

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА Д.С. КОРЖИНСКОГО
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО

**ХII ВСЕРОССИЙСКАЯ
ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
МИНЕРАЛОГИЯ,
ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ»**

**посвященная 95-летию со дня рождения академика
В.А. Жарикова**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



26-27 октября 2021 г.

Черноголовка

УДК 550.4.02

ХII ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ»: Сборник материалов. Черноголовка. 2021 г. 115 с.

В сборнике представлены материалы ХII Всероссийской школы молодых ученых «Экспериментальная минералогия, петрология и геохимия», посвященной 95-летию со дня рождения академика В.А. Жарикова. Школа организована на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского Российской академии наук (г. Черноголовка, 26-27 октября 2021 г.). В сборнике обсуждаются общие и частные проблемы экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии. Уделяется внимание условиям зарождения и эволюции магм, минеральным равновесиям в силикатных и рудных системах, исследованиям гидротермальных и флюидных систем, синтезу макро- и нанокристаллов, технической петрологии и материаловедению.

Все материалы представлены в авторском варианте

ISBN 978-5-6041841-7-2

ISBN 978-5-6041841-7-2



©ИЭМ РАН

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ ШКОЛЫ:

Председатель:

Сафонов О.Г., профессор РАН, д.г.-м.н., директор ИЭМ РАН

Заместитель председателя:

Шаповалов Ю.Б., член-корреспондент РАН, д.г.-м.н., научный руководитель ИЭМ РАН

Сопредседатели:

Ковальская Т.Н., к.г.-м.н., ученый секретарь ИЭМ РАН

Воронин М.В., к.х.н., зам. директора ИЭМ РАН

Программный комитет:

Воронин М.В., к.х.н., зам. директора ИЭМ РАН

Бутвина В.Г., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Костюк А.В., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Ханин Д.А., к.г.-м.н., ИЭМ РАН

Ученые секретари:

Варламов Д.А., ИЭМ РАН

Косова С.А., ИЭМ РАН

Ханина Е.В., ИЭМ РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

МАТЕРИАЛЫ ЛЕКЦИИ	10
КОНЦЕНТРАЦИЯ УЛЬТРАРАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОБРАЗОВАНИЕ ИМИ СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ SC И GA)	
Варламов Д.А.	11
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО ВЕЩЕСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ АНАЛИЗА	
Вирюс А.А.	15
ЯЧЕЙКА С АЛМАЗНЫМИ НАКОВАЛЬНЯМИ - ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ	
<u>Спивак А.В.</u> , Черткова Н.В., Литвин Ю.А., Захарченко Е.С.	18
МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ	21
ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ АЗОТА В ГАЗАХ ТЕРМОМИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ЗАКАВКАЗЬЯ	
<u>Айдаркожина А.С.</u> , Лаврушин В.Ю., Меликсетян Х.Б.	22
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА С ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ МАТРИЦЕЙ	
<u>Антипов М.С.</u> , Бажин П.М., Константинов А.С., Чижиков А.П., Прокопец А.Д., Столин П.А.	25
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ В СИСТЕМЕ $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-FeO-}$ $\text{MgO-H}_2\text{O}$ ПРИ 6ГПА	
<u>Бурова А.И.</u> , Черткова Н.В., Спивак А.В., Бобров А.В., Захарченко Е.С.	27
АМФИБОЛЫ В БАЗАЛЬТОИДАХ МОРОЗОВСКОЙ СВИТЫ (RF ₃ MR) СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПАЙ-ХОЯ	
Вовчина Т.А.	30
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ РЕДКИХ К- ТИТАНАТОВ В СИСТЕМАХ ШПИНЕЛЬ-РУТИЛИ/ИЛЬМЕНИТ- ФЛЮИД ПРИ ПАРАМЕТРАХ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ	
<u>Воробей С.С.</u> , Бутвина В.Г., Сафонов О.Г., Ван К.В.	33
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МАЛАХИТА С РАСТВОРАМИ ГИДРООКСИ АММОНИЯ	
<u>Гаврилова Е.О.</u> , Бубликова Т.М., Балицкий В.С., Сеткова Т.В., Некрасов А.Н.	35
ПОСТШПИНЕЛЕВЫЕ ФАЗЫ МАНТИИ ЗЕМЛИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИРОДНЫЕ ДААННЫЕ	
<u>Искрина А.В.</u> , Бобров А.В., Спивак А.В.	38

ПОСТШПИНЕЛЕВЫЕ ФАЗЫ МАНТИИ ЗЕМЛИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИРОДНЫЕ ДАННЫЕ

Искрина А.В.^{1,2}, Бобров А.В.^{1,2,3}, Спивак А.В.²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва), ² ИЭМ РАН (г. Черноголовка), ³ ГЕОХИ РАН (г. Москва),
iskrina@iem.ac.ru

Шпинель – широко распространённый минерал со стехиометрией $A^{2+}B^{3+}_2O_4$ ($A^{2+}_2B^{4+}_2O_4$), изучение которого, благодаря обилию в породах различных геологических формаций, имеет большое значение в науках о Земле. Однако, стабильность фаз со структурой шпинели ограничена, так как уже в условиях переходной зоны происходит фазовый переход и изменение структуры. В качестве постшпинелевых фаз различные исследователи рассматривают соединения со структурами кальциоферрита $CaFe_2O_4$ [1], кальцититаната $CaTi_2O_4$ [2] и марокита $CaMn_2O_4$ [3].

Структура постшпинелевых фаз образована краевыми и угловыми октаэдрами с полыми каналами, параллельными оси b (структура CF) и оси a (структура CT), соответственно, среди которых выделяются структуры с центрированной $Cmcm$ ($Bbmm$) и с примитивными $Pnma$ ($Pm\bar{c}n$), $Pbcm$ ($Pmab$) ячейками.

В природе постшпинелевые фазы могут быть как фазами высокого давления, так и фазами низкого давления. Постшпинелевые фазы высокого давления были обнаружены в качестве включений в алмазах, в метеоритах и в импактных кратерах. Так, в алмазе из района Juína, Бразилия описано многофазное минеральное включение [4], содержащее агрегат карбида железа, богатый Fe периклаз, графит, ромбический $Mg(Cr,Fe)_2O_4$ оксид и ромбический оксид $CaCr_2O_4$. В работе [5] было описано несколько высокобарных фаз: фаза со структурой CF; новая гексагональная алюмосодержащая фаза (NAL); Al, Ti и Fe-содержащий Mg-перовскит; и Ca-перовскит, богатый Ti. В метеоритах и импактитах были обнаружены маохокит ($MgFe_2O_4$), постшпинелевый полиморф магнезиоферрита со структурой CF ($Pnma$) [6]; ксиеит ($FeCr_2O_4$) – природный ромбический полиморф хромита со структурой кальциоферрита [7]; ченмингит ($FeCr_2O_4$) – минерал высокого давления со структурой CF ($Pnma$) [8]; щаунерит $(Fe^{2+})(Fe^{2+}Ti^{4+})O_4$ – высокобарный полиморф ульвошпинели со структурой CT [9].

К природным фазам низкого давления относятся эллинаит ($CaCr_2O_4$) [10], марокит ($CaMn_2O_4$) [11], хармунит ($CaFe_2O_4$) – природный кальциоферрит $CaFe_2O_4$, [12], вернеркраусеит ($CaFe^{3+}_2Mn^{4+}_2O_6$) – минерал «низкого давления» с туннельной структурой ($Pnma$) [13].

В экспериментальных исследованиях определены условия образования, границы фазовых переходов и изменение физических свойств постшпинелевых фаз в различных химических системах в широком диапазоне давлений и температур. Изученные фазы можно подразделить на несколько групп. Основными группами являются следующие: $A^{2+}Fe^{3+}_2O_4$; $A^{2+}Cr^{3+}_2O_4$; $A^{2+}Al^{3+}_2O_4$ и $A^{2+}Mn^{3+}_2O_4$, где позицию A^{2+} занимают различные катионы, например, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Co и др. Также выделяется группа с отличной стехиометрией $A^{2+}_2B^{4+}_2O_4$, где позицию B^{4+} занимает Ti, а в позиции A^{2+} могут располагаться Fe, Zn, Co [14 и ссылки в ней].

Также экспериментально были изучены некоторые системы твердых растворов постшпинелевых фаз: $MgAl_2O_4$ – Mg_2SiO_4 [15]; $MgAl_2O_4$ – $CaAl_2O_4$ [16]; $NaAlSiO_4$ – $MgAl_2O_4$ [17]; Mg_2SiO_4 – $MgCr_2O_4$ [18].

В основном, поля стабильности природных постшпинелевых фаз располагаются в областях высоких давлений. Обнаружение природных фаз с постшпинелевой структурой в метеоритах и включениях в алмазах указывает на то, что эти фазы участвуют в глубинных процессах мантии Земли, а также являются компонентами других планет Солнечной системы. Таким образом, изучение

условий образования и полей стабильности соединений с постшпинелевой структурой, поможет оценить влияние обогащения мантийных глубин коровыми элементами в процессе субдукции на гетерогенность и фазовый состав переходной зоны и нижней мантии Земли.

Работа выполнена за счет грантов РФФИ № 21-17-00147 и РФФИ № 20-35-90095, в рамках научного плана Лаборатории глубинных геосфер МГУ им. М.В. Ломоносова и, частично, в рамках государственного задания АААА-А18-118020590140-7 Института экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского РАН.

Литература:

1. Decker B. F. and Kasper J. S. (1957) The structure of calcium ferrite. *Acta Crystallogr.* **10**, 332–337.
2. Rogge M. P., Caldwell J. H., Ingram D. R., Green C. E., Geselbracht M. J. and Siegrist T. (1998) A New Synthetic Route to Pseudo-Brookite-Type CaTi_2O_4 . *J. Solid State Chem.* **141**, 338–342.
3. Giesber H. G., Pennington W. T. and Kolis J. W. (2001) Redetermination of CaMn_2O_4 . *Acta Crystallogr. Sect. C Cryst. Struct. Commun.* **57**, 329–330.
4. Kaminsky F. V., Wirth R. and Schreiber A. (2015) A microinclusion of lower-mantle rock and other minerals and nitrogen lower-mantle inclusions in a diamond. *Can. Mineral.* **53**, 83–104.
5. Walter M. J., Kohn S. C., Araujo D., Bulanova G. P., Smith C. B., Gaillou E., Wang J., Steele A. and Shirey S. B. (2011) Deep mantle cycling of oceanic crust: Evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science* (80-.). **334**, 54–57.
6. Chen M., Shu J., Xie X. and Tan D. (2019) Maohokite, a post-spinel polymorph of MgFe_2O_4 in shocked gneiss from the Xiuyan crater in China. *Meteorit. Planet. Sci.* **54**, 495–502.
7. Chen M., Shu J. F. and Mao H. K. (2008) Xieite, a new mineral of high-pressure FeCr_2O_4 polymorph. *Chinese Sci. Bull.* **53**, 3341–3345.
8. Ma C., Tschauner O., Beckett J. R., Liu Y., Greenberg E., Prakapenka V. B. (2019) Chenmingite, FeCr_2O_4 in the CaFe_2O_4 -type structure, a shock-induced, high-pressure mineral in the Tissint martian meteorite. *Am. Mineral.* **104** (10), 1521–1525.
9. Ma C. and Prakapenka V. (2018) Tschaunerite, IMA 2017-032a. CNMNC Newsletter No. 46, December 2018, page 1188. *Eur. Mineral.* **30**, 1181–1189.
10. Sharygin V. V. (2019) Orthorhombic CaCr_2O_4 in phosphide-bearing gehlenite-rankinite paralava from Hatrurim basin, Israel: preliminary data. In *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits* pp. 272–276.
11. Gaudefroy C., Jouravsky G. and Permingeat F. (1963) La marokite, CaMn_2O_4 , une nouvelle espèce minérale. *Bull. la Société française Minéralogie Cristallogr.* **86**, 359–367.
12. Galuskina I. O., Vapnik Y., Lazic B., Armbruster T., Murashko M. and Galuskin E. V. (2014) Harmunite CaFe_2O_4 : A new mineral from the Jabel Harmun, West Bank, Palestinian Autonomy, Israel. *Am. Mineral.* **99**, 965–975.
13. Galuskin E. V., Krüger B., Krüger H., Blass G., Widmer R. and Galuskina I. O. (2016) Wernerkrauseite, $\text{CaFe}^{3+}_2\text{Mn}^{4+}\text{O}_6$: the first nonstoichiometric post-spinel mineral, from Bellerberg volcano, Eifel, Germany. *Eur. J. Mineral.* **28**, 485–493.
14. Искрина А.В., Бобров А.В., Спивак А.В. (2022) Постшпинелевые фазы в мантии Земли. *Геохимия*. В печати.
15. Kojitani H., Hisatomi R. and Akaogi M. (2007) High-pressure phase relations and crystal chemistry of calcium ferrite-type solid solutions in the system MgAl_2O_4 - Mg_2SiO_4 . *Am. Mineral.* **92**, 1112–1118.
16. Akaogi M., Hamada Y., Suzuki T., Kobayashi M. and Okada M. (1999) High pressure transitions in the system MgAl_2O_4 - CaAl_2O_4 : A new hexagonal aluminous phase with implication for the lower mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.* **115**, 67–77.
17. Ono A., Akaogi M., Kojitani H., Yamashita K. and Kobayashi M. (2009) High-pressure phase relations and thermodynamic properties of hexagonal aluminous phase and calcium-ferrite phase in the systems NaAlSiO_4 - MgAl_2O_4 and CaAl_2O_4 - MgAl_2O_4 . *Phys. Earth Planet. Inter.* **174**, 39–49.
18. Bindi L., Griffin W.L., Panero W.R., Sirotkina E., Bobrov A., Irifune T. (2018) Synthesis of inverse ringwoodite sheds light on the subduction history of Tibetan ophiolites. *Sci. Rep.* **8**, 5457.