

МИНЕРАГЕНИЯ ДОКЕМБРИЙСКИХ УЛЬТРАОСНОВНЫХ-ОСНОВНЫХ ВУЛКАНО-ИНТРУЗИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОРЫ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ТИПА ВКМ (ЦЕНТРАЛЬНАЯ РОССИЯ)

Статья 2. Состав и минерагения вулканно-интрузивных высокомагнезиальных образований позднеархейского геодинамического цикла формирования коры континентального типа ВКМ

Н. М. Чернышов, **М. В. Рыбора**, Е. М. Боброва, А. Ю. Альбеков,
М. Н. Чернышова

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 22 февраля 2016 г.

Аннотация: приводится цикл статей, раскрывающих эволюцию высокомагнезиальных образований различных геодинамических режимов докембрия ВКМ в связи с их рудонесущей ролью. Вторая часть исследований минерагении докембрийских высокомагнезиальных образований освещает позднеархейские породы мегаблока КМА.

Приведены типовые минералогическо-петрографические, петрохимические и рудно-геохимические признаки вулканно-интрузивных породных ассоциаций, которые определяются близкой к примитивной мантийной и мантийно-коревой природе магматических очагов на этапе позднеархейского энсиалического рифтогенеза. Рассмотрены наиболее перспективные на CR, NI, элементы платиновой группы и AU рудообразующие системы.

Ключевые слова: геодинамика, вулканно-интрузивные комплексы, высокомагнезиальные породные ассоциации, рудообразующие системы, цветные и благородные металлы, Воронежский кристаллический массив, Курская магнитная аномалия.

MINERAGENCY OF THE PRECAMBRIAN ULTRABASIC-BASIC VOLCANIC-INTRUSIVE COMPLEXES OF THE VARIOUS GEODYNAMIC REGIMES OF FORMATION OF THE CONTINENTAL CRUST OF THE VCM (CENTRAL RUSSIA)

ARTICLE 2. COMPOSITION AND MINERAGENCY OF THE VOLCANO-INTRUSIVE HIGH-MAGNESIUM FORMATIONS OF THE LATE ARCHAEOEN GEODYNAMIC CYCLE OF THE FORMATION OF THE CONTINENTAL CRUST

ABSTRACT: PRESENT THE CYCLE OF ARTICLES, EXPLAINING THE EVOLUTION OF THE HIGH-MAGNESIUM FORMATIONS OF VARIOUS GEODYNAMIC REGIMES OF THE PRECAMBRIAN OF THE VCM MEGABLOCK BECAUSE OF THEIR ORE-BEARING ROLE. SECOND PART OF THE RESEARCH OF THE MINERAGENCY OF THE PRECAMBRIAN HIGH-MAGNESIUM FORMATIONS DEDICATED TO LATER ARCHAEOEN ROCKS OF THE KMA MEGABLOCK.

TYPICAL MINERALOGICAL-PETROGRAPHICAL, PETROCHEMICAL AND ORE-GEOCHEMICAL FEATURES OF THE VOLCANIC-INTRUSIVE ASSOCIATIONS, THAT ARE DETERMINED WITH CLOSE TO PRIMITIVE MANTLE AND MANTLE-CRUSTAL NODULES MAGMA CHAMBERS ON THE STAGE OF THE LATER ARCHAEOEN ENSIALIC RIFTING ARE GIVEN. THE MOST PROMISING CR, NI, PGE AND AU ORE-BEARING SYSTEMS ARE REVIEWED.

KEYWORDS: GEODYNAMICS, VOLCANO-INTRUSIVE COMPLEXES, HIGH-MAGNESIUM ROCK ASSOCIATIONS, ORE-BEARING SYSTEMS, NON-FERROUS AND FERROUS METALS, VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF, KURSK MAGNETIC ANOMALY.

1. Положение высокомагнезиальных образований в структуре мегаблока КМА

Архейские образования широко распространены на территории мегаблока КМА и составляют около 60 % всей площади. В настоящее время [1] они стратифицированы на два плутоно-метаморфических комплекса (см. статья 1): обоянский (в его составе брянская и

россошанская ассоциации и комагматичный им бесединский перидотит-пироксенит-габбровый комплекс) и михайловский (в его составе александровская и лебединская серии и комагматичные им, соответственно, сергиевский габбро-дунит-перидотитовый и салтыковский мигматит-плагногравитовый комплексы). Высокомагнезиальные образования, отвечающие

ранне- и позднеархейскому циклам [2–6] развития КМА, слагают зеленокаменные ассоциации, которые картируются по реликтам характерных структурно-вещественных комплексов (СВК) и геофизическим данным. Геология и вещественный состав высокомагнезиальных образований раннего архея приведены в статье 1.

Все исследователи Курской магнитной аномалии, начиная с Е. М. Крестина, впервые установившего наличие в зеленокаменной толще этого региона коматиитов [7], стремились выделить и оконтурить зеленокаменные пояса (ЗП). В настоящее время отчетливо выделяются два зеленокаменных пояса: Льговско-Ракитнянский (Белгородско-Михайловский по Крестину Е. М. [2, 7], Чернышову Н. М. [8] и др.) и Алексеевско-Воронецкий (Орловско-Тимской по Чернышову Н. М. и др. [8]), приуроченные к одноименным синклиориям.

Льговско-Ракитнянский и Алексеевско-Воронецкий позднеархейские зеленокаменные пояса образуют (рис. 1) в плане полосы северо-западного простира-

ния, подчеркивающие зоны глубинных субмеридиональных разломов, и располагаются в западной и центральной частях КМА, соответственно.

Первый из них протягивается на 300–400 км, второй – приблизительно на 400 км. Льговско-Ракитнянский зеленокаменный пояс (ЛРЗП) имеет наиболее полный разрез образований михайловского ПМК и насыщен породами коматиит-базальтовой формации. В геофизических полях вулканогенно-осадочные образования поясов выражаются в виде вереницы узких положительных гравитационных и магнитных аномалий различной интенсивности. Структурно-вещественные комплексы позднеархейской зеленокаменной ассоциации идентифицируются в разрезе докембрийских пород как занимающие промежуточное положение между раннеархейскими гранито-гнейсами обоянского комплекса и палеопротерозойскими образованиями, представленными железорудными метасадками (ВIF-формация) и базальными конгломератами (стойленская свита) в составе курской серии.

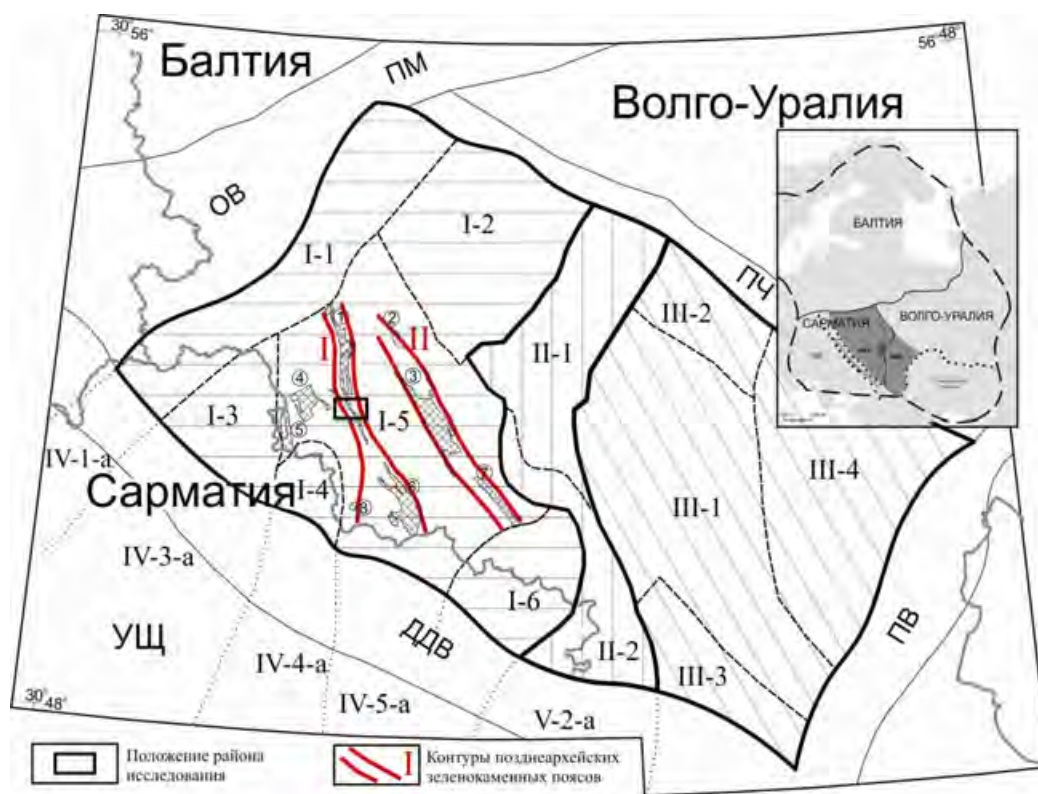


Рис. 1. Схема структурно-формационного районирования Воронежского кристаллического массива (по [9, 10, 11], с дополнениями). I – мегаблок КМА, в том числе макроблоки: I-1 – Брянский, I-2 – Ливенско-Ефремовский, I-3 – Севский, I-4 – Сумской, I-5 – Орловско-Белгородский (Оскольский), I-6 – Россошанский; цифры в кружках – палеопротерозойские рифтогенные структуры: 1 – Михайловская, 2 – Орловская, 3 – Тим-Ястребовская, 4 – Рыльская, 5 – Крупецкая, 6 – Белгородская, 7 – Волотовская, 8 – Борисовская; II – Лосевская шовная зона: II-1 – Лосевская и II-2 – Донская подзоны; III – Хоперский мегаблок, в том числе макроблоки: III-1 – Калачско-Эртильский, III-2 – Тамбовский, III-3 – Варваринский, III-4 – Камышинский. IV – V – продолжение структур ВКМ на УЩ, геоблоки (террейны): IV-1 – Белоцерковско-Одесский (Брагинский), IV-3 – Кировоградский (Ингулецкий), IV-4 – Среднеприднепровский, IV-5 – Приазовский, V-2 – Восточно-Приазовский. УЩ – Украинский щит, ОВ – Оршанская впадина, ПМ – Подмосковский авлакоген, ПЧ – Пачелмский прогиб, ПВ – Прикаспийская впадина. Красным цветом отмечено положение позднеархейских зеленокаменных поясов: I – Льговско-Ракитнянский (Белгородско-Михайловский), II – Алексеевско-Воронецкий (Орловско-Тимской).

Мощность зеленокаменных образований Курской гранит-зеленокаменной области, ввиду сложности их геологического строения, точной оценке не поддается. Предполагаемые же мощности колеблются в интервале 2–5 км [2]. Возникновение поздних [12] зеленокаменных поясов (позднеархейский этап) связано с деструкцией сравнительно маломощной сиалической протокры (начальная рифтовая стадия). На заключительной стадии позднеархейского этапа развития рифтогенный тип сменяется своеобразным архейским орогенезом: рифтовые структуры подвергаются сжатию, интенсивно проявлены процессы гранитизации и мигматизации рифтогенных СВК, в пределах примыкающих к рифтовым зонам блоках и частично в самих рифтовых структурах формируется вертикальный ряд гранитоидных формаций. В начале процесса орогенеза образуются тела широко распространенной на территории КМА мигматит-тоналит-плагитогранитной формации, а в завершение этапа – формации микроклиновых гранитов и мигматитов. Каждая рифтогенная структура характеризуется формированием вертикального формационного ряда бимодального толеит-риодацитового типа. Нижние части разрезов во всех структурах сложены породами коматиит-базальтовой формации и тесно пространственно связанными с ними многочислен-

ными дунит-перидотит-габбровыми интрузиями, которые последовательно сменяются вверх по разрезу толщей кислых вулканитов с ограниченным количеством толеитовых базальтов. Вместе с тем, наблюдается закономерная латеральная изменчивость состава магматических образований, выраженная последовательным уменьшением в направлении с запада на восток относительной доли коматиитов и коматиитовых базальтов и ассоциирующих с ними интрузивных ультраосновных и основных пород, что позволяет выделить единый латеральный формационный ряд, формирование которого, вероятно, обусловлено различной глубиной заложения рифтовых систем и очагов магмогенерации.

Таким образом, возрастание степени дифференцированности и латеральной неоднородности в процессе энсиалического рифтогенеза (с последующей коллизией и элементами субдукции) и сопряженных с ним термодинамических обстановок глубинного петрогенезиса обусловили [11, 12] появление заметно большего разнообразия СВК, усложнение состава и структуры слагающих их формационных рядов магматических и метаморфических породных ассоциаций, существенное расширение спектра и продуктивности рудных, в том числе благороднометалльно-содержащих, формаций (рис. 2).

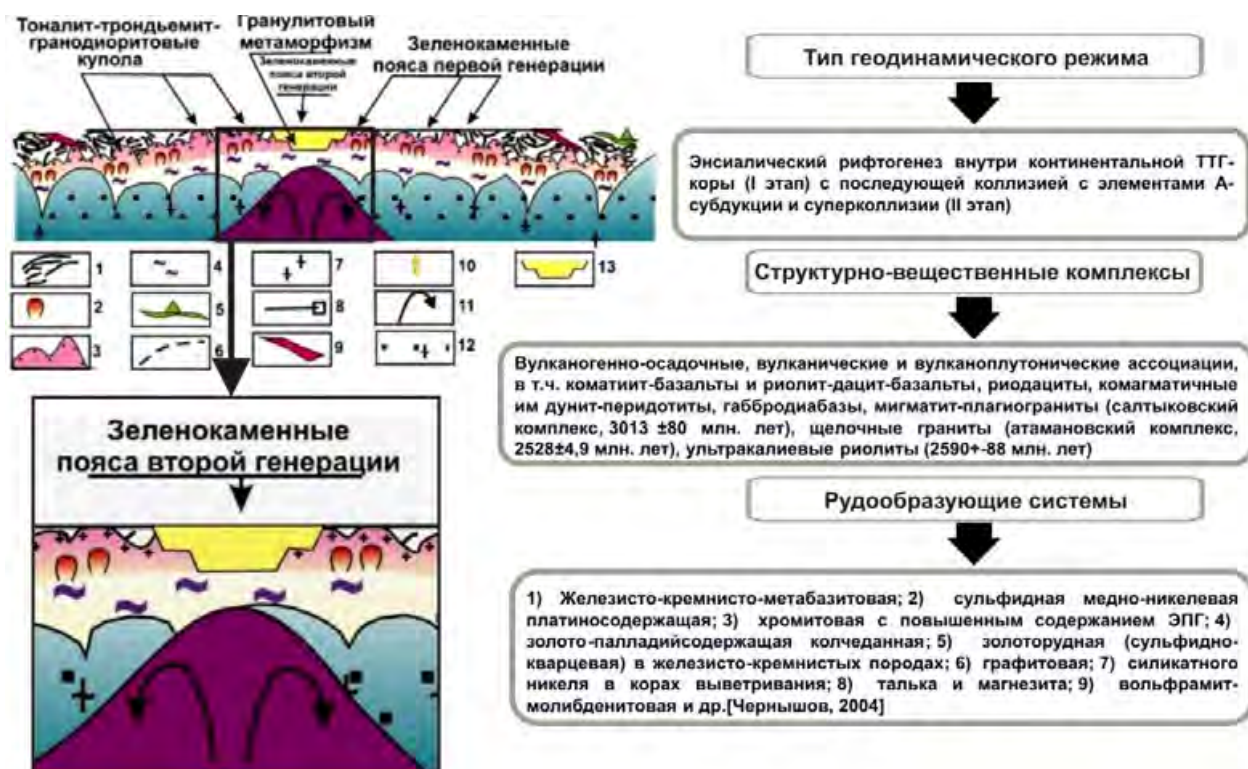


Рис. 2. Геодинамика и минералогия позднеархейского этапа (по [12]): 1 – коматиит-базитовая кора и ее деформированные фрагменты в зонах торошения; 2, 3 – тоналит-трондьемит-гранодиоритовые купола: 2 – ранней генерации (низкокальциевые эндрбиты), 3 – поздней генерации (кальциевые эндрбиты); 4 – "базитовый" континентальный слой реститового происхождения; 5 – известково-щелочные магматические серии зеленокаменных поясов первого типа; 6 – фрагменты базитовой коры, затасанные на глубину нисходящими ветвями плюмов; 7 – эклогитизированные фрагменты базитовой протокры; 8 – площадные спрединговые зоны надплюмового пространства; 9 – зоны протосутур; 10 – пути подъема известково-щелочных магматических диапиров; 11 – направление адвективного перемещения вещества в плюмах; 12 – литосферная мантия; 13 – бимодальные магматиты зеленокаменных поясов второго типа.

2. Особенности состава высокомagneзиальных пород

2.1. Коматит-базальтовые образования

Льговско-Ракитнянский зеленокаменный пояс характеризуется двучленным строением [2, 4, 7, 13, 15, 14]. Нижняя толща представлена ультраосновными-основными метапородами [1] в составе александровской свиты, верхняя – базальт-андезит-дацит-риолитовой ассоциацией метавулканитов лебединской свиты михайловской серии.

Высокомagneзиальные породы пояса метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций [2, 4, 8] представлены преимущественно

серпентинитами, породами амфибол-серпентинового и тремолит-карбонатного составов и амфиболитами [8, 14]. Установление природы первичных пород в большинстве случаев затруднено, не представляется возможным и прослеживание в разрезе дифференциации пород. О вулканическом происхождении [4, 7, 14] пород свидетельствуют редкие реликты порфировой структуры, отмеченной в амфибол-серпентиновых породах и амфиболитах. Но в связи с довольно высокой степенью метаморфизма пород идентификация индивидуальных потоков в пределах толщи затруднена.

Таблица 1

Средний химический состав высокомagneзиальных метапород ЛРЗП [14]

Компонент	РК n=8	ВК* n=3	НМgВ n=4	НFeТ n=7	Компонент	РК n=5	ВК	НМgВ n=4	НFeТ n=8
SiO ₂	45,35	46,73	50,09	50,45	La	0,69	Н.о.	1,60	4,26
TiO ₂	0,20	0,25	0,61	1,15	Ce	1,80	Н.о.	4,33	10,64
Al ₂ O ₃	2,73	10,64	13,23	12,33	Sm	0,49	Н.о.	1,30	2,41
Fe ₂ O ₃ _{зщ}	13,94	9,57	14,17	18,49	Eu	0,17	Н.о.	0,58	0,85
MnO	0,18	0,17	0,18	0,74	Gd	0,74	Н.о.	2,10	3,25
MgO	33,68	19,07	8,65	5,98	Tb	0,13	Н.о.	0,39	0,58
CaO	3,75	11,39	10,42	7,93	Dy	0,79	Н.о.	2,43	3,91
Na ₂ O	0,11	0,71	2,74	2,62	Ho	0,17	Н.о.	0,53	0,86
K ₂ O	0,04	0,25	0,37	0,19	Er	0,50	Н.о.	1,60	2,52
P ₂ O ₅	0,02	0,07	0,07	0,11	Yb	0,44	Н.о.	1,48	2,38
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	Lu	0,17	Н.о.	1,60	0,35
АТМ	14,81	46,07	22,71	11,09	(La/Yb) _n	1,23	Н.о.	0,79	1,28
CaO/Al ₂ O ₃	1,37	1,07	0,79	0,64	(La/Sm) _n	0,97	Н.о.	0,79	1,14
Mg#	0,82	0,78	0,55	0,38	(Gd/Yb) _n	1,45	Н.о.	1,20	1,15

Примечания: РК – перидотитовые коматиты, ВК – базальтовые коматиты, НМgВ – высокомagneзиальные базальты, НFeТ – высокожелезистые толеиты. Содержания породообразующих (мас. %) оксидов определены методом РФА (ИГЕМ РАН, ВСЕГЕИ), концентрации (ppm) редкоземельных элементов – ICP MS (ИПТМ РАН, ВСЕГЕИ), ВК* – данные по [4], н.о. – не определялось, n – число анализов.

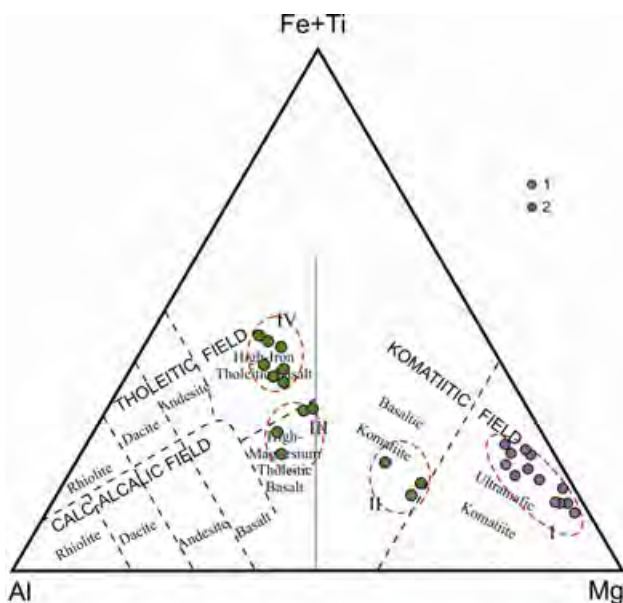


Рис. 3. Положение точек составов ультраосновных-основных метапород Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА на классификационной диаграмме Al-(Fe+Ti)-Mg [16]. Условные обозначения: I – поле РК, II – поле

ВК, III – поле НМgВ, IV – поле НFeТ. 1 – серпентиниты, породы амфибол-серпентинового состава, 2 – амфиболиты

В современном состоянии метапороды диагностируются, главным образом, по химическому составу (табл. 1). На диаграмме TAS [15] магматиты попадают в поля ультраосновных-основных пород нормальной щелочности. В основу разделения метапород положена диаграмма Енсена [16], на которой отчетливо выделяется четыре поля составов (рис. 3). Ниже приводится краткое описание петрогеохимических особенностей метапород, подробнее оно приводится в работе [14].

Поле I – перидотитовые коматиты (РК), включает в себя серпентиниты и породы амфибол-серпентинового состава. Породы образуют компактную петрохимическую группу (таблица 1) ультраосновных пород и характеризуются высокой мagneзиальностью ($MgO > 25\%$, $Mg\# = 0,77 - 0,87$, крайне низкой щелочностью ($\Sigma(Na_2O + K_2O) < 0,30\%$, $Na_2O \gg K_2O$), невысоким содержанием кремнезема ($SiO_2 = 39,16 - 46,95\%$), низким содержанием титана ($TiO_2 = 0,04 - 0,33\%$). Величина отношения $Al_2O_3/TiO_2 =$

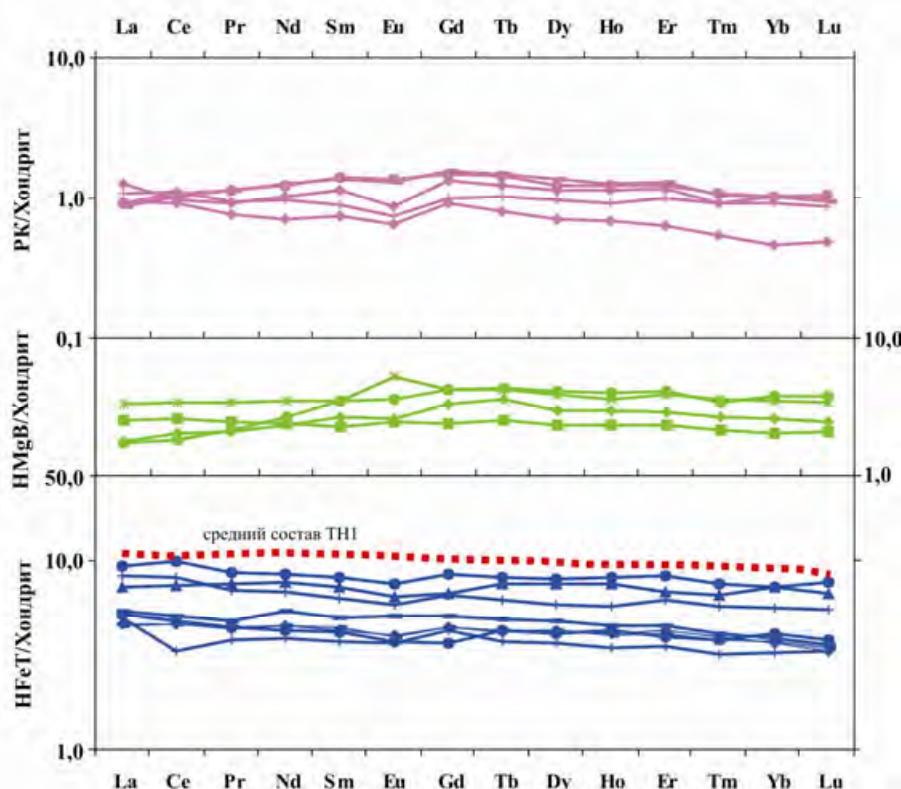


Рис. 4. Геохимическая характеристика метапород коматиит-толеитовой ассоциации Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА. Породы нормированы к хондриту по [18].

= 14,81 (от 9,58 до 19,05), преимущественно ниже хондритовой. Распределение РЗЭ носит преимущественно слабо фракционированный [14, 17] близкий хондриту характер (рис. 4) при значениях отношений $(La/Sm)_n$ около 1,1 – 1,2, $(Gd/Yb)_n$ 1,30–2,37 и наличием умеренных отрицательных европиевых аномалий ($Eu/Eu^*=0,81$, от 0,70 до 0,95).

Метакоматииты Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА имеют АТМ (Al_2O_3/TiO_2) = 9,77–14,10 (среднее 11,2, $n=5$) и в системе $Al_2O_3/TiO_2 - (Gd/Yb)_{mn}$ [19] локализируются в поле коматиитов деплетированных глиноземом, перекрываясь с коматиитами Барбертон.

Поле II – базальтовые коматииты (BK), включает в себя актинолититы, тремолититы, актинолит-тремолитовые, тремолит-карбонатные породы [4], которые отличаются от перидотитовых коматиитов меньшей магнезиальностью ($MgO=17,36-21,95$ %, $Mg\#=0,70-0,83$), более высоким содержанием кремнезема ($SiO_2=41,20 - 51,34$ %), щелочей ($\Sigma(Na_2O+K_2O)>0,50$ %, $Na_2O \gg K_2O$).

Поле III – высокомагнезиальные базальты (НМГВ) – амфиболиты с содержанием $SiO_2=49,21-51,15$ %, $TiO_2=0,47 - 0,68$ %. Это более железистые (11,38 – 15,09 %) породы с магнезиальностью 8,52 – 8,81 % ($Mg\#=0,56 - 0,59$) и глиноземистостью ($al=0,47-0,77$). НМГВ характеризуются слабо фракционированным распределением РЗЭ, превышающим хондритовый примерно в 5 раз (рис. 6), и отношением $Eu/Eu^*=0,80-1,35$.

Поле IV – высокожелезистые толеиты (HFET) –

амфиболиты, которые обладают низкой магнезиальностью ($MgO=3,5-7,43$ %, $Mg\#=0,28-0,44$ %), более высокой кремнеземистостью $SiO_2=46,43-55,50$ % и титанистостью $TiO_2=0,88-1,46$ %. HFET характеризуются аналогичным НМГВ трендом распределения РЗЭ (рис. 4), отличаются лишь немного большим уровнем (5–10 кратным) относительно хондрита. Породы обнаруживают сходство с толеитами типа ТН-1, которые в большинстве зеленокаменных поясов составляют 50–80 % типового разреза [20].

По классификации Енсена [16] ультраосновные-основные метапороды образуют два тренда: коматиитовый (перидотитовые и базальтовые коматииты) и толеитовый (высокомагнезиальные базальты и высокожелезистые толеиты), что также подтверждается рядом известных диаграмм [21, 22, 14].

По изотопно-геохимическим параметрам коматииты характеризуются [6, 14] в среднем более высокими значениями $\epsilon Nd(T_{2500}) = +1,4 - +4,3$, отвечающими деплетированной мантии. Высокомагнезиальные базальты характеризуются пониженными значениями $\epsilon Nd(T_{2500}) = -0,7 - +1,5$, указывающими на обогащенный источник этих пород.

Эрохронная зависимость, построенная для метакоматиитов, отвечает позднеархейскому возрасту $2,89 \pm 0,19$ млрд лет, СКВО=13, данные для высокомагнезиальных метабазальтов показывают $2,45 \pm 0,69$ млрд лет, СКВО=50. Sm-Nd модельный возраст, рассчитанный по образцу с наиболее низким отношением $^{147}Sm/^{144}Nd=0,1284$, составляет, согласно

модели Гольдштейна и Якобсена [23], 2,98 млрд лет.

Таким образом, совокупность геохимических и изотопных характеристик позволяет сделать вывод, что образование коматиитов связано с плавлением сублитосферной мантии. В источник родоначальных расплавов для высокомагнезиальных базальтов в значительных объемах могло входить вещество раннеархейской мафической нижней коры. Низкие содержания несовместимых элементов, а также формы спектра РЗЭ, как в метакоматиитах, так и в высокомагнезиальных метабазальтах свидетельствуют об их формировании за счёт высокой степени плавления деплетированных мантийных и нижнекорковых пород на относительно малых глубинах в сходном температурном режиме. Источник метакоматиитов мог ассоциировать с истощенным мантийным диапиром, тогда как источник высокомагнезиальных метабазальтов включал существенную долю нижней мафической коры раннеархейского возраста.

2.1. Габбро-дунит-перидотитовый сергиевский комплекс

В пределах верхних зеленокаменных поясов КМА плутогенные ультраосновные и основные породы

слагают многочисленные тела среди вулканитов и вулканогенно-осадочных образований михайловской серии.

Пространственная связь интрузивных магматитов с потоками базальтов позднеархейской коматиит-толеитовой ассоциации свидетельствует о формировании их в ранние стадии становления зеленокаменных поясов.

Силлоподобные тела ультраосновных и основных пород имеют удлинённую форму (по геофизическим параметрам) протяжённостью 1,5–2,5 км при ширине до 0,3–0,5 км. Мощность их по разрезу колеблется от 25 до 140 м. Ультраосновные породы представлены исключительно метаморфическими аналогами – преимущественно антигоровыми серпентинитами и апосерпентинитовыми тальк-карбонатными и существенно тальковыми породами с реликтами антигорита. Первичные реликтовые структуры пород просматриваются редко.

Основные породы представлены преимущественно габбро-амфиболитами среднезернистого массивного облика с реликтовой габбровой структурой. Химический состав основных породных разновидностей приведен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав ультраосновных пород сергиевского комплекса КМА

Тип пород	Компоненты														
	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Плп.	Сумма
1(18)	35,34	0,12	0,24	2,19	6,34	2,37	0,15	35,97	3,03	0,08	0,06	0,10	0,11	13,18	99,87
2(9)	34,52	0,18	0,36	1,29	7,04	1,75	0,19	35,84	3,03	0,07	0,09	0,06	0,20	15,41	100,05
3(10)	34,76	0,09	0,25	1,72	6,24	2,42	0,10	35,50	5,70	0,19	0,03	0,09	0,12	12,45	99,74
4(5)	33,80	0,22	0,26	0,68	6,87	1,37	0,13	39,26	1,02	0,03	0,04	0,04	0,11	16,36	100,19
5(17)	33,25	0,16	0,16	2,73	5,23	3,88	0,18	27,78	9,55	0,17	0,11	0,11	0,08	16,35	99,78
6(5)	48,12	0,88	14,95	0,03	2,25	9,84	0,18	7,92	9,94	2,60	0,35	0,10	0,08	2,85	99,88

Примечания: 1 – антигоровые серпентиниты; 2 – антигорит-лизардитовые серпентиниты; 3 – антигоровые карбонатизированные серпентиниты; 4 – лизардит-антигоровые серпентиниты; 5 – тальк-карбонатные апосерпентинитовые породы; 6 – габбро-амфиболиты. В скобках — количество анализов. 1–5 по [8], 6 – по [4].

3. Особенности минерогенеза высокомагнезиальных пород

Металлогенический облик высокомагнезиальных образований этого этапа определяется прежде всего наличием сульфидной медно-никелевой рудообразующей системы (рудопроявления Косиновское, Сторожевско-Реутецкое, Олимпийское, Жидеевское, Верхопенское [4, 8]). Кроме того, с ультраосновными породами связаны проявления хромита (Жидеевское и Мантуровское), силикатного никеля (0,5–0,9 %) в корах выветривания, талька и магнезита (Жидеевское, Ивнянское, Сергеевское [4, 8]).

Для пород коматиит-толеитовой ассоциации значимую роль играет сульфидное медно-никелевое оруденение. Ранее [3, 4, 8, 11, 13] в ультраосновных-основных зеленокаменных образованиях КМА установлен ряд [8, 11] разномасштабных проявлений благороднометалльного сульфидного медно-никелевого оруденения.

Наиболее часто встречаемым минералом является *халькопирит*, ксеноморфные зерна (до 0,8–1,0 мм) которого находятся в базисе пород и в прожилках, отмечаются сростания халькопирита с другими сульфидами. *Пентландит* часто находится совместно с халькопиритом, бравоитом и магнетитом. Образует ксеноморфные зерна (0,03 – 0,05 мм) в матрике и карбонатных прожилках; самостоятельные агрегатные его выделения (до 0,01 мм) характерны для матрикса пород. *Пирротин* встречается вместе с пентландитом, а также халькопиритом в матрике и карбонатных прожилках. *Пирит* часто корродирует и замещает ассоциирующие с ним сульфиды – пирротин, халькопирит, а также образует самостоятельные мелкие (сотые доли миллиметра) изометричные зерна, отмеченные только в основной массе пород.

Исследование геолого-структурного положения, приуроченности сульфидов к определенным типам пород и жильных образований в ультраосновных-

основных магматитах Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА позволило выделить три типа ассоциаций: 1) пирит-пирротин-пентландит-халькопиритовая рассеянного вкрапленного оруденения; 2) пирит-халькопиритовая, развитая в кварцевых прожилках; 3) пентландит-пирротин-галенит-халькопиритовая карбонатного прожилкования (табл. 3).

Установлены граничные признаки между составом сульфидов и распределением в них количественных содержаний цветных и благородных металлов [14] в трех выделенных типах сульфидных ассоциаций, пространственно приуроченных к ультраосновным-основным метамородам Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА. Особенности выделенных сульфидных ассоциаций подробнее рассмотрены в работе [14].

Выделенные три типа сульфидных ассоциаций,

характеризующиеся различным геолого-структурным положением и приуроченностью к определенным типам пород и жильных образований, различающиеся составом ведущих сульфидов и особенно распределением в них элементов-примесей (цветных и благородных металлов), отражают многостадийную природу формирования.

Особый интерес для оценки перспектив рудоносности ультраосновных-основных метамород представляет исследование поведения никеля, кобальта, хрома, меди. Наибольшие содержания никеля (1683,07 – 2277,52 г/т), кобальта (100,00 – 117,00 г/т) и хрома (1528,57 – 2733,00 г/т) характерны для перидотитовых метакоматитов, повышение концентрации меди (табл. 4) отмечается в высокомагнезиальных метабазальтах (до 509,00 г/т).

Таблица 3

Состав ведущих сульфидов (мас.%) в различных типах сульфидных ассоциаций, пространственно приуроченных к высокомагнезиальным метамородам [14]

Сульфидная ассоциация/ Минерал	Халькопирит	Пентландит	Пирротин	Пирит	Галенит
Пирит-пирротин-пентландит-халькопиритовая вкрапленного типа	CU (33,36-36,61) FE(29,03-30,65) S (33,37-35,77) <i>NI (до 0,22)</i> <i>CO(до 0,22)</i> <i>AS (до 0,40)</i> <i>ZN (до 1,12)</i> <i>AU (до 0,288)</i> <i>PT (до 0,254)</i>	FE (29,40-31,85) NI (33,29-36,00) S (32,06-32,34) <i>CO(0,25 – 5,65)</i> <i>AS (до 1,94)</i> <i>ZN (до 0,06)</i>	FE (58,47-60,82) S (38,16-39,73) <i>NI (0,06 – 1,02)</i> <i>CO(0,09 - 0,24)</i> <i>AS (до 0,32)</i> <i>ZN (до 0,88)</i>	FE (45,36-46,35) S (52,61-54,83) <i>NI (0,06 – 1,03)</i> <i>CO(0,44 - 1,52)</i> <i>PB (до 0,38)</i>	
Пирит-халькопиритовая (кварцевые прожилки)	CU (35,23-36,82) FE (29,14-30,15) S (34,18-34,95) <i>CO(до 0,11)</i> <i>ZN (0,16 – 0,25)</i> <i>PT (до 0,245)</i>			FE (45,81-47,31) S (51,42-53,93) <i>NI (до 0,63)</i> <i>CO(0,11 – 1,09)</i> <i>ZN (0,11 – 0,19)</i> <i>PB (до 0,42)</i>	
Пентландит-пирротин-галенит-халькопиритовая (карбонатные прожилки)	CU (29,21-31,75) FE (33,85-34,95) S (34,01-35,48) <i>NI (до 0,20)</i> <i>ZN (0,05 – 0,08)</i>	FE (29,66-31,08) NI (32,55-34,81) S (33,81-35,19) <i>CO(0,04 – 2,47)</i>	FE (56,2-57,85) S (39,23-41,82) <i>NI (1,02 – 1,53)</i> <i>CO(до 0,15)</i>		PB (82,92-86,60) S (12,73-13,21) <i>NI (до 0,06)</i> <i>BI (1,80 – 2,01)</i> <i>AG (0,452 – 0,505)</i>

Примечания: жирным шрифтом обозначены минералообразующие элементы, курсивом – примесные.

Таблица 4

Содержания рудных элементов (г/т) в ультрамафит-мафитовых метамородах ЛРЗКП [14]

Компоненты	PK			HMgB			HFeT		
	min	max	S (n=5)	min	max	S (n=4)	min	max	S (n=8)
Cr	1528,57	2733,00	2043,18	147,00	416,00	295,75	7,40	218,00	92,89
Ni	1683,07	2277,52	1868,52	94,80	147,00	124,95	32,40	166,00	94,65
Co	100,00	117,00	108,84	50,70	70,00	58,20	39,20	91,80	59,66
Cu	3,70	47,50	27,58	149,00	509,00	280,00	29,60	228,00	159,15

Примечания: S – среднее значение, N – количество анализов.

Заключение

Позднеархейская эпоха (>2,5 млрд лет) становления литосферы ВКМ, связанная с механизмом энсиалического рифтогенеза (с последующей коллизией и элементами субдукции) и сопряженных с ним термодинамических обстановок глубинного петрогенезиса, обусловила появление заметно большего разнообразия СВК по сравнению с раннеархейской, усложнение состава и структуры слагающих их формационных рядов магматических и метаморфических породных ассоциаций, существенное расширение продуктивности рудных, в том числе благороднометаллосодержащих, формаций зеленокаменных поясов.

Ультраосновные-основные в разной степени метаморфизованные породы относятся к двум сериям – коматиитовой и толеитовой. Совокупность геохимических и изотопных характеристик указывает на мантийный источник родоначальных расплавов для метакоматиитов, тогда как формирование метапород толеитовой серии происходило за счет обогащения мантийных расплавов мафическим материалом нижних уровней континентальной коры.

Изучение распределения цветных и благородных металлов в высокомагнезиальных породах выявило наибольшие концентрации хрома, никеля и кобальта в ультраосновных разностях, тогда как повышенные концентрации меди наблюдаются в высокомагнезиальных метабазах. Исследование металлоносных особенностей метапород выявило многостадийную природу формирования рудно-магматической системы.

Таким образом, ультраосновные-основные метапороды Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса характеризуются совмещением раннего, собственно магматического мелкомасштабного сульфидного медно-никелевого с золотом и платиноидами оруденения, с последующими проявлениями благороднометалльного оруденения гидротермально-метасоматического генезиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов, Н. М. О современном состоянии схемы стратиграфии и магматизма раннего докембрия Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов, А. Ю. Альбеков, М. В. Рыборак // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2009. – № 2. – С. 33 – 40.
2. Крестин, Е. М. Докембрий КМА и основные закономерности его развития / Е. М. Крестин // Изв. вузов: Геология и разведка, 1980. – № 3. – С. 3 – 18.
3. Ножкин, А. Д. Радиоактивные элементы в породах раннего докембрия (на примере КМА) / А. Д. Ножкин, Е. М. Крестин. – М.: Наука. – 1984. – 126 с.
4. Бочаров, В. Л. Ультрамафит-мафитовый магматизм гранит-зеленокаменной области КМА / В. Л. Бочаров, С. М. Фролов, А. Н. Плаксенко, В. Н. Левин. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 1993. – 176 с.
5. Чернышов, Н. М. Структурно-тектоническое районирование ВКМ (по геологическим и геофизическим данным) / Н. М. Чернышов, В. И. Лосицкий, С. П. Молотков [и др.] //

Современные проблемы геологии: мат-лы юбилейной научной сессии геолог. ф-та ВГУ. – Воронеж. – 1998. – С. 5–7.

6. Чернышов, Н. М. Первые данные Sm-Nd изотопии неархейской коматиит-толеитовой ассоциации Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА (Центральная Россия) / Н. М. Чернышов, М. В. Рыборак, В. М. Саватенков, А. Ю. Альбеков, Е. М. Соловьева // Доклады академии наук. – 2012. – Т. 447. – № 1. – С. 1–4.
7. Крестин, Е. М. Первая находка коматиитов в СССР / Е. М. Крестин // Доклады академии наук СССР. – 1978. – Т. 242. – № 2. – С. 412 – 415.
8. Чернышов, Н. М. Гипербазиты КМА / Н. М. Чернышов, В. Л. Бочаров, С. М. Фролов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 1981. – 252 с.
9. Геология и полезные ископаемые России / Ред. Б. В. Петров, В. П. Кириков. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ. – 2006. – Т. 1. Запад России и Урал. – Кн. 1. Запад России. – 528 с.
10. Ненахов, В. М. Минерогенические исследования территорий с двухъярусным строением (на примере Воронежского кристаллического массива) / В. М. Ненахов [и др.]. – М.: Геокарт, Геос. – 2007. – 284 с.
11. Чернышов, Н. М. Платиноносные формации Курско-Воронежского региона (Центральная Россия): монография / Н. М. Чернышов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 2004. – 448 с.
12. Чернышов, Н. М. Главнейшие типы геодинамических и минерогенических рядов в общей модели формирования докембрийской литосферы (на примере ВКМ) / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2011. – Вып. 2. – С. 47 – 58.
13. Бочаров, В. Л. Эндогенные режимы раннего докембрия Воронежского кристаллического массива / В. Л. Бочаров, Н. М. Чернышов. – Л. – 1985. – С. 192–205.
14. Боброва, Е. М. Геология, вещественный состав и условия образования ультрамафит-мафитовых пород Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / Е. М. Боброва. – СПб. – 2013. – 24 с.
15. Петрографический кодекс / Ред. О. А. Богатиков, О. В. Петров. – СПб.: «ВСЕГЕИ». – 2009. – 198 с.
16. JENSEN, L. SA new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks / L. S. Jensen // Ontario Dept. Mines. – 1976. – V. 66. – 22 p.
17. Боброва, Е. М. Новые данные о петрогеохимических особенностях ультрамафит-мафитовых пород неархейского Льговско-Ракитнянского зеленокаменного пояса КМА (на примере Косинового участка) // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2011. – Вып. 1. – С. 103 – 116.
18. SUN, SH. S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes / SH. S. SUN, W. F. McDonough // Magmatism in ocean basins / Eds. A. D. Saunders, M. J. Norry. Geol. Soc. Spec. Public. – 1989. – N. 42. – P. 313 – 345.
19. SPRIGUE, R. A. Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiitic in the Abitibi greenstone belt / R. A. Sprigle, C. M. Leshner, J. A. Ayer, P. S. Thurston, C. T. Herzberg // Precambrian research. – 2002. – № 115. – P. 153– 186.
20. Конди, К. Архейские зеленокаменные пояса / К. Конди: пер. с англ. – М.: Мир. – 1983. – 390 с.
21. Куликов, В. С. Коматииты и высокомагнезиальные вулканиты раннего докембрия Балтийского щита / В. С. Куликов, А. И. Светова, М. Б. Раевская [и др.] – Л.: Наука. – 1988. – 191 с.

22. KUNQ H. Differentiation of basalt magmas // Hess H. H., Poldervart A. (eds.) Basalts: The Poldervart treatise on rocks of basaltic composition. – V. 2. Interscience, N.Y. – 1968. – P. 623 – 688.

23. GOLDSTEIN, S. Nd and Sr isotopic systematics of water suspended material: Implications for crustal evolution / S. J. Goldstein, S. B. Jacobsen // Earth and Planetary Science Letters. – 1988. – V. 87. – P. 249 – 265.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Чернышов Н. М., член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой минералогии и петрологии, руководитель НОЦ «Геология рудных месторождений Центральной России» ВГУ-ИГЕМ РАН

E-MAIL: PETROLOGY@LIST.RU

Тел.: 8(473) 220 86 81;

Рыборак М. В., кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией НОЦ ВГУ и ИГЕМ РАН

Боброва Е. М., кандидат геолого-минералогических наук, преподаватель кафедры, петрографии и геохимии

E-MAIL: SAMCRODCK2006@MAIL.RU

Тел.: 8(473) 220 87 79

Альбеков А. Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры, петрографии и геохимии

E-MAIL: SASHAALB@MAIL.RU

Тел.: 8(473) 220 87 79

Чернышова М. Н., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и петрологии

E-MAIL: PETROLOGY@GEOL.VSU.RU

Тел.: 8(473) 220 84 34

VORONEZH STATE UNIVERSITY

CHERNYSHOV N. M., CORRESPONDING MEMBER OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES, HONORED RESEARCHER OF RF, DOCTOR OF GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, PROFESSOR, HEAD OF DEPARTMENT OF MINERALOGY, PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY, HEAD OF CENTRE FOR RESEARCH AND EDUCATION "GEOLOGY OF ORE DEPOSITS OF CENTRAL RUSSIA" AT VSU-IGEM RAS.

E-MAIL: PETROLOGY@LIST.RU

TEL.: 8(473) 220 86 81

RYBORAK M. V., CANDIDATE OF THE GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, CHIEF OF THE SCIENCE MINERAGENIC LABORATORY

BOBROVA E. M., CANDIDATE OF THE GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, TEACHER OF DEPARTMENT OF MINERALOGY, PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY

E-MAIL: SAMCRODCK2006@MAIL.RU

TEL.: 8(473) 220 87 79

ALBEKOV A. YU., CANDIDATE OF THE GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, SENIOR LECTURER OF DEPARTMENT OF MINERALOGY, PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY

E-MAIL: SASHAALB@MAIL.RU

TEL.: 8(473) 220 87 79

M. N. CHERNYSHOVA – DOCTOR OF GEOLOGICAL AND MINERALOGICAL SCIENCES, OF DEPARTMENT OF MINERALOGY, PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY

E-MAIL: PETROLOGY@LIST.RU

TEL.: 8(473) 220 84 34