

УДК 536.71

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧАРОИТА И ТИНАКСИТА ПО ДАННЫМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕАКЦИЙ РАЗЛОЖЕНИЯ

© Т.С. Соколова¹, Б.С. Данилов², П.И. Дорогокупец³¹⁻³Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

Геологические исследования, направленные на установление механизма и условий образования чароитовых пород, до сих пор не дают однозначных результатов, поэтому для решения этих вопросов необходимо применять другие подходы. Одним из таких альтернативных подходов является термодинамическое моделирование, с помощью которого можно рассчитать химическое равновесие и определить компонентный состав природной системы при заданных P - T -параметрах. Целью настоящего исследования являлось физико-химическое моделирование продуктов реакций высокотемпературного разложения чароита и тинаксита. Моделирование реакций проводилось при температурах 700–900°C и давлении 1 кбар с помощью ПК «Селектор». Расчеты выполнены на основе многокомпонентной модельной системы (K, Na, Ca, Fe, Al, Si, Ti, Mn, Sr, Ba, P, F, Cl, C, O, H), отвечающей сложному химическому составу минералов. Термодинамический расчет показал, что на всем температурном интервале (700–900°C) основными и устойчивыми продуктами реакций разложения чароита и тинаксита являются кварц и волластонит. Массовая доля волластонита после разложения чароита может составлять более 40%. Количество других минеральных фаз (эгирин, микроклин, родонит и пр.) незначительно. Практически аналогичные соотношения наблюдаются и при разложении тинаксита. Полученные результаты согласуются с известными экспериментами по отжигу чароита и его взаимодействию с вмещающими породами, являются новыми данными для тинаксита как для одного из основных сосуществующих минералов чароитового парагенезиса и в своей перспективе способствуют решению вопроса генезиса чароитовой минерализации.

Ключевые слова: чароит; тинаксит; волластонит; физико-химическое моделирование; высокая температура.

GENETIC FEATURES OF CHAROITE AND TINAKSITE ACCORDING TO THE DATA OF HIGH TEMPERATURE DECOMPOSITION REACTION THERMODYNAMIC MODELING

T.S. Sokolova, B.S. Danilov, P.I. Dorogokupets

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Geological researches aimed at establishing the formation mechanism and conditions of charoite rocks still have not yielded consistent results, therefore other approaches should be applied to address these issues. Thermodynamic modeling is one of such alternative approaches. It enables to calculate chemical equilibrium and determine the component structure of the natural system under given P - T -parameters. The purpose of the present study is physico-chemical modeling of reaction products of high-temperature decomposition of charoite and tinaksite. Reaction modeling has been performed at temperatures of 700–900°C and pressures of 1 kbar using a “Selector” PC. The calculations are made based on a multicomponent model system (K, Na, Ca, Fe, Al, Si, Ti, Mn, Sr, Ba, P, F, Cl, C, O, H) corresponding to the complex chemical composition of the minerals. Thermodynamic calculation shows that quartz and wollastonite are main and stable products of charoite and tinaksite decomposition reactions in the whole temperature range (700–900°C). After charoite decomposition the mass fraction of wollastonite may

¹Соколова Татьяна Сергеевна, научный сотрудник лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза, тел.: (3952) 511680, e-mail: sokolovats@crust.irk.ru

Sokolova Tatiana, Researcher of the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, tel.: (3952) 511680, e-mail: sokolovats@crust.irk.ru

²Данилов Борис Станиславович, научный сотрудник лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза, тел.: (3952) 511680, e-mail: boris@crust.irk.ru

Danilov Boris, Researcher of the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, tel.: (3952) 511680, e-mail: boris@crust.irk.ru

³Дорогокупец Петр Иванович, заведующий лабораторией петрологии, геохимии и рудогенеза, тел.: (3952) 511680, e-mail: dor@crust.irk.ru

Dorogokupets Peter, Head of the Laboratory of Petrology, Geochemistry and Ore Genesis, tel.: (3952) 511680, e-mail: dor@crust.irk.ru

be more than 40%. The amount of other mineral phases (aegirin, microcline, rhodonite, etc.) is insignificant. Similar ratios are observed under the decomposition of tinaksite. The results obtained are consistent with the known experiments on thermal annealing of charoite and its interaction with host rocks. They also are new data for the tinaksite as one of the major coexisting mineral of charoite paragenesis and contribute in solving the problem of charoite mineralization genesis.

Keywords: charoite; tinaksite; wollastonite; physico-chemical modeling; high temperature.

Введение

Чароит – уникальный минерал, обнаруженный на единственном в мире месторождении Сиреневый камень, расположенном на Мурунском массиве в северо-западной части Алданского щита на границе Иркутской области и Республики Саха (Якутия). Месторождение было открыто в 1960 г. Ю.А. Алексеевым, Ю.Г. Роговым и В.П. Роговой и включает в себя как коренные выходы чароита и чароитсодержащих пород, так и элювиальные развалы чароитовых глыб. Минерал имеет сложный химический состав с общей формулой $(K, Sr, Ba, Mn)_{15-16}(Ca, Na)_{32}[(Si_{70}(O, OH)_{180}) (OH, F)_4 \cdot nH_2O]$ и чрезвычайно сложную структуру, которая была установлена в работе [13]. Чароит относится к группе щелочных кальциевых силикатов с трубчатými Si-O-радикалами и обладает исключительным кристаллохимическим своеобразием подобно другим минералам этой группы, встречающимся в районе Мурунской чароитовой минерализации (канасит, тинаксит, франкаменит, мизерит и др.). Главными химическими компонентами чароита являются K, Na, Ca, Si и H₂O, второстепенными – Ba, Sr и Mn, в следовых количествах отмечается присутствие Fe, Mg, Al, Ti, Zr и Th [3]. Исследования, посвященные тематике образования чароита, описанию механизма и условий этого процесса, ведутся в России с 1970-х гг. [1, 3, 14 и др.], однако единого мнения о генезисе чароитовых пород не сложилось до сих пор. Ряд исследователей придерживается метасоматической гипотезы происхождения чароита в экзоконтактовом ореоле Мало-мурунского щелочного массива под воздействием флюидов, богатых Sr, Ba, Mn, F, CO₂ и щелочами [1]. Другие исследователи высказывают магматическую гипотезу формирования чароита вслед-

ствие фракционирования щелочного расплава [14] либо рассматривают его генезис как комбинацию магматических и метасоматических процессов [2].

Открытие чароита позволило обнаружить и другие новые уникальные минералы. Одним из таких минералов является тинаксит, который по распространенности не уступает чароиту, хоть и не образует крупных скоплений [3]. Тинаксит присутствует практически на всех участках месторождения чароита, в чароитовых породах и в метасоматитах вокруг них. Минерал имеет постоянный химический состав и отвечает общей формуле $K_2Na(Ca, Mn)_2TiSi_7O_{19}(OH)$. Главные химические компоненты тинаксита – K, Na, Ca и Si – аналогичны минералам группы щелочных кальциевых силикатов, но с минимальным количеством H₂O и большим содержанием TiO₂ до 10 вес. %. В малых количествах могут присутствовать Fe, Mn, Mg и Sr.

Современное состояние проблемы

Экспериментальных работ по моделированию образования чароита практически нет. Основные причины этому – неясный генезис чароитовой минерализации, сложный химический состав и структура чароитовых пород. В чароите наблюдается тесное срастание и прорастание минералов-вкрапленников (кварц, микроклин, эгирин, тинаксит, франкаменит, арфведсонит, апофиллит и др.), которые придают ему особые декоративные свойства [3]. Проведенные в 1980-е гг. термобарогеохимические исследования показали, что чароитовые породы кристаллизуются из остаточного расплава-флюида при температурах 400–750°C. Современные исследования включений в чароитовых породах, выполненные А.А. Боровиковым (ИГМ СО РАН), свидетельствуют в пользу

кристаллизации чароититов из расплава флюида при $T \sim 800^\circ\text{C}$. Однако эти результаты требуют подтверждения путем вовлечения в систему наиболее типичных морфологических разновидностей чароита и чароитовых руд.

Термогравиметрическим анализом была определена температура реакции дегидратации чароита [8, 12]. Установлено, что в интервалах 210–480 и 940–960°C чароит теряет воду, при этом ее массовая доля может составлять до 5%. Столь широкий температурный интервал реакции объясняется многокомпонентным химическим составом исследуемой системы (стехиометрический фактор $f \sim 20$) [8] и, согласно К.А. Лазебник с соавторами (1988), присутствием в составе чароита трех типов воды: молекулярной с сильными и слабыми связями и слабосвязанных гидроксильных групп [3].

Недавняя серия экспериментов, направленных на изучение особенностей взаимодействия чароита с вмещающими породами (лампрофир) при температурах 500–900°C с добавлением 10%-го раствора щелочей, показала, что в температурном интервале 700–900°C происходит перекристаллизация чароита с образованием волластонита и реакционной полиминеральной зоны [4, 6]. Микрондовым анализом сложный химический состав полиминеральной зоны определить не удалось. Проведенные исследования [4] также не подтвердили образование силикатного расплава, который был диагностирован в изотермоизобарических условиях при температуре 550°C и давлении 1 кбар в работе [2]. Образование волластонита при отжиге чароита было установлено и в работе [10]. В результате распада структуры чароита (при $T = 970^\circ\text{C}$) методом высокотемпературного рентгеновского анализа при 1000°C была зафиксирована единственная кристаллическая фаза – волластонит. Новая серия экспериментов, выполненная В.Я. Медведевым (ИЗК СО РАН), обнаруживает образование волластонита при нагревании чароита от темпера-

туры 850°C (в экспериментах использовался порошок, р/ф анализ: чароит с примесью микроклина). С ростом температуры наблюдается последовательное увеличение содержания фазы волластонита (при $T = 850^\circ\text{C}$: чароит – 90%, волластонит – 10%; при $T = 900^\circ\text{C}$: чароит – 80%, волластонит – 20%).

Физико-химических данных для тинаксита найти не удалось. В свою очередь, согласно Н.В. Бондаренко (2009), тинаксит может являться достаточно информативным источником для описания процесса чароитообразования, поскольку вариация состава минеральных фаз чароитового парагенезиса «тинаксит – токкоит» может отражать эволюцию состава рудообразующего флюида при его генезисе. Таким образом, термодинамическое моделирование реакции разложения тинаксита позволит установить возможный парагенезис из его состава при заданных условиях. Однако P - T -параметры поля устойчивости тинаксита необходимо определять экспериментально.

Термодинамическое моделирование

Метод современного термодинамического (или физико-химического) моделирования решает широкий круг геологических задач на основе известных программных комплексов. В частности, термодинамическое моделирование позволяет рассчитать химическое равновесие и определить компонентный состав природной системы при заданных P - T -параметрах [5]. Таким образом, в рамках решаемой задачи с помощью ПК «Селектор» можно определить сосуществующие с волластонитом минеральные фазы, которые образуются при отжиге чароита, и возможный парагенезис минеральных фаз из состава тинаксита при его высокотемпературном разложении. Для этого нами были рассчитаны две модели реакций разложения чароита и тинаксита в интервале температур от 700 до 900°C и давлении 1 кбар.

Расчеты для чароита были выполнены на основе 16-компонентной мо-

дельной системы (K, Na, Ca, Fe, Al, Si, Ti, Mn, Sr, Ba, P, F, Cl, S, O, H), состоящей из 116 потенциально возможных фаз, включая твердые минералы, газ и водный раствор. Термодинамика для минералов и простых веществ моделировалась из базы данных [9] и справочника [15]. Газовая фаза основана на данных из работы [11]. Фаза водного раствора составлена по данным электронной базы SUPCRT98. В качестве исходных компонентов в модели принимался химический состав чароита из табл. 1. При моделировании к составу чароита добавлялось избыточное количество H_2O (55,51 моль), что обеспечивало постоянное присутствие жидкой фазы, а также небольшое количество CO_2 (0,01 моль), что создавало условия для возможности формирования карбонатов.

Расчеты показали (табл. 2), что из состава чароита при температурах 700–900°C и давлении 1 кбар образуется следующий парагенезис (рис. 1): кварц (~57 мол. %), волластонит (~40 мол. %), родонит (менее 0,6 мол. %), небольшое количество эгирина (до 0,2 мол. %) и микроклина (до 0,1 мол. %), в незначительных количествах могут присутствовать оксид марганца, карбонат и гидроксид бария, $BaTiO_3$ и $SrSiO_3$ (в сумме всего до 3 мол. %).

В расчетах для тинаксита была использована 9-компонентная модельная система (K, Na, Ca, Fe, Si, Ti, Mn, O, H), состоящая из 89 потенциально возможных фаз. В качестве исходных компонентов в модели принимался химический состав тинаксита из табл. 3. При моделировании к составу тинаксита также добавлялись H_2O и CO_2 .

Расчеты показали (табл. 4) соотношения, практически аналогичные полученным при разложении чароита.

Таким образом, из состава тинаксита в температурном интервале 700–900°C и при давлении 1 кбар может образовываться следующий парагенезис (рис. 2): кварц (~59 мол. %), волластонит (~40 мол. %), родонит (менее 0,5 мол. %), небольшое количество эгирина, микроклина и сфена (в сумме всего до 0,08 мол. %).

Результаты и выводы

Методом термодинамического моделирования были определены продукты высокотемпературных реакций разложения чароита и тинаксита. Установлено, что на всем температурном интервале (700–900°C) при давлении 1 кбар основными и устойчивыми продуктами реакций разложения чароита и тинаксита являются кварц и волласто-

Таблица 1

Химический состав чароита, вес. %

Компонент	1	2	3
SiO_2	58,5	57,31	58,94
TiO_2	0,02	0,02	0,14
Al_2O_3	0,03	0,01	–
Fe_2O_3	0,14	–	–
FeO	–	0,02	0,01
MnO	0,10	0,35	0,23
CaO	21,9	21,01	21,12
SrO	–	1,43	0,64
BaO	2,53	0,65	3,22
Na_2O	2,26	2,29	2,62
K_2O	10,01	8,35	9,48
P_2O_5	0,03	–	–
F	0,33	0,53	0,49
Cl_2	0,02	–	–

Примечание. 1 – состав чароита из работы [12], 2 – из работы [13], 3 – средний состав по пяти анализам из работы [7].

Таблица 2

Продукты высокотемпературного разложения чароита, мол. кол-во

Минеральная фаза	Температура, °С								
	700	800	900	700	800	900	700	800	900
	1			2			3		
Кварц (SiO ₂)	0,4942	0,5476	0,5550	0,4837	0,5343	0,5408	0,5122	0,564	0,5715
Волластонит (CaSiO ₃)	0,3905	0,3905	0,3905	0,3746	0,3746	0,3746	0,3766	0,3766	0,3766
Эгирин (NaFeSi ₂ O ₆)	0,0017	0,0017	0,0017	0,0003	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001
Микроклин (KAlSi ₃ O ₈)	0,0006	0,0006	0,0006	0,0002	0,0002	0,0002	–	–	–
Родонит (MnSiO ₃)	–	0,0014	0,0014	–	0,0049	0,0049	–	0,0032	0,0032
Биксбит (Mn ₂ O ₃)	0,0007	–	–	0,0025	–	–	0,0016	–	–
BaCO ₃	0,0008	–	–	0,0040	–	–	0,0008	–	–
Ba(OH) ₂	0,0154	0,0162	0,0162	–	0,0040	0,0040	0,0184	0,0193	0,0193
BaTiO ₃	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0017	0,0017	0,0017
SrSiO ₃	–	–	–	0,0138	0,0138	0,0138	0,0062	0,0062	0,0062

Примечание. Колонки 1, 2, 3 аналогичны колонкам табл. 1.

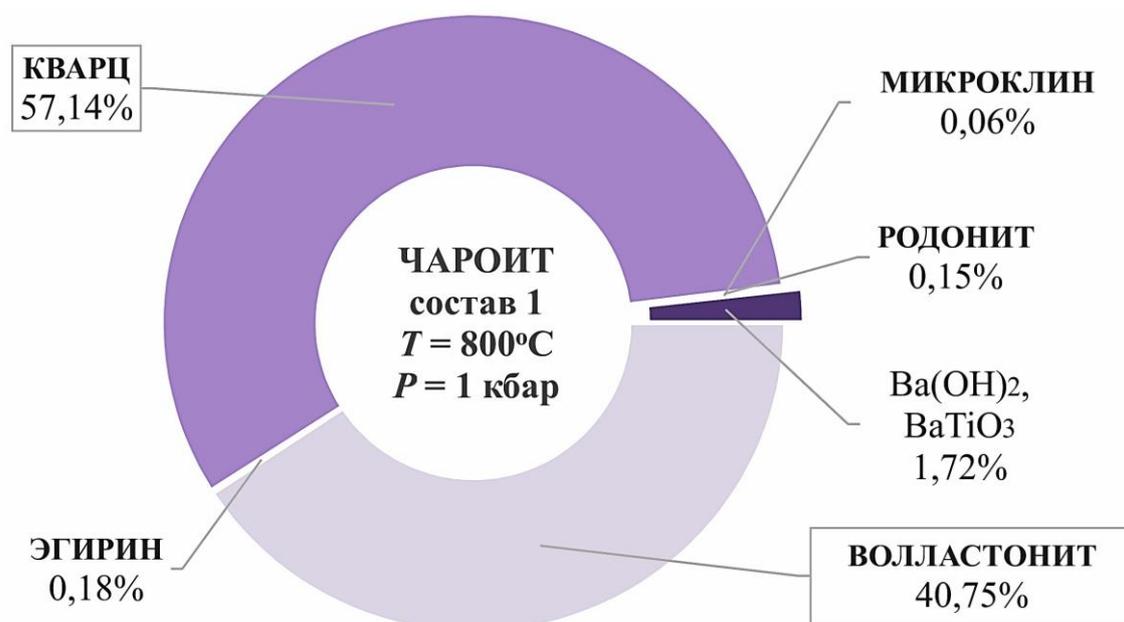


Рис. 1. Продукты высокотемпературного разложения чароита, мол. %.

Результаты получены при физико-химическом моделировании с помощью ПК «Селектор», условия моделирования приведены на рисунке. Химический состав чароита приведен в табл. 1 (колонка 1)

нит. Содержание волластонита при разложении чароита может составлять до 40 мол. %. Количество других минеральных фаз (эгирин, микроклин, родонит, оксид марганца, карбонат и гидроксид бария, BaTiO₃ и SrSiO₃) незначительно. В работе [6] было показано,

что при взаимодействии чароита с ксенолитами лампрофиров в реакционной зоне помимо волластонита можно обнаружить следы микроклина и обособление щелочных фаз различного состава. Таким образом, полученные результаты согласуются с известными эксперимен-

Таблица 3

Химический состав тинаксита, вес. %

Компонент	1
SiO ₂	55,44
TiO ₂	9,63
FeO	1,25
MnO	0,67
MgO	0,23
CaO	13,31
Na ₂ O	3,85
K ₂ O	12,30

Примечание. 1 – средний состав тинаксита по пяти анализам из работы [7].

Таблица 4

Продукты высокотемпературного разложения тинаксита, мол. кол-во

Минеральная фаза	Температура, °C		
	700	800	900
Кварц (SiO ₂)	0,4974	0,5461	0,5545
Волластонит (CaSiO ₃)	0,3744	0,3744	0,3744
Эгирин (NaFeSi ₂ O ₆)	0,0003	0,0003	0,0003
Микроклин (KAlSi ₃ O ₈)	0,0002	0,0002	0,0002
Родонит (MnSiO ₃)	–	0,0040	0,0039
Сфен (CaTiSiO ₅)	0,0002	0,0002	0,0002

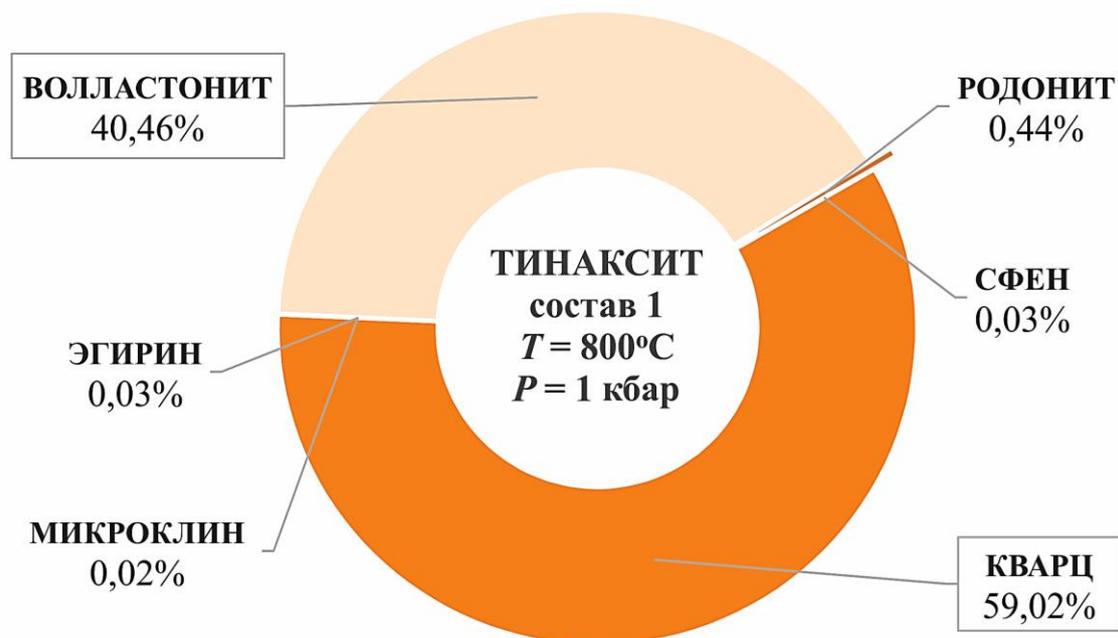


Рис. 2. Продукты высокотемпературного разложения тинаксита, мол. %.

Результаты получены при физико-химическом моделировании с помощью ПК «Селектор», условия моделирования приведены на рисунке. Химический состав тинаксита приведен в табл. 3.

тами по отжигу чароита и его взаимодействию с вмещающими породами, хотя при расчете образование волластонита зафиксировано и при более низкой температуре (от 700°C).

Приведенные результаты для тинаксита являются новыми данными и определяют возможный парагенезис минеральных фаз из его состава при заданных условиях. Рассчитать *P-T*-параметры устойчивости тинаксита пока не представляется возможным, для этого необходимо проводить экспериментальные исследования минерала.

Физико-химическое моделирование показало, что волластонит и кварц в сумме составляют более 97 мол. % от

всей массы чароита и тинаксита при их высокотемпературном разложении. Щелочи преимущественно распределяются в раствор и в небольшом количестве фиксируются в эгирине и микроклине. Титан после разложения тинаксита формирует сфен. Марганец, стронций и барий после разложения чароита формируют собственные фазы, количество которых незначительно и, возможно, было бы еще меньше, если бы модель учитывала более сложные схемы изоморфизма в минералах. Полученные результаты способствуют решению вопроса генезиса чароитовой минерализации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-Байкал № 14-45-04108.

Библиографический список

1. Бирюков В.М., Бердников Н.В. О парагенетической связи чароитовой минерализации с щелочным метасоматозом // Записки ВМО. 1992. Т. 121. № 6. С. 59–76.
2. Воробьев Е.И. Чароит. Новосибирск: Гео, 2008. 140 с.
3. Конев А.А., Воробьев Е.И., Лазебник К.А. Минералогия Мурунского щелочного массива. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1996. 221 с.
4. Марчук М.В., Медведев В.Я. Экспериментальное исследование взаимодействия чароита с вмещающими породами Мурунского массива: тез. докл. VII Сибирской науч.-практ. конф. молодых ученых по наукам о Земле (17–21 нояб. 2014 г.). Новосибирск, 2014. С. 107–108.
5. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.
6. Экспериментальное исследование взаимодействия чароита с лампрофиром: тез. докл. ВЕСЭМПГ / В.Я. Медведев, Л.А. Иванова, М.В. Марчук, З.Ф. Ущাপовская (21–22 апр. 2015 г.). М., 2015. С. 66.
7. Age and origin of charoitite, Malyy Murun massif, Siberia, Russia / Y. Wang, H. He, A.V. Ivanov, R. Zhu, C. Lo // International Geology Review. 2014. V. 56. № 8. P. 1007–1019.
8. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice // Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary. 2011. V. 213. P. 180.
9. Holland T.J.B., Powell R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids // Metamorphic Geology. 2011. V. 29. № 3. P. 333–383.
10. Janeczek J. Thermal decomposition of charoite // Mineralogia Polonica. 1991. V. 22. № 2. P. 21–27.
11. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. The properties of gases and liquids. McGrawHill. NY: Book Company, 1977. 592 p.
12. The high-temperature behavior of charoite / E. Matesanz, J. Garcia-Guinea, E. Crespo-Feo, P. Lopez-Arce, F. Valle-Fuentes, V. Correcher // Canadian Mineralogist. 2008. V. 46. P. 1207–1213.
13. The structure of charoite, $(K,Sr,Ba,Mn)_{15-16}(Ca,Na)_{32}[(Si_{70}(O,OH)_{180})](OH,F)_{4.0} \cdot nH_2O$, solved by conventional

and automated electron diffraction / I. Rozhdestvenskaya, E. Mugnaioli, M. Czank, W. Depmeier, U. Kolb, A. Reinholdt, T. Weirich // *Mineralogical Magazine*. 2010. V. 74. № 1. P. 159–177.

14. Vladykin N.V. The Malyi Murun volcano-plutonic complex: an example of differentiated mantle magmas of lamproitic

type. *Geochemistry International*. 2000. V. 38 (S. 1). P. S73–S83.

15. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // *Journal of the national chemical laboratory for industry*. 1988. V. 83. P. 27–118.

References

1. Biriukov V.M., Berdnikov N.V. О парагенетической связи charoitовой минерализации с шхелохным метасоматозом [On paragenetic relationships of charoite mineralization and alkaline metasomatism]. *Zapiski VMO – VMO Notes*, 1992, vol. 121, no. 6, pp. 59–76.

2. Vorob'ev E.I. *Charoit* [Charoite]. Novosibirsk, Geo Publ., 2008, 140 p.

3. Konev A.A., Vorob'ev E.I., Lazebnik K.A. *Mineralogiia Murunskogo shchelochnogo massiva* [Murunsky alkaline massif mineralization]. Novosibirsk: SO RAN, NITs OIGGM Publ., 1996, 221 p.

4. Marchuk M.V., Medvedev V.Ia. Экспериментальное исследование взаимодействия charoита с вмещающими породами Murunского массива [Experimental study of charoite and host rocks relationship in Murun massif]. *Tez. dokl. VII Sibirskoi nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh po naukam o Zemle* [Abstracts of VII Siberian scientific conference of young scientists in Earth sciences]. 17–21 November 2014. Novosibirsk, 2014, pp. 107–108.

5. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimii: teoriia, algoritmy, programmnoe obespechenie, prilozheniia* [Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010, 287p.

6. Medvedev V.Ia., Ivanova L.A., Marchuk M.V., Ushchapovskaia Z.F. Экспериментальное исследование взаимодействия charoита с лампрофиром [Experimental study of charoite and lamprophyre interaction]. *Tez. dokl. Vserossiiskogo ezhegodnogo seminara po eksperimental'noi mineralogii, petrologii i*

geokhimii [Abstracts of the Annual All-Russian Seminar on Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry]. 21–22 April 2015. Moscow, 2015, p. 66.

7. Wang Y., He H., Ivanov A.V., Zhu R., Lo C. Age and origin of charoite, Malyi Murun massif, Siberia, Russia. *International Geology Review*, 2014, vol. 56, no. 8, pp. 1007–1019.

8. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. *Occasional Papers of the Geological Institute of Hungary*, 2011, vol. 213, p. 180.

9. Holland T.J.B., Powell R. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Metamorphic Geology*, 2011, vol. 29, no. 3, pp. 333–383.

10. Janeczek J. Thermal decomposition of charoite. *Mineralogia Polonica*, 1991, vol. 22, no. 2, pp. 21–27.

11. Reid R., Prausnitz J., Sherwood T. *The properties of gases and liquids*. McGrawHill. NY, Book Company, 1977, 592 p.

12. Matesanz E., Garcia-Guinea J., Crespo-Feo E., Lopez-Arce P., Valle-Fuentes F., Correcher V. The high-temperature behavior of charoite. *Canadian Mineralogist*, 2008, vol. 46, pp. 1207–1213.

13. Rozhdestvenskaya I., Mugnaioli E., Czank M., Depmeier W., Kolb U., Reinholdt A., Weirich T. The structure of charoite, $(K,Sr,Ba,Mn)_{15-16}(Ca,Na)_{32}[(Si_{70}(O,OH)_{180})(OH,F)_{4.0} \cdot nH_2O]$, solved by conventional and automated electron diffraction. *Mineralogical Magazine*, 2010, vol. 74, no. 1, pp. 159–177.

14. Vladykin N.V. The Malyi Murun volcano-plutonic complex: an example of differentiated mantle magmas of lamproitic type. *Geochemistry International*, 2000, vol. 38 (s. 1), pp. S73–S83.

15. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds. *Journal of the national chemical laboratory for industry*, 1988, vol. 83, pp. 27–118.

Статья поступила 27.12.2015 г.