

УДК 549:542.4(470.323)  
DOI: 10.7868/S25000640210101

## ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ РЫЛЬСКОЙ СТРУКТУРЫ (ВОРОНЕЖСКИЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ МАССИВ) КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ГЕНЕЗИСА ПОРОД

© 2021 г. В.С. Кузнецов<sup>1</sup>, В.В. Абрамов<sup>1</sup>

**Аннотация.** Объектом исследований в настоящей работе выступают углеродистые сланцы, вскрытые буровыми скважинами в пределах Рыльской рифтогенной структуры Курского блока Воронежского кристаллического массива. В изучаемых породах установлен и впервые охарактеризован с помощью современных методов исследования вещества комплекс породообразующих и акцессорных минералов – апатит, пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, магнетит, рутил, гранаты, циркон, ставролит, оливин, барит, муассанит, синхизит, бастнезит. При этом муассанит, синхизит, бастнезит описаны для сланцев Рыльской структуры впервые, а для рутила, гранатов, ставролитов и цирконов по их физическим свойствам и химическому составу впервые выделено несколько разновидностей этих минералов. В основной ткани сланцев диагностированы тонкозернистые флогопит и терригенный калиевый полевой шпат. Установленные особенности минерального состава сланцев позволяют охарактеризовать некоторые особенности природы протолита и условий седиментации изучаемых пород. Столь широкий спектр акцессорных минералов, особенно аллотигенных, характерных для пород как кислого, так и основного-ультраосновного состава, а также присутствие в ткани породы помимо кварца калиевых полевых шпатов, указывает на наличие в областях сноса пород различного петрографического состава с низкой степенью выветривания.

**Ключевые слова:** углеродистые сланцы, Курский блок, минералогия, докембрий.

## THE DISTINCTIVE FEATURES OF MINERAL COMPOSITION OF THE CARBONACEOUS SHALE IN THE RYLSKAYA STRUCTURE (VORONEZH CRYSTALLINE MASSIF) AS AN INDICATOR OF ROCK GENESIS

V.S. Kuznetsov<sup>1</sup>, V.V. Abramov<sup>1</sup>

**Abstract.** The subject of research in this study is the carbonaceous shale exposed by the drill-holes within the Rylskaya rift structure of the Kursk block of the Voronezh crystalline massif. The analysis of the examined rock revealed a complex of rock-forming and accessory minerals, i.e. apatite, pyrite, pyrrhotite, sphalerite, chalcopyrite, magnetite, rutile, garnets, zircon, staurolite, olivine, barite, moissanite, synchisite, bastnesite, which was for the first time described using the modern research methods. Therewith, moissanite, synchisite, and bastnesite were discovered in the shale of the Rylskaya structure for the first time. Several varieties of rutile, garnets, staurolites and zircons were for the first time identified by their physical characteristics and chemical composition. Fine-grained phlogopite and terrigenous K-feldspar were found in the main shale tissue. The discovered features of the shale's mineral composition allow to define some of the aspects of the protolith nature and the sedimentation conditions of the studied rock. The wide range of accessory minerals, especially allogenic, that are characteristic of rocks of both acidic and basic-ultrabasic composition, as well as the presence of potassium feldspars in the rock tissue alongside with quartz, indicate the presence of rocks of various petrographic compositions with a low degree of weathering in the erosion areas.

**Keywords:** carbonaceous shales, Kursk unit, mineralogy, Precambrian.

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет (Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation), Российская Федерация, 394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1, e-mail: voronezhpodkl@inbox.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Разновозрастные стратифицированные углеродистые толщи различных регионов Земли являются уникальными источниками цветных, редких и благородных металлов. В настоящей работе объектом изучения выступают углеродистые сланцы, вскрытые буровыми скважинами в пределах Рыльской рифтогенной структуры Курского блока Воронежского кристаллического массива. Рыльская структура, расположенная на периферии Курского блока вдали от детально исследованных железорудных районов Курской магнитной аномалии (КМА), характеризуется значительно меньшей степенью изученности, что обуславливает интерес к данным породам. В процессе изучения минералого-петрографических особенностей углеродистых сланцев были подробно охарактеризованы породообразующие и акцессорные минералы сланцев с применением современных методов исследования вещества. Полученные результаты дают новую информацию о вещественном составе и генезисе изучаемых метаосадочных пород. Подобные исследования для углеродистых сланцев Рыльской структуры выполнены впервые.

## ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории Воронежского кристаллического массива углеродсодержащие породы встречаются в составе докембрийских метаморфических комплексов различного возраста. Максимального развития углеродсодержащие породы достигают в оскольской серии нижнего протерозоя, которая перекрывает железорудную курскую серию. Состав и строение оскольской серии характеризуется ритмичной, неоднократно повторяющейся сменой конгломератов, гравелитов и метапесчаников, переходящих к верхам разреза в карбонатно-сланцевые сланцы с горизонтами амфиболитов, метаморфизованных доломитов и известняков, широким развитием углеродсодержащих пород и вулканитов. Отложения оскольской серии накапливались только в наиболее крупных структурах с длительным устойчивым прогибанием: Тим-Ястребовской, Белгородской, Михайловской, Волотовской, Рыльской [1]. Рыльская структура протяженностью около 50 км при ширине 30 км является крупной палеопротерозойской синформой, расположенной в западной части Курского блока Воронежского кристаллического массива (рис. 1). В геологи-

ческом строении структуры принимают участие образования архея и палеопротерозоя. К характерным ее особенностям следует отнести слабое развитие в ее пределах магматической деятельности. Стратифицированные докембрийские образования Рыльской структуры смяты в узкие изоклинные складки, подчиненные общему северо-восточному направлению всей структуры. Углеродистые сульфидизированные сланцы были вскрыты на Стрекаловском участке в конце 1970-х гг. в ходе поисковых работ на бокситы в установленной гравимагнитной съемкой зоне пониженного электрического сопротивления. Осадочно-метаморфический комплекс пород палеопротерозойской оскольской серии слагает круто падающую, узкую, осложненную мелкой складчатостью синклинальную складку, ядерная часть которой сложена довольно значительной по мощности (200–250 м) толщей углеродистых сланцев и карбонатно-терригенных образований, пересеченной буровым профилем [3]. Исследования проводились по керну скважины 3602, наиболее представительной по сохранности керна.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

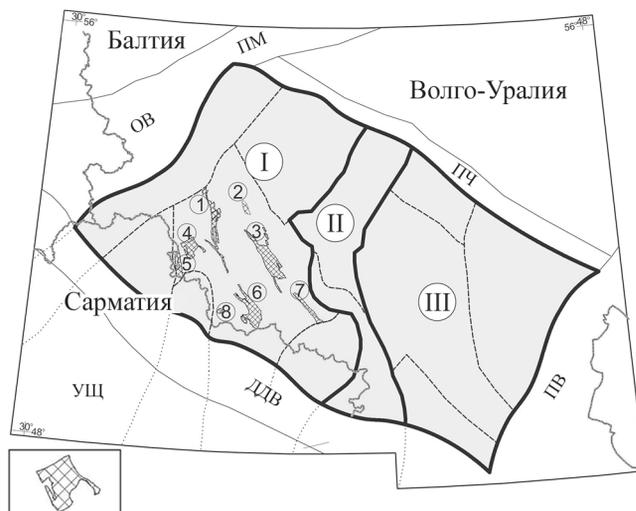
Минералого-петрографические особенности сланцев изучали по прозрачно-полированным шлифам, химический состав минеральных фаз определяли с помощью растрового электронного микроскопа Jeol 6380 LV с системой энергодисперсионного количественного микроанализа INCA 250 в Воронежском государственном университете (ВГУ, Россия). Для исследования акцессорных минералов из керна скважины 3602 была отобрана крупнообъемная проба сланцев (весом около 7 кг). Породы были издроблены на щековых дробилках до крупности менее 1 мм, а затем подвергнуты гравитационному обогащению на концентрационном вибростоле. Далее полученный гравитационный концентрат был перечищен в чашках с использованием тяжелой жидкости (бромформ) и проведена магнитная сепарация. Полученные минеральные фракции, различные по физическим свойствам, изучали под бинокляром с отбором минеральных зерен для проведения микрорентгеноспектральных исследований. Рентгенофазовый анализ минералов выполнен на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария) в Центре коллективного пользования научным оборудованием ВГУ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Макроскопически углеродистые сланцы представляют собой темно-серые до черных породы. Для них характерны микрозернистая, гранобластовая, лепидобластовая (рис. 2а), порфиробластовая структуры. Текстура пород сланцеватая (рис. 2а), часто плейчатая. Главными породообразующими минералами сланцев являются кварц, слюды (серицит, флогопит, мусковит), калиевый полевой шпат (КПШ), а также гранаты. В отдельных участках породы интенсивно обогащены углеродистым веществом (графитом), что затрудняет определение состава пород. В качестве второстепенных и акцессорных минералов выступают карбонаты, апатит, хлорит.

Во всех типах углеродистых сланцев присутствует кварц, который слагает основную массу породы. В сростании с углеродистым веществом минерал плохо распознаваем под микроскопом, поэтому дать оценку его количеству затруднительно. Зачастую содержание кварца около 10–20 %. Зерна кварца имеют неправильную, уплощенную или изометричную форму. Поверхность часто не гладкая, содержит мелкие включения других минералов, чаще всего рудных. Размер зерен варьирует в пределах 0,05–0,08 мм. Слюдистая составная часть микрочешуйчатая, удлиненно-пластинчатые зерна располагаются параллельно со сланцеватостью (0,04–0,07 мм), обычно разбросанные в ткани (рис. 2б), или образуют струеподобные скопления. Количество слюды в шлифах около 45–50 %. По результатам микрорентгеноспектрального анализа установлено, что слюда представлена флогопитом с переменным химическим составом (табл. 1). В составе сланцев также установлены калиевые полевые шпаты (табл. 1, рис. 2б). Совместно с кварцем и слюдами они слагают основную ткань породы. Представлены прямоугольными, изометричными зернами размером 0,02–0,05 мм. Содержание в породе составляет около 15 %.

При изучении породообразующих минералов сланцев под микроскопом были диагностированы порфиробласты гранатов, представленные идиоморфными кристаллами (рис. 2в). Это темно-бурые до коричневатых зерна кубической сингонии. В шлифах гранат изотропный, с высоким рельефом и резкой шагреневой поверхностью. По химическому составу (табл. 1) отвечает спессартину (более 90 % Sps), зональность кристаллов не выявлена.

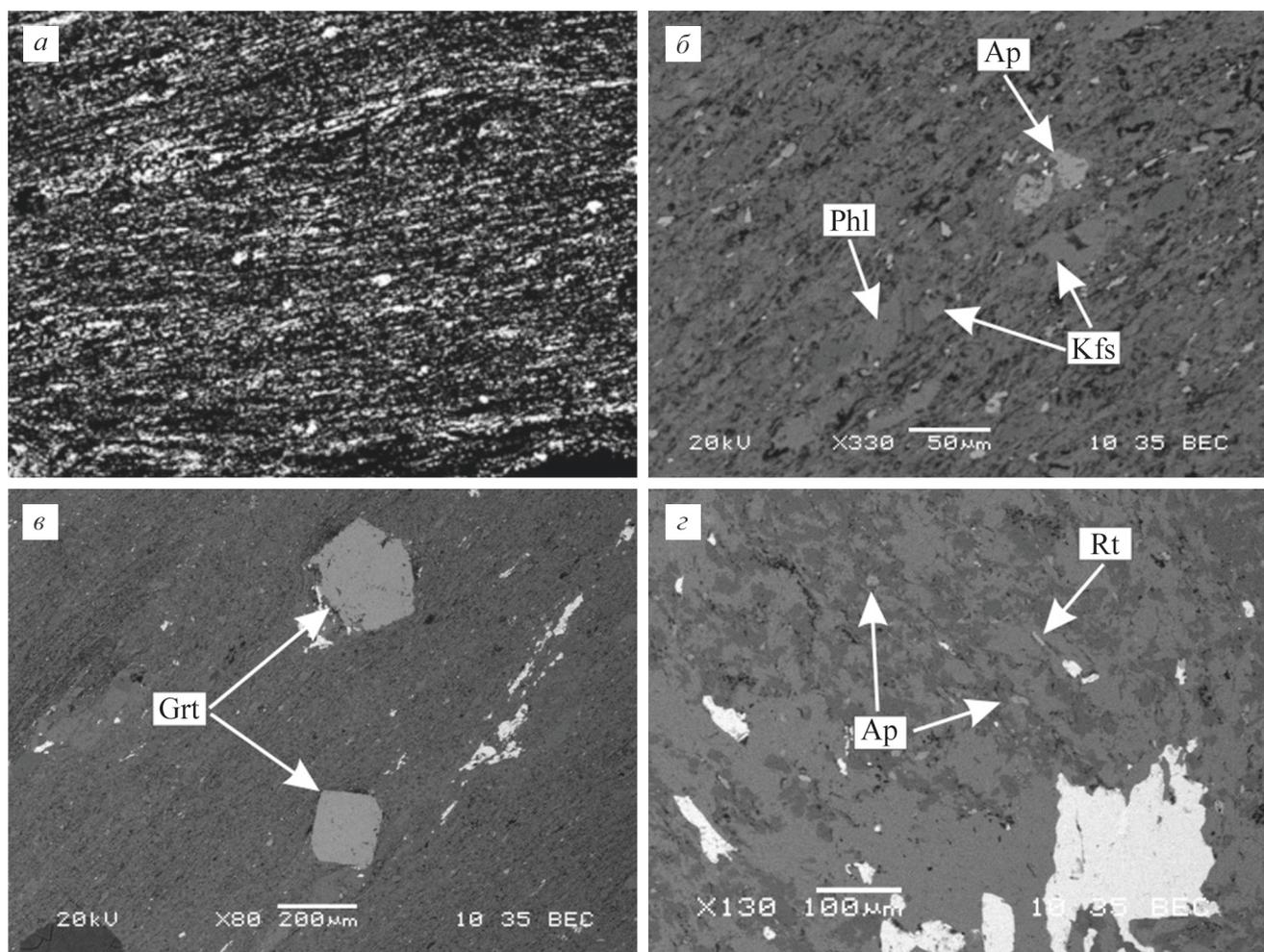


**Рис. 1.** Схема структурно-формационного районирования Воронежского кристаллического массива (по [1; 2], с изменениями и дополнениями). I – мегаблок КМА; II – Лосевская шовная зона; III – Хоперский мегаблок. На вставке границы палеопротерозойских рифтогенных структур. Цифры в кружках – названия рифтогенных структур: 1 – Михайловская; 2 – Орловская; 3 – Тим-Ястребовская; 4 – Рылская; 5 – Крупецкая; 6 – Белгородская; 7 – Волотовская; 8 – Борисовская. УЩ – Украинский щит; ОВ – Оршанская впадина; ПМ – Подмосковский авлакоген; ПЧ – Пачелмский прогиб; ПВ – Прикаспийская впадина.

**Fig. 1.** Scheme of structural-formational zoning of the Voronezh crystalline massif (after [1; 2], with changes and additions). I – KMA megablock; II – Losevskaya suture zone; III – Khopersky megablock. The inset shows boundaries of Paleoproterozoic riftogenic structures. The numbers in circles are the names of riftogenic structures: 1 – Mikhailovskaya; 2 – Orlovskaya; 3 – Tim-Yastrebovskaya; 4 – Rylskaya; 5 – Krupetskaya; 6 – Belgorodskaya; 7 – Volotovskaya; 8 – Borisovskaya. УЩ – Ukrainian shield; ОВ – Orsha depression; ПМ – Podmoskovny aulacogen; ПЧ – Pachelmsky trough; ПВ – Caspian depression.

Из акцессорных минералов в шлифах уверенно диагностируется только апатит, образующий кристаллы неправильной, изометричной формы (рис. 2г). Размер зерен составляет 0,015–0,03 мм. По результатам микрорентгеноспектральных исследований установлено, что данный минерал содержит в своем составе тяжелые лантаноиды и является фторапатитом (табл. 1).

В исследуемых породах также присутствует рутил, представленный тонкими игольчатыми кристаллами вытянутой формы. Маленький размер зерен (10–20 мкм) затрудняет диагностику в шлифах, но данный минерал был уверенно диагностирован при микрорентгеноспектральных исследованиях (рис. 2г). При микрозондовых исследованиях были обнаружены единичные зерна редкоземельных минералов (табл. 1), представленных синхизитом  $(Ca_{1,97}(Ce_{0,82}La_{0,48}Nd_{0,41})_{\Sigma=1,71}F_{2,17}[CO_3]_2)$  и бастнезитом  $((Ce_{0,92}La_{0,52}Nd_{0,23})_{\Sigma=1,68}Ca_{0,49}F_{1,87}[CO_3])$ .



**Рис. 2.** Структурно-текстурные особенности, породообразующие и акцессорные минералы углеродистых сланцев Рыльской рифтогенной структуры КМА: а – сланцеватая текстура; б – Ap – апатит, Phl – флогопит, Kfs – калиевый полевой шпатель; в – Grt – гранат, Ap – апатит; з – Rt – рутил. Сокращенные обозначения минералов даны по работе [4].

**Fig. 2.** Structural and textural features, rock-forming and accessory minerals of carbonaceous shales of the Rylskaya riftogenic structure of the KMA: а – shaly texture; б – Ap – apatite, Phl – phlogopite, Kfs – potassium feldspar; в – Grt – garnet, Ap – apatite; з – Rt – rutile. Abbreviated designations of minerals are given in [4].

Среди рудных минералов сланцев наибольшим распространением пользуются пирит и пирротин, содержание и взаимоотношение которых в породах значительно изменяется в различных образцах, колеблясь от единичных зерен до 30–35 % в образцах с сульфидной минерализацией прожилково-вкрапленного типа.

Выполненные исследования тяжелой фракции проб показали, что углеродистые сланцы характеризуются значительным разнообразием видового состава акцессорных минералов. Прежде всего следует отметить значительное количество сульфидов, представленных пиритом и пирротинном, суммарное содержание которых достигает 95 %. Для пирита, составляющего около 70 % тяжелой фракции, характерны идиоморфные кристаллы, размеры их

колеблются от 0,1 мм до 10 мкм. Содержание пирротина также значительно (20–25 %), размер зерен сопоставим с таковым пирита и также колеблется в пределах от 0,1 мм до 10 мкм, характерны сростки с халькопиритом. Другие сульфидные минералы встречаются в виде единичных зерен. Сфалерит и халькопирит представлены отдельными мельчайшими кристаллами размером 10 мкм. Химический состав пирита и халькопирита близок к стехиометрическому, в сфалерите отмечаются примеси Fe и Mn (табл 2). Сфалерит с высоким содержанием Mn, как показано в работе [5], благоприятствует кристаллизации сульфида цинка в форме вюртцита.

Окиснорудные минералы представлены магнетитом и рутилом. Содержание магнетита значительно (около 5 % от общего количества акцессорных

**Таблица 1.** Химический состав породообразующих, аксессуарных минералов углеродистых сланцев Рылской структуры (масс. %) **Table 1.** Chemical compositions of rock-forming, accessory minerals of carbonaceous shales of the Rylskaya structure (wt %)

	Флогопит 1 Phlogopite 1	Флогопит 2 Phlogopite 2	Флогопит 3 Phlogopite 3		Гранат 1 Garnet 1	Гранат 2 Garnet 2	Синхизит Synchysite	Бастнезит Bastnasite		КПШ 1 K-feldspar1	КПШ 2 K-feldspar2	Апатит Apatite
SiO <sub>2</sub>	38,96	40,34	39,61	SiO <sub>2</sub>	36,62	37,78	1,87	0,00	SiO <sub>2</sub>	64,13	63,23	
TiO <sub>2</sub>	1,33	1,22	2,07	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,88	20,86	1,37	0,00	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,08	17,51	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,05	17,73	17,92	FeO	1,65	1,05	3,95	0,00	FeO	0,00	0,00	0,00
FeO	2,71	2,07	10,50	MnO	36,1	34,66	0,00	0,00	MnO	0,00	0,00	0,00
MnO	0,78	0,75	0,00	MgO	1,45	1,39	0,00	0,00	MgO	0,00	0,00	0,00
MgO	21,74	22,01	16,07	CaO	4,63	4,07	10,85	4,24	CaO	0,00	0,00	50,77
CaO	0,00	0,00	0,00	Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	Na <sub>2</sub> O	0,68	0,71	0,00
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,00	0,00	K <sub>2</sub> O	15,45	14,89	0,00
K <sub>2</sub> O	9,16	9,55	9,73	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	0,00	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	37,89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,00	0,00	0,00	F	0,00	0,00	5,23	6,35	F	0,00	0,00	4,76
F	0,00	0,00	0,00	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	11,34	15,47	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	17,55	25,69	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	1,51
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	10,49	8,66	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	1,40
Сумма / Total	89,46	93,67	95,90	Сумма / Total	101,33	99,81	62,65	60,41	Сумма / Total	98,34	96,34	96,34
Si	2,96	2,95	2,95	Si	2,92	3,05	–	–	Si	3,01	3,03	0,00
Ti	0,08	0,07	0,12	Ti	0,00	0,00	–	–	Ti	0,00	0,00	0,00
Al	1,36	1,53	1,57	Al	1,96	1,99	–	–	Al	1,00	0,99	0,00
Al 4	1,04	1,05	1,05	Cr	0,00	0,00	–	–	Fe <sup>2+</sup>	0,00	0,00	0,00
Al 6	0,32	0,47	0,52	Fe <sup>3+</sup>	0,19	0,00	–	–	Mn	0,00	0,00	0,00
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,00	0,00	Fe <sup>2+</sup>	0,00	0,07	–	–	Mg	0,00	0,00	0,00
Fe <sup>2+</sup>	0,17	0,13	0,65	Mn	2,44	2,37	–	–	Ca	0,00	0,00	0,00
Mn	0,05	0,05	0,00	Mg	0,17	0,17	–	–	Na	0,06	0,07	0,00
Mg	2,48	2,40	1,78	Ca	0,40	0,35	–	–	K	0,93	0,91	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	Na	0,00	0,00	–	–	X(Ca)	0,00	0,00	0,00
Na	0,00	0,00	0,00	K	0,00	0,00	–	–	X(Na)	0,06	0,07	0,00
K	0,89	0,89	0,92	X(adr)	0,01	0,00	–	–	X(K)	0,94	0,93	0,00
ОН	2,00	2,00	2,00	X(grs)	0,12	0,12	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00
XSdph	3,94	4,18	17,85	X(uvarovite)	0,00	0,00	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00
XEast	43,64	57,99	48,73	X(alm)	0,00	0,01	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00
XAnn	4,34	2,54	8,96	X(sps)	0,81	0,80	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00
XPhl	48,08	35,29	24,46	X(prp)	0,06	0,06	–	–	0,00	0,00	0,00	0,00

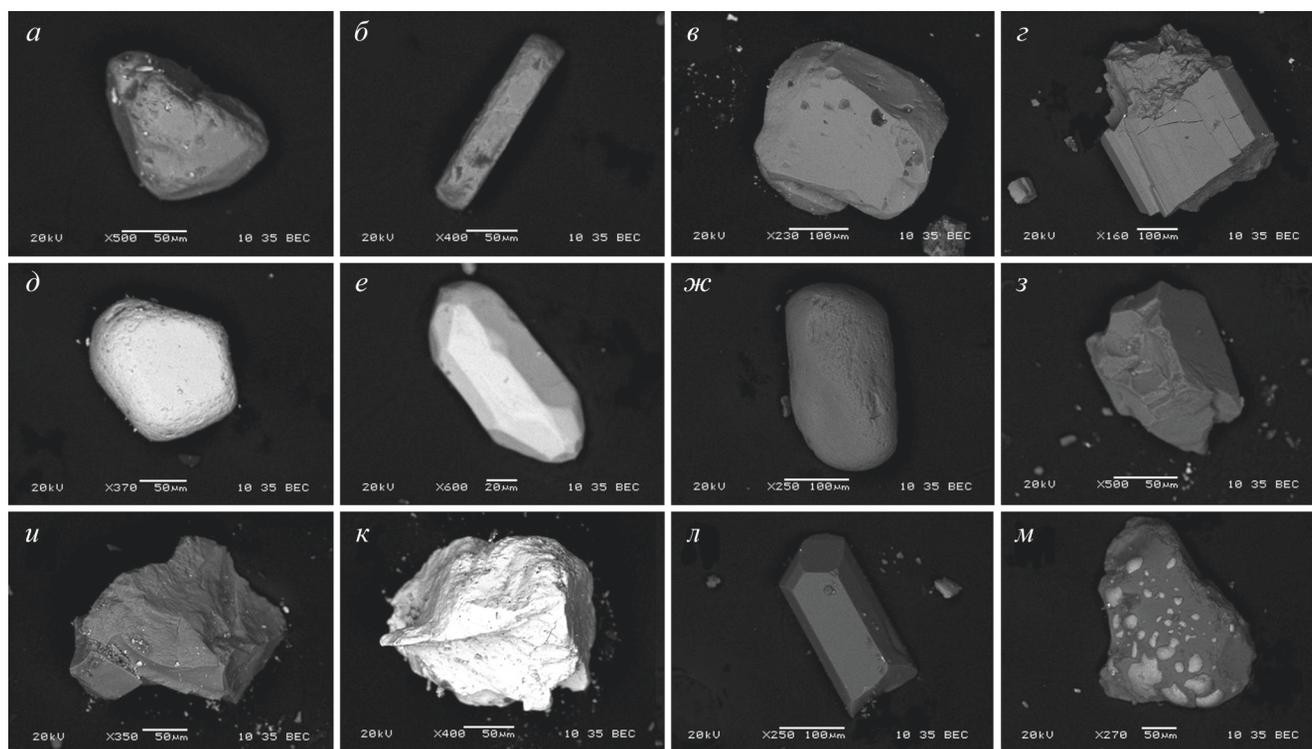
минералов), химический состав близок к стехиометрическому, без примесей Ti. Рутил представлен двумя типами: длиннопризматическими (дитетрагональная призма) столбчатыми кристаллами и их обломками (рис. 3б) и слабоокатанными зернами неправильной формы (рис. 3а) темно-вишневого или густо-красного цвета (центральные зоны кристаллов характеризуется более яркой окраской, чем краевые). Химический состав рутила близок к стехиометрическому (табл. 2).

При просмотре тяжелой фракции также было диагностировано большое количество зерен гра-

ната. Представлены преимущественно кристаллами субизометричной неправильной формы с раковистым изломом. По результатам химического анализа (табл. 2) выделяется 2 группы гранатов: пиральспиты (рис. 3в) и уграндиты (рис. 3з). Первая группа характеризуется преобладанием альмандинового минала (58–77 %) (табл. 2), представлена зернами неправильной формы, иногда со сглаженными гранями, розоватого оттенка. В гранатах второго типа содержится значимое количество гроссуляровой составляющей (табл. 2). Зерна желтовато-зеленого и

Таблица 2. Химический состав акцессорных минералов из углеродистых сланцев Рыльской структуры (масс. %)  
 Table 2. Chemical compositions of rock-forming, accessory minerals of carbonaceous shales of the Rylskaya structure (wt %)

Минерал Mineral	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	BaO	CuO	ZnO	ZrO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Сумма Total	Формула минерала Mineral formula
1 Оливин Olivine	38,53	0	0	29,64	0,74	30,72	0,37	0	0	0	0	0	0	100	Mg <sub>1,23</sub> Fe <sub>0,67</sub> Mn <sub>0,02</sub> Ca <sub>0,01</sub> [Si <sub>1,05</sub> O <sub>4</sub> ]
2 Барит Barite	0	0	0	0	0	0	0	31,7	68,3	0	0	0	0	100	Ba <sub>0,97</sub> [S <sub>1,09</sub> O <sub>4</sub> ]
3 Гранат Garnet	31,85	0	17,85	38,48	1,79	4,68	5,35	0	0	0	0	0	0	100	Mg <sub>0,56</sub> Fe <sub>1,42</sub> Mn <sub>0,12</sub> Al <sub>1,7</sub> Fe <sub>1,17</sub> [Si <sub>2,57</sub> O <sub>12</sub> ]
4 Гранат Garnet	37,96	0	17,51	30,14	10,5	1,89	2	0	0	0	0	0	0	100	Fe <sub>2,12</sub> Mn <sub>0,75</sub> Ca <sub>0,18</sub> Al <sub>1,74</sub> [Si <sub>3,2</sub> O <sub>12</sub> ]
5 Гранат Garnet	36,73	0	20,23	27,53	1,46	2,85	11,2	0	0	0	0	0	0	100	Mg <sub>0,34</sub> Fe <sub>1,52</sub> Mn <sub>0,1</sub> Ca <sub>0,95</sub> Al <sub>1,89</sub> Fe <sub>0,3</sub> [Si <sub>2,91</sub> O <sub>12</sub> ]
6 Гранат Garnet	39,63	0	22,54	25,08	1,25	8,22	3,28	0	0	0	0	0	0	100	Mg <sub>0,94</sub> Fe <sub>1,61</sub> Mn <sub>0,08</sub> Ca <sub>0,27</sub> Al <sub>2,04</sub> [Si <sub>3,05</sub> O <sub>12</sub> ]
7 Гранат Garnet	39,7	0	25,03	11,81	0	0	23,46	0	0	0	0	0	0	100	Fe <sub>0,76</sub> Ca <sub>1,93</sub> Al <sub>2,26</sub> [Si <sub>3,05</sub> O <sub>12</sub> ]
8 Ставролит Staurolite	29,23	0,79	54,82	13,74	0	1,42	0	0	0	0	0	0	0	100	Fe <sub>1,62</sub> Mg <sub>0,3</sub> Ti <sub>0,09</sub> Al <sub>9,12</sub> O <sub>7</sub> OH[SiO <sub>4</sub> ] <sub>4</sub>
9 Ставролит Staurolite	27,27	0	53,22	17,49	0,84	1,18	0	0	0	0	0	0	0	100	Fe <sub>20,1</sub> Mg <sub>0,24</sub> Mn <sub>0,09</sub> Al <sub>9,19</sub> O <sub>7</sub> OH[SiO <sub>4</sub> ] <sub>4</sub>
10 Циркон Zircon	29,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68,73	2,07	0	100	Zr <sub>1,06</sub> Hf <sub>0,02</sub> [Si <sub>0,925</sub> O <sub>4</sub> ]
11 Циркон Zircon	30,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69,73	0	0	100	Zr <sub>1,06</sub> [Si <sub>0,94</sub> O <sub>4</sub> ]
12 Рутил Rutile	0,51	98,71	0	0,78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	Ti <sub>0,99</sub> Fe <sub>0,075</sub> Si <sub>0,0075</sub> O <sub>2</sub>
13 Рутил Rutile	0,93	98,36	0	0,71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	Ti <sub>0,09825</sub> Fe <sub>0,0075</sub> Si <sub>0,0125</sub> O <sub>2</sub>
14 Пирит Pyrite	0	0	0	44,67	0	0	0	51,93	0	0	0	0	0	96,6	Fe <sub>0,98</sub> S <sub>2</sub>
15 Халькопирит Chalcopyrite	0	0	0	31,67	0	0	0	34,49	0	33,85	0	0	0	100,01	Cu <sub>0,981</sub> Fe <sub>1,049</sub> S <sub>2</sub>
16 Сфалерит Sphalerite	0	0	0	8,82	2,9	0	0	34,87	0	0	51,51	0	0	98,1	Zn <sub>0,727</sub> Fe <sub>0,144</sub> Mn <sub>0,048</sub> S



**Рис. 3.** Рудные акцессорные минералы сланцев Рыльской структуры (растровый электронный микроскоп Jeol 6380 LV, ВГУ): *а, б* – рутил; *в, г* – гранат; *д, е* – циркон; *ж, з* – ставролит; *и* – оливин; *к* – барит; *л, м* – муассанит.

**Fig. 3.** Ore accessory minerals of the shale of the Ryl'skaya structure (scanning electron microscope Jeol 6380 LV, Voronezh State University, Russia): *a, б* – rutile; *в, г* – garnet; *д, е* – zircon; *ж, з* – staurolite; *и* – olivine; *к* – barite; *л, м* – moissanite.

оранжевого цвета, отмечаются отдельные четкие грани кристаллов.

Цирконы обнаружены при просмотре тяжелой фракции пробы. Выделяется два типа зерен. Первый тип представлен сильно окатанными зернами, прозрачными, иногда с оранжевым оттенком (рис. 3д). В прозрачных разностях отмечаются повышенные содержания гафния (табл. 2). Ко второму типу относятся менее окатанные зерна, сохранившие свою кристаллическую огранку. Представлены хорошо оформленными длиннопризматическими с дипирамидальными окончаниями прозрачными и полупрозрачными (с розоватым оттенком) кристаллами (рис. 3е), часто трещиноватыми. Судя по морфологии наиболее сохранившихся зерен, цирконы относятся к гиацинтовому типу.

Также среди акцессорных минералов обнаружен ставролит. Анализ кристалломорфологических особенностей и химического состава позволил выделить два его типа. Первый тип представлен сильно окатанными зернами (рис. 3ж) медово-красного цвета с повышенными содержаниями железа и пониженными кремнезема (табл. 2). Зерна второго типа прозрачные со слабым оранжево-розовым оттенком, угловатой формы (рис. 3з).

Микрозондовыми исследованиями в тяжелой фракции сланцев диагностирован оливин. Он представлен осколком кристалла неправильной формы (рис. 3и). По химическому составу (табл. 2) соответствует гиалосидериту ( $Fo = 65 \%$ ). Помимо вышеописанных минералов в виде единичных зерен встречается барит (рис. 3к).

В ходе исследований в тяжелой фракции были диагностированы десятки полупрозрачных кристаллов зелено-голубоватого оттенка (рис. 3л, м). Микрозондовый анализ показал наличие в их составе только кремния. Учитывая аналитические возможности энергодисперсионной приставки, можно предположить также присутствие в химическом составе этих зерен углерода либо более легких элементов. Исходя из морфологии и окраски кристаллов, было сделано предположение, что данный минерал является природным карбидом кремния – муассанитом. С целью окончательной диагностики указанной минеральной фазы был выполнен рентгенофазовый анализ, результаты которого (рис. 4) подтвердили, что вышеописанные кристаллы действительно являются муассанитом. В соответствии с классификацией Германа – Могена [6] простая форма 43m характеризуется следующими параметрами:  $9P3L^44L^36L^2C$ .

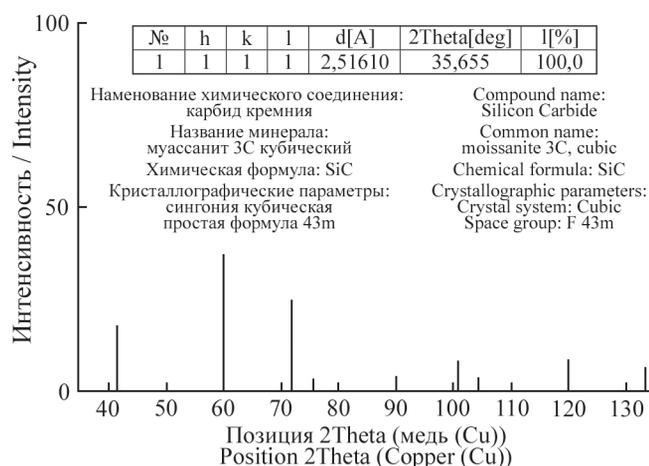


Рис. 4. Кристаллографические параметры муассанита.

Fig. 4. Crystallographic parameters of moissanite.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение имеющихся результатов изучения минерального состава углеродистых сланцев дает значительный объем новой информации о генезисе пород. Калиевый полевой шпат достаточно часто встречается в метаморфизованных осадках, например в метаморфизованных глинистых сланцах, песчаниках, мергелистых известняках и доломитах. При метаморфизме низких ступеней, несмотря на то, что обломочные зерна полевых шпатов разлагаются, все же новообразования КПШ (адуляра) происходят преимущественно по существующим обломочным зернам КПШ [7]. Исходя из вышесказанного, можно с высокой долей вероятности предположить, что КПШ попадал в исходные осадки сланцев в виде терригенной примеси. Этот факт свидетельствует о поступлении в протолит терригенного материала кислого состава с низкой степенью выветривания. Рутит в виде мельчайших зерен очень широко распространен во многих (главным образом в глубинных) магматических породах, кроме того, рутит является обычным терригенно-обломочным минералом. Образование рутила первого типа (правильной удлиненно-призматической формы) происходило, вероятнее всего, в ходе регионального метаморфизма (эпидот-амфиболитовой фации) пород оскольской серии, при изменении других титанистых минералов. Окатанная форма зерен рутила второго типа предполагает его аллотигенную природу. Гранаты, обнаруженные при изучении тяжелой фракции (рис. 3в, г) характеризуются преобладанием алмандинового компонента, со значительным количеством грос-

сулярового и подчиненным количеством спессартинового (табл. 2). Их состав резко отличается от такового гранатов, диагностированных в шлифах (более 90 % Sps, табл. 1). Учитывая принцип фазового соответствия в минеральных системах при метаморфизме, все гранаты должны быть сходного состава, и вышеупомянутый факт требует объяснения. В ряде работ [8–10] показано, что гранаты преимущественно спессартинового состава появляются на биотитовой и добиотитовой субфациях зеленосланцевой фации метаморфизма, в то время как при более высоких температурах метаморфизма, соответствующих верхам зеленосланцевой фации (гранатовая субфация) появляется алмадин, содержащий значительную примесь спессартинового и гроссулярового миналов [7]. Присутствие в сланцах Рыльской структуры значительного количества спессартина согласуется с данными работы [11] о низкой степени метаморфизма пород Рыльской структуры. Гранаты, выделенные из тяжелой фракции, являются более высокотемпературными и могли попасть в исходный осадок в виде терригенной примеси при разрушении подстилающих пород. Интенсивно окатанные зерна цирконов, ставролита свидетельствуют о длительном нахождении этих минералов в экзогенных условиях, в том числе в породах, претерпевших несколько циклов выветривания и седиментации. Промежуточными коллекторами могли выступать метаосадочные породы михайловской серии и обоянского комплекса КМА, стратиграфически предшествующие образованиям оскольской серии. Оливины, имеющие состав Fo 80 – Fo 50, чаще всего встречаются в магматических породах основного состава, в то время как в некарбонатных метаморфических породах образуется фаялит [5]. Исходя из магнезиального состава оливина углеродистых сланцев, можно предположить его аллотигенное происхождение. Оливин окисляется и разлагается в гипергенных условиях в кислородной атмосфере. Однако в палеопротерозое атмосфера была бескислородная, что позволяло оливину мигрировать и накапливаться в осадках. К тому же углеродистые сланцы характеризуются резко восстановительной бескислородной обстановкой накопления. Эти факторы позволили оливину оставаться устойчивым. Вероятным источником оливина могли являться магматические породы ультрабазит-базитового состава, широко развитые в составе михайловской серии КМА. Барит является типичным минералом гидротермальных месторождений. В качестве спутника он устанавливается

во многих месторождениях сульфидных, марганцевых, железных и других руд. Его нахождение в сланцах Рыльской структуры связано, вероятнее всего, с наложенной сульфидной минерализацией. Природный муассанит встречается достаточно редко. Установлены четыре типичных парегенезиса муассанита [12]: метеоритный, зафиксированный в железных метеоритах (алмаз, графит, троилит); мантийный, свойственный кимберлитам, гипербазитам (алмаз, пироп, хромдиопсид, магниезильный оливин, пикроильменит); коровый, присущий эффузивным породам (графит, когениит, троилит, пирротин); гидротермальный, характерный для гидротермальных месторождений золота, зон дробления, сульфидных месторождений (самородные Au, Ag, Fe, Cu, Zn, пирит, халькопирит, галенит, тетрадимит). Присутствие муассанита в сланцах Рыльской структуры обусловлено, вероятнее всего, его образованием в ходе гидротермальных процессов, сопровождавших развитие сульфидной минерализации в обогащенных углеродом породах. Установление происхождения муассанита требует проведения более детальных минералогических исследований, прежде всего наиболее интенсивно сульфидизированных разновидностей сланцев, с целью изучения его парагенезиса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сульфидизированных углеродистых сланцах оскольской серии в пределах Рыльской структуры

установлен и впервые охарактеризован с помощью современных методов исследования вещества комплекс породообразующих и акцессорных минералов – флогопит, калиевый полевой шпат, апатит, пирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, магнетит, рутил, гранаты, циркон, ставролит, оливин, барит, муассанит, синхизит, бастнезит. При этом муассанит, синхизит, бастнезит описаны для сланцев Рыльской структуры впервые, а для рутила, гранатов, ставролитов и цирконов по их физическим свойствам и химическому составу впервые выделено несколько разновидностей этих минералов. В основной ткани сланцев диагностированы тонкозернистые флогопит и калиевый полевой шпат. Установленные особенности минерального состава сланцев позволяют охарактеризовать некоторые особенности природы протолита и условий седиментации изучаемых пород. Столь широкий спектр акцессорных минералов, особенно аллотигенных, характерных для пород как кислого, так и основного-ультраосновного состава, а также присутствие в ткани породы помимо кварца калиевых полевых шпатов, указывает на наличие пород различного петрографического состава в областях сноса с низкой степенью выветривания, что согласуется с полученными ранее результатами геохимических исследований углеродистых сланцев [13]. Вместе с тем требуется проведение дальнейших исследований по изучению генезиса редких акцессорных минералов и уточнению параметров метаморфизма пород Рыльской рифтогенной структуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышов Н.М., Ненахов В.М., Лебедев И.П., Стрик Ю.Н. 1997. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембри. *Геотектоника*. 3: 21–30.
2. Розен О.М., Щипанский А.А., Туркина О.М. 2008. *Геодинамика ранней земли: эволюция и устойчивость геологических процессов (офиолиты, островные дуги, кратоны, осадочные бассейны)*. М., Научный мир: 184 с.
3. Абрамов В.В., Кузнецов В.С., Скулков Н.А. 2014. Новые данные по геохимии золота в углеродистых сланцах оскольской серии Рыльской структуры Курской магнитной аномалии. *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 2: 49–55.
4. Whitney D.L., Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 95(1): 185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371
5. Дир У.А., Хауи Р.А., Зусман Дж. 1965. *Породообразующие минералы*. М., Мир: 371 с.
6. Попов Г.М., Шафрановский И.И. 1972. *Кристаллография. Учебник для студентов геологических специальностей высших учебных заведений*. М., Высшая Школа: 352 с.
7. Кориковский С.П. 1979. *Фаши метаморфизма метапелитов*. М., Наука: 263 с.
8. Kramm U. 1973. Chloritoid stability in manganese rich low-grade metamorphic rocks, Venn-Stavelot Massif, Ardennes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 41(2): 179–196. doi: 10.1007/BF00375042
9. Hutton C.O. 1962. Composition of some garnets in low grade schists. *Transactions of the Royal Society of New Zealand: Geology*. 1(8): 129–133.
10. Brown E.H. 1969. Some zoned garnets from the greenschist facies. *The American mineralogist*. 54(11–12): 1662–1677.
11. Савко К.А., Самсонов А.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Кориш Е.Х., Базиков Н.С. 2017. Палеопротерозойский метаморфизм в восточной Сарматии: P-T параметры, возраст, причины и следствия. В кн.: *Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембри и фанерозое. Материалы V Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия, Санкт-Петербург, ИГД РАН*. СПб., Springer: 156–158.
12. Lyakhovich V.V. 1980. Origin of accessory moissanite. *International Geology Review*. 22(8): 961–970. doi: 10.1080/00206818209466961

13. Абрамов В.В., Кузнецов В.С. 2014. Геохимические особенности и состав протолита углеродистых сланцев Рылской структуры (воронежский кристаллический массив). *Вестник ВГУ. Серия: Геология*. 4: 21–28.

## REFERENCES

- Chernyshov N.M., Nenakhov V.M., Lebedev I.P., Strik Yu.N. 1997. A model of geodynamic history of the Voronezh Massif in the early precambrian. *Geotectonics*. 31(3): 186–194.
- Rozen O.M., Shchipsanskiy A.A., Turkina O.M. 2008. *Geodinamika ranney zemli: evolyutsiya i ustoychivost' geologicheskikh protsessov (ofiolity, ostrovnye dugi, kratony, osadochnye basseyny)*. [Geodynamics of the early earth: evolution and stability of geological processes (ophiolites, island arcs, cratons, sedimentary basins)]. Moscow, Nauchnyy mir: 184 p. (In Russian).
- Abramov V.V., Kuznetsov V.S., Skulkov N.A. 2014. [New data on geochemistry of gold in oskolskaya series carbonaceous shales from Kursk magnetic anomaly Rylskaya structure]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 2: 49–55. (In Russian).
- Whitney D.L., Evans B.W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 95(1): 185–187. doi: 10.2138/am.2010.3371
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1965. *Porodoobrazuyushchie mineraly*. [Rock-forming minerals]. Moscow, Mir: 371 p. (In Russian).
- Popov G.M., Shafranovskiy I.I. 1972. *Kristallografiya. Uchebnik dlya studentov geologicheskikh spetsial'nostey vysshikh uchebnykh zavedeniy*. [Crystallography. A textbook for students of geological specialties of higher educational institutions]. Moscow, Vysshaya shkola: 352 p. (In Russian).
- Korikovskiy S.P. 1979. *Fatsii metamorfizma metapelitov*. [Metamorphic facies of metapelites]. Moscow, Nauka: 263 p. (In Russian).
- Kramm U. 1973. Chloritoid stability in manganese rich low-grade metamorphic rocks, Venn-Stavelot Massif, Ardennes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 41(2): 179–196. doi: 10.1007/BF00375042
- Hutton C.O. 1962. Composition of some garnets in low grade schists. *Transactions of the Royal Society of New Zealand: Geology*. 1(8): 129–133.
- Brown E.H. 1969. Some zoned garnets from the greenschist facies. *The American mineralogist*. 54(11–12): 1662–1677.
- Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Korish E.Kh., Bazikov N.S. 2017. [Paleoproterozoic metamorphism in eastern Sarmatia: P-T parameters, age, causes and consequences]. In: *Geodinamicheskie obstanovki i termodinamicheskie usloviya regional'nogo metamorfizma v dokembrii i fanerozoie. Materialy V Rossiyskoy konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya, Sankt-Peterburg, IGGD RAN*. [Geodynamic settings and thermodynamic conditions of regional metamorphism in the Precambrian and Phanerozoic. Proceedings of the V Russian Conference on Problems of Precambrian Geology and Geodynamics (St Petersburg, Russia, 24–26 October 2017)]. St Petersburg, Springer: 156–158. (In Russian).
- Lyakhovich V.V. 1980. Origin of accessory moissanite. *International Geology Review*. 22(8): 961–970. doi: 10.1080/00206818209466961
- Abramov V.V., Kuznetsov V.S. 2014. [Chemical features and composition of protolith carbonaceous shales from Rylskaya structure (Voronezh crystalline massif)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 4: 21–28. (In Russian).

Поступила 21.12.2020