

## **Особенности вариаций составов ксенолитов мантийных шпинелевых перидотитов: возможные механизмы их формирования в складчатых и стабильных областях**

Приходько В.С.<sup>1</sup> Петухова Л.Л.<sup>1</sup> Чубаров В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

<sup>2</sup> ИВ ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

Рассмотрены особенности вариаций составов пород и минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов Алчанской и Свягинской щелочнобазальтовых построек. Ксенолиты первой из них характеризуют вещество верхней мантии Сихотэ-Алинской покровно-складчатой системы, а ксенолиты Свягинского местонахождения – верхнюю мантию Ханкайского кратонного террейна. Петрохимические диаграммы показывают близкий характер вариаций составов ксенолитов шпинелевых перидотитов из данных построек, что свидетельствует о сходстве механизмов их формирования, а особенности структуры, о том, что таким механизмом было частичное плавление вещества верхней мантии. Выявленные закономерности изменения химического состава минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов Алчанской постройки в зависимости от магнезиальности пород отвечают в общих чертах теоретических расчетам и результатам экспериментальных исследований процессов частичного плавления верхней мантии. Показано, что картина изменений химического состава минералов шпинелевых перидотитов Свягинской постройки выглядит значительно сложнее, хотя сама петрохимическая структура этой выборки ксенолитов достаточно проста и подчиняется закономерностям процесса частичного плавления вещества верхней мантии. Вместе с тем, тренды составов минералов ксенолитов этой постройки в основном имеют противоположные тенденции по отношению к трендам составов минералов ксенолитов Алчанской постройки. Предполагается, что сама петрохимическая структура этих пород была сформирована в результате частичного плавления исходного мантийного вещества, представленного гранатовыми перидотитами, а особенности составов минералов и их тренды определяются характером распределения элементов при твердофазовых реакциях между минералами при переходе гранатовых перидотитов в шпинелевые.

### **Введение**

Существующие оценки состава верхней мантии Земли показывают, что она сложена в основном ультрамафитами, фрагменты которых выносятся на дневную поверхность щелочнобазальтоидными или кимберлитовыми расплавами. Изучение обломков этих пород является прямым методом исследования состава и строения глубинного вещества, а также дает возможность оценить масштабы магматических и метаморфических процессов в мантии, отвечающих за их формирование. Подобные вопросы

слабо отражены в литературе, чему в значительной степени способствует фрагментарность данных о составах ксенолитов и слагающих их минералов. Это не позволяет в должной мере охарактеризовать локальные и латеральные особенности составов пород и обсудить возможные механизмы преобразования вещества верхней мантии под различными тектоническими структурами. В настоящем сообщении обсуждается природа вариаций химических составов пород и минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов в пределах отдельных щелочно-базальтоидных построек, характеризующих вещество мантии под стабильными (Свиягинский вулкан) и складчатыми (Алчанская постройка) областями юга Дальнего Востока.

### Геологическая ситуация

Рассматриваемая территория охватывает Ханкайский срединный массив, Сихотэ-Алинскую покровно-складчатую систему и Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Это основные тектонические структуры континентальной части юга Дальнего Востока России. Проявления кайнозойского щелочно-базальтоидного вулканизма, в продуктах которого присутствуют ксенолиты шпинелевых перидотитов, развиты по всей площади региона. Были изучены представительные коллекции образцов глубинных пород из щелочобазальтоидных построек, расположенных в пределах вышеназванных тектонических структур региона. Литосферу Ханкайского срединного массива характеризуют ксенолиты Свиягинского и Медвежьего вулканов, Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса – образцы пород из вулканической постройки по ручью Санку (левый приток р.Коппи). Все остальные образцы (из Алчанского, Анюйского, Бархатного, Болоньского и Иннокентьевского вулканов) представляют верхнюю мантию различных секторов Сихотэ-Алинской системы. Описания вулканических построек, составов эффузивов, распространенность и условия нахождения ксенолитов приведены во многих публикациях [1, 2, 4, 5, 6].

Сравнительный анализ вещественного состава ксенолитов шпинелевых перидотитов с целью оценки степени гетерогенности глубинного вещества в пределах континентального блока ДВ проводился на базе данных о вариациях составов пород в пределах отдельных вышеобозначенных вулканических построек. Для рассматриваемых перидотитовых ксенолитов характерны четко выраженные отрицательные корреляции содержания MgO в породе с содержаниями SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Na<sub>2</sub>O. В работе [5] были рассмотрены локальные и латеральные вариации составов (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO) вещества мантии на уровне фации шпинелевых перидотитов. Исходя из среднего содержания и характера распределения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выделены две группы глубинных пород. Первая ( максимум в выборке приходится на интервал 2-3 вес.%, имеются образцы с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ниже 1 вес.%) объединяет глубинные ксенолиты Свиягинского, Медвежьего и Болоньского вулканов. Вторая группа характеризуется максимумом значений Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в интервале 3-

4% и отсутствием низких содержаний этого оксида. В нее входят породы Алчанского, Анюйского, Бархатного, Иннокентьевского вулканов и местонахождения "Санку". Столь же убедительно выделяются эти группы на графике распределения CaO и MgO в породах. Таким образом, петрохимически истощенные перидотиты обнаружены в блоках мантии под Ханкайским срединным массивом (Медвежий и Свягинский вулканы) и Сихотэ-Алинской покровно- складчатой областью (Болоньский вулкан). По своим характеристикам эти породы относятся к "окраинно-океаническому", предельно истощенному типу ультрамафитовых субстратов мантии Земли [3]. Другая группа ксенолитов, характеризующих верхнюю мантию Сихотэ-Алинской системы и Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, может соответствовать по своим параметрам слабо истощенному "срединно-океаническому" ультрамафитовому субстрату [3].

### **Образцы и методы исследований**

Изучались представительные коллекции образцов ксенолитов шпинелевых перидотитов из Алчанской и Свягинской вулканических построек. Первая из них располагается в бассейне р. Бикин, вблизи ее правого притока р. Алчан. Останец вулканической постройки представляет собой небольшую возвышенность, сложенную потоками плотных базальтов. Эффузивы обильно насыщены небольшими (в основном до 10 см) угловатыми обломками шпинелевых лерцолитов. Останец вулканической постройки Свягинского вулкана (вблизи железнодорожной станции Свягино) пререзает автомобильная дорога Хабаровск-Владивосток. В плотных базальтах встречается множество небольших округлых ксенолитов шпинелевых перидотитов.

Из каждой постройки случайным способом отбиралась представительная выборка образцов ксенолитов шпинелевых перидотитов, позволяющая в полной мере охарактеризовать петрохимические особенности этой группы глубинных пород. Основные требования – отсутствие продуктов вторичных изменений, размер ксенолитов не должен быть меньше 7 см. Эти образцы после соответствующей обработки (удаление базальтовых примазок и другого инородного материала) разрезались на две части, одна из которых дробилась и истиралась для последующего силикатного анализа. Силикатный анализ образцов выполнялся в Институте тектоники и геофизики ДВО РАН, аналитики Зазулина В.Е., Боковенко Л.С. и Ильина Н.И. Из второй части образца под микроскопом отбирались относительно чистые зерна оливина, хромшпинели, орто- и клинопироксенов, состав которых в дальнейшем изучался на микроанализаторе «Самебах» в Институте вулканологии ДВО РАН, аналитик Чубаров В.М. Анализировалось по пять зерен каждого минерала из одного образца, причем каждое зерно было охарактеризовано тремя анализами (центр, край). Исследуемые образцы достаточно равномер-

но характеризуют общую выборку пород глубинных пород по магниальности и другим минералогическим параметрам.

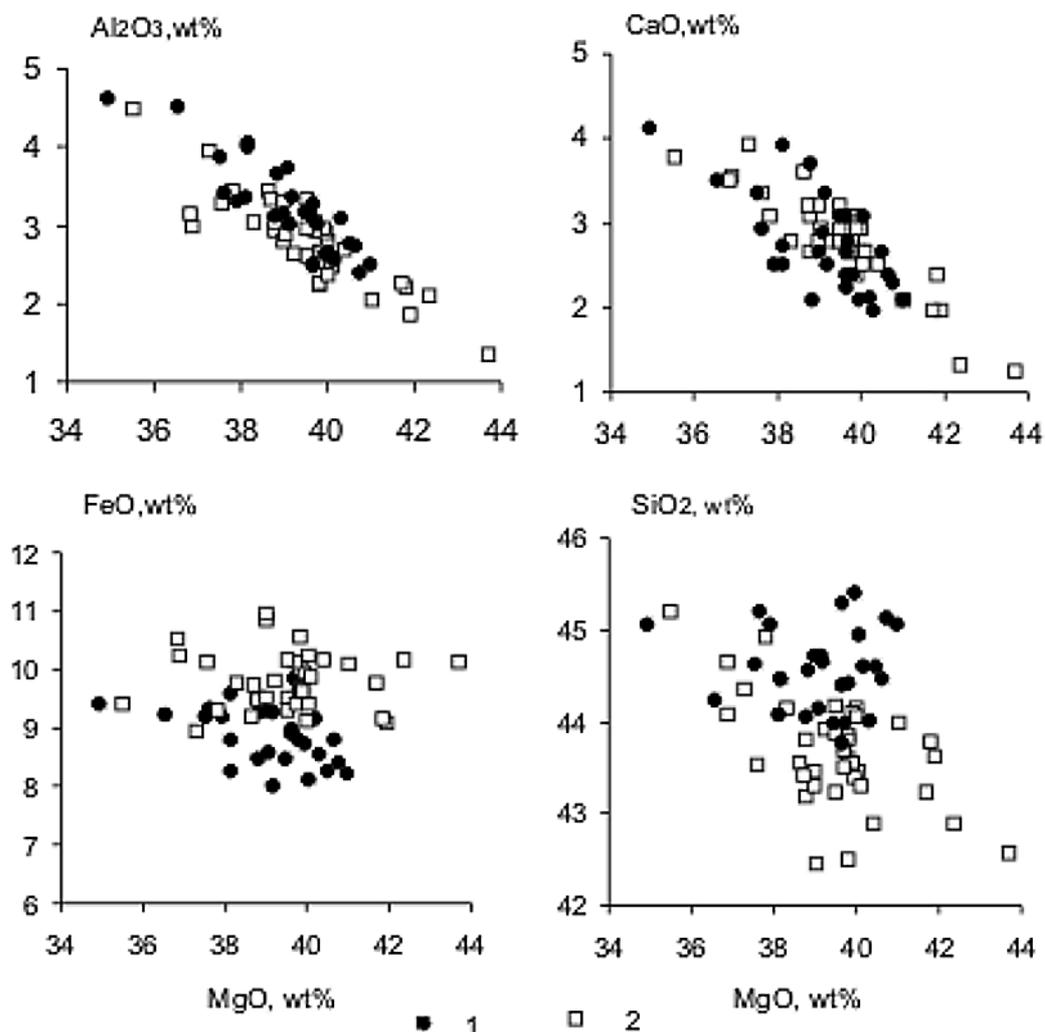


Рис.1. Вариационная диаграмма породообразующих оксидов в ксенолитах шпинелевых перидотитов из Свягинской и Алчанской щелочнобазальтоидных построек.

1 – Алчанская, 2 - Свягинская.

## Результаты

Анализ химических составов ксенолитов шпинелевых перидотитов из Алчанского и Свягинского вулканов, представленных на рис. 1, показывает, что данные выборки достаточно однородны, причем Алчанская – более компактна. Ниже приведены средние составы ксенолитов Алчанской (29 обр.): SiO<sub>2</sub>- 44.55; TiO<sub>2</sub> - 0.11; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 3.22; FeO общ.- 8.81; MgO-39.09; CaO- 2.77; Na<sub>2</sub>O- 0.22, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,42) и Свягинской построек ( 32 обр.): SiO<sub>2</sub> – 43,67, TiO<sub>2</sub> – 0,32, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2,81, FeO – 9,54 , MgO – 39,51, CaO – 2,80, Na<sub>2</sub>O – 0,20, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,45. Существуют определенные различия в петрохимических характеристиках ксенолитов из двух вулканических центров, что иллюстрируют вариационные диаграммы на рисунке 1. Для этих выборок

перидотитовых ксенолитов характерны четко выраженные отрицательные корреляции содержания MgO в породе с содержаниями Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO.

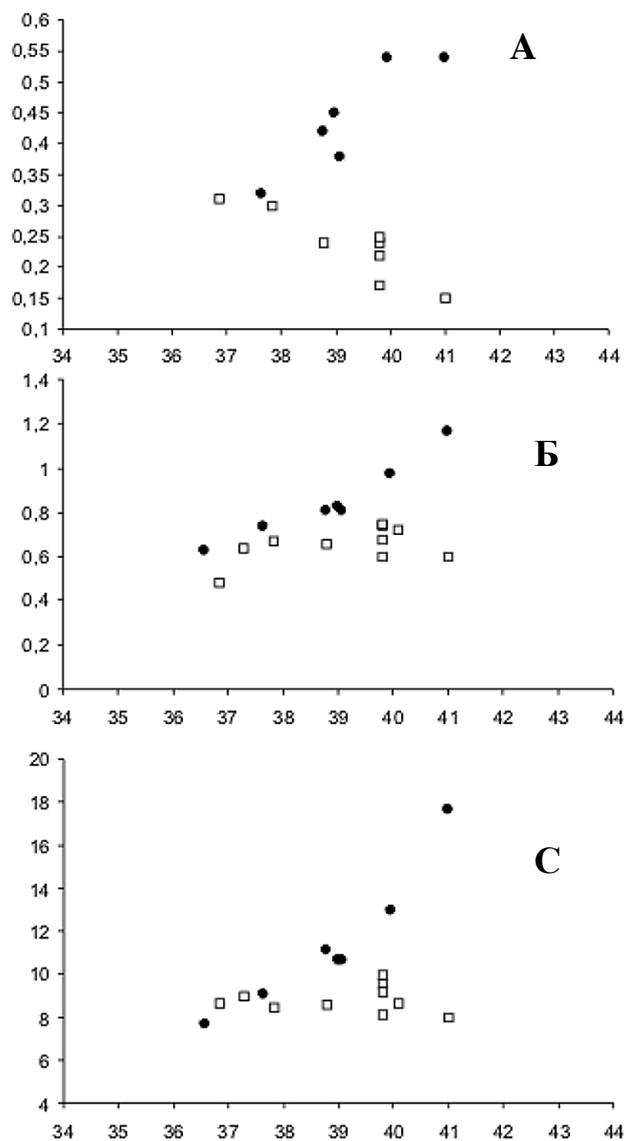


Рис. 2. Зависимость содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (мас.%) по оси ординат в минералах ксенолитов от содержания MgO (мас.%) в породе по оси абсцисс.

а – ортопироксены, б – клинопироксены, в – хромшпинели.

Соотношение содержаний SiO<sub>2</sub> и FeO с магнезиальностью пород менее устойчивое, тем не менее общая тенденция сохраняется, т.е. с возрастанием MgO в породе количество SiO<sub>2</sub> и FeO последовательно уменьшается.

Рассмотрим, какие изменения происходят в составах минералов ксенолитов Алчанской и Свягинской построек в зависимости от магнезиальности пород. В качестве основных химических параметров минералов (наиболее изменчивых) использовались содержания хрома в орто- и клинопироксенах, шпинелях, алюминия в пироксенах, натрия и волластонитовой молекулы в клинопироксенах.

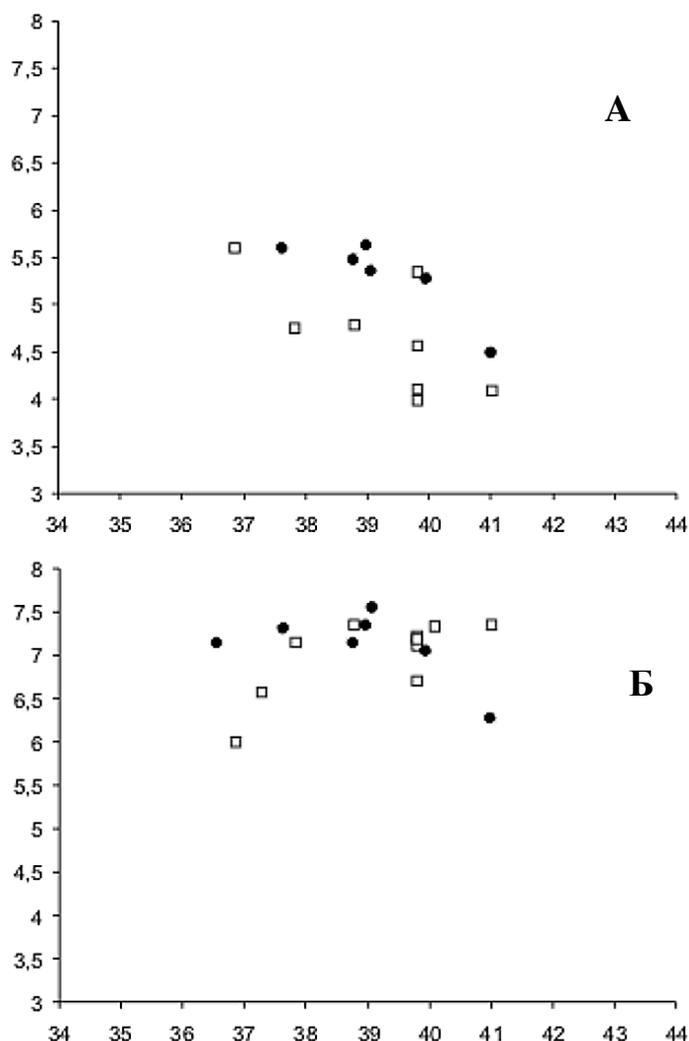


Рис. 3. Зависимость содержания  $Al_2O_3$  (мас.%) по оси ординат в минералах ксенолитов от содержания  $MgO$  (мас.%) в породах по оси абсцисс.

а – ортопироксены, б – клинопироксены.

На рис. 2 (а, б, в) представлена серия диаграмм, иллюстрирующая соотношения между содержаниями  $Cr_2O_3$  (мас.%) в минералах ксенолитов и содержаниями  $MgO$  (мас.%) в породах: (а – в ортопироксенах, б – в клинопироксенах, с – в хромистых шпинелях). Прежде всего необходимо отметить различный характер отношений между названными параметрами в ксенолитах шпинелевых перидотитов Алчанской и Свягинской построек. Для ксенолитов Алчанской постройки характерна устойчивая тенденция повышения содержания хрома в ортопироксенах (наиболее интенсивно), в клинопироксенах и шпинелях при возрастании магнезиальности пород. В ортопироксенах шпинелевых перидотитов Свягинской постройки (рис. 2а) налицо отчетливое уменьшение содержания  $Cr_2O_3$  при возрастании содержа-

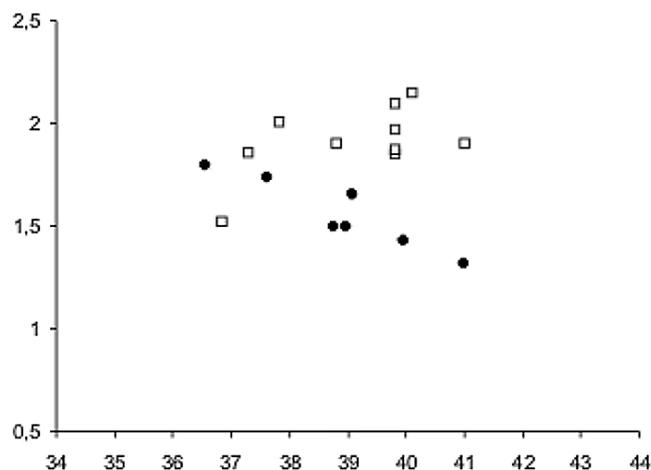


Рис. 4. Зависимость содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  (мас.%) по оси ординат в клинопироксенах от содержания  $\text{MgO}$  (мас.%) по оси абсцисс в ксенолитах шпинелевых перидотитов.

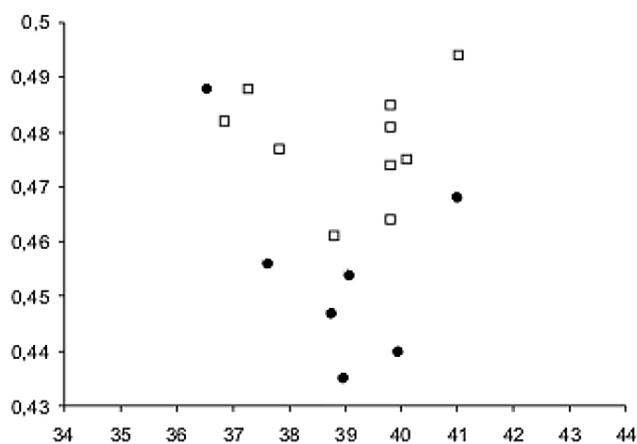


Рис. 5. Зависимость содержания волластонитовой молекулы в клинопироксенах по оси ординат от содержания  $\text{MgO}$  (мас.%) по оси абсцисс в ксенолитах шпинелевых перидотитов.

ния  $\text{MgO}$  в породах. Фигуративные точки концентраций  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в клинопироксенах и шпинелях ксенолитов Свягинской постройки (рис. 2 б, в) образуют субгоризонтальные плато.

Зависимость содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в орто- и клинопироксенах от магнезиальности шпинелевых перидотитов показаны на рис. 3а, б. Обращает на себя внимание сходный характер изменения этого оксида в ортопироксенах ксенолитов Алчанской и Свягинской построек. В клинопироксенах наблюдается существенно более сложный характер изменения содержаний  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : в минералах из Алчанской постройки происходит слабое понижение при возрастании магнезиальности пород, а в клинопироксенах ксенолитов второй постройки - слабое увеличение. Рис. 4 демонстрирует характер изменения содержания натрия в клинопироксенах шпинелевых лерцолитов: направленное понижение содержания натрия в клинопироксенах ксенолитов из Алчанского местонахождения и повышение

– в клинопироксенах шпинелевых перидотитов Свягинского вулкана. Характер зависимости содержания волластонитового минала в клинопироксенах от магнезиальности пород проиллюстрирован рис. 5. Фигуративные точки составов минералов ксенолитов из двух построек можно описать параболическими кривыми, причем в том и другом случаях, их минимумы отвечают 39% MgO в породах.

### **Обсуждение результатов**

Представленные петрохимические диаграммы (рис. 1) показывают близкий характер вариаций составов ксенолитов шпинелевых перидотитов из Алчанской и Свягинской построек, что свидетельствует о сходстве механизмов их формирования. В современной геологической литературе наибольшее признание получила концепция формирования мантийных ультрамафитов в процессе частичного плавления глубинного вещества. Линейный характер зависимости между содержаниями петрогенных оксидов в шпинелевых перидотитах (отрицательные линейные корреляции содержания MgO с содержаниями FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub> и т.д.) допускает их реститовый характер в рамках модели частичного плавления. При отделении от «первоначального» вещества мантии базальтовых или пикритоидных жидкостей возникают в различной степени истощенные перидотиты. Состав комплементарных членов (выплавов и реститов) контролируется химизмом мантийного вещества, степенью его плавления и коэффициентами распределения элементов между жидкой и твердыми фазами. Предполагается, что шпинелевые перидотиты с минимальными (36-38 вес. %) содержаниями MgO могут рассматриваться в качестве примитивных, т.е. близких по составу к исходному веществу мантии. Более магнезиальные разности пород, обедненные легкоподвижными компонентами (Al, Ca, Na), являются тугоплавкими остатками (реститами) после удаления выплавов. Чем выше температура, а отсюда, и степень плавления исходного материала, тем более истощенным становится состав реститов. Эксперименты с плавлением ультрамафитовых систем показали, что породообразующие минералы переходят в расплав в такой последовательности: Crx – Orx – Ol, каждый в определенном температурном интервале [3]. Клинопироксен исчезает при достижении 25% степени плавления исходной породы. Особенности процесса частичного плавления природных ультрамафитовых парагенезисов наглядно иллюстрирует линейное распределение фигуративных точек составов ксенолитов шпинелевых перидотитов в координатах CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (отношение приближается к 1). Судя по величине этого отношения, которое значительно ниже, чем в клинопироксене (2,8 и более), можно предположить участие в плавлении и второй глиноземистой фазы – хромшпинели. Подтверждением участия этого минерала в процессах плавления является положительная корреляция между содержаниями Ca<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в шпинелях и MgO в породе. Известно, что при повышении степени плавления,

что равносильно формированию более магнезиальных парагенезисов, в хромшпинелидах растет величина отношения Cr/Al [3]. Для данного изоморфного ряда шпинелей это аналогично возрастанию в них содержания хрома.

Выше мы изложили некоторые петрохимические соображения относительно процессов частичного плавления ультрамафитов в условиях верхней мантии и в самом общем виде рассмотрели результаты экспериментальных исследований процессов плавления ультрамафитов.

Следует заметить, что выявленные закономерности изменения химического состава минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов Алчанской постройки (рис. 2, 3, 4) в зависимости от магнезиальности пород отвечают в общих чертах теоретическим расчетам и результатам экспериментальных исследований процессов частичного плавления. Наиболее показательны изменения содержания хрома в хромшпинелях, орто- и клинопироксенах - устойчивое возрастание этого компонента связано с возрастанием магнезиальности пород (рис. 2). Столь же отчетливо проявлено уменьшение содержания алюминия в ортопироксенах и содержания натрия в клинопироксенах при увеличении содержания MgO в шпинелевых перидотитах. Более сложный характер носит изменение содержания алюминия в клинопироксенитах. Это возможно связано с двойственной позицией алюминия в структуре клинопироксена: жадеитовая и чермакитовая молекулы. Процесс частичного плавления должен приводить к уменьшению жадеитового и увеличению (?) чермакитового минералов. Косвенным подтверждением вышесказанному может служить расположения фигуративных точек на диаграмме в координатах: содержания MgO в породе и волластонита в клинопироксене (рис. 5).

Картина изменений химического состава минералов шпинелевых перидотитов Свягинской постройки выглядит значительно сложнее, хотя сама петрохимическая структура этой выборки ксенолитов достаточна проста и подчиняется закономерностям процесса частичного плавления вещества верхней мантии. Но, тренды составов минералов ксенолитов этой постройки в основном имеют противоположные тенденции по отношению к трендам составов минералов ксенолитов Алчанской постройки (см. рис. 2,3,4), что требует специального осмысления.

Наше объяснение этому факту состоит в следующем. Ксенолиты шпинелевых перидотитов Свягинской постройки характеризуют современную верхнюю мантию Ханкайского кратонного террейна. На раннем этапе развития Земли ханкайский блок был составной частью более крупного кратона, верхняя мантия которого была относительно холодная и в основном состояла из гранатовых перидотитов. В дальнейшем, в результате структурной перестройки Тихоокеанской окраины Азии и активизации магматических процессов, произошло повышение геотермического градиента в пределах Ханкайского кратонного террейна, что привело к

преобразованию мантийных гранатовых перидотитов в шпинелевые. Предполагается, что сама петрохимическая структура шпинелевых перидотитов была сформирована на ранних этапах в результате частичного плавления исходного мантийного вещества, представленного гранатовыми перидотитами. Вполне вероятно, что в случае ксенолитов Свягинского вулкана, особенности составов минералов и их тренды определяются характером распределения элементов при твердофазовых реакциях между минералами при переходе гранатовых перидотитов в шпинелевые.

### **Заключение**

Установлено, что выявленные закономерности изменения химического состава минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов Алчанской постройки в зависимости от магнезиальности пород обусловлены процессами частичного плавления. Петрохимическая структура пород этой выборки и особенности составов минералов ксенолитов шпинелевых перидотитов были сформированы при частичном плавлении мантийного вещества на уровне фации шпинелевых перидотитов.

Установлено, что петрохимическая структура выборки ксенолитов Свягинского вулкана достаточно проста и подчиняется закономерностям процесса частичного плавления вещества верхней мантии, однако тренды составов минералов ксенолитов этой постройки, в основном, имеют противоположные тенденции по отношению к трендам составов минералов ксенолитов Алчанской постройки. Предполагается, что сама петрохимическая структура шпинелевых перидотитов была сформирована в результате частичного плавления гранатовых перидотитов, а особенности составов минералов и их тренды определяются характером распределения элементов при твердофазовых реакциях между минералами при переходе гранатовых перидотитов в шпинелевые.

### **Литература**

1. **Говоров И. И., Илунин И.П., Харкив А. Д.** Геохимия глубинных вулканических пород и ксенолитов. М.: Наука, 1980, 332с.
2. **Есин С.В.** Ультроосновные модули из кайнозойских щелочных базальтоидов Совгаванского плато (Восточный Сихотэ-Алинь) // Гипербазитовые ассоциации складчатых областей. Новосибирск: Наука, 1991. С.99-117.
3. **Магматические горные породы (ультраосновные породы)** / Отв. ред. Е.Е. Лазько, Е.В. Шарков. М.: Наука, 1988. 508.
4. **Приходько В.С., Бехтольд А.Ф., Бердников Н.В.** Глубинная петрология активных континентальных окраин. М.: Наука, 1985. 152с.
5. **Приходько В.С., Пономорев Г. П., Каретников А.С.** Глубинные ксенолиты и верхняя мантия юга Дальнего Востока // Структура и геокинематика литосферы Востока России. Магадан. 1993. С. 122-143.
6. **Щека С.А.** Базит-гипербазитовые интрузии и включения в эффузивах Дальнего Востока. М.: Наука, 1983. 168с

УДК 552.33:552.578+549.74