

НАУЧНЫЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 537.622.6+542Я+548326

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФЕРРИМАГНИТНЫХ МИНЕРАЛАХ КСЕНОЛИТОВ ГЛУБИННЫХ ПОРОД ЗЕМНЫХ НЕДР

© 1997 г. В. А. Цельмович, Ю. С. Геншафт, А. К. Гапеев

Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 19.12.94 г.

Ксенолиты глубинных пород Земли, вынесенные на поверхность Земли в процессе вулканических извержений, испытали сложную историю существования в меняющихся физико-химических условиях. В них зафиксированы следы изменения P , T параметров (главным образом глубинное субизобарическое остывание) [1], летучести кислорода [2], пластическая деформация в полях напряжений [3], метасоматические преобразования химического и минерального состава под воздействием ювенильных флюидов и расплавов [4-6]. Все эти процессы, по-видимому, протекали в течение относительно длительного периода времени - десятки, сотни тысяч лет или, возможно, миллионы лет, - и глубинное вещество успевало прийти в равновесное состояние относительно меняющихся глубинных условий. Иное дело, когда глубинные породы и минералы испытывали достаточно быстрое и кратковременное воздействие со стороны магм и связанных с ними потоков горячих флюидов. В этом случае развивались неравновесные минеральные ассоциации, для которых часто характерны неоднородности состава, проявляемые в монотонных (диффузионных) изменениях содержаний различных химических компонентов от края зерна к его середине. Так, например, реакционные взаимодействия оливинов, пироксенов и шпинелей перидотитовых ксенолитов с вмещающими базальтами. От края зерна оливина, обращенного внутрь ксенолита, к наружному краю на контакте с базальтом монотонно нарастает содержание железа. Наружные краевые зоны имеют состав, подобный таковому для оливина основной массы щелочного базальта. Внешние зоны моноклиновых пироксенов обогащаются титаном [5, 6].

Края Cr-Al шпинели на контакте с базальтом замещаются титаномагнетитом, также близкого по составу к рудному минералу вмещающего ксенолита вулканической породы. По мере удаления в глубь зерна монотонно уменьшаются содержания Cr , Al , Mg [7]. Эти диффузионные реакционные зоны имеют ширину первые десятки мкм.

Экспериментальные исследования по кристаллизации титаномагнетитов и отжигу образцов базальтов при температурах до 1000°C показали,

что в этих условиях ярко проявлены процессы диффузионного перераспределения компонентов состава сосуществующих минеральных фаз, в том числе вынос из титаномагнетитов железа и титана [8-10]. С целью более детального изучения этих явлений в природных образованиях была изучена коллекция образцов ксенолитов Al-Fe пироксенитов (включения "черной" серии) из калиевых базальтов вулкана Шаварын-Царам (Центральная Монголия, Тарятская депрессия на Хангайском нагорье) - 10 образцов, и ксенолитов пород нижней коры из кимберлитовых трубок Якутии - 6 образцов. Рудные минералы в этих образцах представлены гемоильменитами, титаномагнетитами и продуктами их распада.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Ксенолиты Al-Fe пироксенитов "черной" серии состоят из минералов повышенной железистости, глиноземистости и с низким содержанием хрома в отличие от более распространенных магнезиальных пород ультраосновного состава. Как правило, это грубозернистые породы, содержащие переменные количества моноклинового пироксена (глиноземистый авгит), ромбического пироксена (гиперстен), железистого оливина, пироп-альмандинового граната, крайне низкохромистой шпинели (плеонаста), магнезиального гемоильменита, титаномагнетита с низким содержанием титана, олигоклаз-андезитового плагиоклаза. В минералах ярко выражен распад твердых растворов, по-видимому, обусловленный прежде всего снижением температуры. Характерно сосуществование шпинели и граната, крупных зерен низкотитанистого титаномагнетита и ильменита с вростками пластинчатой феррошпинели. В ксенолитах часто фиксируются признаки начального плавления: межзерновые выделения щелочнополевошпатового или базальтового состава.

Ксенолиты пород нижних горизонтов земной коры Якутии представлены в разной степени измененными серпентинизацией, карбонатизацией и другими наложенными процессами, апомагматическими и метаморфическими образованиями.

Таблица 1. Характерные средние составы сосуществующих титаномагнетитовой (ТМ) и гемейменитовой (ГИ) фаз в структурах распада титаномагнетитов в пироксенитовых включениях из щелочных базальтов Монголии

Обр.	TiO ₂	FeO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
1	1.5	84.0	4.1	0.5	0.5	4.3
ТМ (5)	1.4–1.6	83.6–84.2	3.9–5.1	0.3–0.5	0.4–0.6	1.5–8.3
2	2.8	81.7	6.1	0.6	2.6	4.7
ТМ (15)	2.3–3.2	77.0–82.7	3.2–9.6	0.5–0.7	0.3–3.2	2.6–8.4
3	5.7	83.4	2.7	0.2	0.0	4.3
ТМ (11)	5.4–5.8	78.6–85.0	2.6–2.8	0.1–0.3	0.0	3.8–7.4
ГИ (5)	31.7	62.2	2.6	0.3	0.0	3.0
	30.5–32.1	62.0–62.5	2.2–2.8	0.2–0.4	0.0	0.5–3.5
4	19.8	67.0	6.1	0.3	0.2	6.7
ТМ (6)	16.2–24.5	61.0–74.7	4.6–9.3	0.2–0.6	0.1–0.6	2.6–12.6
ГИ (6)	45.0	51.0	4.7	0.3	0.1	1.5
	41.5–47.6	49.1–55.6	4.1–5.0	0.1–0.7	0.05–0.2	0.3–3.2

Примечание. FeO – суммарное содержание железа, подсчитанное в закисной форме; в скобках – количество исследованных зерен; вторая строка – пределы изменений составов фаз.

Изучались образцы пород основного и среднего составов, в которых объемная доля рудных минералов достигала 15%. Подробная минералогическая характеристика коллекции коровых включений в кимберлитах Якутии, из которой были отобраны объекты для настоящего исследования, приведены в работе [11].

Изучались магнитные параметры образцов по стандартной методике [12]: измерялись коэрци-

тивная сила H_c и остаточная коэрцитивная сила H_{CR} , проводился термомагнитный анализ намагниченности насыщения I_s в интервале температур 20–600°C; состав минералов и структурное состояние определялись методом рентгено-спектрального микроанализа (РСМ) на электронном микроанализаторе "Camebax" [11]. Линейные профили содержаний различных петрогенных элементов в рудных фазах (Fe, Ti, Al, Mg) записывались на

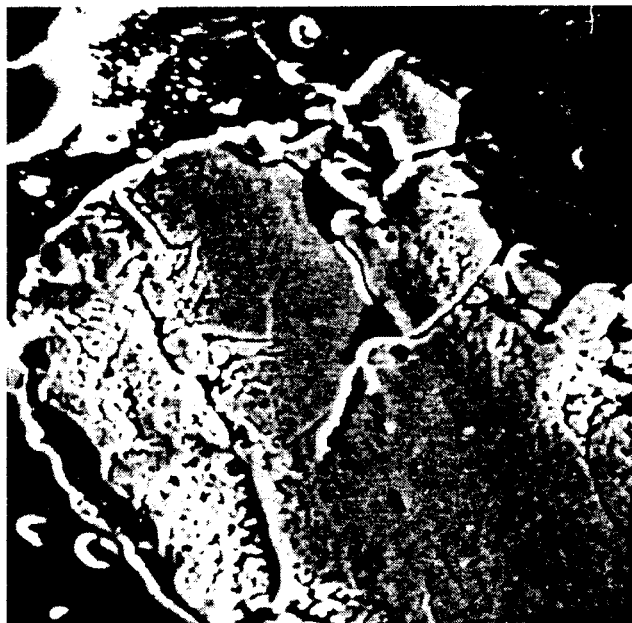


Рис. 1. Титаномагнетитовое зерно со структурой однофазного окисления по краю зерна. Увеличение $\times 400$.

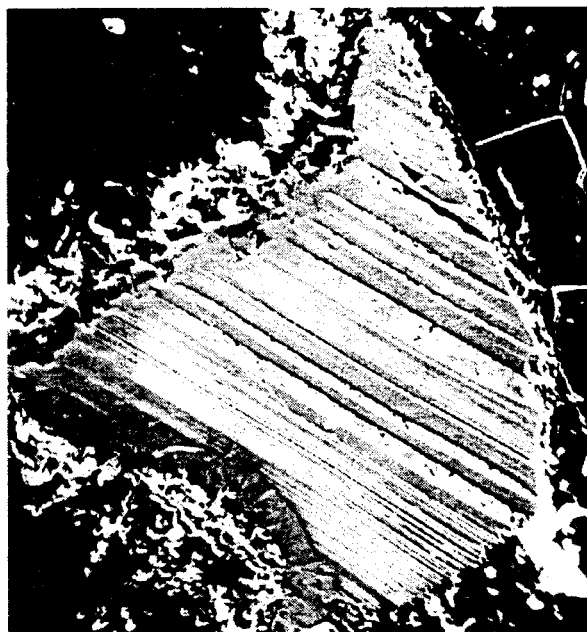


Рис. 2. Ильменитовое зерно с пластинчатыми ориентированными выделениями титаномагнетитовой шпинели. Увеличение $\times 150$.

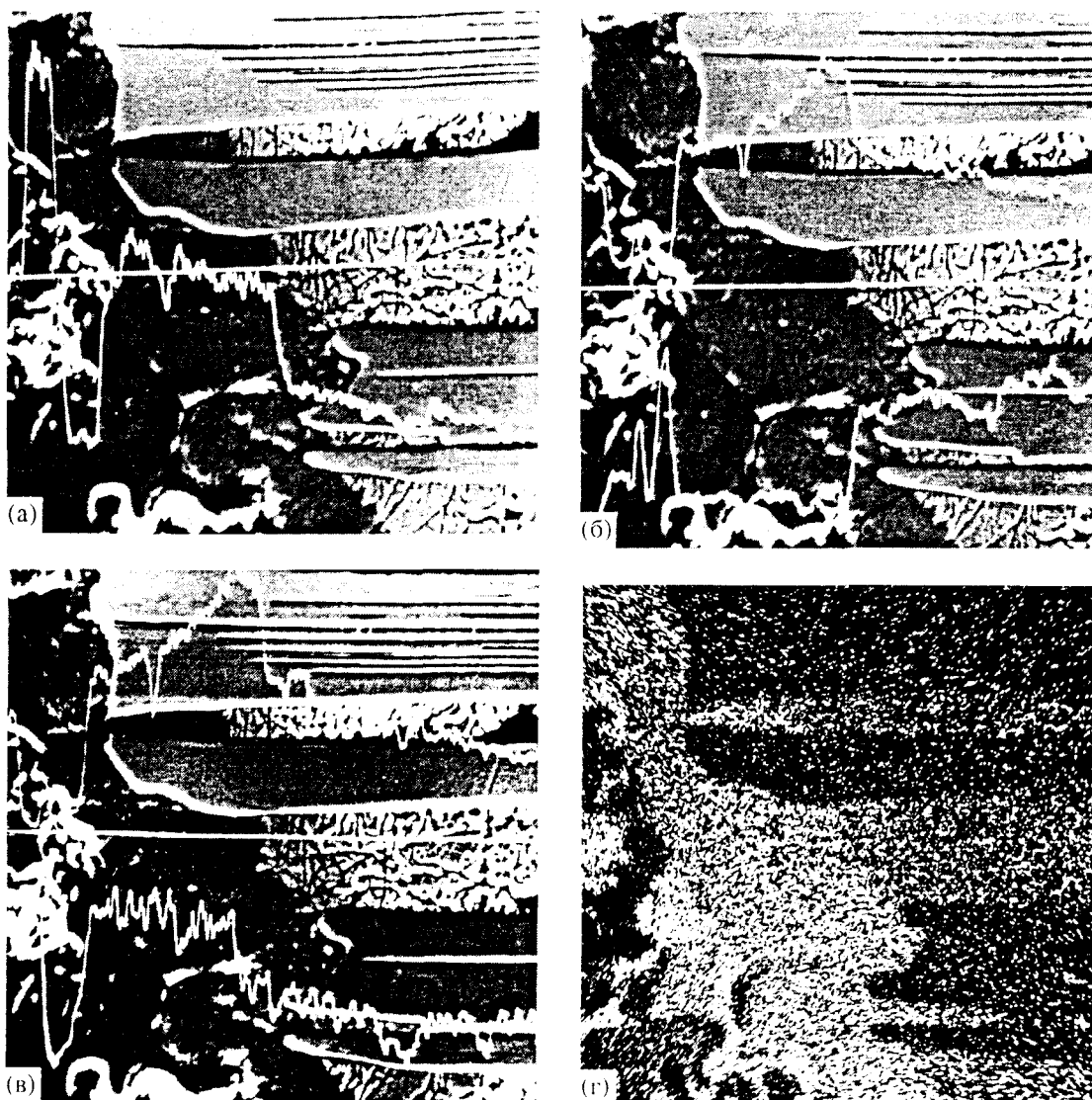


Рис. 3. Распределение компонентов по сечению титаномagnetитовой матрицы между ламеллями ильменита в структуре распада титаномagnetита (увеличение $\times 800$): а – профиль распределения титана (верхняя кривая) и магния (нижняя кривая); б – профиль распределения титана (верхняя кривая) и железа (нижняя кривая); в – профиль распределения алюминия; г – площадное распределение алюминия.

двухкоординатном самописце Hewlett-Packard. Тонкие структуры распада выявлялись путем травления в соляной кислоте.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характерные средние составы зерен титаномagnetитов и гемоильменитов изученных образцов ксенолитов приведены в табл. 1. По результатам РСМ установлено, что изученные образцы содержат рудные зерна трех типов:

1. Гемоильмениты с пластинчатыми ориентированными выделениями титаномagnetитовой шпинели, состав которых во всему зерну достаточно однороден.

2. Титаномagnetиты со структурами однофазного окисления (рис. 1).

3. Гемоильмениты с пластинчатыми ориентированными выделениями титаномagnetитов, состав которых меняется при переходе от краевых зон к центральным (рис. 2). Неоднородное распределение Fe, Ti, Mg, Al с диффузионными фронтами в краевых зонах отчетливо видно как в отдельных ламеллях, имеющих толщину 2–20 мкм (рис. 3), так и в пределах всего зерна размером 500×500 мкм² (рис. 4). Краевые зоны как гемоильменита, так и титаномagnetитовых ламеллей обогащены Mg, Al, Ti и обеднены Fe. Подобные неоднородности состава хорошо просматриваются и в отдельных зернах титаномagnetита. Некоторые примеры определения составов зерен гемоильме-

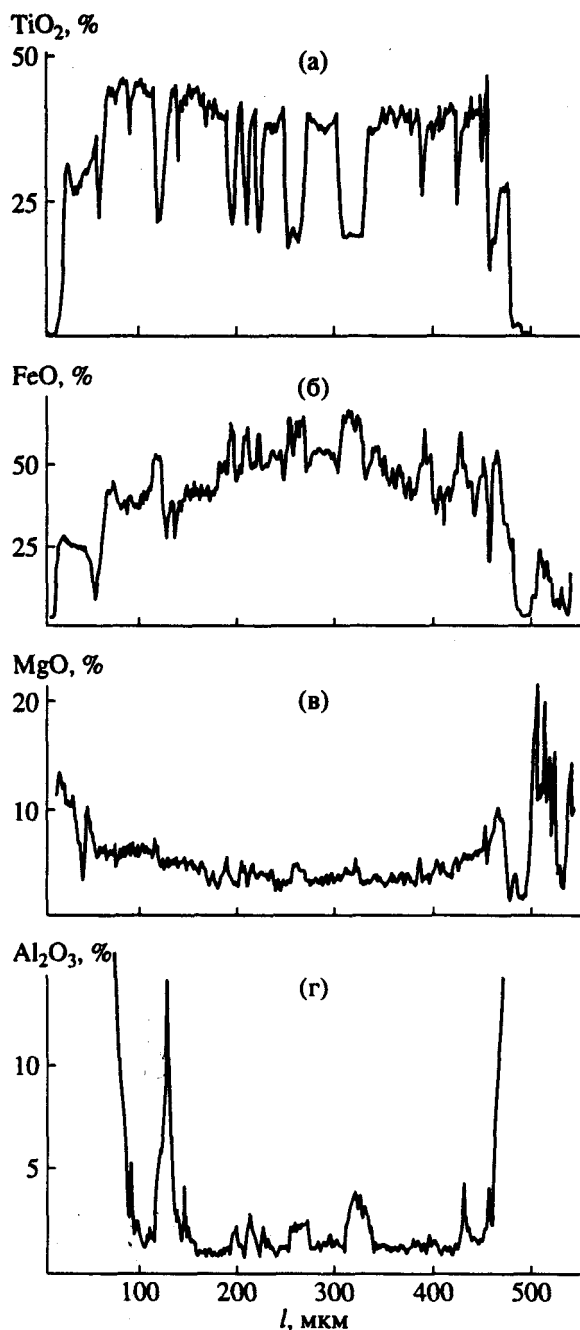


Рис. 4. Распределение компонентов по сечению гематитового зерна размером 500×500 мкм², содержащего ламеллы феррошпинели: а – профиль распределения титана; б – профиль распределения железа; в – профиль распределения магния; г – профиль распределения алюминия.

нитов и титаномagnetитов в краевых и центральных частях приведены в табл. 2.

Отметим, что в различных образцах и в различных зернах в общем наблюдается выдержанный размер ширины диффузионной зоны в 20–50 мкм.

Термомангнитные кривые указывают на сильную окисленность рудных минералов, так как во

всех случаях их температура Кюри при нагреве превышает 500°C , тогда как расчетная T_c (исходя из валового состава зерен) широко варьирует от $<200^\circ\text{C}$ до $>500^\circ\text{C}$.

Так как методом РСМ рудные фазы с точкой Кюри $>500^\circ\text{C}$ не диагностируются, следует допустить дополнительно тонкий распад с размером фаз $<1\text{--}2$ мкм.

Ветвь охлаждения на термомангнитных кривых смещена в область более низких температур. Это может быть связано с частичной гомогенизацией распавшихся зерен титаномagnetитов в процессе их нагревания. То есть кратковременный нагрев образцов до 600°C в течение 25 мин приводит к диффузионному перераспределению компонентов состава между сосуществующим гематитом и низкопримесным субмикронным низко-титановым титаномagnetитом.

В ксенолитах из кимберлитов картины диффузионного перераспределения компонентов состава не обнаружены.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные изучения ксенолитов глубинных пород показывают, что диффузионное перераспределение компонентов состава сосуществующих минеральных рудных фаз отчетливо проявлено там, где можно допустить кратковременные высокотемпературные воздействия со стороны вмещающей ксенолит магматической породы (расплава). В данном случае речь идет о ксенолитах в базаните вулкана Шаварын-Царам. Ранее было показано, что ультраосновные ксенолиты лав этого вулкана испытали высокотемпературный отжиг и соответствующую рекристаллизацию зерен [13].

Следует отметить, что в ксенолитах вообще часто фиксируются признаки неравновесного физико-химического состояния минерального вещества: наличие гетерогенности состава зерен, неоднородных по составу зон локального начального плавления в разных частях ксенолитов, реакционных каемок вокруг первичных минеральных зерен, структур распада и т.д. Диффузионные фронты также свидетельствуют о неравновесном состоянии, обусловленном относительно кратковременным пребыванием глубинного вещества в меняющихся физико-химических условиях и температурной закалкой. Проще всего эти условия можно объяснить, предположив термическое воздействие на ксенолиты глубинных горных пород в процессе подъема захвативших их магм к поверхности Земли.

Минеральная геотермобарометрия позволяет оценить температуру существования пироксенов в интервале $1000\text{--}1150^\circ\text{C}$. Оценки проводились по сосуществующим парам орто- и клинопи-

роксена, титаномагнетит-гемоильменит, в том числе и из структур распада силикатов и рудных фаз. При этих же температурах произошел распад гемоильменитов с выделением пластинчатого примесного титаномагнетита. Температура щелочно-базальтовых магм составляет около 1200°C [16]. По этим оценкам можно принять условную температуру диффузионного перераспределения компонентов составов минеральных зерен ксенолитов равной 1000°C. Уравнение диффузии $l = 2\sqrt{Dt}$, где l – ширина диффузионной зоны, D – коэффициент диффузии, t – время процесса. Коэффициент диффузии зависит от концентрации и от температуры. В работе [14] вычислен коэффициент взаимной диффузии Fe и Ti в титаномагнетите: при 1000°C $D = 5.86 \times 10^{-12}$ см²/с. На порядок меньшая величина была получена для коэффициента диффузии Ti в титаномагнетите при 1000°C в работе [15]: $D = 1.2\text{--}1.4 \times 10^{-13}$ см²/с. С этими значениями оценка длительности процесса образования диффузионных зон в рудных фазах шириной 20–50 мкм приводит к величинам от 300 ч до 3 лет. По-видимому, это верхний предел оцениваемой длительности процесса, так как с учетом реальной структуры природного вещества, содержащей разнообразие дефекты кристаллической решетки, он мог протекать значительно быстрее.

При сопоставлении профилей линейного сканирования зерен гемоильменита и титаномагнетита по различным элементам видно, что более четкие и устойчивые по характеру распределения диффузионные фронты наблюдаются для Ti относительно Fe. Это свидетельствует о меньшей подвижности ионов Ti по сравнению с Fe при одинаковых условиях диффузии. В процессе охлаждения диффузионное перераспределение титана "закрепляется" быстрее и четче, чем распределение Fe, миграция которого, вероятно, продолжается в более широких пределах изменения температуры. На более высокую подвижность ионов Fe по сравнению с Ti указывалось в ряде работ [8,9].

Повышение концентраций Mg и Al во внешних зонах рудных фаз обусловлено привнесением этих элементов из силикатов. Следует иметь в виду, что диффузионные процессы в природной среде существенно активируются присутствием флюидных и расплавных составляющих системы, находящихся в надкритическом состоянии в недрах Земли. Это обстоятельство усиливает наше предположение о преимущественно термической природе наблюдаемых диффузионных явлений в минералах ксенолитов под воздействием вмещающего их расплава.

Так как диффузионные фронты наблюдаются не на всех образцах, можно допустить, что образцы ксенолитов из Якутских кимберлитов были вынесены на поверхность в процессе взрывного

Таблица 2. Примеры определения составов титаномагнетитовой (ТМ) и гемоильменитовой фаз (ГИ) в краевой и центральной частях гемоильменитового зерна в пироксенитовых включениях из щелочных базальтов Монголии

Обр.	TiO ₂	FeO	MgO	MnO	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃
2 ТМ						
край	4.3	79.6	6.0	0.4	2.3	3.7
центр	2.9	81.6	4.6	0.3	2.3	2.0
5 ТМ						
край	23.5	62.7	4.1	0.1	0.0	7.4
центр	17.7	74.0	0.9	0.1	0.0	4.5
5 ГИ						
край	46.4	45.5	7.0	0.4	0.1	2.3
центр	44.0	47.8	3.7	0.8	0.3	1.1

извержения. При этом ксенолиты практически не испытывали прогрева со стороны кимберлитовой магмы.

Наличие почти во всех образцах микротрещин со структурой, характерной для однофазного окисления, является, по нашему мнению, свидетельством низкотемпературного окисления.

Работа была выполнена благодаря финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 93-05-9426.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылова М.Г., Геншафт Ю.С. Петрология гранат-шпинелевых ксенолитов в кайнозойских базальтах Монголии // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1991. № 5. С. 36–58.
2. Илупин И.П., Геншафт Ю.С. О метасоматических замещениях пикроильменитов кимберлитов // Минерал. журнал. 1986. Т. 8. № 5. С. 65–72.
3. Геншафт Ю.С. Текстурированность глубинных ксенолитов как отражение динамических процессов в литосфере Земли // Физика Земли. 1993. № 10. С. 44–59.
4. Mantle metasomatism / Eds. Menzies M., Hawnesworth C. N.Y.: Academic Press, 1986. 512 p.
5. Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я., Крамер В., Зайферт В. Индикаторная роль ультраосновных включений в познании глубинных условий базальтового магматизма // Океанический магматизм. Эволюция, геологическая корреляция. М.: Наука, 1986. С. 51–63.
6. Салтыковский А.Я., Геншафт Ю.С. Геодинамика кайнозойского магматизма Юго-Востока Монголии. М.: Наука, 1985. 135 с.
7. Genshaft J.S., Saltykovskiy A.J., Kramer W., Seifert W. Spinell-Lherzolite-Xenolithe in tertiären Basalten der Lausitz (DDR) und Probleme des Mantel magmatismus // Z. Geol. Wiss. 1985. Bd 13. 11/7 5. S. 647–658.