

МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕТРОГЕНЕЗИС ИЗВЕСТКОВО-ЩЕЛОЧНЫХ ПОРОД ОЛЬХОВСКОГО КОЛЬЦЕВОГО МАССИВА ВОСТОЧНО-САРМАТСКОГО ОРОГЕНА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ

Р. А. Терентьев, К. А. Савко

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 20 декабря 2014 г.

Аннотация: приводятся данные детального изучения петрографии и минералогии кварцдиорит–кварцмонцодиорит–гранодиоритовой серии внешнего кольца и лейкогранодиоритов внутреннего штока Ольховского интрузива Воронежского кристаллического массива. Породы Ольховского массива отнесены к гранитоидам магнетитовой серии по следующим признакам: (1) минеральный парагенезис (Opx-Cpx-Mag-Ilm-Pl₁₆₋₅₃-Bt-Qtz-Fsp), (2) высокая магнитная восприимчивость пород, (3) средне-кислый известково-щелочной тренд дифференциации от габбродиоритов до гранодиоритов, (4) преобладание магнетита над ильменитом при железистом составе ильменита, (5) высокая степень окисленности расплава. Предполагается нижнекоровый источник расплавов или условия взаимодействия кора–мантийный клин в постсубдукционной обстановке. Условия кристаллизации Ольховского интрузива: $P = 0,4–1,6$ кбар (глубинность менее 5 км); T (°C) начала кристаллизации – 1102–1127, T (°C) субсолидусной области 759 ± 38 °C и T (°C) завершения кристаллизации – около 720 и 650 °C; $\log fO_2 = (-7)–(-13)$. Установленные петрологические параметры и химизм гипотетических расплавов противоречат возможности образования магматогенных малосульфидных платинометалльных и, тем более, сульфидных медно-никелевых залежей, они более благоприятны для порфировых Cu-(Mo-Au) или Au-Cu-железооксидных плутоногенно-гидротермальных систем в контуре Ольховского массива.

Ключевые слова: палеопротерозой, Воронежский кристаллический массив, диориты, гранодиориты, минералогия, условия кристаллизации, потенциальная рудоносность.

THE MINERALOGY AND PETROGENESIS OF CALC-ALKALI ROCKS OF THE OLKHOVSKY RING INTRUSIVE, EAST SARMATIAN OROGEN, CENTRAL RUSSIA

Abstract: the mineralogy and petrography of the Olkhovsky ring massif are discussed. Olkhovsky massif belong to a magnetite series granite by the following features: (1) the usual paragenesis (Opx-Cpx-Mag-Ilm-Pl₁₆₋₅₃-Bt-Qtz-Fsp); (2) the high rocks magnetization; (3) the intermediate to felsic rock composition and calc-alkaline differentiation trend from gabbroid to diorite; (4) predominance magnetite above ilmenite at ferrous composition of ilmenite; (5) high level of the melt oxidization. We are suggested a lower crust source of melts or condions of crust – mantle wedge interaction in postsubduction environment. The crystallization conditions of the Olkhovsky intrusive are $P = 0,4–1,6$ kbar (depth lower 5 km) T (°C) of initial crystallization – 1102–1127, T (°C) of subsolidus area 759 ± 38 °C and solidus T (°C) – near 720 and 650 °C; $\log fO_2 = (-7)–(-13)$. The petrological parameters and the hypothetic melts chemistry contradict the possibility of the magmatic low-sulfidation PGE deposits forming or sulphide Cu-Ni ones. These features are more favorable for the porphyry Cu-(Mo-Au) or iron oxide-copper-gold magmatic-hydrothermal deposits.

Keywords: paleoproterozoic, Voronezh Crystalline Massif, diorite, granodiorite, mineralogy, crystallization conditions, prospective presence of ore.

Введение

С давних пор [1, 2] восточная часть Воронежского кристаллического массива (ВКМ) известна как Воронежская медно-никеленосная провинция. Наиболее крупные рудопроявления относятся к сульфидному медно-никелевому типу, ассоциирующему с мафитовыми и/или ультрамафитовыми еланским и мамон-

ским плутоническими комплексами. В последние годы прогнозируется магматогенное сульфидное медно-никелевое платинометалльное оруденение в наиболее меланократовых дериватах Ольховского массива ВКМ [3]. Этот прогноз основан на предположении о мантийном происхождении магм ольховского комплекса и петрохимическом сходстве с сульфидными

платинометалльными объектами из других регионов. Целью данной работы является выявить теоретическую возможность образования сульфидных, в том числе платинометалльных, руд в породах Ольховского массива ВКМ на основе расчетов параметров кристаллизации (температура, давление, фугитивность кислорода) и оценки внутренних и внешних факторов (фракционная кристаллизация, степень контаминации), влияющих на растворимость серы в силикатных расплавах и потенциальную рудоносность [4].

Геологическая позиция, петрография и химизм Ольховского массива

Ольховский интрузив расположен в пределах Воронежского кристаллического массива – восточной части корового сегмента Сарматии в составе Восточно-Европейской платформы. Он прорывает терригенные отложения воронежской свиты, которая со стратиграфическим несогласием залегает на палеопротерозойских образованиях Лосевского и Воронцовского террейнов Восточно-Сарматского орогена [5–7] в полосе сочленения Сарматского и Волго-Уральского сегментов Восточно-Европейского кратона [8]. Воронежская свита состоит из сланцев, метаалевролитов, метапсаммитов, базальных и внутриформационных метаконгломератов, заполняющих так называемую Ольховско-Шукавскую грабенсинклиналь [9].

Ольховский массив имеет овальную форму диаметром около 20 км по длинной оси (рис. 1). Мезократовые породы кварцдиорит–кварцмонцодиорит–гранодиоритовой серии внешней части интрузива [10] слагают прерывистое кольцо, в центре которого расположен шток лейкогранодиоритов. Время кристалли-

зации $2065 \pm 9,9$ млн лет кварцевых диоритов внешнего магматического кольца [10] согласуется с временем кульминации гранитоидного магматизма в Воронцовском [11] и Лосевском террейнах [12] и позволяет относить Ольховский массив к позднеорогенным образованиям.

Плутонические образования внешнего кольца рассматриваемого интрузива представляют собой светло-серые, серые до розовато-серых массивные мелко-среднезернистые породы. Содержания главных породообразующих минералов широко варьируют по [10 и 13] (об., %): плагиоклаз 36,6–73,0, ортоклаз 0,8–22,9, кварц 4,5–23,3, клинопироксен 1,1–26,1, ортопироксен 0–23,9, амфибол 0–19,0, биотит 0,2–11,0. Значения цветового индекса, как правило, низкие не превышающие 40%. Распространены акцессорные минералы, такие как циркон, апатит, магнетит, ильменит, титанит и аланит. По петрохимическому составу рассматриваемые породы являются средними и кислыми (SiO_2 52,25–65,0 мас. %) и относятся к семействам известково-щелочных, от умеренно- до высокоглиноземистых $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MgO}) = 0,5\text{--}1,9$, низко-, умереннощелочных ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} < 8$ мас. %) габбродиоритов, диоритов, монцонитов и гранодиоритов с низким (< 1) $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ отношением в средних разновидностях. От средних к кислым дериватам постепенно растут отношения A/CNK ($\text{Al}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$) от 0,52 до 0,95 и железистость X_{Fe} ($\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$) от 0,3 до 0,6. По ряду признаков породы Ольховского массива отличаются от других диоритсодержащих интрузивов близкого возраста и пространственного положения [14].

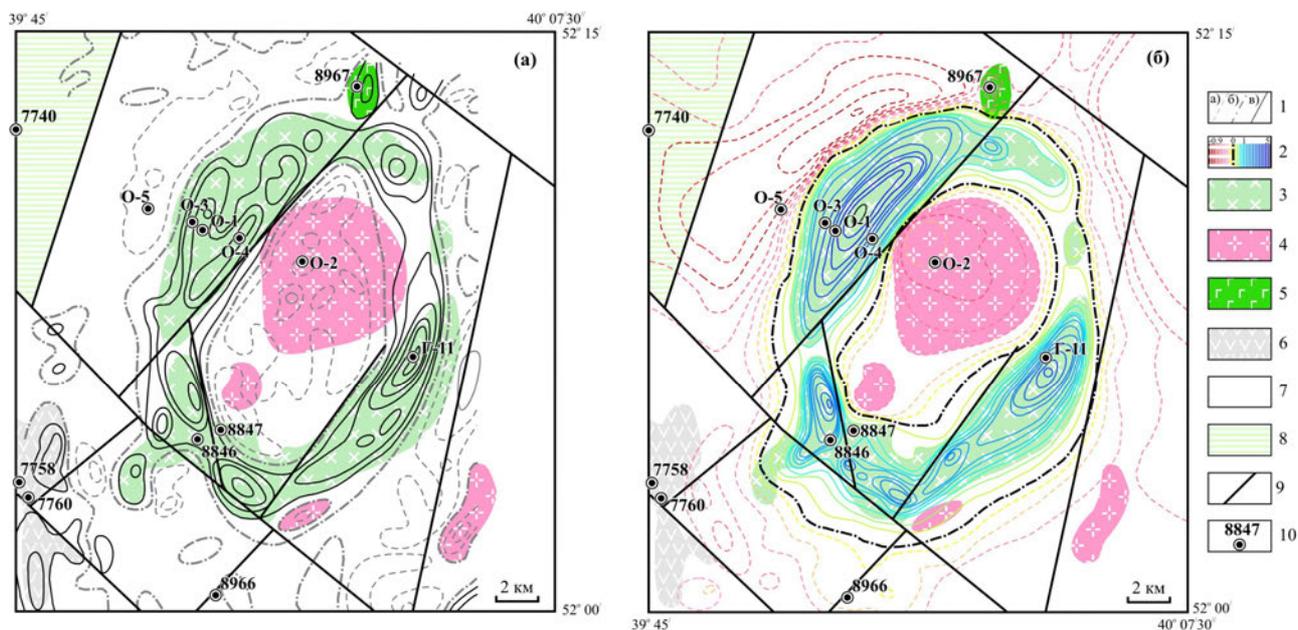


Рис. 1. Карты гравитационных (а) и магнитных (б) аномалий района Ольховской интрузии (по данным Воронежской геолого-геофизической экспедиции ПГО «Центргеология»): 1 – аномалии гравитационного поля (Δg , мГал): отрицательные (а), нулевые (б) и положительные (в), 2 – шкала напряженности магнитного поля; Ольховский массив: 3 – породы кварцдиорит–кварцмонцодиорит–гранодиоритовой серии, 4 – лейкогранитоиды; 5 – габброиды неясной формационной принадлежности, 6 – вулканогенные породы байгоровской толщи, 7 – метатерригенные породы воронежской свиты, 8 – метавулканогенно-осадочные породы лосевской серии, 9 – тектонические нарушения, 10 – положение и номер скважин.

Материал и методы исследования

Кристаллооптические исследования осуществлены на оптическом поляризационном микроскопе OLYMPUS BX51-P. Описаны шлифы по керну скважин 8846, 8847, О-3 и О-2 в количестве 48 шт.

Локальные анализы минералов (около 180 шт) выполнены на электронном микроскопе Jeol 6380LV с системой количественного энергодисперсионного анализа «Inca» (ВГУ, аналитик Н. С. Базиков). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1,2 нА, время набора спектра 90 сек, диаметр пучка 1–3 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводились с помощью комплекта программ математического обеспечения системы. Точность анализа систематически контролировалась по эталонным образцам природных и синтетических минералов.

Результаты исследования

В лейкогранодиоритах центрального штока Ольховского массива (скв. О-2) наиболее идиоморфными являются темноцветные минералы (биотит и редкая роговая обманка) и плагиоклаз, калишпат и кварц

ксеноморфны, что характерно для пород с гранитовой структурой и нормальным порядком идиоморфизма (рис. 2). Мезократовые породы кварцдиорит–кварцмонцодиорит–гранодиоритовой серии внешней части интрузива обладают следующим рядом идиоморфизма: ортопироксен – магнетит и ильменит – клинопироксен – роговая обманка и плагиоклаз – биотит – кварц и калишпат. Ортопироксен представлен в виде изометричных кристаллов (0,2 мм и более) и редко в виде крупных (2 мм и более) фенокристаллов, часто хлоритизирован. Он образует сростания с клинопироксеном или встречается в виде хадакристаллов. Клинопироксен более крупный относительно ортопироксена (до 2 мм), субидиоморфный. Роговая обманка слагает прерывистые каймы вокруг пироксенов, сростания с пироксенами и редко самостоятельные кристаллы. Неравномерная зернистость (порфиридность) пород обусловлена широкими вариациями преобладающего в породах плагиоклаза размером около 0,2 мм (таблитчатый) и 1–3 мм (изометричный, зональный). Биотит, кварц и калишпат слагают интерстиции (см. рис. 2).

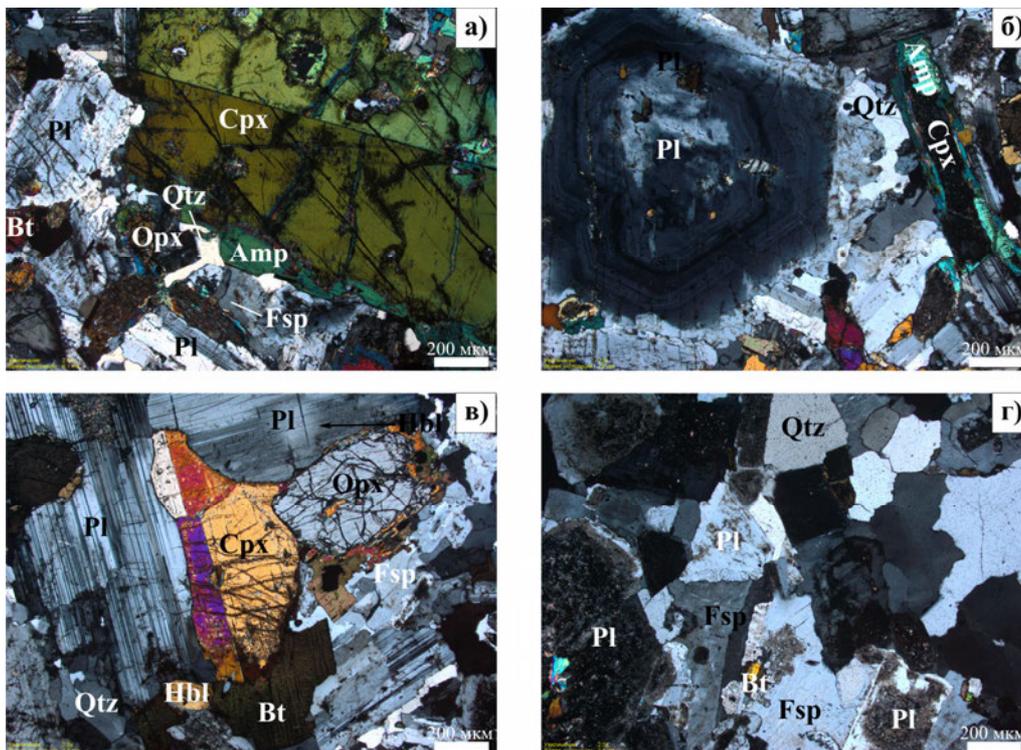


Рис. 2. Фотографии пород под микроскопом (николи скрещены): (а) – дупироксеновый кварцевый габбродиорит (скв. 8847, глубина 477,0 м); (б) – амфибол-клинопироксеновый кварцевый диорит (скв. 8847, 430,0 м); (в) – биотит-амфибол-дупироксеновый кварцевый монцодиорит (скв. 8846, глубина 500,0 м); (г) – амфибол-биотитсодержащий лейкогранодиорит (скв. О-2, глубина 429,1 м).

Полевые шпаты (табл. 1, рис. 3). В кварцевых диоритах и монцодиоритах зональный плагиоклаз имеет состав от An_{36-53} в центральных (за редким исключением, соответствует андезину) до An_{16-25} в краевых частях зерен. Относительно мелкие хадакристаллы в клинопироксенах имеют андезиновый состав, около An_{45} . Ламеллевидные и изометричные включения в калиевых полевых шпатах и участки сростания

плагиоклазов и калишпатов соответствуют альбиту или анортоклазу ($An_{10}Ab_{88}Or_{02}-An_{02}Ab_{75}Or_{23}$). Калиевый полевой шпат во всех образцах отвечает обычно микроклину, который содержит примесь железа в измененных участках до 0,35 мас. %. Олигоклаз в лейкогранитах центрального штока слабо зональный: An_{23} – в центре до An_{13} – в краевой зоне.

Таблица 1

Представительные микрозондовые анализы плагиоклазов и калиевых полевых шпатов из пород Ольховского массива

Скважина	8846	8846	8846	8846	8846	8846	8846	8846	8846	8847	8847	8847
Глубина, м	712,5	712,5	712,5	712,5	712,5	712,5	712,5	712,5	712,5	411,0	411,0	411,0
Коммент.	центр	центр	центр	крупный кристалл			центр	край	центр	край	край	включ.
SiO ₂	56,11	60,31	54,08	55,72	58,18	55,14	65,94	64,81	65,85	64,06	62,77	57,24
TiO ₂	0,00	0,00	0,63	0,00	0,62	0,00	0,00	0,00	0,43	0,00	0,34	0,00
Al ₂ O ₃	26,34	23,00	26,97	26,55	25,30	27,46	18,31	18,61	17,19	21,82	22,38	25,72
FeO	0,60	0,63	0,38	0,00	0,50	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,00	0,00	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	7,94	5,70	10,75	9,79	7,88	10,45	0,48	0,00	0,49	3,49	4,49	9,78
Na ₂ O	7,55	8,96	5,63	6,68	6,84	5,75	2,52	3,52	1,86	10,49	9,67	5,51
K ₂ O	0,35	0,39	0,30	0,36	0,56	0,39	12,96	12,35	13,20	0,00	0,27	0,61
Cr ₂ O ₃	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V ₂ O ₅	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,71	0,00	0,00	0,00	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Сумма	99,42	100,03	99,22	99,1	99,89	100,09	100,56	99,29	99,3	99,86	99,92	98,85
An	0,36	0,25	0,51	0,44	0,38	0,49	0,02	0,00	0,03	0,16	0,20	0,48
Ab	0,62	0,72	0,48	0,54	0,59	0,49	0,22	0,30	0,17	0,84	0,78	0,49
Or	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,75	0,70	0,80	0,00	0,01	0,04
T°C (1 kbar)	787	734	858	812	806	852					726	903
T°C (2 kbar)	794	740	865	819	813	860					732	911

Таблица 1 (окончание)

Скважина	8847	8847	8847	8847	8847	8847	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2	O-2
Глубина, м	411,0	411,0	411,0	411,0	411,0	411,0	429,1	429,1	429,1	429,1	429,1	429,1
Коммент.	край	центр	центр	центр	край	включ.	край	пром.	центр	центр		
SiO ₂	56,17	56,60	57,89	63,94	66,26	65,37	63,25	63,21	62,75	61,97	64,12	64,70
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40
Al ₂ O ₃	26,63	25,41	25,27	18,10	18,11	18,82	22,26	21,46	21,16	21,79	18,20	17,75
FeO	0,00	0,00	0,00	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	0,54
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	9,98	9,74	8,74	0,53	0,00	0,33	2,82	3,88	5,22	4,99	0,34	0,00
Na ₂ O	6,11	7,17	6,73	10,83	4,80	0,73	10,20	10,82	10,30	10,56	0,00	1,52
K ₂ O	0,54	0,33	0,40	5,07	10,40	13,91	0,97	0,42	0,00	0,24	14,92	14,64
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,00	0,78	0,00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,89	0,00
Сумма	99,43	99,26	99,81	99,56	100,43	99,16	99,51	99,79	99,75	99,55	100,77	99,55
An	0,46	0,42	0,41	0,02	0,00	0,02	0,13	0,16	0,22	0,20	0,02	0,00
Ab	0,51	0,56	0,57	0,75	0,41	0,07	0,82	0,82	0,78	0,78	0,00	0,14
Or	0,03	0,02	0,02	0,23	0,59	0,91	0,05	0,02	0,00	0,01	0,98	0,86
T°C (1 kbar)							659	647	657	658		
T°C (2 kbar)							663	651	661	672		

Примечание: T°C – температура кристаллизации пород при заданном давлении по данным двухполюшпатового геотермометра по [15].

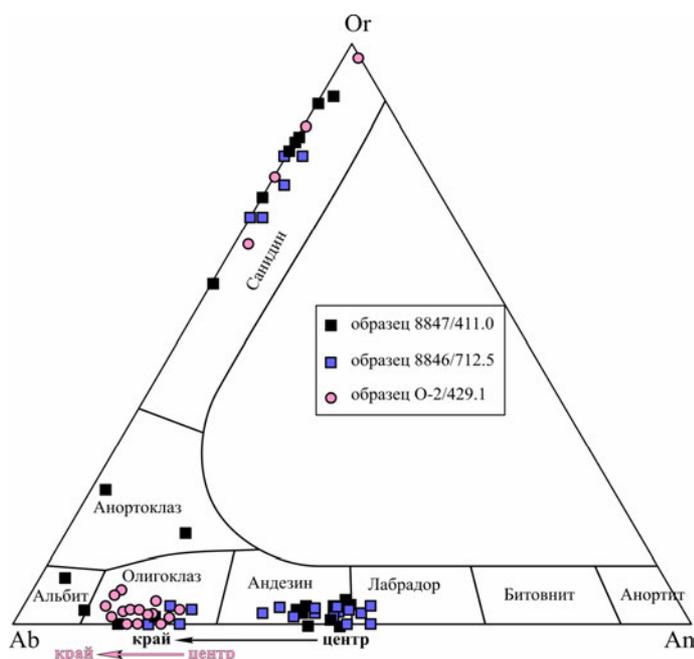


Рис. 3. Составы полевых шпатов из кварцевых диоритов, монцодиоритов и лейкогранодиоритов Ольховского массива на диаграмме Ортоклаз–Альбит–Анортит по [16].

Пироксены (табл. 2, рис. 4а). Клинопироксены из наиболее меланократовых пород Ольховского массива по составу отвечают авгиту, а краевые части в самых лейкократовых диоритоидах – салиту. Закономерной зональности в клинопироксенах не установлено, но магнезиальность широко варьирует $Mg\#$ 0,67–0,93. Ортопироксены, наоборот, имеют совершенно отчетливую зональность, когда центральные части кристаллов более магнезиальны, чем их края. А их составы классифицируются как гиперстены и железистые бронзиты.

Биотиты (табл. 3, рис. 4б). Биотиты во всех образцах характеризуются умеренной магнезиальностью ($X_{Mg} = 0,47–0,58$) и классифицируются как магнезиальные разновидности.

Таблица 2

Представительные микрондовы анализы клино- и ортопироксенов из пород Ольховского массива

Скважина	8846	8846	8846	8847	8847	8847	8846	8846	8847	8847	8847	8847
Глубина, м	712,5	712,5	712,5	411,0	411,0	411,0	712,5	712,5	411,0	411,0	411,0	411,0
SiO ₂	51,38	50,96	50,74	50,94	52,35	51,96	52,69	52,98	52,53	54,05	54,63	52,29
TiO ₂	0,00	0,56	0,54	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	1,76	1,30	2,57	2,11	1,58	1,41	0,91	0,51	1,06	0,77	0,00	1,60
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,38	0,46	0,00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00
FeO	9,05	9,49	11,98	8,42	8,98	11,39	21,58	20,82	16,68	17,20	26,14	23,58
MnO	0,00	0,69	0,48	0,31	0,00	0,54	0,51	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00
MgO	14,12	14,77	13,85	17,08	17,23	13,78	22,71	23,56	25,63	25,61	17,27	20,14
CaO	22,18	21,19	19,61	19,25	18,61	20,01	0,88	1,68	3,04	0,99	1,06	2,25
Na ₂ O	0,84	0,00	0,00	0,00	1,25	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,28	0,00	0,00
V ₂ O ₅	0,47	0,00	0,00	0,75	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	0,00
Сумма	99,81	98,96	99,77	100,02	100,81	99,1	99,27	99,79	99,90	99,44	100,27	99,86
Si	1,91	1,92	1,91	1,89	1,90	1,97	1,97	1,96	1,90	1,98	2,11	1,97
Ti	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Al	0,08	0,06	0,11	0,09	0,07	0,06	0,04	0,02	0,05	0,03	0,00	0,07
Cr	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Fe ^{III}	0,16	0,07	0,03	0,07	0,20	0,00	0,02	0,07	0,17	0,00	0,00	0,00
Fe ^{II}	0,13	0,23	0,34	0,19	0,07	0,36	0,65	0,57	0,34	0,53	0,84	0,74
Mn	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
Mg	0,78	0,83	0,78	0,95	0,93	0,78	1,26	1,30	1,38	1,40	0,99	1,13
Ca	0,88	0,86	0,79	0,77	0,72	0,81	0,04	0,07	0,12	0,04	0,04	0,09
Na	0,06	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00
X(Mg)	0,86	0,77	0,68	0,82	0,93	0,67	0,65	0,69	0,80	0,73	0,54	0,60
En	40,19	41,81	39,96	47,92	48,34	39,88	64,09	64,66	68,96	71,21	52,84	57,58
Fs	14,44	15,06	19,37	13,24	14,12	18,48	34,13	32,03	25,16	26,81	44,83	37,79
Wo	45,37	43,13	40,67	38,84	37,54	41,64	1,78	3,31	5,88	1,98	2,33	4,63

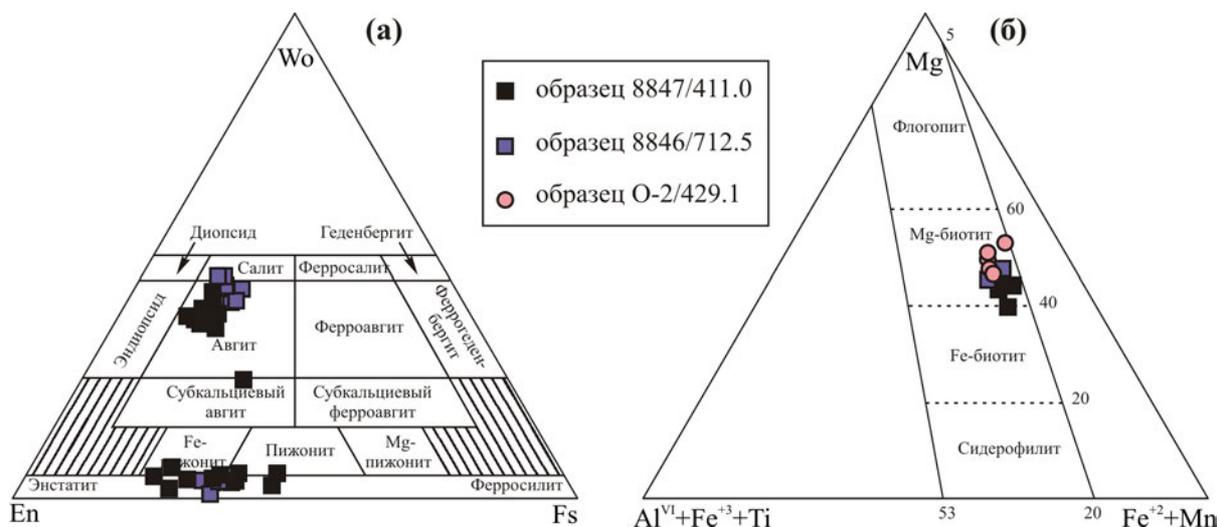


Рис. 4. Составы пироксенов (а) и (б) биотитов из кварцевых диоритов, монцодиоритов и лейкогранодиоритов Ольховского массива на классификационных диаграммах по [17, 18]. Условные обозначения см. на рис. 2.

Таблица 3
Представительные микрозондовые анализы биотитов из пород Ольховского массива

Скважина	8846	8846	8847	8847	O-2	O-2
Глубина, м	712,5	712,5	411,0	411,0	429,1	429,1
SiO ₂	36,52	37,96	36,25	37,89	35,46	34,90
TiO ₂	5,47	3,31	1,94	3,47	2,82	2,65
Al ₂ O ₃	12,00	11,69	13,79	13,15	14,62	14,28
FeO	20,72	19,64	20,95	22,26	20,41	18,34
MnO	0,00	0,00	0,53	0,40	1,05	0,00
MgO	11,61	11,60	14,51	11,20	14,59	14,47
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49
K ₂ O	8,68	9,42	6,07	8,74	4,78	6,31
V ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15
Сумма	94,99	93,62	94,05	97,11	93,73	93,02
Si	2,91	3,04	2,86	2,95	2,82	2,80
Ti	0,33	0,20	0,12	0,20	0,17	0,16
Al	1,13	1,10	1,28	1,21	1,37	1,35
al,4	1,09	0,96	1,14	1,05	1,18	1,20
al,6	0,04	0,14	0,15	0,16	0,19	0,16
Fe ^{III}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ^{II}	1,38	1,31	1,38	1,45	1,36	1,23
Mn	0,00	0,00	0,04	0,03	0,07	0,00
Mg	1,38	1,38	1,71	1,30	1,73	1,73
Ca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	0,88	0,96	0,61	0,87	0,48	0,65
X(Mg)	0,50	0,51	0,55	0,47	0,55	0,58

Кальциевые амфиболы (табл. 4, рис. 5). Удалось поранализировать не измененные кальциевые амфиболы только в породах внешнего магматического кольца. Большинство из них по классификации [23] относится к магнезиальной роговой обманке и реже к эдениту. Характерны умеренные содержания глинозема (4,6–10 мас.%), повышенные Na₂O (до 2,93 мас.%) и K₂O (до 0,79 мас.%) при довольно высокой магнезиальности Mg# 0,65–0,82.

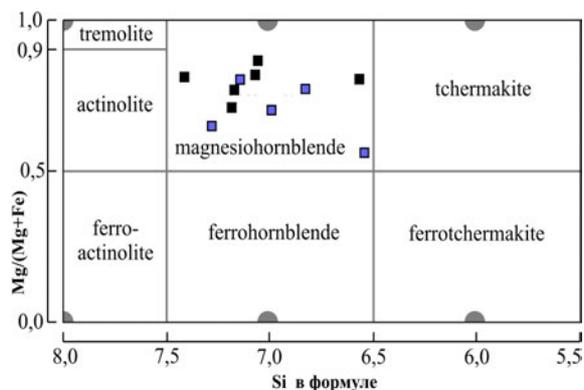


Рис. 5. Составы амфиболов из кварцевых диоритов и монцодиоритов Ольховского массива на классификационной диаграмме по [23].

Оксиды (табл. 5, рис. 6, 7). Рудные оксидные минералы в кварцдиорит–кварцмонцодиорит–гранодиоритовой серии пород представлены магнетитом и ильменитом, в лейкогранитах внутреннего штока – только магнетитом. Ильмениты из диоритоидов часто с примесью марганца до 2,7 мас.%, а магнетиты – с примесью титана (0,45–1,3 мас.%), ванадия (0,5–1,6 мас.%). Этих примесей значительно меньше в магнетитах из лейкогранитов: TiO₂ 0–0,46 мас.%, V₂O₅ 0–0,75 мас.%.

Таблица 4

Представительные микронзондовые анализы амфиболов из пород Ольховского массива

Скважина	8846	8846	8846	8847	8847	8847
Глубина, м	712,5	712,5	712,5	411,0	411,0	411,0
SiO ₂	47,51	49,97	47,13	45,80	49,81	50,39
TiO ₂	1,78	0,98	1,67	1,53	0,94	0,85
Al ₂ O ₃	6,00	4,88	5,84	9,96	5,30	5,48
FeO	16,07	15,23	14,99	9,24	14,57	16,68
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	13,91	13,46	13,32	15,90	14,35	13,29
CaO	11,51	11,32	10,98	11,43	11,12	10,81
Na ₂ O	0,69	1,79	1,37	2,93	0,68	1,01
K ₂ O	0,53	0,38	0,70	0,79	0,32	0,54
Cr ₂ O ₃	0,47	0,00	0,00	0,73	0,00	0,00
Сумма	98,47	98,01	96	98,31	97,09	99,05
Si	6,83	7,28	6,99	6,57	7,17	7,18
Ti	0,19	0,11	0,19	0,16	0,10	0,09
Al	1,02	0,84	1,02	1,68	0,90	0,92
Cr	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00
Fe ^{III}	1,05	0,28	0,61	0,31	0,88	0,86
Fe ^{II}	0,88	1,58	1,25	0,80	0,87	1,13
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg	2,98	2,92	2,94	3,40	3,08	2,82
Ca	1,77	1,77	1,74	1,75	1,71	1,65
Na	0,19	0,51	0,39	0,81	0,19	0,28
K	0,10	0,07	0,13	0,14	0,06	0,10
X(Mg)	0,77	0,65	0,70	0,81	0,78	0,71
Ti	0,20	0,11	0,19	0,17	0,10	0,09
(Ca+Na)b	1,82	1,96	1,91	1,96	1,83	1,84
(Na+K)a	0,30	0,38	0,37	0,76	0,16	0,21
Nab	0,00	0,20	0,16	0,20	0,10	0,18
XAb	0,48	0,51	0,59	0,49	0,49	0,48
XAn	0,51	0,47	0,38	0,48	0,48	0,49
T°C	716	782	779	842	711	751
P(kbar)	1,57	0,43	0,55	1,56	1,04	0,61
ΔNNO	5,07	5,05	4,95	5,23	5,45	5,10
logfO ₂ *	-10,78	-9,23	-9,42	-7,82	-10,51	-9,89
logfO ₂ **	-12,30	-10,33	-10,43	-8,77	-12,45	-11,23

Примечание: T°C и P(kbar) – PT-условия кристаллизации пород по данным афибол-плаггиоклазового геотермобарометра по [19], XAb и XAn – составы плаггиоклазов использованные для расчетов, ΔNNO – относительная фугитивность кислорода согласно формуле по [20], logfO₂ – фугитивность кислорода согласно формулам по * [21] и ** [22].

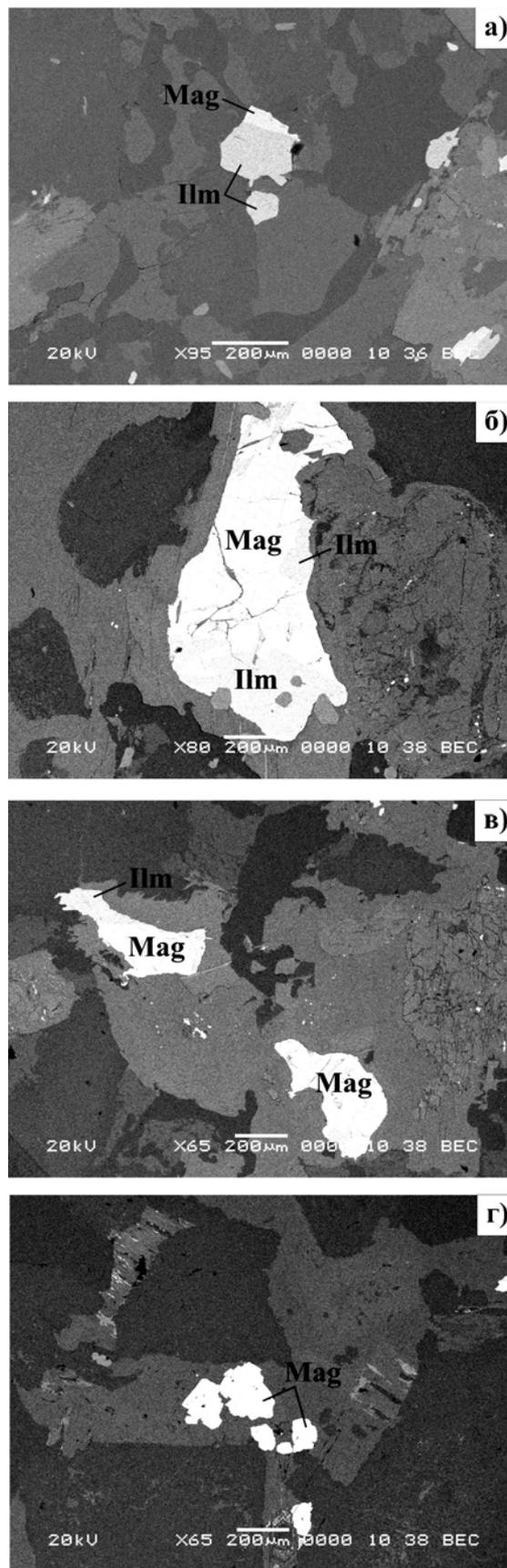


Рис. 6. Фотографии ильменитов и магнетитов в отраженных электронах: (а) – кварцевый монцодиорит, (б, в) – кварцевый диорит и (г) – лейкогранодиорит.

Таблица 5

Представительные микронзондовые анализы магнетитов и ильменитов из пород Ольховского массива

Скважина	8846	8846	8846	8847	8847	8847	8847	8847	8847	8847	О-2	О-2	О-2
Глубина, м	712,5	712,5	712,5	411,0	411,0	411,0	411,0	411,0	411,0	411,0	429,1	429,1	429,1
SiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	48,29	1,23	1,30	48,77	47,54	49,96	47,72	1,29	0,48	0,67	0,00	0,00	0,00
Cr ₂ O ₃	0,00	0,38	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,42	0,00
FeO	46,78	88,92	89,79	48,44	45,80	47,88	48,63	87,46	88,83	90,00	84,94	83,15	84,88
MnO	2,70	0,00	0,71	1,28	1,61	1,30	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,32
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
V ₂ O ₅	0,90	1,35	0,54	0,00	0,98	1,08	1,24	1,45	1,59	1,76	0,38	0,00	0,46
Сумма	99,17	92,53	92,92	98,49	96,46	100,22	98,94	91,47	91,42	93,03	85,32	83,88	85,66

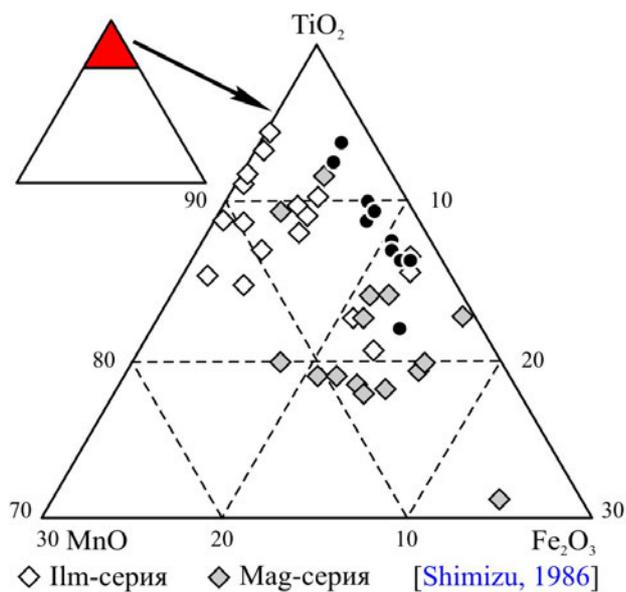


Рис. 7. Составы ильменитов из кварцевых диоритов и монцодиоритов Ольховского массива на диаграмме MnO–TiO₂–Fe₂O₃ по сравнению с ильменитами магнетитовой и ильменитовой серий гранитоидов Японии [24].

**Обсуждение результатов.
Магматическая эволюция и условия кристаллизации**

Химизм пород внешнего магматического кольца Ольховского массива позволяет считать их дериватами единой магматической системы, образованными в результате кристаллизационной дифференциации. В ряду кварцевый диорит – кварцевый монцодиорит – гранодиорит наряду с изменениями количественно-минерального состава (увеличение содержаний кварца, калишпата с уменьшением количества темноцветных силикатов) изменяются содержания кремнезема

от 52,25 до 65,0 мас. %, увеличивается железистость и глиноземистость [10]. Установленный порядок кристаллизации, последовательное истощение дериватов мафическими компонентами и обогащение салическими свидетельствуют о раннем фракционировании пироксенов и оксидов, о последующем фракционировании амфиболов и плагиоклазов и о поздней кристаллизации биотита, кварца и калишпата.

Неравномерностернистые, часто порфириовидные, структуры пород предполагают кристаллизацию расплава в малоглубинных условиях. Количественно литостатическое давление, рассчитанное по содержаниям Al в роговой обманке [25, 26], составило – 0,4–1,6 кбар (см. табл. 4), что примерно соответствует глубине становления интрузива менее 5 км. Температуры кристаллизации по данным амфибол-плагиоклазового геотермометра [19] варьируют около среднего 759±38 °С. Согласно порядка кристаллизации эти значения близки к субсолидусной области. Температуры начала кристаллизационного процесса оценены по двупироксеновому термометру [27], откалиброванному разными авторами (табл. 6). Центры кристаллов в кварцевых диоритах формируются при температурах 1102–1127 °С, а краевые части – 980–1089 °С. Чуть меньшие значения получены для дифференциатов – кварцевых монцодиоритов: 925–950 °С и 825–945 °С, соответственно.

Постоянная примесь магнетита в средних и кислых породах Ольховского интрузива свидетельствует об окислительных условиях, что согласуется с данными по фугитивности кислорода, рассчитанной по составам роговой обманки [20–22]. logf O₂ изменяется от -7 до -13 (см. табл. 4, рис. 8), что значительно выше уровня буфера NNO (Ni–NiO). Высокая степень окисления подтверждается и составами биотитов, графически находящихся над буфером NNO (рис. 9).

Таблица 6

Расчетные температуры кристаллизации пород внешнего магматического кольца Ольховского массива по данным двутироксенового геотермометра

Источники	[28]	[29]	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]	[15]	Комментарии
<i>кварцевый монцодиорит (скв. 8846/411,0 м)</i>									
1	814	695	821	н/д	938	1048	605	855	край-край
2	915	929	968	н/д	1014	1060	831	901	край-край
3	932	939	978	н/д	1014	1050	850	889	центр-край
4	854	756	865	904	929	1022	708	849	центр-центр
5	908	879	943	н/д	995	1068	812	868	центр-центр
<i>среднее</i>	<i>884</i>	<i>840</i>	<i>915</i>	<i>904</i>	<i>978</i>	<i>1050</i>	<i>761</i>	<i>872</i>	
<i>кварцевый диорит (скв. 8847/712,0 м)</i>									
6	990	991	1015	984	1034	992	947	1000	край-край
7	1062	1186	1117	982	1180	н/д	1006	н/д	край-край
8	1080	1186	1119	1043	1171	1253	1050	1112	центр-центр
9	1070	1157	1104	1033	1167	1245	1033	1125	центр-центр
10	1035	1232	1131	973	1184	1199	990	1074	центр-центр
11	978	1216	1103	н/д	1118	989	868	942	край-край
12	986	1094	1062	н/д	1118	1213	947	985	край-край
13	980	1134	1076	н/д	1118	1212	918	1034	край-край
14	928	966	989	н/д	1033	1144	891	910	край-край
<i>среднее</i>	<i>1012</i>	<i>1129</i>	<i>1079</i>	<i>1003</i>	<i>1125</i>	<i>1156</i>	<i>961</i>	<i>1023</i>	

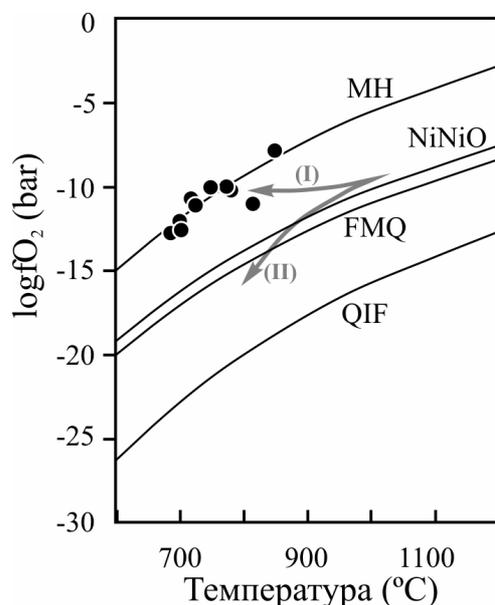


Рис. 8. Положение расчетных параметров Ольховского интрузива на диаграмме фугитивность кислорода – температура по [35]. Буферы (здесь и на рис. 9): MH – магнетит-гематит; NiNiO – никель-оксид никеля; FMQ – фаялит-магнетит-кварц; QIF – кварц-железо-фаялит. Стрелками показаны направления дифференциации магм в окислительных (I) и восстановительных (II) условиях по [36].

Большинство характеристик пород внешнего магматического кольца Ольховского интрузива, такие как высокая магнитная восприимчивость (см. рис. 1б), родство с породами андезитового химизма, дифференцированность от габбродиоритов до гранодиоритов, преобладание магнетита над ильменитом, характерный состав ильменита (см. рис. 7), высокая степень окисленности расплава, аналогичны атрибутам так называемых гранитоидов магнетитовой серии [24, 39]. Считается [24, 39], что магнетитовые серии благодаря вертикальным тектоническим нарушениям, по которым они внедряются, и скоростному подъему не успевают смешиваться с породами основания, и их контаминация крайне незначительна. Постоянная примесь ильменита однако свидетельствует, что рассматриваемые породы могут быть переходными к ильменитовой серии гранитоидов, и, значит, родоначальный расплав был в некоторой степени контаминирован. Слабая контаминация расплава позволяет нам, в первом приближении, отождествлять наиболее меланократовые породы внешнего кольца с родоначальным расплавом. Повышенная магнезиальность пород (Mg# 0,4–0,7) и слагающих их темноцветных силикатов с одной стороны, андезибазальтовый химизм и повышенная калиевоность всех дериватов с другой стороны, характерны для мафитового (базальтового) внутрикорового источника [40, 41].

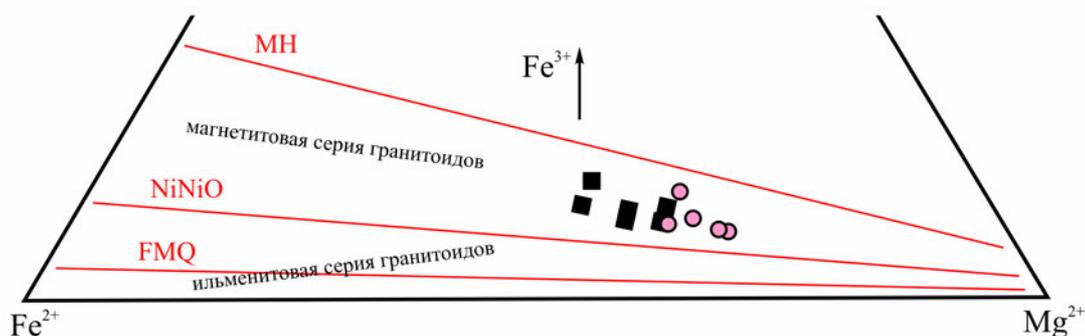


Рис. 9. Составы биотитов пород Ольховского массива на диаграмме Fe^{2+} - Fe^{3+} - Mg^{2+} по [37]. Fe^{3+} рассчитано по [38].

Потенциальная рудоносность

Как мы отметили во введении, Ольховский массив ВКМ, считается перспективным на магматогенное малосульфидное платинометалльное оруденение [3]. Для образования сульфидных сегрегаций магматического генезиса требуется ряд петрологических условий [4]. Это факторы, определяющие растворимость сульфида в магмах, и составы, и глубинность магматических источников.

(1) Элементы платиновой группы наряду с Ni и Cu имеют мантийное происхождение. Родоначальный расплав Ольховского массива по предварительным данным образовался на нижнекоровом уровне литосферы или в условиях взаимодействия кора-мантийный клин над ранее отсубдуцировавшей плитой.

(2) Для сегрегации сульфидов, особенно богатых Cu-Ni руд, требуется значительная контаминация корового материала, содержащего в своем составе серу. Вмещающие Ольховский интрузив породы воронежской свиты, в редких случаях содержат прослой углеродсодержащих пиритизированных сланцев, которые могли бы служить источником серы. А продукты кристаллизации внешнего магматического кольца массива слабо контаминированы, т.е. не имеют потенциала растворить серу из вмещающих пород.

(3) Положительным признаком для образования малосульфидного оруденения является высокая степень дифференциации исходного расплава, что характерно для Ольховского массива, но тренд дифференциации имеет известково-щелочную направленность.

(4) Высокие температуры способствуют как растворимости сульфидов в силикатных расплавах, так и их накоплению в остаточных расплавах. Однако, температуры кристаллизации кварцевых диоритов и кварцевых монцодиоритов относительно низкие 1100–750 °С, по сравнению с сульфидоносными мафитовыми магмами, и являются обычными для пород среднего и кислого химизма.

(5) Низкое давление при кристаллизации способствует растворимости сульфидов, но это чуть ли не единственное условие (малая глубинность становления), которое соблюдается в дериватах Ольховского интрузива.

(6) Важнейшим параметром, влияющим на растворимость сульфидов и возможность их накопления и кристаллизации в магматических условиях является

фугитивность кислорода (противопоставляемая фугитивности серы). Крайне высокая фугитивность кислорода установленная при кристаллизации магм Ольховского интрузива, исключительно оксидная минерализация в нем (нами не обнаружено ни одного сульфида магматического генезиса), свидетельствуют о том, что элементы сульфидных минералов не кристаллизовались вплоть до крайних дериватов – гранодиоритов, а могли только накапливаться как несовместимые и отлагаться в постмагматическую стадию.

В наиболее измененных (пропилитовый и кварцсерицитовый парагенезис) породах внешнего кольца Ольховского массива появляются редкие вкрапленники сульфидов. Это, наряду с известково-щелочным средне-кислым химизмом, высокой степенью окисленности магм, малоглубинными условиями становления – признаки порфировых Cu-(Mo-Au) систем [42–44] или, что более характерно для докембрия [45], золото-медно-железооксидных плутоногенно-гидротермальных месторождений.

Выводы

1. Минеральный парагенезис (Орх-Срх-Маг-Плм-Pl-Bt-Qtz-Fsp), состав плагиоклаза (андезин-олигоклаз) подтверждают принадлежность пород внешнего магматического кольца Ольховского массива ВКМ кварцдиорит-кварцмонцодиорит-гранодиоритовой серии с известково-щелочным трендом дифференциации, установленной ранее по количественно-минеральному и химическому составам [10].

2. Высокая магнитная восприимчивость, родство с породами андезитового химизма, дифференцированность от габбродиоритов до гранодиоритов, преобладание магнетита над ильменитом, железистый состав ильменита, высокая степень окисленности расплава позволили соотнести породы Ольховского массива с гранитоидами магнетитовой серии [24, 39], которые слабо контаминированы вмещающими породами.

3. В свою очередь, слабая степень контаминации гипотетического расплава, его андезибазальтовый химизм и повышенная калиевоность всех дериватов, повышенная магнезиальность пород ($Mg\#$ 0,4–0,7) и слагающих их темноцветных силикатов позволяют предполагать нижнекоровый магматический источник ольховских магм или условия взаимодействия кора-мантийный клин в постсубдукционной обстановке.

4. Оценены условия кристаллизации кварцдиорит-

кварцмондиорит–гранодиоритовой серии пород и лейкогранодиоритов внутреннего штока Ольховского массива: давление 0,4–1,6 кбар (глубинность менее 5 км); температуры начала кристаллизации – 1102–1127 °С, температуры субсолидусной области 759±38 °С и температуры завершения кристаллизации – около 720 и 650 °С, соответственно; высокая фугитивность кислорода, выше буфера NNO – от -7 до -13.

5. Предполагаемый нижнекоровый уровень генерации магм, их слабая контаминация, умеренные температуры кристаллизации и высокая степень окисленности расплава противоречат возможности образования магматогенных малосульфидных платинометалльных и, тем более, сульфидных медно-никелевых залежей в контуре Ольховского массива.

6. Перечисленные в п. 5 признаки, а также известково-щелочной средне-кислый химизм и малоглубинные условия становления Ольховского массива более благоприятны для порфировых Cu-(Mo-Au) или Au-Cu-железооксидных плутоногенно-гидротермальных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Годлевский, М. Н.* Медно-никелевые месторождения мира и проблемы их генезиса / М. Н. Годлевский // Тр. ЦНИГРИ. – М., 1963. – 22 с.
2. *Годлевский, М. Н.* Никеленосные провинции СССР / М. Н. Годлевский // Геология медноколчеданных, свинцово-цинковых и никеленосных месторождений // Тр. ЦНИГРИ. – М., 1967. – Вып. 75. – С. 178–199.
3. *Чернышов, Н. М.* Формационно-генетические типы платинометалльных проявлений Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов // Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов. – М., 1994. – С. 85–103.
4. *Naldrett, A. J.* Magmatic Sulfide Deposits of Nickel-Copper and Platinum-metal ores / A. J. Naldrett. – St. Petersburg: St. Petersburg university, 2003. – 487 p.
5. *Shchipansky, A. A.* Geodynamics of the Eastern Margin of Sarmatia in the Paleoproterozoic / A. A. Shchipansky, A. V. Samsonov, A. Yu. Petrova, Yu. O. Larionova // Geotectonics. – 2007. – V. 41 (1). – P. 38–62.
6. *Terentiev, R. A.* Paleoproterozoic Sequences and Magmatic Complexes of the Losevo Suture Zone of the Voronezh Crystalline Massif: Geological Position, Material Composition, Geochemistry, and Paleogeodynamics / R. A. Terentiev // Stratigraphy and Geological Correlation. – 2014. – V. 22 (2). – P. 123–146.
7. *Terentiev, R. A.* Geochronology and Geochemistry of Acid Metavolcanites, Losevo Series, Voronezh Crystalline Massif / R. A. Terentiev, K. A. Savko, A. V. Samsonov, A. N. Larionov // Dokl. Earth Sci. – 2014. – V. 454 (2). – P. 136–139.
8. *Bogdanova, S. V.* East European Craton / S. V. Bogdanova, R. Gorbatshev, R. G. Garetsky // Selley, R., Cocks, R., Plimer, I. (eds.) Encyclopedia of Geology, Elsevier, Amsterdam, 2005. – V. 2. – P. 34–49.
9. *Зайцев, Ю. С.* Докембрийские конгломераты восточной части Воронежского кристаллического массива / Ю. С. Зайцев // Известия АН СССР. Серия геол. – 1979. – № 11. – С. 23–30.
10. *Савко, К. А.* Вещественный состав и возраст мезократовых пород Ольховского интрузива Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко, Р. А. Терентьев, А. Н. Ларионов // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2014. – № 5. – С. 71–75.
11. *Savko, K. A.* Paleoproterozoic A- and S-granites in the Eastern Voronezh Crystalline Massif: geochronology, petrogenesis, and tectonic setting of origin / K. A. Savko, A. V. Samsonov, A. N. Larionov, Yu. O. Larionova, N. S. Bazikov // Petrology, 2014. – V. 22(3). – P. 205–233.
12. *Skryabin, V. Yu.* Trondhjemite-granodiorite intrusivism of Losevo structural and formational zone, Voronezh Crystal Massif / V. Yu. Skryabin, R. A. Terentiev // Dokl. Earth Sci. – 2014. – V. 458 (2). – P. 1261–1264.
13. *Рыборак, М. В.* Геология, петрология и металлогеническая специализация Ольховского кольцевого габбронорит-кварцмондиорит-гранитного плутона (Воронежский кристаллический массив): автореф. дис. канд. геол.-минерал. наук. / М. В. Рыборак. – Воронеж, 1999. – 24 с.
14. *Терентьев, Р. А.* Габбродиорит–тоналит–трондjemитовая и мондиорит–кварцдиоритовая ассоциации макарьевских интрузивов (Воронежский кристаллический массив) // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – № 1. – С. 62–72.
15. *Putirka, K.* Thermometers and Barometers for Volcanic Systems / K. Putirka // Putirka K., Tepley F. (eds.) Minerals, Inclusions and Volcanic Processes, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Soc. Am. – 2008. – V. 69. – P. 61–120.
16. *Deer, W. A.* An introduction to the rock forming minerals (second edition) / W. A. Deer, R. A. Howie, J. Zussman // Essex: Longman Scientific and Technical, New York: Wiley, 1992. – 696 p.
17. *Poldervaart, A.* Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma / A. Poldervaart, H.H. Hess // J. Geol. – 1951. – V. 59(5). – P. 472–489.
18. *Foster, M. D.* Interpretation of the Composition of Trioctahedral Micas / M. D. Foster // U.S.G.S. Prof. Paper. – 1960. – V. 354B. – P. 1–49.
19. *Holland, T.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry / T. Holland, J. Blundy // Contrib. Mineral. Petrol. – 1994. – V. 116. – P. 433–447.
20. *Ridolfi, F.* Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: An overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes / F. Ridolfi, A. Renzulli, M. Puerini // Contrib. Mineral. Petrol. – 2010. – V. 160. – P. 45–66.
21. *O'Neill, H. S. C.* Thermodynamic data from redox reactions at high temperatures. I. An experimental and theoretical assessment of the electrochemical method using stabilized zirconia electrolytes, with revised values for the Fe-FeO, Co-CoO, Ni-NiO, and Cu-Cu₂O oxygen buffers, and new data for the W-WO₂ buffer / H. S. C. O'Neill, M.L. Pownceby // Contrib. Mineral. Petrol. – 1993. – V. 114. – P. 296–314.
22. *Wones, D. R.* Significance of the assemblage titanite+magnetite +quartz in granitic rocks / D. R. Wones // Amer. Mineral. – 1989. – V. 74. – P. 744–749.
23. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral names / B. E. Leake [et al.] // The Canadian Mineralogist. – 1997. – V. 35. – P. 219–246.
24. *Shimizu, M.* The Tokuwa Batholith, Central Japan – An Example of Occurrence of Ilmenite-series and Magnetite-series Granitoids in a Batholith / M. Shimizu // University Museum, University of Tokyo Bulletin, 1986. – V. 28. – 143 p.
25. *Hammarstrom, J. M.* Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer / J. M. Hammarstrom, E. Zen // Am. Mineral. – 1986. – V. 71. – P. 1297–1313.
26. *Hollister, L. S.* Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline

- plutons / L. S. Hollister, G. C. Grissom, E. K. Peters, H. H. V.B. Stowell, Sisson // *Am. Mineral.* – 1987. – V. 72. – P. 231–239.
27. Lindsley, D. H. Pyroxene thermometry / D. H. Lindsley // *Am. Mineral.* – 1983. – V. 68. – P. 477–493.
28. Wood, B. J. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems / B. J. Wood, S. Banno // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1973. – V. 42. – P. 109–124.
29. Henry, D. J. Applications of pyroxene and olivine-spinel geothermometers to spinel peridotites in southwestern Oregon / D. J. Henry, L. G. Jr. Medaris // *Amer. Jour. Sci.* – 1980. – V. 280-A. – P. 211–231.
30. Wells, P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems / P. R. A. Wells // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1977. – V. 62. – P. 129–139.
31. Perchuk, L. L. Thermodynamic control of metamorphic processes / L. L. Perchuk // Saxena S. K., Bhattacharji S. (eds.) *Energetics of Geological Processes*: New York, Springer-Verlag, 1977. – P. 285–352.
32. Kretz, R. Transfer and exchange equilibria in a portion of the pyroxene quadrilateral as deduced from natural and experimental data / R. Kretz // *Geochem. Cosmochim. Acta.* – 1982. – V. 46. – P. 411–422.
33. Sen, G. Experimental equilibration of multicomposition pyroxenes in spinel peridotite field: Implication for practical thermometers and possible barometers / G. Sen, R. Jones // *J. Geophys. Res.* – 1989. – V. 94. – P. 17871–17880.
34. Brey, G. P. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers / G. P. Brey, T. Köhler // *J. Petrol.* – 1990. – V. 31. – P. 1353–1378.
35. Frost, B. R. Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance / Lindsley D. H. (ed.) "Reviews in Mineralogy" // Mineralogical Society of America. – 1991. – V. 25. – 509 p.
36. de Albuquerque, C. A. R. Geochemistry of biotites from granitic rocks, northern Portugal / C. A. R. de Albuquerque // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 1973. – V. 37. – P. 1779–1802.
37. Wones, D. R. Stability of biotite: Experiment, theory, and application / D. R. Wones, H. P. Eugster // *Am. Mineral.* – 1965. – V. 50. – P. 1228–1272.
38. Dymek, R. F. Titanium, aluminum and interlayer cation substitutions in biotite from high-grade gneisses, west Greenland / R. F. Dymek // *Am. Mineral.* – 1983. – V. 68. – P. 880–899.
39. Ishihara, S. The redox state of granitoids relative to tectonic setting and earth history: The magnetite-ilmenite series 30 years later. Transactions of the Royal Society of Edinburgh / S. Ishihara // *Earth Sciences.* – 2004. – V. 95. – P. 23–33.
40. Evans, O. C. Late- to post-kinematic Archaean granitoids of the S.W. Superior province: derivation through direct mantle melting / O. C. Evans, G. N. Hanson // De Wit M. J., Ashwal, L. D. (eds.) *Greenstone Belts*. Clarendon Press, Oxford, 1997. – P. 280–295.
41. Rapp, R. P. Heterogeneous source regions for Archaean granitoids: experimental and geochemical evidence / R. P. Rapp // De Wit M. J., Ashwal L. D. (eds.), *Greenstone Belts: Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 1997. – V. 35. – P. 267–279.
42. Imai, A. Highly oxidized and sulfur-rich dacitic magma of Mount Pinatubo: Implications for metallogenesis of porphyry copper mineralization in the western Luzon arc / A. Imai, E. L. Listanco, T. Fuji // Newhall C. G., Punongbayan R. S. (eds.) *Fire and mud. Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines: Quezon City, Philippines Institute of Volcanology and Seismology/Seattle, WA, University of Washington Press*, 1996. – P. 865–874.
43. Richards, J. P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation / J. P. Richards // *Economic Geology.* – 2003. – V. 98. – P. 1515–1533.
44. Richards, J. P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere / J. P. Richards // *Geology.* – 2009. – V. 37. – P. 247–250.
45. Richards, J. P. Magmatic-hydrothermal processes within an evolving Earth: Iron oxide-copper-gold and porphyry Cu ± Mo ± Au deposits / J. P. Richards, A. H. Mumin // *Geology.* – 2013. – V. 41. – P. 767–770.

Воронежский государственный университет

Терентьев Р. А., директор учебно-научно-производственного центра "Поисковая геохимия", кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: terentiev@geol.vsu.ru
Тел.: 8 (4732) 22-73-63

Савко К. А., доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования
E-mail: ksavko@geol.vsu.ru
Тел.: 8-915-544-21-64

Voronezh State University

Terentiev R. A., The Director of the Educational- and -Research-and-Production Center "Search Geochemistry", Candidate of Geological and Mineralogical Sciences
E-mail: terentiev@geol.vsu.ru
Tel.: 8 (4732) 22-73-63

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