

О зеркальности элементов упругой симметрии в системе «ксенолит – вмещающая порода»

В. Л. Ильченко

Геологический институт КНЦ РАН, Анапты

Получено 31 марта 2010; опубликовано 5 июня 2010.

Акустопляризационным методом [Горбацевич и др., 2002] исследована коллекция, состоящая из 10 пар пространственно ориентированных образцов «ксенолит – вмещающая порода» (далее в тексте «К-ВП»). Установлено, что ориентировки элементов упругой симметрии образцов в парах «К-ВП» образуют в пространстве зеркальную пару с плоскостью зеркальной симметрии, совпадающей с поверхностью раздела между ксенолитом и породой-захватчиком. Причина этой зеркальности, по-видимому, обусловлена продолжительным воздействием акустической эмиссии (АЭ) со стороны ксенолита из-за его термических деформаций (нагрев-остывание), которая инициирует возникновение волнового поля, контролирующего кристаллизационный процесс окружающей среды (расплава-захватчика) в ближайших окрестностях ксенолита. Эффект зеркального отражения в структуре кристаллизующейся в окрестностях ксенолита породы может возникать в ситуации, когда под воздействием АЭ-колебаний ксенолита вокруг него создаётся система стоячих волн, способная сохранять «память» о пространственном положении его элементов упругой симметрии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустопляризационный метод; ксенолиты; анизотропия

Ссылка: Ильченко В. Л. (2010), О зеркальности элементов упругой симметрии в системе «ксенолит – вмещающая порода», *Вестник ОНЗ РАН*, 2, NZ6013, doi:10.2205/2010NZ000031, 2010

Введение

Современная геологическая наука уделяет мало внимания изучению ксенолитов «не мантийной природы», например в учебнике [Короновский и др., 2007] о них нет ни слова. На самом же деле присутствие таких ксенолитов, в особенности рудоносных, может и должно рассматриваться в определённых геологических ситуациях (например, если сложность геологического строения ведёт к искажению или маскировке геофизических полей не выходящих на поверхность рудных залежей) как важный поисковый признак [Ильченко, 2008]. Но для этого необходимо найти способ определения в пространстве точки захвата ксенолита. Такой способ, вероятно, может быть найден в результате проведения серьёзных исследований системы «ксенолит – вмещающая порода» (далее по тексту: «К-ВП») с целью построения эволюционной термодинамической модели. При создании такой модели практическое значение может иметь информация о вариациях в пространственных соотношениях упругих свойств компонентов системы «К-ВП».

Методика

Ориентированные образцы коренных пород отбирали попарно: «К-ВП». Затем из них выпиливали образцы кубической формы (прямоугольные параллелепипеды) с размером ребра ~30-35 мм, которые исследовали с помощью акустопляризационного метода (аналог оптического поляризационного метода) [Горбацевич и др., 2002], позволяющего фиксировать с заданным шагом (углом поворота образца) вариации амплитуды пропускаемых сквозь образец поляризованных сдвиговых ультразвуковых волн по мере полного поворота образца вокруг направления прозвучивания. По результатам акустоплярикопии строят круговые диаграммы (см. рис.1) или акустопляриграммы, которые служат для определения ориентировок элементов упругой симметрии на гранях куба. Данные проекции (прямые линии) являются направлениями, в которых ультразвуковые плоско поляризованные поперечные волны распространяются с максимальной скоростью (при совмещении с этими направлениями плоскости поляризации ультразвукового сигнала). В соответствии с

направлениями элементов упругой симметрии определяют скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) колебаний и составляют матрицы скоростей V_{ij} :

$$V_{ij} = \begin{vmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{vmatrix} \quad (1)$$

где V_{11} , V_{22} и V_{33} - величины скорости продольных колебаний, измеренные, в направлениях 1, 2, 3, соответственно, а остальные значения - скорости поперечных волн, а первый подстрочный индекс обозначает направление (грань) прозвучивания, второй – номер грани, в направлении которой ориентирован элемент упругой симметрии.

Значение показателя упругой анизотропии по поперечным волнам B определяют, используя данные квазиматриц и следующие формулы:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{2(V_{12} - V_{13})}{V_{12} + V_{13}}, \quad B_2 = \frac{2(V_{21} - V_{23})}{V_{21} + V_{23}}, \quad B_3 = \frac{2(V_{31} - V_{32})}{V_{31} + V_{32}}$$

- коэффициенты двулучепреломления по граням 1, 2 и 3 образца.

Коэффициент упругой анизотропии по продольным волнам рассчитывают по формуле:

$$A_p = \frac{1}{V_{cp}} \sqrt{(V_{11} - V_{cp})^2 + (V_{22} - V_{cp})^2 + (V_{33} - V_{cp})^2} \times 100\% \quad (3)$$

где $V_{cp} = (V_{11} + V_{22} + V_{33})/3$ – средняя скорость распространения продольных волн в образце.

Главная плоскость упругой симметрии образца образуется парой элементов упругой симметрии на соседних гранях, ориентированных в направлении общего ребра, в которых скорость прохождения сдвиговых волн максимальна. Принято считать, что пространственное положение плоскости упругой симметрии в породе определяется особенностями структурно-текстурного характера (одинаково ориентированными зёрнами породообразующих минералов плоско-таблитчатой или удлинённой формы). Это мнение справедливо только по отношению к породам, не испытавшим деструктивного геодинамического влияния после их консолидации. В остальных же случаях положение элементов упругой симметрии в образце определяется, главным образом, ориентировками систем микротрещин.

Плотность пород определяли методом Архимеда.

Результаты

Анализ формы акустополяриграмм изученных образцов (рис.1) даёт повод для некоторых выводов. В парах «К-ВП» (в 7 ксенолитах из 10) установлен эффект ЛААП (линейная акустическая анизотропия поглощения), типичный для пород с ярко выраженными «динамическими» (линейность, сланцеватость, гнейсовидность) текстурами [Горбачевич, 2002].

Наши образцы «динамических» текстур не имеют и можно утверждать, что причина ЛААП здесь кроется в значительном количестве деформаций, возникших вследствие резкого наложения анизотропного поля напряжений – реакции на тепловой шок, полученный ксенолитом в момент его захвата расплавом.

Очертания диаграмм образцов свидетельствуют о высокой дефектности и неоднородности строения, на что указывают такие признаки, как почти полное отсутствие симметричности по форме и размеру в противоположных парах лепестков, а также по их количеству и взаимному расположению.

Парным сравнением пространственного положения элементов упругой симметрии системы «К-ВП» установлено, что в большинстве случаев, в 2-х из 3-х одноименных направлений (парах граней) парных образцов наблюдается эффект зеркальной симметрии [Шубников и Копцик, 2002] или двойной инверсионной оси (направления 1 и 2, рис.2), выраженный в положении проекций элементов упругой симметрии на одноименных гранях.

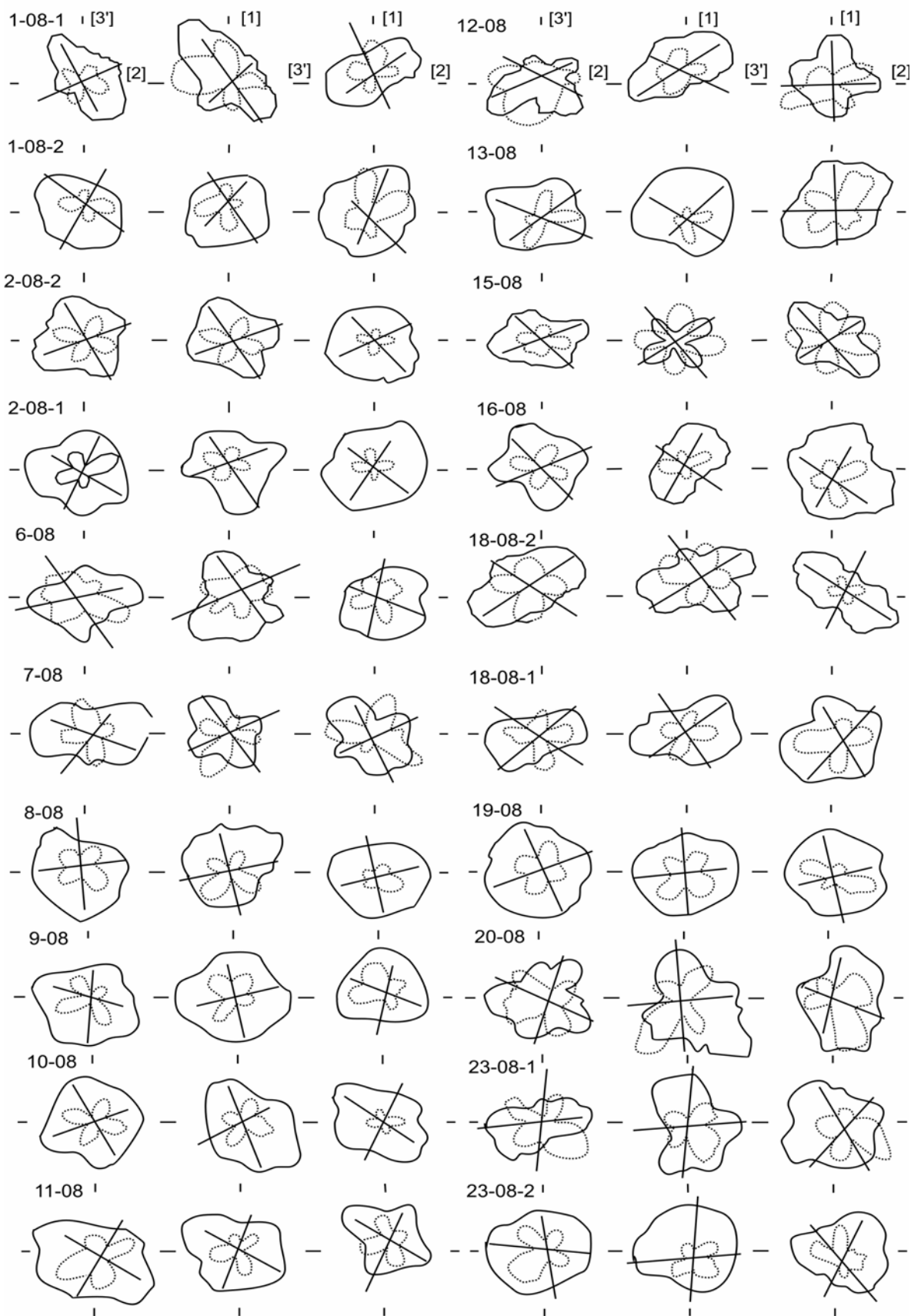


Рис.1. Акустополяриграммы 10 пар (сверху вниз: ксенолит - вмещающая порода). Сплошная линия – векторы поляризации источника и приёмника акустополярископа параллельны, пунктир – векторы скрещены. Тонкие скрещенные линии – элементы упругой симметрии. В квадратных скобках – маркировка граней образцов.

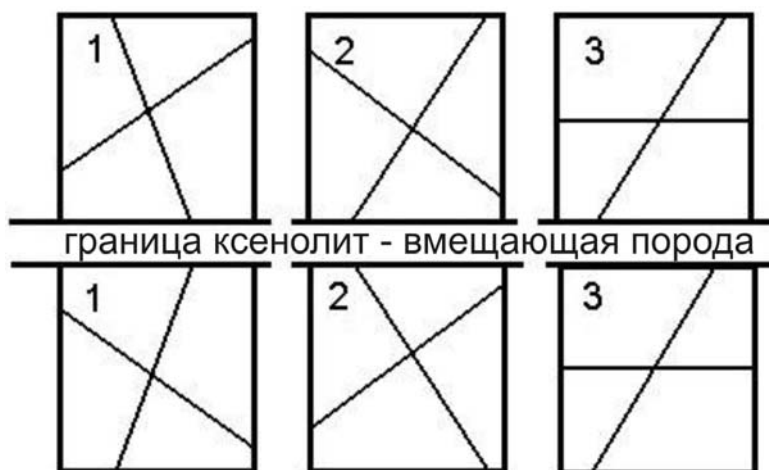


Рис.2. Типичное положение проекций элементов упругой симметрии (тонкие скрещенные линии) в парах «К-ВП». В кружках – номера граней (направления прозвучивания).

Как правило, положения проекций элементов упругой симметрии пар «К-ВП» совпадают (направление 3, рис.2) на одноименных гранях в одном из направлений. Элементы упругой симметрии ксенолита и вмещающей породы совпадают также с положением двойной инверсионной оси, расположенной нормально (субнормально) к плоскости корки закаливания ксенолита (на рис.2 двойная инверсионная ось проходит в направлении 3). Бдительного читателя, внимательно рассматривающего соотношения элементов упругой симметрии в акустополяриграммах пар «К-ВП» (рис.1) не должен смущать тот факт, что далеко не на всех приведённых на рисунке парах акустополяриграмм двойная инверсионная ось проходит в направлении 3 (как показано на рис.2). У семи пар эта ось проходит в направлении 2, у одной – в направлении 1 и лишь у двух – в направлении 3. Дело в том, что образцы нашей коллекции не являются «ориентированными» по понятиям, принятым в среде геологов-структурщиков. При отборе этих образцов строго соблюдалась лишь идентичность взаимных ориентировок в пределах пары «К-ВП». Поэтому номера граней на образцах ксенолитов и вмещающих пород оказались одинаковыми только в пределах этих пар.

Пространственные ориентировки главных плоскостей упругой симметрии в парах «К-ВП» сильно различаются, совпадение установлено в одном случае из 10.

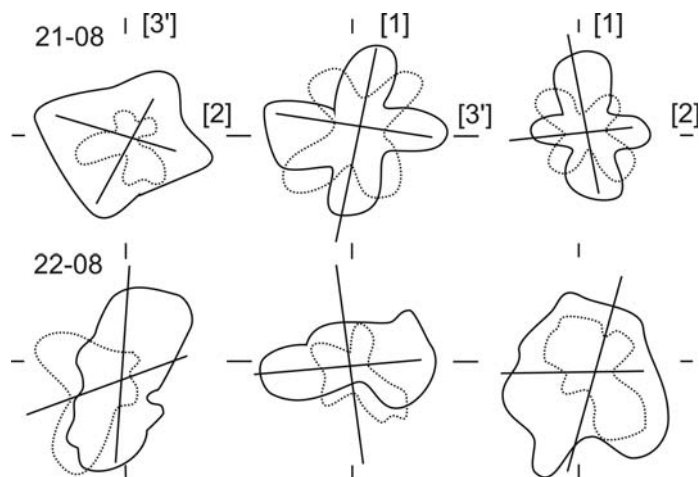


Рис.3. Акустополяриграммы пары образцов, изготовленных из одного штуфа.

Помимо пар «К-ВП», для сравнения изучены два одинаково ориентированных образца, выпиленных из одного габбро-анортозитового штуфа (между ними 2-3 см). Эти образцы оказались весьма схожими по показателям анизотропии и плотности (таблица), но они сильно различны по форме диаграмм и положению элементов упругой симметрии (рис.3). Внешний облик этой породы (габбро-анортозита) наводит на мысль о вероятном её происхождении.

ИЛЬЧЕНКО: О ЗЕРКАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОЙ СИММЕТРИИ

Таблица. 1. Упругие и плотностные свойства ксенолитов и вмещающих пород

№ пп	№ образца	Название породы	Квазиматрица скоростей, (км/с) $V_{ij} =$ $V_{11}V_{12}V_{13}$ $V_{21}V_{22}V_{23}$ $V_{31}V_{32}V_{33}$	Пространственное положение главной плоскости упругой симметрии: $A_{пл}^0/Uгол_{пл}^0$.	Показатели анизотропии: А, % В, %	Плотность, г/см ³
1	2	3	4	5	6	7
1	1-08-1	Габбронорит с сульфидами. Ксенолит.	2,22 2,83 3,09 2,80 2,71 2,91 2,99 3,18 5,23	130 / 45	<u>67,38</u> 9,54	2,87
2	1-08-2	Габбронорит вмещ. для 1-08.	6,00 3,53 3,53 3,50 6,01 3,50 3,56 3,53 6,02	215 / 50	<u>0,23</u> 0,4	2,86
3	2-08-1	Габбро, вмещающий для 2-08-2).	6,21 3,55 3,43 3,51 6,15 3,51 3,49 3,47 5,96	0 / 0	<u>3,02</u> 3,45	2,76
4	2-08-2	Габброанортозит. Ксенолит в 2-08-1.	3,31 3,56 3,56 3,61 6,38 3,60 3,59 3,53 6,05	225 / 15	<u>3,93</u> 0,56	2,78
5	6-08*	Метагаббро. Ксенолит в обр. 7-08.	1,59 2,99 2,95 3,09 5,08 2,81 - - -	310 / 25	- -	3,00
6	7-08	Габбронорит вмещающий для 6-08.	5,07 3,04 2,92 2,97 4,66 2,75 3,17 2,99 2,30	160 / 65	<u>52,72</u> 8,74	3,11
7	8-08	Габбронорит, ксенолит в обр. 9-08.	5,42 3,09 3,16 4,12 7,18 4,23 3,72 3,69 6,41	145 / 60	<u>19,70</u> 3,47	2,91
8	9-08	Габбронорит вмещающий для обр. 8-08	5,93 3,49 3,38 3,49 5,82 3,47 3,45 3,46 5,77	310 / 65	<u>1,98</u> 3,25	2,88
9	10-08	Габбронорит с сульфидами. Ксенолит.	6,10 3,62 3,61 3,75 6,43 3,63 3,71 3,61 6,05	315 / 30	<u>4,72</u> 3,32	2,97
10	11-08	Габбронорит вмещающий для 10-08.	6,37 3,80 3,72 3,73 6,48 3,84 3,65 3,84 6,59	15 / 65	<u>2,40</u> 3,51	3,04
11	12-08	Габброанортозит. Ксенолит.	5,87 3,45 3,47 3,25 5,04 3,16 3,43 3,35 5,64	80 / 50	<u>10,98</u> 2,93	2,92
12	13-08	Габбронорит вмещающий для 12-08.	6,48 3,75 3,71 3,75 6,27 3,97 3,76 3,69 6,36	170 / 35	<u>2,34</u> 5,82	2,89
13	15-08	Габбронорит. Ксенолит, краев. часть.	4,76 3,26 3,11 2,97 5,09 3,26 3,20 3,26 5,10	155 / 60	<u>5,50</u> 10,42	2,95
14	16-08	Метагаббро, вмещ. для обр. 15-08.	5,86 3,32 3,38 3,44 3,74 3,38 3,38 3,41 5,76	350 / 65	<u>33,04</u> 2,48	2,78
15	18-08-1	Габбронорит с/з, вмещ. для 18-08-2.	6,35 3,82 3,72 3,63 6,19 3,60 3,64 3,75 6,40	300 / 30	<u>2,46</u> 2,71	3,09
16	18-08-2	Габбронорит м/з. Ксенолит.	5,84 3,53 3,40 3,58 6,15 3,73	320 / 45	<u>3,70</u> 5,19	3,01

ИЛЬЧЕНКО: О ЗЕРКАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОЙ СИММЕТРИИ

			3,43 3,37 5,96			
1	2	3	4	5	6	7
17	19-08	Ксенолит м/з, габбронорит.	5,89 3,52 3,49 3,54 6,15 3,54 3,50 3,61 6,05	160 / 80	<u>3,08</u> 0,54	2,98
18	20-08	Габбронорит с/з, вмещающий 19-08.	5,12 3,55 3,36 3,48 5,43 3,52 3,34 3,40 6,68	160 / 80	<u>20,35</u> 5,59	3,03
19	23-08-1	Пироксенит. Ксенолит, краев. часть.	6,03 3,32 3,44 3,75 6,57 3,64 3,87 3,62 6,67	250 / 80	<u>7,58</u> 4,73	3,75
20	23-08-2	Габбронорит, вмещающий для обр. 23-08-1.	6,79 3,90 3,97 3,99 6,71 3,99 3,93 3,98 6,95	210 / 60	<u>2,53</u> 1,73	3,17
21	21-08	Габброанортозит пятнист., рассл.	5,58 3,32 3,32 3,81 5,94 3,43 3,43 3,50 6,02	240 / 50	<u>5,67</u> 3,52	2,85
22	22-08	Габброанортозит пятнист., рассл.	5,47 3,39 3,29 3,27 5,85 3,33 3,34 3,39 5,98	350 / 25	<u>6,50</u> 3,47	2,84

*обр.6-08 самый анизотропный (в направлении 3 не проводит ультразвук).

Здесь всё выглядит так, словно обломки из зоны дробления тела габброидов были захвачены и частично ассимилированы анортозитовым расплавом. Элементы упругой симметрии в этих образцах совпадают с границами темноцветных включений (обломков габброидов), которые могут быть рассмотрены в качестве мелких ксенолитов.

Установлено также (таблица), что значения показателей анизотропии упругих свойств (А, В) ксенолитов в большинстве случаев выше аналогичных показателей вмещающих пород. По плотности ксенолиты и вмещающие породы нашей коллекции различаются незначительно.

Обсуждение результатов

Зеркальность элементов упругой симметрии горных пород в системе «К-ВП», ранее никем не фиксировалась и, по-видимому, нуждается хотя бы в каком-нибудь объяснении.

В рассматриваемой ситуации, когда вязким расплавом захватывается ксенолит, который является твёрдым телом и, скорее всего, обладает анизотропией упругих свойств, логичным будет предположить, что во вмещающей породе нашли зеркальное отражение упругие характеристики ксенолита. Наиболее вероятным агентом силового воздействия, в такой ситуации, будут выступать генерируемые остывающим ксенолитом упругие колебания. Это предположение справедливо, поскольку большинство твёрдых сред, при нагревании и остывании деформируется с проявлением акустической эмиссии (АЭ). Так, после включения и выключения, изменение температуры таких нагревательных приборов, как утюг, паяльник и др., сопровождается АЭ - ритмичными щелчками. Таким образом, можно полагать, что формирование структуры и упругой симметрии кристаллизующейся вокруг ксенолита среды происходило под его АЭ-аккомпанемент и продолжалось непрерывно с момента захвата ксенолита расплавом и до полного остывания.

В работе [Жекамухов и Шокаров, 2000а] предложена теоретическая модель акустического эффекта кристаллизации (АЭК), базирующаяся на представлении о скачкообразном характере появления или исчезновения макрослоев и макрообластей на растущей (или плавящейся) поверхности. Согласно данной модели, картина колебаний в основных чертах воспроизводит форму наблюдаемых в экспериментах сигналов, где частота колебаний жидкости (расплава) определяется частотой возникновения скачков на фронте кристаллизации. Другой механизм возникновения АЭК основан на возможном усилении волн, распространяющихся в жидкости и в кристалле при движении границы их раздела [Жекамухов и Шокаров, 2000б].

В работе [Раутиан, 2008], посвященной рассмотрению роли различных физических неформальных аргументов, используемых при выводе геометрического закона преломления на границе двух сред, автор, в итоге, приходит к выводу, что в приграничных условиях, в периодически неоднородной среде не может быть бегущих волн. Здесь все волны стоячие.

Известно [Гурбатов, 2008], что с ростом амплитуд (интенсивностей) волн может нарушаться принцип суперпозиции: пересекаясь во времени и пространстве (эффект кросс-модуляции), сильные волны начинают взаимодействовать, обмениваясь энергией. При этом каждая из волн запоминает как характеристики «партнёров», так и материальные характеристики среды (в той области, где это взаимодействие произошло). Эта информация может «доставляться» к приёмнику самими исходными волнами, испытавшими кросс-модуляцию, а также излучаться непосредственно из области взаимодействия в виде новых спектральных компонент, отсутствовавших в исходном волновом спектре.

Рассматривая ксенолит как источник колебаний в периодически неоднородной (иной она просто быть не может) окружающей среде, в соответствии со сказанным выше, можно прийти к выводу, что генерируемые ксенолитом упругие волны трансформируются в пакеты стоячих волн. При этом генерируемые ксенолитом колебания могут быть поляризованными (в соответствии с пространственным положением его элементов упругой симметрии). Остывание и кристаллизация расплава в поле действия окружающей ксенолит системы стоячих волн, хранящих в своей конфигурации «память» о пространственных ориентировках элементов упругой симметрии ксенолита, может приводить к возникновению в новообразованной породе симметрии, зеркально отражающей элементы упругой симметрии ксенолита.

Проявление в образцах ксенолитов, обладающих массивной текстурой, эффекта ЛААП, который является типичным для пород с ярко выраженными «динамическими» текстурами (гнейсовидность и др.), по-видимому, вызвано тепловым шоком в момент попадания «холодного» ксенолита в магматический расплав. Теоретически, на поверхности ксенолита сразу должна возникнуть корка закалывания («намерзает» из расплава). Быстрая механическая реакция на тепловой шок натурализуется в распространении волны напряжений-деформаций от поверхности к центру ксенолита. В таком случае эффектом ЛААП будет отличаться не только краевая часть ксенолита и вызванный тепловым шоком стресс приведёт к развитию системы микротрещин концентрической формы по всему его объёму. Продвижение волны напряжений-деформаций от периферии к центру ксенолита не может не отразиться на состоянии ксенолитного вещества. Тепловой шок, при благоприятных условиях, даже может на какое-то время превратить ксенолит в автоколебательную систему с пульсирующей поверхностью, что также дополняет идею о контролирующей волновой роли над процессами кристаллизации расплава в ближних окрестностях ксенолита.

Выводы

Причиной зеркальности расположения в пространстве элементов упругой симметрии в системе «К-ВП», по-видимому, является волновой контроль над процессами кристаллизации вмещающей среды, обусловленный акустической эмиссией остывающего ксенолита. Акустоэмиссионные колебания способствовали возникновению в ближайших окрестностях ксенолита систем стоячих волн (или, скорее, волнового поля), способных, по-видимому, сохранять и переносить информацию о пространственном положении элементов упругой симметрии ксенолита, что, в конечном итоге, нашло своё зеркальное отражение в пространственном положении элементов упругой симметрии новообразованной породы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №-07-05-00100.

Литература

- Горбацевич Ф. Ф. (2002), *Акустополарископия породообразующих минералов и кристаллических пород*, Изд. Кольского НЦ РАН, Апатиты.
- Горбацевич Ф. Ф., О. С. Головатая, В. Л. Ильченко и др. (2002), Упругие свойства некоторых образцов пород по разрезу Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3), определенные при атмосферных условиях и условиях «in situ», *Физика Земли*, №7, 46-55.
- Гурбатов С. Н., О. В. Руденко, А. И. Саичев (2008), *Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. Приложения к нелинейной акустике*, ФИЗМАТЛИТ Москва.
- Жекамухов М. К., Х. Б. Шокаров (2000) а, О механизме возникновения акустической эмиссии при кристаллизации и плавлении вещества. I часть, *Инженерно-физический журнал*, 73, 1064-1072.
- Жекамухов М. К., Х. Б. Шокаров (2000) б, О механизме возникновения акустической эмиссии при кристаллизации и плавлении вещества. II часть. *Инженерно-физический журнал*, 73, 1073-1079.
- Ильченко В. Л. (2008), Петрофизические особенности нижнего расслоенного горизонта Панского массива (Кольский полуостров), *Связь поверхностных структур земной коры с*

ИЛЬЧЕНКО: О ЗЕРКАЛЬНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ УПРУГОЙ СИММЕТРИИ

глубинными. *Материалы 14-й международной конференции*,.. Изд-во Карельского НЦ РАН, Петрозаводск, часть 1, 233-236.

Короновский Н. В., В. И. Старостин, В. В. Авдонин (2007), *Геология для горного дела*, Издательский центр «Академия», Москва.

Раутиан С. Г. (2008), Об отражении и преломлении на границе среды с отрицательной групповой скоростью, *Успехи физических наук*, 178, 1017-1024.

Шубников А. В., В. А. Копчик (1972), *Симметрия в науке и искусстве. Издание 2-е, переработанное и дополненное* Наука, Москва.

В. Л. ИЛЬЧЕНКО Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, Тел: 8 1555 79-626;

e-mail: vadim@geoksc.apatity.ru