (б); 10 – аномалии гравитационного поля (Дг, мГал): отрицательные (а), нулевые (б) и положительные (в); 11 – положение и номер скважин

Местоположение скважин, керн которых использован для петрографических, геохимических исследований, показано на рис. 1. Опробованы интрузивные породы (52 образца), ксенолиты и вмещающие метаморфические породы (9 образцов). Осуществлено петрографическое описание с подсчетом количественно-минерального состава 49 шлифов, геохимическим исследованиям подвергнуты 8 образцов по интрузивным породам. Концентрации петрогенных оксидов определялись рентгено-флуоресцентным методом, FeO и потеря при прокаливании (ППП) – методом классической мокрой химии, редких, рассеянных элементов – методом ICP-MS. Для сравнительной характеристики использованы неопубликованные петрохимические данные В. М. Богданова (19 анализов) и Т. Е. Салтыковой с соавторами (1 анализ).

Геологическая позиция. Рассматриваемые массивы расположены в пределах восточной части ВКМ среди поля палеопротерозойских образований лосевской серии, главным образом, метатерригенного состава с узкими зонами развития амфиболитов и мигматитов (скважины 080 и 7739). Интрузивные массы основных и средних пород хорошо выражены максимумами в гравитационном поле (см. рис. 1). В эрозионном срезе докембрийского фундамента они имеют вытянутую форму (18–49 км²), ориентированы в различных направлениях как субсогласно, так и вкрест предполагаемого простираения амфиболитосодержащих толщ лосевской серии, выраженных аномалиями магнитного поля. Макарьевский массив, который является наиболее разбуренным (скв. 7741, 7742, 7775, 7776, 081 и 082), вытянут в субширотном направлении, сплошность массива нарушается разрывными нарушениями, одно из которых разделяет его на две части.

Контактные взаимоотношения с рамой не выявлены, тем не менее, состав ксенолитов размером от 1 до 35 см в диоритоидах (в порядке убывания): плагиогнейсы, амфиболиты, роговообманковые меланогаббро и амфибол-пироксен-лабрадорные шпинельсодержащие роговики по основным породам, позволяет относить их к палеопротерозойской (2140–2180 млн лет) лосевской серии [3]. Макарьевский массив имеет неоднородное строение и сложен двумя ассоциациями пород: габбродиорит-тоналит-трондьемитовой и монцодиорит-кварцдиоритовой. Первая занимает 90 % площади интрузии, а вторая распространена ограниченно и вскрыта одной скважиной 7776. Развитие гнейсовидности в породах габбродиорит-тоналит-трондьемитовой ассоциации за счет ориентировки темноцветных минералов и плейчатости в эндоконтактных частях интрузивов свидетельствует об их участии в процессах складча-

тости. Вероятно, с этими процессами связаны вторичные преобразования пород, выраженные в появлении кварцевых, кварц-эпидот-карбонатных и кварц-полевошпатовых прожилков, и мигматизация, наложенная на диоритоиды.

В приконтактных частях массивов породы первой ассоциации прорваны дайками биотитовых гранодиоритов и гранитов мощностью 0,5–1,5 м. Дайки гранодиоритов соответствуют по составу усманскому комплексу, массивы которого перекрываются конгломератами воронежской свиты с галькой этих гранитоидов. Это означает, что макарьевские массивы не могут быть моложе воронежской свиты.

По сравнению с гнейсовидными породами габбродиорит-тоналит-трондьемитовой серии пород вторая ассоциация монцодиоритов и кварцевых диоритов с орто- и клинопироксеном (скв. 7776) характеризуется массивной текстурой и в меньшей степени затронута вторичными процессами.

Вещественный состав. Породы первой ассоциации состоят из переменных количеств плагиоклаза, биотита, роговой обманки, кварца. В наиболее меланократовых габбродиоритах сохраняются реликты клинопироксена, обрастающего роговой обманкой, а в лейкократовых трондьемитах появляется заметное количество калиевого полевого шпата. Вариации количественно-минерального состава (табл. 1, рис. 2) позволяют выделить несколько главных разновидностей от преобладающих мелано-, мезократовых биотит-роговообманковых кварцевых и кварцсодержащих габбродиоритов и кварцевых диоритов до подчиненных роговообманково-биотитовых и биотитовых тоналитов и трондьемитов. Переходы между разновидностями постепенные, они закономерно чередуются между собой в разрезах скважин, прошедших по докембрию от 36 до 55 м.

Габбродиориты гипидиоморфнозернистой структуры состоят из идиоморфных зерен (0,70–0,75 мм) андезина-лабрадора (An₅₀) 58,3–63,3 об. %, роговой обманки 20,4–25,3 об. %, чешуек биотита 10,2–12,5 об. %, интерстиции которых заполнены кварцем 3,1–6,4 об. % и редкими зернами калиевого полевого шпата. Из аксессуарных минералов широко развит апатит, иногда более 1 об. % (скв. 7742, глубина 313,1 м), в незначительных количествах диагностированы титаномагнетит, циркон и сульфиды.

Кварцевые диориты и тоналиты количественно преобладают среди всех разновидностей пород Макарьевского массива, они связаны взаимными переходами с увеличением количеств кварца, уменьшением роговой обманки и раскислением плагиоклаза (An_{45–30}) от первых ко вторым. В мезократовых разновидностях кварцевых диоритов и тоналитов появляется слабо выраженная порфириовидная структу-

Таблица 1
Количественно-минеральный состав представительных образцов пород Макарьевского массива

№ п/п	№ скв,	Глубина, м	Наименование (размер зерна, мм)	Pl	№ Pl	Орх	Срх	Bt	Hbl	Qtz	Fsp	Акцессории
1	7742	282,0	Биотит-роговообманковый тоналит (0,79 мм)	52,5 ± 6,3		–	–	13,8 ± 3,4	17,5 ± 5,2	15,9 ± 5,6	–	0,3 ± 0,1
2	7742	286,0	Роговообманково-биотитовый тоналит (0,77 мм)	54,8 ± 8,6		–	–	14,5 ± 4,4	13,3 ± 2,8	16,7 ± 4,2	–	0,6 ± 0,5*
3	7742	290,0	Биотит-роговообманковый габбродиорит (0,70 мм)	63,3 ± 4,8	50	–	1,8	10,2 ± 4,0	20,8 ± 4,4	3,1 ± 1,0	0,2	0,6
4	7742	295,7	Биотит-роговообманковый кварцевый габбродиорит (0,76 мм)	58,3 ± 4,6		–	0,6	10,9 ± 2,0	25,3 ± 2,8	4,6 ± 1,8	–	0,4 ± 0,1*
5	7742	300,0	Биотит-роговообманковый кварцевый диорит (0,71 мм)	58,7 ± 2,1		–	–	14,9 ± 1,4	18,1 ± 3,3	8,1 ± 3,3	–	0,2 ± 0,1
6	7742	313,1	Биотит-роговообманковый кварцевый габбродиорит (0,75 мм)	59,0 ± 4,5		–	–	12,5 ± 2,5	20,4 ± 4,0	6,4 ± 1,6	–	1,7 ± 0,6*
7	7775	262,1	Биотит-роговообманковый тоналит (0,47 мм)	61,5 ± 2,3	30	–	–	9,9 ± 1,8	11,7 ± 2,8	16,5 ± 3,2	–	0,3 ± 0,2
8	7775	267,2	Биотитовый тоналит (0,31 мм)	38,0 ± 5,3	30	–	–	18,1 ± 3,7	0,2	40,0 ± 5,6	3,2 ± 1,8	0,5 ± 0,1
9	7775	269,0	Роговообманково-биотитовый тоналит (0,27 мм)	37,7 ± 4,1	30	–	–	19,4 ± 2,2	7,5 ± 3,1	33,9 ± 5,5	0,8	0,8 ± 0,4**
10	7775	270,0	Роговообманково-биотитовый тоналит (0,34 мм)	50,5 ± 3,0	37	–	–	20,0 ± 3,2	9,9 ± 1,5	17,5 ± 3,5	0,5	1,7 ± 0,5**
12	7775	275,0	Роговообманково-биотитовый кварцевый меладиорит (0,29 мм)	39,0 ± 4,5	45	–	–	32,2 ± 3,9	15,9 ± 2,1	9,1 ± 2,2	–	3,8 ± 1,7**
13	7775	278,0	Роговообманково-биотитовый тоналит (0,38 мм)	43,8 ± 5,6		–	–	18,3 ± 2,7	5,2 ± 2,5	31,4 ± 2,4	–	1,2 ± 0,3**
14	7775	283,5	Роговообманково-биотитовый тоналит (0,37 мм)	48,5 ± 2,4		–	–	18,7 ± 0,9	6,1 ± 1,4	25,8 ± 3,7	–	0,9 ± 0,3**
15	7775	290,0	Биотитовый трондьемит (0,65 мм)	36,3 ± 3,1	25	–	–	9,1 ± 1,1	0,1	53,5 ± 2,9	–	1,0 ± 0,2**
16	7776	279,2	Роговообманково-биотит-дупироаксеновый кварцевый монцодиорит (0,51 мм)	50,2 ± 3,6	33	6,6 ± 3,2	8,9 ± 3,1	8,3 ± 2,9	8,2 ± 3,1	6,4 ± 2,7	10,1 ± 4,1	1,2
17	7776	282,5	Гиперстен-биотитовый кварцевый диорит (0,46 мм)	59,2 ± 3,7	35	7,3 ± 2,1	1,8 ± 0,8	18,5 ± 3,9	1,1 ± 0,9	10,4 ± 1,9	±	1,7 ± 0,5**
18	7776	288,3	Роговообманково-гиперстеновый кварцевый диорит (1,20 мм)	63,7 ± 6,6	33	9,6 ± 3,1	3,8 ± 2,0	5,3 ± 1,8	3,7 ± 1,8	11,0 ± 2,2	2,6 ± 1,8	0,4
19	7776	296,7	Биотит-дупироаксеновый кварцевый монцодиорит (0,62 мм)	39,8 ± 5,2	36	11,1 ± 2,1	15,1 ± 2,4	19,4 ± 6,6	3,4 ± 1,2	4,4 ± 0,9	5,7 ± 1,1	1,1

Примечание. В подсчеты породообразующих минералов включены развивающиеся по ним вторичные минералы, * – апатита более 90 % от суммы аксессуариев; ** – присутствуют рудные минералы порядка 1 и более %.

ра с идиоморфными фенокристаллами андезина. Мелкозернистая основная масса сложена ксеноморфными, относительно фенокристаллов, роговой обманкой и плагиоклазом, чешуйками биотита, кварца и калишпата. Акцессорные минералы представлены, как и в габбродиоритах, апатитом и цирконом, часто в значительных количествах до 3,2 об. % присутствуют рудные минералы (пирит, ильменит, пирротин в ассоциации с графитом, очень редко магнетит).

Обогащенные кварцем (более 30 мас. %) тоналиты и трондjemиты – наименее распространенные породы. Они характеризуются заметным уменьшением количества роговой обманки 0,1–7,5 об. % и увеличением количества кварца. Кварц образует ксеноморфные, крупные относительно биотит-плагиоклазовой массы, скопления, что нередко придает породам пятнистый облик. Состав акцессорных минералов аналогичен мезократовым тоналитам и кварцевым диоритам с заметным преобладанием рудных минералов и доминированием циркона над апатитом.

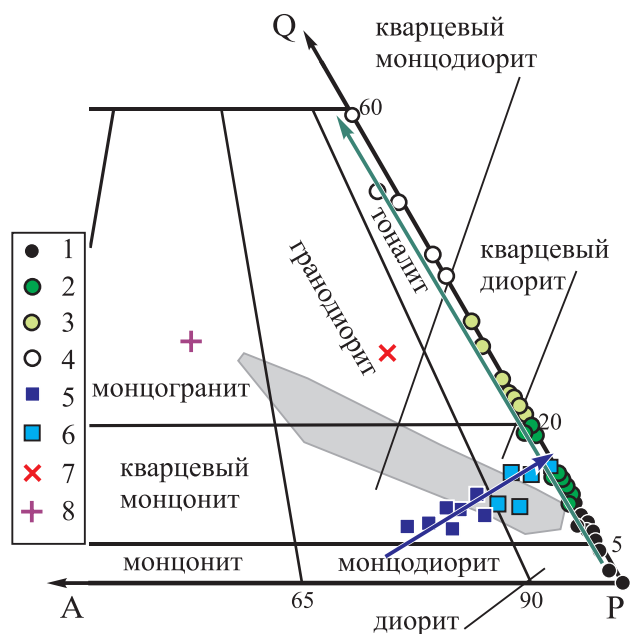


Рис. 2. Модальный минеральный состав группы макарьевских массивов на фрагменте диаграммы QAP [5, 6]: Q – кварц, А – щелочные полевые шпаты, Р – плагиоклаз. Габбродиорит-тоналит-трондjemитовая ассоциация: 1 – габбродиориты; 2 – кварцевые диориты; 3 – тоналиты; 4 – обогащенные кварцем тоналиты и трондjemиты; монцодиорит-кварцдиоритовая ассоциация: 5 – кварцевые монцодиориты; 6 – кварцевые диориты; дайки: 7 – гранодиорит (скв. 082/295,5 м); 8 – гранит (скв. 081/257,9 м). Стрелками показаны направления дифференциации ассоциаций пород от меланократовых к лейкократовым разновидностям; светло-серый полигон – поле составов Ольховского кольцевого массива по данным [7]

Выявленные структурные закономерности пород и взаимоотношения минералов свидетельствуют о

следующей последовательности кристаллизации при переходе от габбродиоритов к тоналитам: клинопироксен, роговая обманка и андезин-лабрадор, андезин, биотит, кварц и калишпат. В породах первой ассоциации заметно влияние фракционирования плагиоклаза, особенно в мезократовых разновидностях, и обогащение кварцем продуктов кристаллизации остаточных расплавов – трондjemитов.

Как было отмечено выше, породы второй ассоциации массивной текстуры и менее подвержены вторичным изменениям относительно серии габбродиорит-тоналит-трондjemит. Среди них можно выделить две главные разновидности – роговообманково-биотит-двупироксеновые кварцевые монцодиориты и биотит-гиперстеновые роговообманковосодержащие кварцевые диориты. Разновидности связаны постепенными переходами с увеличением кварца и уменьшением калишпата от кварцевых монцодиоритов к кварцевым диоритам. Структура пород мелко- и среднезернистая (0,46–1,20 мм) гипидиоморфнозернистая – степень идиоморфизма уменьшается в ряду ортопироксен – клинопироксен и роговая обманка – плагиоклаз (андезин) и калишпат (в монцодиоритах) – биотит – кварц и калишпат (в кварцевых диоритах). Клинопироксен обрастает каймой роговой обманки в идиоморфных кристаллах или образует пойкилитовые кристаллы. Калишпат в монцодиоритах обладает высокой степенью идиоморфизма аналогичной плагиоклазовым кристаллам, а в кварцевых диоритах он занимает интерстиции, что свидетельствует о разном порядке кристаллизации в начальных и конечных дифференциатах ассоциации. Вторичные изменения выражены в баститизации ортопироксена и хлоритизации клинопироксена. Акцессорная минерализация представлена едичными кристаллами граната и стабильной примесью циркона, апатита и рудных минералов (магнетит, ильменит и агрегаты пирротина с графитом).

Структурные особенности пород второй фазы и их модальный минеральный состав свидетельствуют об обогащении кварцем и изменении порядка кристаллизации калишпата от монцодиоритов к кварцевым диоритам, что контрастно отличает их от серии габбродиорит-тоналит-трондjemит (см. рис. 2).

Петрохимия и геохимия (табл. 2). По особенностям химического состава породы первой ассоциации при содержаниях $SiO_2 = 51,58–66,92$ мас. % по сумме $Na_2O + K_2O$ (1,3–5,35 мас. %) относятся к породам нормальной и реже умеренной щелочности, характеризуются метаглиноземистостью ($A/CNK = 0,63–0,96$), увеличивающейся с ростом кремнезема, нормативных ортоклаза, плагиоклаза железистостью ($Fe/(Fe + Mg) = 0,29–0,60$) (рис. 3) и преобладанием

Таблица 2

Химический состав (мас. %) пород Макарьевского и Нелзинского массивов

№ п/п	Порода	Габбродиориты, кварцевые габбродиориты															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	Ксенолит	7742	081	7775	081	7742	7742	081	7742	7742	7742	7742	7742	7742	7742	7775	7775
Скважина																	
Глубина, м	286,0	265,0	300,7	273,1	278,8	288,4– 295,7	310,0	249,5	290,0	288,4– 295,7	288,4– 295,7	288,4– 295,7	288,4– 295,7	288,4– 295,7	288,4– 295,7	304,0	304,0
SiO ₂	49,90	51,58	53,08	53,40	54,24	54,40	54,70	54,74	55,00	55,20	55,20	55,20	55,20	55,20	55,20	58,76	59,64
TiO ₂	0,75	1,10	1,11	1,13	1,25	0,690	0,867	1,10	0,634	0,754	0,754	0,754	0,754	0,754	0,724	0,93	0,99
Al ₂ O ₃	7,68	15,35	13,62	14,27	14,61	16,20	15,70	15,35	15,90	16,70	16,70	16,70	16,70	16,70	15,60	14,77	17,43
Fe ₂ O ₃	9,65*	1,48	1,89	2,68	5,45	9,12*	10,00*	1,31	9,36*	8,51*	8,51*	8,51*	8,51*	8,51*	9,03*	9,73*	1,16
FeO	–	8,07	7,92	8,00	5,51	–	–	8,21	–	–	–	–	–	–	–	6,48	5,11
MnO	0,124	0,04	0,01	0,05	0,06	0,122	0,126	0,04	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	0,112	0,104	0,04
MgO	13,20	7,31	9,94	8,45	6,83	5,39	5,17	5,85	5,50	4,88	4,88	4,88	4,88	4,88	5,50	4,76	2,12
CaO	14,30	7,91	10,76	7,23	7,23	7,98	6,58	7,23	7,52	7,13	7,13	7,13	7,13	7,29	6,92	6,78	6,73
Na ₂ O	0,910	3,20	1,10	2,70	3,20	3,00	2,78	3,20	3,00	3,10	3,10	3,10	3,10	2,88	3,45	3,03	3,60
K ₂ O	0,731	1,35	0,20	1,20	1,00	1,51	1,79	1,35	1,56	1,90	1,90	1,90	1,90	1,57	1,74	1,46	1,75
P ₂ O ₅	0,051	0,37	0,30	0,39	0,34	0,272	0,230	0,37	0,218	0,341	0,341	0,341	0,341	0,253	0,467	0,270	0,27
ППП	2,07	1,67	0,80	0,56	0,70	1,37	1,5	1,99	1,38	1,28	1,28	1,28	1,28	1,55	1,83	0,89	0,90
Total	99,37	99,43	100,73	100,06	100,42	100,05	99,44	100,74	100,20	99,91	99,91	99,91	99,91	99,91	100,03	100,93	99,74
FeO	7,44	–	–	–	–	7,59	8,83	–	7,95	7,33	7,33	7,33	7,33	7,69	5,54	8,22	–
SO ₃	–	0,14	0,12	0,48	0,48	–	–	0,50	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,63
H ₂ O	–	–	0,08	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,05	0,10
Na ₂ O + K ₂ O	1,87	4,55	1,30	3,90	4,20	5,03	5,19	4,55	5,09	5,54	5,54	5,54	5,54	4,98	5,79	4,97	5,35
K ₂ O/Na ₂ O	0,80	0,42	0,18	0,44	0,31	0,50	0,64	0,42	0,52	0,61	0,61	0,61	0,61	0,55	0,50	0,48	0,49
al'	0,34	0,91	0,69	0,75	0,82	1,12	1,03	1,00	1,07	1,25	1,25	1,25	1,25	1,07	1,54	1,13	2,08
A/CNK	0,27	0,73	0,63	0,76	0,75	0,77	0,85	0,77	0,78	0,83	0,83	0,83	0,83	0,79	0,87	0,87	0,87
Fe/(Fe + Mg)	0,24	0,40	0,33	0,38	0,39	0,44	0,49	0,46	0,45	0,46	0,46	0,46	0,46	0,44	0,53	0,49	0,60

Окончание табл. 2

№ п/п	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Скважина	7775	7775	7775	082	7776	7776	7776	7776	7736	7736	7776	081	082
Глубина, м	311,0	300,2	312,0	307,9	301,5	303,0	299,0	287,0	322,0– 329,0	328,7	282,0	257,9	295,5
SiO ₂	55,10	57,08	57,14	66,92	55,90	57,04	57,76	58,62	58,70	58,72	60,80	71,38	69,96
TiO ₂	1,32	1,07	0,85	0,70	1,38	0,96	1,02	1,18	0,87	1,20	1,23	0,38	0,38
Al ₂ O ₃	15,35	15,10	13,16	12,23	14,37	14,96	14,71	16,07	18,00	15,01	14,89	14,32	14,32
Fe ₂ O ₃	2,23	1,02	0,69	0,82	2,28	1,68	1,33	0,68	0,84	1,97	0,01	0,70	0,51
FeO	7,89	8,21	7,13	6,19	6,27	6,09	6,12	7,71	4,89	4,83	7,84	2,16	3,06
MnO	0,03	0,01	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,07	0,08	0,07	0,06	0,03	0,05
MgO	6,36	6,52	10,27	2,95	6,12	5,36	5,87	4,56	3,04	2,90	3,80	0,81	1,30
CaO	9,64	8,07	6,73	2,96	7,29	7,18	6,95	4,04	4,91	5,47	3,97	1,58	2,26
Na ₂ O	1,30	1,80	1,40	3,50	2,80	2,90	2,80	2,80	3,87	4,00	2,85	4,00	4,40
K ₂ O	0,35	0,50	1,20	1,50	2,60	3,30	2,80	1,95	3,22	4,20	1,85	4,10	3,20
P ₂ O ₅	0,32	0,32	0,30	0,37	0,71	0,25	0,34	0,18	0,34	0,34	0,18	0,25	0,32
ППП	0,84	0,68	1,99	1,23	0,96	0,83	0,57	2,89	0,67	1,59	2,03	0,53	0,72
Total	100,73	100,38	100,90	99,40	100,73	100,58	100,30	100,75	99,43	100,30	99,51	100,24	100,48
FeO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
SO ₃	0,28	0,26	0,11	0,19	0,13	0,15	0,18	0,71	–	0,25	0,08	0,14	0,05
H ₂ O	0,1	0,08	0,07	0,05	0,16	0,12	0,31	0,11	–	0,30	0,30	–	0,02
Na ₂ O + K ₂ O	1,65	2,30	2,60	5,00	5,40	6,20	5,60	4,75	7,09	8,20	4,70	8,10	7,60
K ₂ O/Na ₂ O	0,27	0,28	0,86	0,43	0,93	1,14	1,00	0,70	0,83	1,05	0,65	1,03	0,73
al'	0,93	0,96	0,73	1,23	0,98	1,14	1,10	1,24	2,05	1,55	1,28	3,90	2,94
A/CNK	0,77	0,83	0,83	0,96	0,70	0,70	0,73	1,14	0,96	0,71	1,07	1,03	0,97
Fe/(Fe + Mg)	0,44	0,43	0,29	0,55	0,40	0,41	0,39	0,50	0,49	0,52	0,54	–	–

Примечания. * – Fe₂O₃ общ., в этом случае дополнительно химическим методом определено FeO (данные автора). al' = Al₂O₃/(Fe₂O₃ + FeO + MgO) [9], A/CNK = Al₂O₃/(CaO + Na₂O + K₂O) молекулярные количества. Анализы 1–19 по породам первой габродиорит-тоналит-протандемитовой ассоциации, анализы 20–26 по породам второй монодиорит-квардиоритовой ассоциации, анализы 27 и 28 по дайковым образованиям. Прочерк – нет данных. Анализы 1, 6, 7, 9–13 – авторские; 24 – по данным Т. Е. Салтыковой с соавторами, остальные – по данным В. М. Богданова.

натрия над калием ($K_2O/Na_2O = 0,18-0,86$). В отличие от них монцодиорит-кварцдиоритовая серия Макарьевского (скв. 7776) и Нелжинского (скв. 7736) массивов при узком диапазоне значений $SiO_2 = 55,9-60,8$ мас. % относится, как правило, к умереннощелочным ($Na_2O + K_2O = 4,7-8,2$ мас. %), мета- и перглиноземистым ($A/CNK = 0,70-1,14$), низко- и умеренножелезистым ($Fe/(Fe + Mg) = 0,39-0,54$) породам среднего состава с повышенным содержанием оксида калия (K_2O до 4,2 мас. %, при $K_2O/Na_2O = 0,65-1,14$).

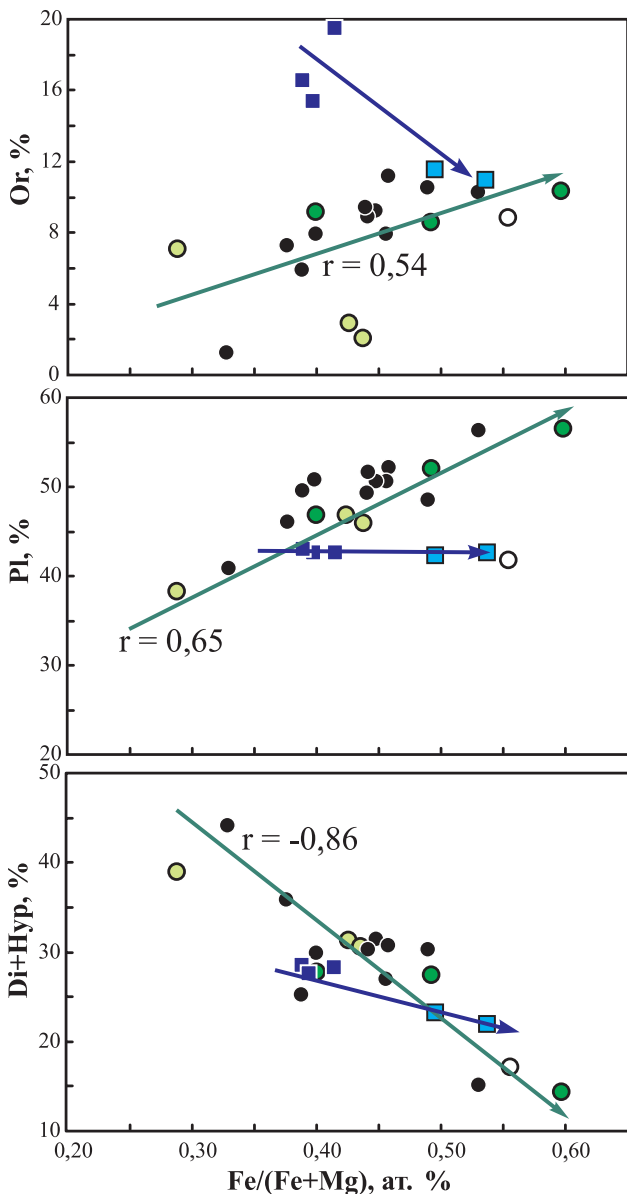


Рис. 3. Зависимость нормативных содержаний ортоклаза (Or), плагиоклаза (Pl) и суммы пироксенов (Di+Hyp) от железистости пород ($Fe/(Fe+Mg)$) в породах Макарьевского массива. Стрелками показаны направления дифференциации, r – значения коэффициента корреляции в габбродиорит-тоналит-трондьемитовой ассоциации, остальные условные обозначения см. на рис. 2

Кварцевые габбродиориты и диориты Макарьевского массива (рис. 4)¹ обладают фракционированными спектрами РЗЭ ($(La/Yb)_N = 8,3-11,2$) и отсутствием ярко выраженных европиевых аномалий ($Eu/Eu^* = 0,99 \pm 0,08$), отношением $Sr/Y = 45 \pm 5$.

Изотопный возраст трондьемитов усманского комплекса 2047 ± 11 млн лет [1] позволяет говорить, что возраст воронежской свиты не древнее $2047 + 11-2060$ млн лет. Изотопный возраст монцодиоритов Нелжинского массива около 2080 млн лет подтверждает факт того, что габбродиорит-тоналит-трондьемитовая ассоциация макарьевских массивов древнее воронежской свиты. Приведенные данные позволяют считать, что вмещающими породами для группы макарьевских массивов являются образования палеопротерозойской лосевской серии. Свидетельства доскладчатого и, соответственно, доколлизийного формирования массивов являются: их геолого-структурное положение в стратифицированных толщах, формировавшихся в условиях активных окраин континентов западно-тихоокеанского типа [1] и их текстурные особенности. Монцодиорит-кварцдиоритовая ассоциация пород, характеризующаяся массивными текстурами и слабой степенью наложенных преобразований, является более поздней относительно габбродиорит-тоналит-трондьемитовой. С учетом общей последовательности внедрения интрузий различных формаций, установленной в ЛСФЗ и других регионах мира, вероятный интервал внедрения габбродиорит-тоналит-трондьемитовой ассоциации Макарьевского массива составит около 2110–2090 млн лет.

Выявленные взаимоотношения породообразующих компонентов, модальные содержания минералов, петрохимические особенности в породах двух ассоциаций Макарьевского массива позволяют говорить об их формировании в результате кристаллизационной дифференциации с накоплением кремнезема в конечных продуктах. Однако при увеличении кремнезема, железистости и уменьшении меланократовости пород наблюдается различие трендов дифференциации с накоплением калия в ранней габбродиорит-тоналит-трондьемитовой серии пород и, наоборот, обеднением калия в поздней монцодиорит-кварцдиоритовой серии пород (см. рис. 3). В ранней ассоциации при падении температур кристаллизации в какой-то момент фракционировал плагиоклаз. Различный ход кристаллизационной дифференциации свидетельствует о резкой смене режимов в промежуточном очаге при фазовом соотношении этих ассоциаций или о их формировании в различных

¹ Таблицу с содержаниями редких и рассеянных элементов в породах Макарьевского массива можно запросить у автора по эл. адресу: terentiev@geol.vsu.ru

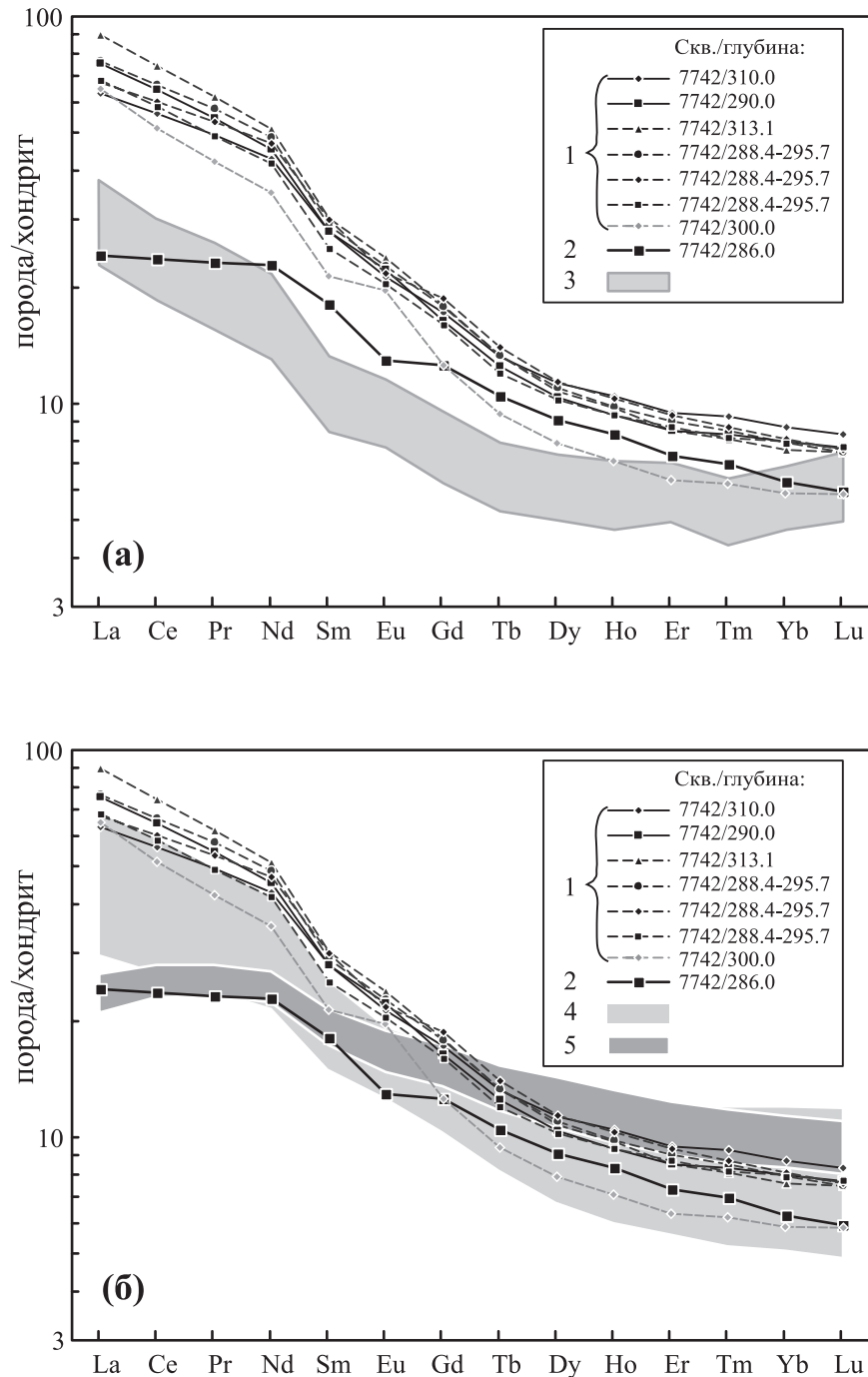


Рис. 4. Хондрит-нормализованное распределение редкоземельных элементов в породах Макарьевского массива по сравнению с кварцевыми габброноритами Ольховского массива (а), породами подгоренской толщи лосевской серии и нововоронежского комплекса (б): 1 – габбродиориты и кварцевые диориты; 2 – ксенолит роговообманкового меланогаббро; 3 – поле составов кварцевых габброноритов первой фазы Ольховского кольцевого массива по данным [9]; 4 – поле среднего состава известково-щелочных базальтов подгоренской толщи лосевской серии; 5 – нововоронежских метагаббро-диабазов, по данным [1]. Хондрит С1 по [12]

геодинамических режимах. Вторая интерпретация, учитывая вещественные и текстурные особенности пород, представляется более вероятной.

Вещественный состав изученных интрузий существенно отличается от состава ольховского комплекса (петротип – Ольховский кольцевой массив), как по соотношениям модальных количеств минералов (см.

рис. 2) и трендам петрохимической дифференциации, так и по распределению редкоземельных элементов в продуктах ранней стадии кристаллизации (см. рис. 4, а). Это, наряду с отличием геолого-структурной позиции группы макарьевских и Ольховского массивов, позволяет выделять первые в состав самостоятельного геологического подразделения. Остает-

ся нерешенным вопрос о взаимоотношении габбродиорит-тоналит-трондьемитовой и монцодиорит-кварцмонцитовой ассоциаций Макарьевского массива – являются они разными фазами одного комплекса или же их внедрение разорвано во времени и они характеризуют разные стадии длительного орогенного процесса?

Сравнение геохимических особенностей (известково-щелочной характер магматизма, дифференцированность от основных к кислым низкощелочным породам, идентичные графики РЗЭ (см. рис. 4, б) и абсолютные концентрации других редких и рассеянных элементов) габбродиорит-тоналит-трондьемито-

вой ассоциации Макарьевского массива и метавулканогенных известково-щелочных пород подгоренской толщи лосевской серии позволяет сделать вывод об их комагматичности. Исходя из этого рассмотренные в работе породные ассоциации группы макарьевских интрузивов, с определенной долей вероятности, можно расположить в ряду последовательности формирования главных геологических подразделений ЛСФЗ (табл. 3). Маркерными, или достоверными, событиями при палеогеотектонических построениях считаем коллизию на рубеже около 2050 млн лет [11] и заложение окраинных бассейнов активной окраины восточной части Сарматии около 2140 млн лет [3].

Таблица 3

Положение породных ассоциаций группы макарьевских массивов в последовательности формирования главных геологических подразделений Лосевской структурно-формационной зоны

Примерный порядок формирования	Возраст, млн лет	Источник	Стратифицированная метавулканогенная формация	Интрузивный комагмат	Обстановка
1	2140–2120	[3]	Толиты стрелицкой толщи лосевской серии		Активная окраина
2	2130–2120	[1]		Рождественский комплекс габброидный	
3	2130–2120	*	Толиты подгоренской толщи лосевской серии		
4	2120–2110	*		Нововоронежский комплекс габбро-диабазовый	
3	2130–2120	*	Известково-щелочная плагиобазальт-андезит-плагиодацитовая формация подгоренской толщи		
5	2110–2090	*		Габбродиорит-тоналит-трондьемитовая ассоциация макарьевских массивов	
6	2090–2070	**	Нет данных	Монцодиорит-кварцдиоритовая ассоциация Макарьевского массива, Нелжинский массив	Нет данных
7	2060–2050	[1]	Нет данных	Усманский трондьемит-гранодиоритовый комплекс	Коллизионная
8	2050–2040	[10]*	Нет данных	Девицкий гранитный комплекс	Постколлизийная

Примечание. * – предполагаемый возраст; ** – неопубликованные данные Т. Е. Салтыковой с соавторами по монцодиоритам Нелжинского массива (скв. 7736, см. рис. 1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Терентьев Р. А. Раннепротерозойские толщи и магматические комплексы Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива : геологическая позиция, вещественный состав, геохимия, палеогеодинамика / Р. А. Терентьев // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2014. – Т. 22, № 2. – С. 7–31.
 2. Рыборак М. В. Геология, петрология и металлогеническая специализация Ольховского кольцевого габбродиорит-кварцмонцит-гранитного плутона (Воронежский кристаллический массив) : автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук / М. В. Рыборак. – Воронеж, 1999. – 24 с.

3. Геохронология и геохимия кислых метавулканитов лосевской серии Воронежского кристаллического массива / Р. А. Терентьев [и др.] // Доклады РАН. – 2014. – Т. 454, № 5. – С. 575–578.
 4. Зайцев Ю. С. Докембрийские конгломераты восточной части Воронежского кристаллического массива / Ю. С. Зайцев // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1979. – № 11. – С. 23–30.
 5. Streckeisen A. To each plutonic rock its proper name / A. Streckeisen // Earth Sci. Rev. – 1976. – Vol. 12. – P. 1–33.
 6. Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. Рекомендации Подкомиссии по система-

тике изверженных пород Международного союза геологических наук: пер. с англ. – М. : Недра, 1997. – 248 с.

7. Рыборак М. В. О минеральном составе и номенклатуре основных пород Ольховской кольцевой интрузии / М. В. Рыборак // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 1996. – № 2. – С. 48–51.

8. Магматические горные породы. М. : Наука, 1983. – Т. 1. – 368 с.

9. Альбеков А. Ю. Лантаноиды как индикаторы процессов внутрикамерной дифференциации (на примере некоторых интрузивов Воронежского кристаллического массива) / А. Ю. Альбеков, М. В. Рыборак // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2010. – № 1. – С. 145–156.

10. Новые данные по радиологическому возрасту гранитоидов Центральной части Курской магнитной аномалии / И. В. Найденков [и др.] // Доклады РАН. – 1996. – Т. 351, № 6. – С. 802–805.

11. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // Геотектоника. – 2007. – № 1. – С. 43–70.

12. Sun S. -S. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes / S.-S. Sun and W. F. McDonough // J. Geol. Soc. London, Special Publications. – 1989. – Vol. 42. – P. 313–345.

Воронежский государственный университет

Терентьев Р. А., кандидат геолого-минералогических наук, директор учебно-научно-производственного центра «Поисковая геохимия»

E-mail: terentiev@geolog.vsu.ru

Тел.: 8 (473) 222-73-63

Voronezh State University

Terentiev R. A., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director of the Educational, Research and Production Center «Search Geochemistry»

E-mail: terentiev@geolog.vsu.ru

Tel.: 8 (473) 222-73-63