

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 003.067.02 НА БАЗЕ
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения
Российской академии наук**

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26 ноября № 02/5

О присуждении Шацкому Антону Фарисовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора геолого-минералогических наук.

Диссертация «Условия образования карбонатов и механизм миграции карбонатных расплавов в мантии Земли» по специальностям 25.00.05 «минералогия, кристаллография» принята к защите 21 августа 2014 г. (протокол № 02/2) диссертационным советом Д 003.067.02 на базе **Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук** (630090, г. Новосибирск, проспект Академика Колтуха, 3; приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.)

Соискатель **Шацкий Антон Фарисович**, 1976 года рождения.

В 1999 г. окончил магистратуру геолого-геофизического факультета **Новосибирского государственного университета** (Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности «геммология».

В 2002 году окончил очную аспирантуру при **Объединенном институте геологии геофизики и минералогии им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ОИГГМ СО РАН)** по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография».

В 2003 году защитил диссертацию на тему «Экспериментальное исследование кристаллизации алмаза в щелочных карбонатных и карбонат-силикатных системах с углеродом» на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография» (решение диссертационного совета ОИГГМ СО РАН от 6 марта 2003 г. № 02/2, диплом КТ № 100602 от 11 июля 2003 г.).

Соискатель работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Лаборатории экспериментальной минералогии и кристаллогенезиса (№453) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

Официальные оппоненты **Гаранин Виктор Константинович**, доктор геолого-минералогических наук, директор Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН (г. Москва), **Гирнис Андрей Владиславович**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва) и **Перчук Алексей Леонидович**, доктор геолого-минералогических наук, зав. кафедрой Петрологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экспериментальной минералогии Российской академии наук (ИЭМ РАН)** (г. Черноголовка) в своем положительном заключении, подписанном директором, председателем ученого совета ИЭМ РАН, Член-корреспондентом РАН, доктором геолого-минералогических наук **Шапваловым Юрием Борисовичем**, заведующим лабораторией литосферы, доктором геолого-минералогических наук **Сафоновым Олегом Геннадьевичем**, главным научным сотрудником лаборатории термодинамики

минералов, доктором геолого-минералогических наук **Персиковым Эдуардом Сергеевичем** и секретарем ученого совета ИЭМ РАН кандидатом геолого-минералогических наук **Федькиным Валентином Васильевичем**, сделала заключение о том, что диссертация «Условия образования карбонатов и механизм миграции карбонатных расплавов в мантии Земли» соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор **Шацкий Антон Фарисович** достоин присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности **25.00.05 «минералогия, кристаллография»**. В отзыве отмечено, что автореферат и опубликованные статьи отражают содержание работы, а сделанные соискателем выводы следуют из проделанной им работы. Отмеченные в отзыве недостатки свидетельствуют лишь о чрезвычайной сложности решаемых задач и множественностью подходов к интерпретации экспериментальных данных. Замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация А.Ф. Шацкого является законченной научно-исследовательской работой, основанной на большом объеме новых экспериментальных результатов, полученных на высочайшем научно-методическом уровне, и разноплановых аналитических данных, что можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы.

Соискатель имеет **56 работ**, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень **Web of Science** и **ВАК**, в том числе по теме диссертации **38 работ**.

Основные публикации соискателя, в которых изложены материалы диссертации:

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Shatskiy A.**, Borzdov Y.M., Litasov K.D., Kupriyanov I.N., Ohtani E. and Palyanov Y.N. Phase relations in the system $\text{FeCO}_3\text{-CaCO}_3$ at 6 GPa and 900-1700 °C and its relation to the system $\text{CaCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-MgCO}_3$ // *American Mineralogist*. - 2014f. - V. 99. - P. 773-785.

2. Litasov K.D., **Shatskiy A.** and Ohtani E. Melting and subsolidus phase relations in peridotite and eclogite systems with reduced C-O-H fluid at 3-16 GPa //

Earth and Planetary Science Letters. - 2014. - V. 391. - P. 87-99.

3. Zedgenizov D.A., **Shatskiy A.**, Ragozin A.L., Kagi H. and Shatsky V.S. Merwinite in diamond from São Luis, Brazil: A new mineral of the Ca-rich mantle environment // American Mineralogist. - 2014. - V. 99. - P. 547-550.

4. **Shatskiy A.**, Sharygin I.S., Gavryushkin P.N., Litasov K.D., Borzdov Y.M., Shcherbakova A.V., Higo Y., Funakoshi K., Palyanov Y.N. and Ohtani E. The system K_2CO_3 - $MgCO_3$ at 6 GPa and 900-1450 °C // American Mineralogist. - 2013a. - V. 98. - P. 1593-1603.

5. **Shatskiy A.**, Gavryushkin P.N., Sharygin I.S., Litasov K.D., Kupriyanov I.N., Higo Y., Borzdov Y.M., Funakoshi K., Palyanov Y.N. and Ohtani E. Melting and subsolidus phase relations in the system Na_2CO_3 - $MgCO_3$ + H_2O at 6 GPa and the stability of $Na_2Mg(CO_3)_2$ in the upper mantle // American Mineralogist. - 2013b. - V. 98. - P. 2172-2182.

6. **Shatskiy A.**, Sharygin I.S., Litasov K.D., Borzdov Y.M., Palyanov Y.N. and Ohtani E. New experimental data on phase relations for the system Na_2CO_3 - $CaCO_3$ at 6 GPa and 900-1400 °C // American Mineralogist. - 2013c. - V. 98. - P. 2164-2171.

7. Litasov K.D., **Shatskiy A.**, Gavryushkin P.N., Sharygin I.S., Dorogokupets P.I., Dymshits A.M., Ohtani E., Higo Y. and Funakoshi K. *P-V-T* equation of state of siderite to 33 GPa and 1673 K // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2013. - V. 224. - P. 83-87.

8. Litasov K.D., **Shatskiy A.**, Ohtani E. and Yaxley G.M. The solidus of alkaline carbonatite in the deep mantle // Geology. - 2013. - V. 41. - P. 79-82.

9. Литасов К.Д., **Шацкий А.Ф.**, Овчинников С.Г., Попов З.И., Пономарев Д.С. and Отани Е. Фазовые превращения нитридов железа Fe_3N - Fe_4N при давлении до 30 ГПа, исследованные методом *in situ* рентгеновской дифрактометрии // Письма в ЖЭТФ. - 2013. - Т. 98. - С. 907-911.

10. **Shatskiy A.**, Litasov K.D., Borzdov Y.M., Katsura T., Yamazaki D. and Ohtani E. Silicate diffusion in alkali-carbonatite and hydrous melts at 16.5 and 24 GPa: Implication for the melt transport by dissolution-precipitation in the transition zone and uppermost lower mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2013d. - V. 225. - P. 1-11.

11. Шарыгин И.С., Литасов К.Д., **Шацкий А.Ф.**, Головин А.В., Отани Е.

and Похиленко Н.П. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная-восточная при 3–6.5 ГПа и 900–1500 °С // Доклады академии наук. - 2013. - Т. 448. - С. 452-457.

12. Добрецов Н.Л. и **Шацкий А.Ф.** Глубинный цикл углерода и глубинная геодинамика : роль ядра и карбонатитовых расплавов в нижней мантии // Геология и Геофизика. - 2012. - Т. 53. - С. 1455-1475.

13. Yoneda A., Cooray T. and **Shatskiy A.** Single-crystal elasticity of stishovite: New experimental data obtained using high-frequency resonant ultrasound spectroscopy and a Gingham check structure model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2012. - V. 190. - P. 80-86.

14. **Shatskiy A.**, Katsura T., Litasov K.D., Shcherbakova A.V., Borzdov Y.M., Yamazaki D., Yoneda A., Ohtani E. and Ito E. High pressure generation using scaled-up Kawai-cell // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2011a. - V. 189. - P. 92-108.

15. **Shatskiy A.**, Borzdov Y.M., Litasov K.D., Ohtani E., Khokhryakov A.F., Pal'yanov Y.N. and Katsura T. Pressless split-sphere apparatus equipped with scaled-up Kawai-cell for mineralogical studies at 10–20 GPa // American Mineralogist. - 2011b. - V. 96. - P. 541-548.

16. Литасов К.Д., **Шацкий А.Ф.** и Похиленко Н.П. Фазовые соотношения и плавление в системах перидотит–H₂O–CO₂ и эклогит–H₂O–CO₂ при давлениях 3–27 ГПа // Доклады Академии Наук. - 2011. - Т. 437. - С. 669-674.

17. Litasov K.D., **Shatskiy A.**, Ohtani E. and Katsura T. Systematic study of hydrogen incorporation into Fe-free wadsleyite // Physics and Chemistry of Minerals. - 2011. - V. 38. - P. 75-84.

18. **Shatskiy A.**, Borzdov Y.M., Yamazaki D., Litasov K.D., Katsura T. and Palyanov Y.N. Aluminum Nitride Crystal Growth from an Al-N System at 6.0 GPa and 1800 °C // Crystal Growth & Design. - 2010a. - V. 10. - P. 2563-2570.

19. **Shatskiy A.**, Litasov K.D., Terasaki H., Katsura T. and Ohtani E. Performance of semi-sintered ceramics as pressure-transmitting media up to 30 GPa // High Pressure Research. - 2010b. - V. 30. - P. 443-450.

20. **Shatskiy A.**, Yamazaki D., Borzdov Y.M., Matsuzaki T., Litasov K.D., Cooray T., Ferot A., Ito E. and Katsura T. Stishovite single-crystal growth and

application to silicon self-diffusion measurements // American Mineralogist. - 2010c. - V. 95. - P. 135-143.

21. Ito E., Yoshino T., Yamazaki D., **Shatskiy A.**, Shan S., Guo X., Katsura T., Higo Y. and Funakoshi K. High pressure generation and investigation of the spin transition of ferropicrinite ($Mg_{0.83}Fe_{0.17}O$) // Journal of Physics: Conference Series. - 2010. - V. 215. - P. 012099.

22. **Shatskiy A.**, Litasov K.D., Matsuzaki T., Shinoda K., Yamazaki D., Yoneda A., Ito E. and Katsura T. Single crystal growth of wadsleyite // American Mineralogist. - 2009a. - V. 94. - P. 1130-1136.

23. **Shatskiy A.**, Yamazaki D., Morard G., Cooray T., Matsuzaki T., Higo Y., Funakoshi K., Sumiya H., Ito E. and Katsura T. Boron-doped diamond heater and its application to large-volume, high-pressure, and high-temperature experiments // Review of Scientific Instruments. - 2009b. - V. 80. - P. 023907.

24. Litasov K.D., **Shatskiy A.**, Fei Y., Suzuki A., Ohtani E. and Funakoshi K. Pressure-volume-temperature equation of state of tungsten carbide to 32 GPa and 1673 K // Journal of Applied Physics. - 2010. - V. 108. - P. 053513-053513-7.

25. Литасов К.Д., Шарыгин И.С., **Шацкий А.Ф.**, Отани Э. и Похиленко Н.П. Роль хлоридов в образовании и эволюции кимберлитовой магмы по данным экспериментальных исследований // Доклады Академии Наук. - 2010. - Т. 435. - С. 667-672.

26. Matsuzaki T., Hagiya K., **Shatskiy A.**, Katsura T. and Matsui M. Crystal structure of anhydrous phase X, $K_{1.93}(Mg_{2.02}Cr_{0.02})Si_{2.00}O_7$ // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. - 2010. - V. 105. - P. 303-308.

27. Katsura T., **Shatskiy A.**, Manthilake M., Zhai S., Yamazaki D., Matsuzaki T., Yoshino T., Yoneda A., Ito E., Sugita M., Tomioka N., Nozawa A. and Funakoshi K. *P-V-T* relations of wadsleyite determined by in situ X-ray diffraction in a large-volume high-pressure apparatus // Geophysical Research Letters. - 2009. - V. 36. - P. L11307.

28. Katsura T., **Shatskiy A.**, Manthilake M., Zhai S., Fukui H., Yamazaki D., Matsuzaki T., Yoneda A., Ito E. and Kuwata A. Thermal expansion of forsterite at high pressures determined by in situ X-ray diffraction: The adiabatic geotherm in the upper mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2009. - V. 174. - P. 86-

29. Литасов К.Д., **Шацкий А.Ф.**, Катсура Т. и Отани Э. Вхождение водорода в структуру форстерита в системах $Mg_2SiO_4-K_2Mg(CO_3)_2-H_2O$ и $Mg_2SiO_4-H_2O-C$ при давлении 7,5–14,0 ГПа // Геология и геофизика. - 2009. - Т. 50. - С. 1456–1469.

30. Литасов К.Д., **Шацкий А.Ф.**, Катсура Т. и Отани Э. Растворимость воды в форстерите при давлении 8–14 ГПа // Доклады Академии Наук. - 2009. - Т. 425. - С. 522-526.

31. Yoshino T., Matsuzaki T., **Shatskiy A.** and Katsura T. The effect of water on the electrical conductivity of olivine aggregates and its implications for the electrical structure of the upper mantle // Earth and Planetary Science Letters. - 2009. - V. 288. - P. 291-300.

32. Xue X., Kanzaki M. and **Shatskiy A.** Dense hydrous magnesium silicates, phase D, and superhydrous B: New structural constraints from one- and two-dimensional ^{29}Si and 1H NMR // American Mineralogist. - 2008. - V. 93. - P. 1099-1111.

33. Katsura T., Yokoshi S., Kawabe K., **Shatskiy A.**, Okube M., Fukui H., Ito E., Nozawa A. and Funakoshi K.-i. Pressure dependence of electrical conductivity of $(Mg, Fe)SiO_3$ ilmenite // Physics and Chemistry of Minerals. - 2007. - V. 34. - P. 249-255.

34. Litasov K.D., Kagi H., **Shatskiy A.**, Ohtani E., Lakshtanov D.L., Bass J.D. and Ito E. High hydrogen solubility in Al-rich stishovite and water transport in the lower mantle // Earth and Planetary Science Letters. - 2007. - V. 262. - P. 620-634.

35. **Shatskiy A.**, Fukui H., Matsuzaki T., Shinoda K., Yoneda A., Yamazaki D., Ito E. and Katsura T. Growth of large (1 mm) $MgSiO_3$ perovskite single crystals: A thermal gradient method at ultrahigh pressure // American Mineralogist. - 2007. - V. 92. - P. 1744-1749.

36. Zhang B., Katsura T., **Shatskiy A.**, Matsuzaki T. and Wu X. Electrical conductivity of $FeTiO_3$ ilmenite at high temperature and high pressure // Physical Review B. - 2006. - V. 73. - P. 134104.

37. **Шацкий А.Ф.**, Борздов Ю.М., Сокол А.Г. и Пальянов Ю.Н. Особенности фазообразования и кристаллизации алмаза в ультракалиевых

карбонат-силикатных системах с углеродом // Геология и Геофизика. - 2002. - Т. 43. - С. 936-946.

38. Pal'yanov Y.N., Sokol A.G., Borzdov Y.M., Khokhryakov A.F., Shatsky A.F. and Sobolev N.V. The diamond growth from Li_2CO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 and Cs_2CO_3 solvent-catalysts at $P=7$ GPa and $T=1700-1750$ °C // Diamond and Related Materials. - 1999. - V. 8. - P. 1118-1124.

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов, из них 4 с замечаниями. Все отзывы отмечают, что диссертация соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор Шацкий Антон Фарисович достоин присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография». **Имеются следующие замечания:**

Бобров Андрей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры петрологии геологического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (г. Москва). К числу недостатков автореферата, в первую очередь, необходимо отнести не совсем удачное построение литературного обзора по карбонатным фазам в мантии Земли и в экспериментальных исследованиях. Вместо приведения заимствованных из литературы фазовых диаграмм (рис. 1 и 2) автору следовало более конкретно рассмотреть те проблемы в изучении карбонатов, на которые делается акцент в проведенных им экспериментальных исследованиях. В обсуждении экспериментальных исследований. В обсуждении экспериментальных результатов, на мой взгляд, не вполне уместным выглядит представление составов образующихся расплавов в виде громоздких формул, в которых одновременно меняются коэффициенты и индексы для карбонатов и мольные количества для силикатных компонентов. Может быть, для характеристики эволюции состава расплавов более наглядным были бы простые бинарные диаграммы. Наконец, обсуждение большей части результатов проведенных в работе экспериментов в тексте автореферата ограничиваются лишь общими теоретическими рассуждениями, без приложения к конкретным геологическим объектам.

Дорогокупец Петр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией петрологии, геохимии и рудогенеза Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Список публикаций в автореферате начинается с работы Shatskiy et al., 2014f. А где публикации с индексами a, b, c, d, e?

Костровицкий Сергей Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геохимии имени А.П. Вернадского СО РАН (г. Иркутск). Не исключая предложенный автором механизм восхождения карбонатных расплавов через растворение и диффузию силикатных минералов, рецензент считает, что все же основным механизмом движения карбонатов в пределах мантии, проникновения в силикатную толщу литосферной мантии и дальнейшего восхождения к поверхности Земли является их дезинтегрирующее воздействие на силикатные породы благодаря возникающей подъемной силе за счет разницы плотностей и, возможно, поверхностно-активному воздействию (эффекту Ребиндера). Об этом свидетельствует, в первую очередь, обилие мантийного ксеногенного материала (в том числе, крупных ксенолитов) в кимберлитах.

Литвин Юрий Андреевич, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией флюидно-магматических процессов Института экспериментальной минералогии РАН (г. Черноголовка). В автореферате допущены некоторые погрешности. Например, на стр. 1 вслед за Luth, 2006 утверждается, что состав частичных расплавов карбонатизированной мантии определяется фазовыми отношениями в карбонатной части системы. Все же - совместно и силикатными и карбонатными, а составы карбонатитовых расплавов определяются полной карбонат-силикатной жидкостной смесимостью в данных условиях. На стр. 26 говорится о "составе субсолидусного расплава", хотя "субсолидус" - это когда все твердое. Также, не смотря на то, что предлагаемая модель миграции карбонатных расплавов строго диффузионная, видимо, было бы уместно хотя бы качественно оценить роли конвекции в перемещаемом расплаве, а также минералогической неоднородности мантии.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В.К. Гаранин, А.В. Гирнис и А.Л. Перчук** имеют целый ряд публикаций в соответствующей данной диссертационной работе сфере исследования и компетентны в данной отрасли науки, а **ФГБУН Институт экспериментальной минералогии РАН**, широко известен своими достижениями в данной отрасли науки.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны фазовые Т-Х диаграммы состояния для бинарных K_2CO_3 – $CaCO_3$, Na_2CO_3 – $CaCO_3$, K_2CO_3 – $MgCO_3$, Na_2CO_3 – $MgCO_3$, K_2CO_3 – $FeCO_3$, Na_2CO_3 – $FeCO_3$, $MgCO_3$ – $CaCO_3$, $MgCO_3$ – $FeCO_3$ и тройных Ca_2CO_3 – $MgCO_3$ – $FeCO_3$, K_2CO_3 – $MgCO_3$ – $FeCO_3$, Na_2CO_3 – $MgCO_3$ – $FeCO_3$, K_2CO_3 – $MgCO_3$ – $CaCO_3$, Na_2CO_3 – $MgCO_3$ – $CaCO_3$ карбонатных систем при 6 ГПа в интервале температур 900–1700 °С. **Установлены** основные ассоциации карбонатных фаз, контролирующих плавление. **Выявлено** восемь новых соединений $K_6Ca_2(CO_3)_5$, $K_2Ca_5(CO_3)_4$, $Na_4Ca(CO_3)_3$, $Na_2Ca_3(CO_3)_4$, $Na_2Ca_4(CO_3)_5$, $K_2Ca_{0.5}Mg_{0.5}(CO_3)_2$, $K_2Fe(CO_3)_2$, $Na_2Fe(CO_3)_2$ и серия полиморфных превращений, как в бинарных, так и в простых карбонатах. **Установлены** минимальные температуры плавления и составы расплавов в петрологически важных карбонатных системах. **Показано**, что К- и Na-содержащие системы характеризуются минимальными температурами плавления, не превышающими температуры континентальной геотермы (1000 °С для K_2CO_3 – $CaCO_3$ – $MgCO_3$ и 1050 °С в случае Na_2CO_3 – $CaCO_3$ – $MgCO_3$ при 6 ГПа). **Установлено**, что первые капли частичного расплава характеризуются высокими концентрациями щелочей и имеют К-Са доломитовый $[36K_2CO_3 \cdot 64(Ca_{0.65}Mg_{0.35})CO_3]$ и Na-Са доломитовый $[48Na_2CO_3 \cdot 52(Ca_{0.63}Mg_{0.37})CO_3]$ составы. **Сделан вывод** о том, что высокие концентрации Na, К и Са являются неотъемлемой характеристикой карбонатных расплавов, образующихся в основании литосферной мантии (1000–1200 °С и 6.0 ± 0.5 ГПа). С увеличением температуры до 1300–1400 °С частичные расплавы становятся малощелочными, эволюционируя до Са-доломитовых в случае Na-эклогита и К-пелита, до Mg-доломитовых в случае Na-лерцолита и до К-магнезитовых в случае К-лерцолита. **Установлены**

коэффициенты диффузии силикатных компонентов в расплавах КМС $[K_2Mg(CO_3)_2 + 25.7 \text{ мас\% } Mg_2SiO_4]$ при 16.5 ГПа и 1700 °С и КМСН $[K_2Mg(CO_3)_2 \times 2H_2O + 31.7 \text{ мас\% } MgSiO_3]$ при 24 ГПа и 1500 °С. Коэффициенты диффузии составили $D_{KMC}^{Mg_2SiO_4} = 2 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, и $D_{KMCN}^{MgSiO_3} = 4 \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. **Определены** скорости миграции изолированных включений карбонатных и водосодержащих карбонат-силикатных расплавов в мантии под действием различных движущих сил. В качестве механизма миграции **предложен** механизм растворения-переотложения. **Показано**, что температурный градиент ($TG_{\text{Max}} = 1 \text{ °С/км}$ в плюмах) является очень слабой движущей силой не способной обеспечить сегрегацию капель карбонатитового расплава в геологически значимых объемах (скорость миграции $= 4 \times 10^{-8} - 8 \times 10^{-7} \text{ м/год}$). С другой стороны, скорости миграции в поле механических напряжений ($\sim 1 \text{ МПа}$) в мантии и при размере включений 0.01 мм оцениваются на уровне 1-10 м/год, что на 1-2 порядка выше скоростей подъема плюмов. **Предложен механизм** объясняющий быструю сегрегацию карбонатных и карбонат-силикатных расплавов с источником глубже 150-230 км, таких как кимберлиты.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказаны следующие положения:

1. Системы $K_2CO_3-CaCO_3$, $Na_2CO_3-CaCO_3$, $K_2CO_3-MgCO_3$, $Na_2CO_3-MgCO_3$, $K_2CO_3-FeCO_3$ и $Na_2CO_3-FeCO_3$ при $6.0 \pm 0.5 \text{ ГПа}$ и $900-1300 \text{ °С}$ характеризуются наличием промежуточных соединений (двойных карбонатов): $K_6Ca_2(CO_3)_5$, $Na_4Ca(CO_3)_3$, $K_2Ca(CO_3)_2$, $K_2Mg(CO_3)_2$, $Na_2Mg(CO_3)_2$, $K_2Fe(CO_3)_2$, $Na_2Fe(CO_3)_2$, $K_2Ca_3(CO_3)_4$, $Na_2Ca_3(CO_3)_4$ и $Na_2Ca_4(CO_3)_5$. Число промежуточных соединений в данных системах возрастает с уменьшением температуры, увеличением давления (от 0.1 до 6 ГПа), а также при смене катионного состава от Fe и Mg к Ca. Двойные карбонаты являются потенциальными концентраторами K, Na и С в мантии на глубинах 180-210 км при температурах не превышающих 1200-1300 °С, что соответствует значениям теплового потока 35-40 мВт/м².

2. В системах $K_2CO_3-MgCO_3-CaCO_3$ и $Na_2CO_3-MgCO_3-CaCO_3$ при $6.0 \pm 0.5 \text{ ГПа}$ частичное плавление происходит при температурах на 100-200 °С ниже континентальной геотермы. В K-содержащей системе плавление субсолидусной

ассоциации магнезит + арагонит + $K_2Ca_{0.1}Mg_{0.9}(CO_3)_2$ реализуется при 1000 °С и сопровождается образованием К-Са-доломитового расплава $[36K_2CO_3 \cdot 64(Ca_{0.65}Mg_{0.35})CO_3]$. В Na-содержащей системе плавление субсолидусной ассоциации магнезит + $Na_2(Ca_{0.9}Mg_{0.1})_4(CO_3)_5$ + $Na_2Ca_{0.1}Mg_{0.9}(CO_3)_2$ происходит при 1050 °С и сопровождается образованием Na-Са-доломитового расплава $[48Na_2CO_3 \cdot 52(Ca_{0.63}Mg_{0.37})CO_3]$. Эти закономерности определяют возможность частичного плавления мантийного вещества и образование высоко-щелочных карбонатных расплавов в основании кратонов на глубинах 180-210 км.

3. Коэффициенты диффузии Mg_2SiO_4 в расплаве $[K_2Mg(CO_3)_2 + 17-26 \text{ мас\% } Mg_2SiO_4]$ при 16.5 ГПа и 1600-1700 °С (480 км) и $MgSiO_3$ в расплаве $[K_2Mg(CO_3)_2 \times 2H_2O + 32-47 \text{ мас\% } MgSiO_3]$ при 24 ГПа и 1500-1700 °С (670 км) составляют $(2.0-2.4) \times 10^{-9}$ и $(3.9-5.6) \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, соответственно. Эти значения на 10-12 порядков превышают коэффициенты диффузии Si в породообразующих мантийных минералах. Пластическое течение пород без расплава лимитируется твердофазной диффузией Si, а в присутствии расплава контролируется диффузией через межзерновой карбонатный расплав, что на несколько порядков понижает вязкость мантийных пород и, как следствие, может повышать скорость подъема восходящих мантийных потоков, в том числе термохимических плюмов.

4. На глубинах свыше 150 км миграция включений карбонатного расплава через мантийные породы реализуется путем растворения силиката на фронте движения, диффузии растворенного силиката через расплав и его кристаллизации. Основной движущей силой, $\Delta\mu$, данного процесса является градиент механических напряжений в конвективной мантии, достигающий 0.1-10 МПа, что соответствует значениям $\Delta\mu = 1-100 \text{ Дж/мол}$. При данных значениях движущей силы скорости миграции включений карбонатного расплава составляют $10^{-1}-10^2 \text{ м/год}$, что достаточно для быстрой сегрегации дисперсных включений карбонатных расплавов в апикальных частях мантийных плюмов.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных методов исследования: сканирующей

электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, микронзондового и рентгеноструктурного анализа. При изучении структуры высокобарических карбонатных фаз использовали метод *in situ* рентгеновской дифракции с использованием синхротронного излучения на линии высоких давлений BL04B1 в центре синхротронного излучения Spring-8 (Хиого, Япония).

В основу работы положены результаты экспериментов при $P = 6, 17$ и 24 ГПа и $T = 1900-1700$ °С, проведенных автором в 2005-2013 гг. на многопуансонных аппаратах высокого давления, а также данные по всестороннему изучению продуктов опытов. В процессе работы автором разработаны новые ячейки высокого давления и созданы специальные методы проведения экспериментов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: в результате исследования представлены

1. Данные о фазовых взаимоотношениях в карбонатных системах при мантийных P - T параметрах необходимы для всестороннего исследования физико-химических свойств карбонатных расплавов. А именно их структуры, плотности, вязкости, смачиваемости, коэффициентов диффузии компонентов и электропроводности. Полученные результаты также полезны в дальнейших исследованиях закономерностей распределения элементов, фракционирования изотопов углерода и окислительно-восстановительных реакций с участием карбонатов и их расплавов.

2. Полученные автором данные о влиянии давления и катионного состава на стехиометрию и структуру простых и бинарных карбонатов пополняют систематику простых химических соединений.

3. Рамановские спектры высокобарических карбонатных фаз необходимы для их идентификации в микровключениях в мантийных минералах, а также в продуктах высокобарических экспериментов в сложных карбонат-силикатных системах.

4. Установленные в данной работе коэффициенты диффузии силикатных компонентов в карбонатных расплавах могут быть использованы при построении численных моделей подъема термохимических плюмов.

5. Предложенный автором механизм миграции карбонатных расплавов при высоких давлениях может быть применен при построении моделей мантийного

массопереноса и сегрегации карбонатных (протокимберлитовых) расплавов в мантии.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Высокая степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований, обобщенных в виде защищаемых положений и выводов диссертации А.Ф. Шацкого, определяется привлечением современных методов исследований. Эксперименты проведены с использованием прессового и беспрессового многопуансонного оборудования высокого давления. Постэкспериментальные образцы детально изучены с применением методов сканирующей электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, микрозондового и рентгеноструктурного анализа. При изучении структуры высокобарических карбонатных фаз применяли метод *in situ* рентгеновской дифракции на линии BL04B1 в центре синхротронного излучения Spring-8 (Хиого, Япония).

Результаты исследований апробированы на российских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах.

Теория построена на основе результатов комплексного экспериментального исследования карбонатных и карбонат-силикатных систем при мантийных давлениях и температурах. **Идеи диссертации базируются** как на общепринятых моделях и концепциях, касающихся проблематики – представлениях об образовании карбонат-содержащих расплавов в мантии Земли, так и на вновь развивающихся гипотезах. Результаты не противоречат и во многом дополняют ранее опубликованные экспериментальные данные по этой теме.

Установлена согласованность результатов исследования с некоторыми данными, полученными при исследованиях акцессорных минералов в мантийных ксенолитах, минералогии кимберлитов, а также при экспериментальных исследованиях, касающихся проблем петрогенезиса мантийных ксенолитов и кимберлитов.

Личный вклад соискателя. Автором проведен детальный анализ существующей научной литературы по тематике диссертации. На основании проведенного анализа соискатель сформулировал цель исследования и задачи, актуальность которых не вызывает сомнения. Для решения поставленных задач

автором лично были разработаны методики проведения экспериментов и уникальные подходы к анализу постэкспериментальных образцов. Разработанные автором методики позволили ему провести широкий спектр экспериментальных и аналитических исследований при высоких давлениях и температурах, направленных на решение поставленной цели и задач. На основании своих результатов, автор построил широкий спектр фазовых диаграмм для карбонатных систем, установил набор наиболее вероятных карбонатных фаз, способных контролировать частичное плавление карбонатизированных мантийных доменов, измерил скорости диффузии силикатных компонентов в карбонатитовых расплавах при мантийных P-T параметрах. Основываясь на этих данных, автор выявил температурные тренды изменения состава карбонатитовых расплавов в мантии и предложил модель их сегрегации. В основу работы положены результаты более 300 экспериментов: 1) при $P = 6$ ГПа и $T = 900-1700$ °С и 2) при $P = 17$ и 24 ГПа и $T = 1500-1700$ °С.

На заседании **26 ноября 2014 г.** диссертационный совет принял решение присудить **Шацкому Антону Фарисовичу** ученую степень доктора геолого-минералогических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 9 докторов наук по специальности 25.00.05, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета



Н. В. Соболев

Ученый секретарь диссертационного совета



О. Л. Гаськова

28 ноября 2014 г.

