

## **МАЛОГЛУБИННЫЙ ОЧАГ ВУЛКАНА КЛЮЧЕВСКОЙ (ПО ДАННЫМ ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ)**

**С.А. Хубуная, Л.И. Гонтовая, С.В. Москалева**

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006,  
e-mail: hubsa@kscnet.ru*

Одной из главных петрологических проблем вулканизма островных дуг является проблема его источника, так как ни один из наиболее распространенных типов высокоглиноземистых базальтов, развитых в пределах этих структур не может быть получен непосредственным плавлением предполагаемого вещества мантии. Для Ключевской группы вулканов эта проблема стоит наиболее остро, так как здесь на ограниченной площади представлены продукты двух основных типов магм: известково-щелочной и субщелочной. По-видимому, решение проблемы лежит в возможности разноглубинного и частичного плавления вещества мантии и дальнейшего фракционирования и смешения магм в промежуточных магматических камерах. Изучение магматических очагов под Ключевской группой вулканов является одной из актуальных задач вулканологии, тесно связанной с проблемами геодинамики и прогнозом вулканических извержений.

Впервые, наличие малоглубинного расслоенного очага и выводных каналов под северо-восточным склоном вулкана Ключевской обосновали Александр Александрович Меняйлов и Софья Ивановна Набоко при изучении его извержения 1937-1938 гг. [11, 12, 13]. Позднее, на основании изучения ксенолитов третичных пород из лав побочных прорывов под северо-восточным склоном вулкана Ключевской, на это же указывал Борис Иванович Пийп [16, стр. 71].

Глубинная структура земной коры Ключевской группы вулканов исследовалась методами сейсмологии от землетрясений и взрывов, гравиметрии, МТЗ (магнитотеллурическое зондирование). [2, 3, 5, 6, 16, 17, 18, 19]. По результатам сейсмического просвечивания из одного источника взрыва было высказано предположение, что магматическое питание Ключевского вулкана, возможно, осуществляется по вертикальному столбообразному каналу примерно 2 км в поперечнике [3]. Крупные коровые или периферические очаги под вулканом по сейсмологическим данным также обнаружены не были [19]. В 1986-1987 гг. на Ключевском вулкане были выполнены детальные сейсмические и гравиметрические наблюдения, в процессе которых было показано, что аномальные особенности верхней части земной коры под конусом вулкана и его северо-восточным склоном до глубины примерно 10 км могут быть взаимосвязаны с зонами питания вулкана. [3, 8]. Однако прямых «геофизических» доказательств существования в коре периферического магматического очага получено не было. Не существовало и достоверных данных изучения вещества, которые позволяли бы связать выявленные физические аномалии с зонами магматического питания вулкана. В 1998-2000 г. на основании анализа экспериментальных данных по сейсмическому просвечиванию (1970-1971 гг. и 1986-1987 гг.) Ключевской группы вулканов, сопоставлению ее структурных особенностей с сейсмической активностью вулcano - тектонических землетрясений и результатов петрографического и петрохимического изучения вершинных извержений 1993 и 1994 гг. было показано, что в верхней части земной коры ( на глубинах 3-5 км ниже уровня моря ) могут существовать условия для формирования периферического магматического очага [1, 25].

В последние годы при изучении скоростного строения земной коры под вулканами: Этной, Невадо-дель-Руисом, Медисон Лейк, Везувием и др. широко используется метод сейсмической томографии [29, 32, 35, 36, 37 и др.]. Для всех исследованных вулканов

нов было отмечено наличие низкоскоростной зоны в верхней части Земной коры, которая связывалась с депрессиями фундамента и дополнительным воздействием разуплотнения в коре под влиянием тепла более глубокого магматического очага. Для изучения скоростной структуры вулкана Ключевской также использованы различные модификации метода сейсмотомографии [5, 28, 31]

Настоящая публикация посвящена сопоставлению результатов изучения высокоглиноземистых андезибазальтов вершинных (терминальных\*) и побочных (латеральных\*) извержений вулкана Ключевской с особенностями сейсмо-плотностной модели верхней части земной коры под вулканом.

### **Петрологические исследования**

*Методы исследования андезибазальтов.* Объектом исследования были андезибазальты латеральных и терминальных извержений 1937, 1938, 1986, 1993, 1994, 2005 и 2007 гг. вулкана Ключевской. Специальные минералогические исследования для выделения мономинеральных фракций были проведены с образцами пород латеральных прорывов 1938 г. Билюкай, Тиранус Невидимка и терминальных извержений 1993, 1994 и 2007 гг. Методика этих исследований подробно описана в нашей ранней публикации [26]. В оливинах, пироксенах и плагиоклазах высокоглиноземистых андезибазальтов 1994 и 2007 гг. были изучены кристаллические включения рудных минералов.

Анализ химических составов минералов проводился на рентгеноспектральном микроанализаторе САМЕВАХ. Условия, при которых проводился анализ минералов, расчет их концентраций и состав эталонов подробно описаны в публикации [27].

Для определения состава оливина кристаллизующегося на ликвидусе базальтового и андезибазальтового расплавов латеральных извержений был применен ряд расчетных методов, основанный на равновесии минерал-расплав и детально описанный в публикации [26, 27]. Оливин на ликвидусе андезибазальтового расплава терминальных извержений оценивался петрографическими и минералогическими методами.

Анализ главных элементов и элементов-примесей (Sc, Ba, Rb, Sr, Zr, Cu, Cr и Ni) в андезибазальтах проводился соответственно методом полного силикатного анализа и методом рентгено-флуоресцентного анализа на приборе PIONER в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Редкие земли анализировались методом масспектрометрии с индукционно-связанной плазмой в Центре исследований геологии урана г. Нанси (Франция). Предел обнаружений легких элементов – примесей на уровне 1 ppm., тяжелых – 20-40 ppm.

### *Динамика, хронология и опробование продуктов вулканических извержений*

Латеральное и терминальное извержение 1937-1938 гг. и состав его продуктов подробно описаны в публикациях [11, 12, 13]. Это единственное извержение вулкана Ключевской, которое началось с излияния терминальных андезибазальтов, а закончилось латеральными магнезиальными андезибазальтами и базальтами прорыва Билюкай на северо-восточном склоне вулкана. Нами были опробованы латеральные глыбовые потоки андезибазальтов и базальтов извержения 1938 г. Билюкай: прорывы Невидимка, Тиранус и Билюкай.

Динамика, хронология, продукты вулканических извержений, а также изменение морфологии вершинного кратера в 80-90-ые годы подробно описаны в публикациях [20, 21, 22, 23, 24]. Наиболее примечательной особенностью активности этого времени была тенденция повышения абсолютных отметок латеральных центров извержений с 2800 до 4400 м. Последнее латеральное извержение началось в июле 1989 г. и продолжалось по январь 1990 г. К концу января оно, по существу, без перерыва перешло в сильное терминальное извержение. С этого времени Ключевской вулкан извергается только через вершинный кратер.

---

\* Здесь используется терминология Б.И. Пийпа [16].

Следующее терминальное извержение вулкана Ключевской началось 19 июля 1993 г. Ему предшествовала длительная сейсмическая подготовка начавшаяся в марте 1993г. [23]. В результате излияния лавы через вершинный кратер сначала по Крестовскому, а потом по Козыревскому желобам было образовано два глыбовых потока. Оба глыбовых потока были опробованы. Терминальное эксплозивно-эффузивное извержение вулкана Ключевской закончилось 8 сентября 1993 г.

После годового перерыва и слабой фумарольной активности с 8 сентября по 2 октября 1994 г. – происходило сильное терминальное извержение. [14]. Наиболее значимыми особенностями этого извержения являются отсутствие сейсмической подготовки перед его началом и сильная плиннианская стадия в его финале с извержением пирокластических потоков высокоглиноземистых андезибазальтов в Крестовском, Апахончичском и Козыревском желобах. Были опробованы шлаковые лапили начального этапа извержения и лавы из глыб и обломков пирокластических потоков финальной стадии извержения.

С 1994 по 2003 гг. Ключевской вулкан не извергался.

Следующая активизация вершинного кратера вулкана Ключевской началась 3 июля 2003 г. По данным Лаборатории сейсмической и вулканической активности Камчатского филиала геофизической службы РАН (ИЛСВ КФ ГС РАН) извержения носили вулканский характер и лава за пределы кратера не поступала. Извержение закончилось 17 июля 2004 г.

После полугодового перерыва 13 февраля 2005 г. началось терминальное извержение вулкана Ключевской. В Крестовском желобе сформировался лавовый поток высокоглиноземистых андезибазальтов, который спустился до высоты 2500 м. Терминальное извержение продолжалось 3 месяца и закончилось 25 апреля 2005 г. [10].

В Козыревском желобе был опробован глыбовый лавовый поток.

Следующая активизация вулкана Ключевской началась в середине декабря 2006 г. (по данным (ИЛСВ КФ ГС РАН)). Лавовые потоки изливались из вершинного кратера по Крестовскому, Апахончичскому и Козыревскому желобам. К концу июля извержение прекратилось. Лавовый поток был опробован в Апахончичском желобе.

*Петрографические и минералогические особенности андезибазальтов извержения 1937-1938, 1993, 1994, 2005 и 2007 гг.*

Петрографические и минералогические особенности андезибазальтов терминальных извержений 1993, 1994, 2005 и 2007 гг. практически не отличаются. Они представлены темно-серыми массивными и пористыми породами глыбовых потоков. Структура пород порфировая, текстура массивная. Отличия в структуре пород фиксируются у андезибазальтов начального этапа извержений 1993 и 1994 гг. Они представлены субафировыми пористыми породами.

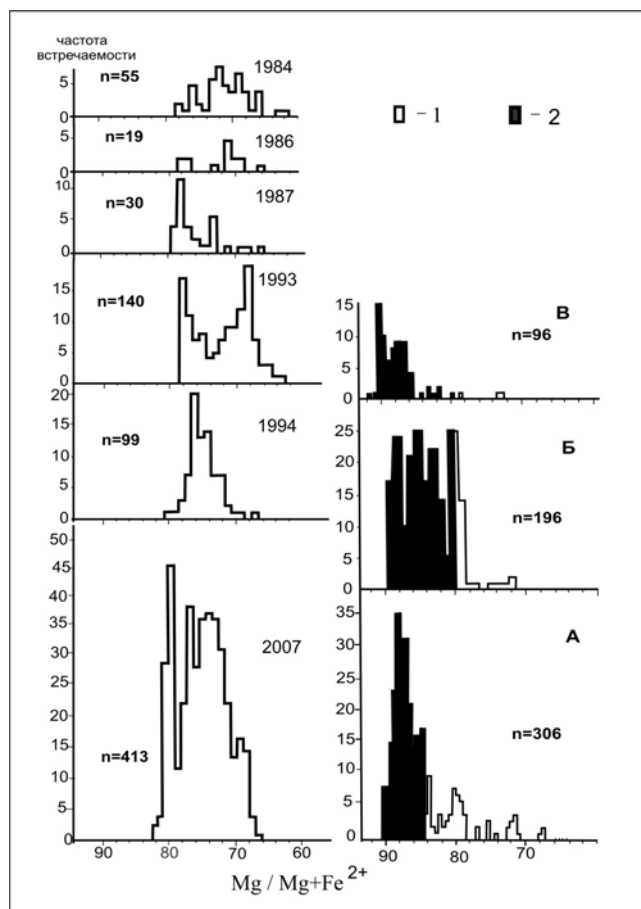
Андезибазальты терминальных извержений относятся к петрографическому типу плагиобазальтов, выделенных академиком Александром Николаевичем Заварицким на Ключевском вулкане [7]. Наиболее характерной их чертой является резкое преобладание плагиоклаза над темноцветными минералами. При этом, наблюдаются постепенные переходы размеров частиц от микролитов плагиоклаза до крупных (1-2 мм) порфировых выделений. (An<sub>86-55</sub>) – 20-25% (от объема породы – серийно-порфировая структура. Следует подчеркнуть, что фенокристаллы темноцветных минералов почти всегда меньше (0.2-0.5 мм). Их порфировые выделения представлены, оливином (Fo<sub>82-65</sub>) – 2-3% и единичными кристаллами клинопироксена (Wo<sub>43-34</sub>, En<sub>43-46</sub>, Fs<sub>14-20</sub>) и ортопироксена (Wo<sub>4-9</sub> En<sub>66-62</sub> Fs<sub>30-29</sub>). Основная масса андезибазальтов сложена светло-бурым или черным вулканическим стеклом, игольчатыми микролитами плагиоклаза (An<sub>80-55</sub>), пижонита (Wo<sub>9-13</sub>, En<sub>62-63</sub>, Fs<sub>29-24</sub>), оливина (Fo<sub>75-65</sub>) и магнетита. Кристаллические фазы рудных минералов в фенокристаллах оливинов, пироксенов, плагиоклазов и основной массы представлены магнетитом, с широким спектром составов. При этом наиболее глиноземистые и магнезиальные магнетиты присутствуют в виде включений в пла-

гиоклазах, оливинах и пироксенах. Титаномагнетиты встречены в виде единичных акцессорных минералов, а также заключены в пироксен-оливин – плагиоклазовом мезостази основной массы.

Обломки и глыбы лав пирокластических потоков терминального извержения 1994 г. несколько отличаются от вышеописанных андезибазальтов присутствием многочисленных гомеогенных включений, представленных в основном лейкократовыми плагиоклазовыми кумулатами. Некоторые гомеогенные включения обогащены магнетитом (до 5%). По-видимому двухлетнее стояние магмы в камере вулкана привело к кумуляции магнетита и части раскристаллизованных обломков более ранних извержений. По петрографическим и минералогическим характеристикам андезибазальты извержения 1993, 1994, 2005 и 2007 гг. сходны с андезитобазальтами «лавы главного кратера и шлаковых лаппили» вершинного извержения 1937-1938 гг. [13].

Петрографические и минералогические особенности латеральных андезибазальтов Билюкай, Тиранус и Невидимка извержения 1938 г. подробно освещены в публикациях [12, 13, 26, 27]. Наиболее яркими петрографическими и минералогическими особенностями этих пород, отличающими их от высокоглиноземистых андезибазальтов латеральных извержений вулкана Ключевской является присутствие крупных (до 5 мм) идиоморфных кристаллов клинопироксенов и оливинов (Fo<sub>90-85</sub>) с включениями хромистой шпинели и практически отсутствием ромбического пироксена [12, 26]. Кристаллы оливинов и пироксенов часто образуют сростки и придают породе гломеропорфиновый облик. Высокомагнезиальные ксенокристаллы оливинов присутствуют во всех без исключения латеральных прорывах высокоглиноземистых базальтов и андезибазальтов [14,33]. Для выяснения присутствия подобных ксенокристаллов в лавах терминальных извержений 1993, 1994 и 2007 гг. были проведены

специальные минералогические исследования описанные выше.



**Рис.1.** Составы оливинов андезибазальтов и базальтов вулкана Ключевской. Условные обозначения: А, Б, В – Латеральные прорывы 1938 г., соответственно Билюкай, Тиранус, Невидимка. 1- фенокристаллы и микролиты оливинов; 2- ксенокристаллы оливинов; n – количество анализов. Даты на рисунке – год извержения

*Оценка состава оливина на ликвидусе латеральных и терминальных андезибазальтов*

Результаты рентгеноспектральных микрозондовых анализов из оливинов протолочных проб указывают на то, что состав фенокристаллов оливинов всех терминальных извержений варьирует Fo<sub>82-65</sub>. (рис. 1). Наиболее магнезиальные фенокристаллы оливинов из сростков с плагиоклазом и микро-включения оливинов в плагиоклазах андезибазальтов терминальных извержений, также

соответствуют  $F_{080-82}$ . Все это позволяет считать, что состав оливина на котектике с плагиоклазом соответствовал  $F_{082}$ . Таким образом в андезибазальтах терминальных извержений ксенокристы высокомагнезиальных оливинов отсутствуют.

Оценка состава оливина на ликвидусе андезибазальтов латеральных извержений 1938 г.: Билюкай, Тиранус и Невидимка была проведена расчетными методами подробно описанными в публикации [24]. Наиболее яркой чертой высокоглиноземистых андезибазальтов латеральных извержений 1938 г. (их петрографическим лицом) является присутствие вкрапленников высокомагнезиального оливина ( $F_{091-89}$ ) с включениями высокохромистой ( $Cr/Cr+Al^{3+}=55-60$ ) шпинели, которые могут быть равновесны с первичными мантийными расплавами [26]. В то же время наблюдается систематическое несоответствие расчетных составов оливинов на ликвидусе, большей части реальных составов фенокристаллов оливинов в андезибазальтах и базальтах латеральных прорывов (см. рис. 1). Наиболее магнезиальные разности фенокристаллов оливинов ( $F_{091-89}$ ) не встречаются в базальтах островных дуг. Они характерны для ультраосновных интрузий. Широкие интервалы магнезиальности фенокристаллов оливинов ( $F_{091-75}$ ) в одном образце рассматриваемых латеральных андезибазальтов, совместное нахождение крупных высокомагнезиальных ( $F_{091-89}$ ) кристаллов с незональными ядрами с фенокристаллами низкомагнезиальных ( $F_{081-75}$ ) оливинов свидетельствует о возможности механического (конвективного) перемешивания кристаллов оливинов и пироксенов образованных при разной температуре с транспортирующим их андезибазальтовым расплавом в промежуточных магматических камерах.

#### **Геохимические особенности продуктов терминальных и латеральных извержений**

По химическому составу большинство рассматриваемых пород лав, шлаков и пеплов терминальных извержений относятся к известково-щелочным высокоглиноземистым андезибазальтам (табл. 1). В этой публикации используется классификация определяющая название породы по химическому составу [9.]. Лавы с содержанием  $SiO_2$  до 52.5 (мас.%) относятся к базальтам. Лавы с содержанием  $SiO_2$  соответствующим от 52.5 до 57 (мас.%) относятся к андезибазальтам. Лавы терминального извержения 1993г. относятся к высокоглиноземистым андезибазальтам. При этом конечные порции лав извержения 1993г. излившиеся в Козыревском желобе обогащены  $MgO$  и  $SiO_2$  по сравнению с более ранними аналогами в Крестовском желобе (см. табл. 1).

Лавы терминального извержения 1994 г в еще большей степени дифференцированы (таб. 1) Субафировые шлаковые лапилли относятся к андезибазальтам, близким по содержанию  $SiO_2$  к андезитам ( $SiO_2 = 55.56-54.98$ ). В то же время наиболее поздние лавы заключительного этапа извержения из пирокластического потока в Крестовском желобе близки к высокоглиноземистым базальтам (см. табл. 1). Лавы и пеплы терминальных извержений 2005 и 2007 годов относятся к высокоглиноземистым андезибазальтам с содержанием  $SiO_2$  свыше 54% (см. табл. 1). К сожалению, лавовые потоки этих извержений представлены по одному образцу каждый, поэтому здесь невозможно судить о дифференциации магмы. В то же время, анализ химических составов андезибазальтов терминальных извержений 1993 и 1994 гг. свидетельствует о возможности дифференциации андезибазальтовой магмы в промежуточной камере. На это же указывает изучение элементов-примесей в терминальных и латеральных андезибазальтах.

#### *Элементы примеси в продуктах терминальных и латеральных извержений*

Андезибазальты терминальных и латеральных извержений на вариационных диаграммах показывают закономерные тренды изменений концентраций элементов – примесей (рис. 2). С убывание содержания  $MgO$  в вулканитах уменьшаются концентрации  $Cr$  и  $Ni$  и увеличиваются -  $Zr$ ,  $Sr$ ,  $Rb$ ,  $Cu$ ,  $Ba$ . При этом точки составов терминальных андезибазальтов образуют компактное поле в низкомагнезиальном конце трендов.

Табл.1. Составы лав и пеплов терминальных извержений вулкана Ключевской

№ обр. Оксиды	I		II			III			IV						
	264	2	10-10-1	10-10-5	10-8	10-9	Б-1	Б-2	4	11	К1	К2	892-1	892-2	ХУ-07 КЛ
SiO <sub>2</sub>	54,45	54,38	54,00	53,98	53,91	53,47	55,56	54,98	52,35	52,66	54,50	54,52	54,26	54,00	54,33
TiO <sub>2</sub>	1,10	0,76	0,81	1,02	0,85	0,94	1,03	1,02	0,86	0,84	1,07	1,08	1,10	1,10	1,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,42	18,31	19,91	19,80	18,63	18,14	17,81	18,04	16,79	18,29	17,18	17,29	17,50	17,42	17,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,45	2,98	2,70	2,68	3,23	4,51	-	1,43	3,01	3,34	2,60	2,48	2,10	2,10	1,98
FeO	5,94	5,37	5,00	5,04	5,17	4,41	6,04	6,26	6,61	5,98	6,37	6,37	6,80	6,80	7,04
MnO	0,29	0,15	0,18	0,18	0,22	0,24	0,15	0,14	0,13	0,16	0,08	0,08	0,18	0,18	0,177
MgO	5,12	4,50	3,8,0	3,76	4,76	5,20	5,22	5,10	7,00	5,84	5,28	4,82	5,19	5,84	7,99
CaO	8,31	8,64	9,50	8,94	9,20	9,14	9,58	8,20	8,78	7,14	7,94	7,96	8,10	8,18	4,79
Na <sub>2</sub> O	3,43	1,54	3,08	3,25	3,00	2,90	2,65	3,04	3,04	3,04	3,61	3,78	3,48	3,40	3,14
K <sub>2</sub> O	1,19	3,16	1,02	1,23	1,07	1,07	1,15	1,15	1,02	1,26	1,15	1,15	1,15	1,15	0,92
H <sub>2</sub> O-		0,02	0,09	0,11	0,01		0,1	0,1	н.о.	0,20.		0,0	0,0	0,0	
п.п.н.	0,12		0,16	0,22	0,14	0,15	0,72	0,68	0,12	0,59	0,0	0,0	0,0	0,0	0,44
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,32		0,22	0,19	0,22	0,22	0,22	0,20	0,24	0,23	0,19	0,18	0,18	0,18	0,14
Сумма	100,18	99,81	100,5	100,39	100,28	100,39	100,13	100,2	100,09	99,57	99,97	99,71	100,04	100,33	99,97

Примечания: Анализы выполнены в Аналитическом центре института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

I – Лава главного кратера терминального извержения 1937 г. [11]; 2 – лавилли из вершинного кратера, извержение 1937 г. [11];

II – Терминальное извержение 1993 г. Лавы из Крестовского желоба – 10-10-1, 10-10-5; лавы из Козыревского желоба – 10-8, 10-9;

пепел, собранный в п. Ключи – 11. Аналитик Округина А. И.; III – Терминальное извержение 1994 г. Шлаки, собранные в 28 км от

вершины вулкана – Б-1, Б-2, аналитик Н.А. Соловьева; лавы из пирокластического потока в Крестовском желобе на высоте 3100 м – 4,

11, аналитик Т.Г. Осетрова; IV – Терминальное извержение 2005 г.. Пепел, собранный в п. Ключи – К1, К2. Лавы из Крестовского

желоба – 892-1, 892-2, аналитик В. В. Дунин-Барковская; ХУ-07 КЛ – лава из Алахоничского желоба, извержение 2007 г., аналитики

Н.А.Соловьева, Е. В. Каргашева.

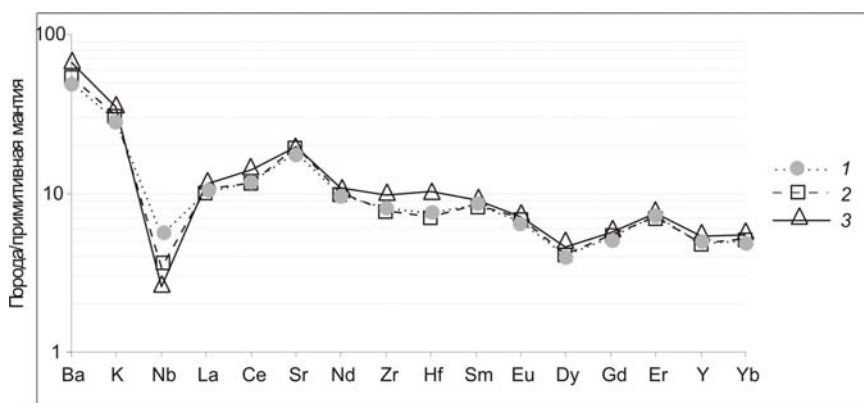


**Рис. 2.** Диаграмма составов базальтов и андезитобазальтов вулкана Ключевской. Условные обозначения: 1 – высокоглиноземистые андезитобазальты термальных извержений 1986, 1993, 1994, 2005 и 2007 гг.; 2 – высокоглиноземистые андезитобазальты латеральных извержений Невидимки Тирануса и базальты Заварицкого; 3 – магниезные базальты латеральных прорывов.

Если изменение концентраций элементов группы железа можно объяснить перераспределением оливина с хромшпинелидом в магматической камере, то, Zr, Sr, Rb, Cu, Ba не входят ни в одну из ранних кристаллических фаз в магниезных базальтах. Их содержания в породах отражают устойчивые геохимические связи между латеральными магниезными базальтами и андезитобазальтами и терминальными андезитобазальтами, свидетельствующими об образовании всех пород из одного магматического источника. Терминальные андезитобазальты по содержанию некогерентных элементов и редких щелочей могут рассматриваться как остаточные расплавы магниезных базальтовых магм, так как точки их составов образуют непрерывные пологие тренды. В тоже время, резкое понижение кон-

центраций хрома в латеральных андезитобазальтах по сравнению с латеральными аналогами, как показано выше, обусловлено отсутствием в них ксенокристов высокомагниезных оливинов с хромистой шпинелью. Последнее, вероятно, связано с большей высотой извержений терминальных базальтов (4750 м). Близкие по  $\text{SiO}_2$  латеральные андезитобазальты Невидимки и Тирануса извергались существенно ниже соответственно 1160м и 1000м. Они содержат многочисленные ксенокристы высокомагниезного оливина, и поэтому обогащены Cr (см. рис. 2). Вероятно, андезитобазальтовая магма терминальных извержений поступала из верхней части дифференцированного очага, не затронутого процессами конвективного перемешивания.

Результаты изучения РЗЭ (редкоземельных элементов) в андезитобазальтах латеральных и терминальных извержений 1938 и 1986 гг., также указывают на единый источник из которого они образовались. Результаты представлены в виде спайдердиаграммы (рис. 3), в которой их составы нормализованы к примитивному мантийному веществу по А.В.Хоффману [30]. Анализ этой диаграммы позволяет считать, что изученные андезитобазальты несмотря на принадлежность к разным по времени извержениям образовались из одного источника. Они обладают геохимическими особенностями свойственными только для терминальных и латеральных андезитобазальтов вулкана Ключевской –



**Рис. 3.** Составы РЗЭ в андезибазальтах вулкана Ключевской.  
Условные обозначения:  
1 – терминальное извержение 1986 г.; латеральные извержения 1938 г.;  
2 – Невидимка;  
3 – Тиранус

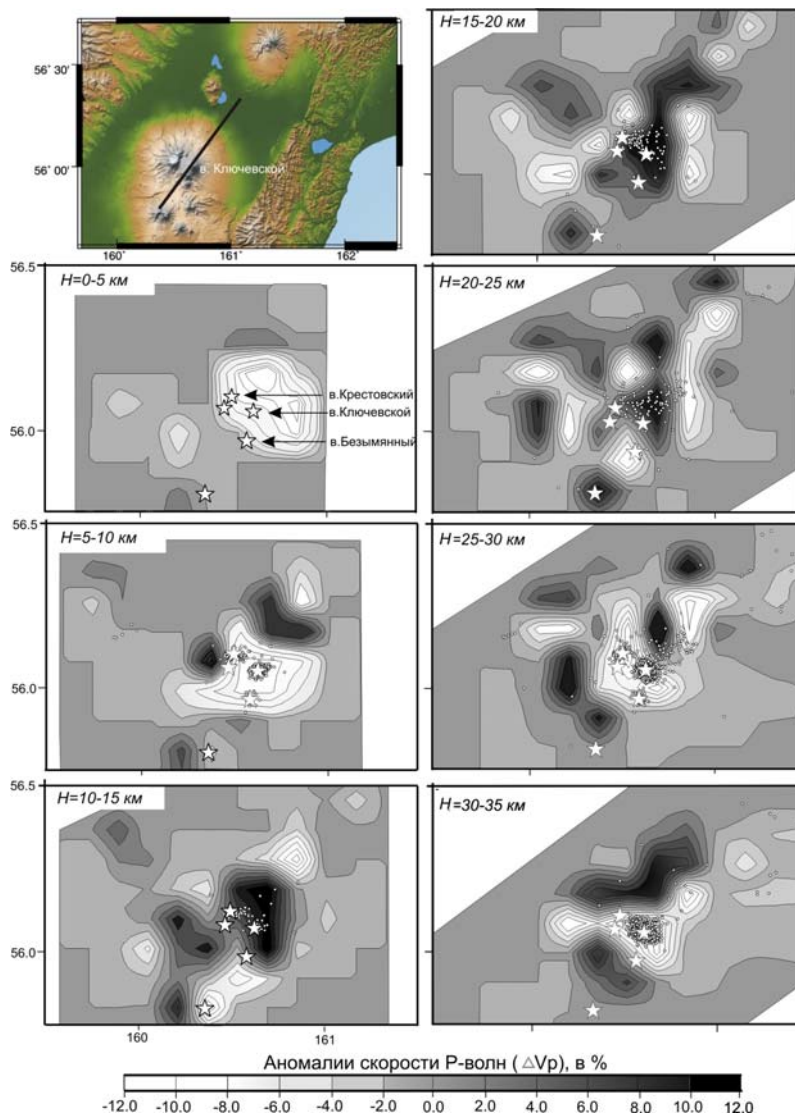
дефицитом К по отношению к Ва. Кроме того, они характеризуются всеми особенностями, типичными для островодужных известково-щелочных магм: отрицательными аномалиями в содержаниях высокозарядных элементов, таких как Nb, Ti и отчетливыми положительными аномалиями в содержаниях крупно-ионных литофильных элементов - K, Rb, Ba, Sr. Спектр РЗЭ в исследованных породах характеризуется обогащением легких РЗЭ над тяжелыми, характерным для известково-щелочных магм.

### Геофизические исследования

Для решения поставленной задачи был сделан анализ результатов исследований сейсмологических структуры земной коры в районе Ключевской группы вулканов за более чем 30-летний период. К ним относятся данные ГСЗ (глубинное сейсмическое зондирование) [1], КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) [3, 17], гравиметрии [8], сейсмотомографии на Р- и S-волнах землетрясений [5, 28, 30, 34,]. Целью такого анализа явилась попытка выявления коровых, в частности малоглубинных магматических очагов под вулканом Ключевской.

*Объемная скоростная модель земной коры под Ключевским вулканом* была рассчитана по временам вступлений Р- и S-волн от вулcano-тектонических (ВТ) землетрясений с использованием метода сейсмической томографии [28, 34]. По сравнению с другими результатами [5, 31], данная модификация позволила значительно увеличить пространственную разрешенность скоростной модели и выявить низко- и высокоскоростные аномальные зоны под вулканом. На рис. 4 приведены карты аномалий скорости  $V_p$ , которые иллюстрируют послойные горизонтальные сечения трехмерной скоростной модели. На каждое сечение спроецированы землетрясения, соответствующие данному слою. На скоростных сечениях просматривается четкая взаимосвязь характера сейсмичности с рисунком аномалий скорости. В интервале глубин 25-35 км выделена низкоскоростная зона – вероятный *магматический очаг в нижней части земной коры*. Вершина вулкана Ключевской проецируется на центральную часть этой аномальной области. Здесь же концентрируются длиннопериодные землетрясения, которые связываются с поступлением расплавов (флюидов) из верхней мантии [5]. *Средняя часть земной коры* включает область повышенной (на 6-10%) скорости  $V_p$ . С ней связаны ВТ землетрясения приуроченные к границам скоростных градиентов, возможно, к разломной зоне. Эта зона выражена цепочкой тектонических землетрясений по линии, соединяющей вершины вулканов Крестовский и Ключевской (см. сечения с глубиной 15-20, 25-30 км). По этой зоне может поступать магма из нижней коры в ее верхние слои и далее к поверхности и вершине Ключевского вулкана. Если вернуться к результатам ГСЗ 70-х годов [2], на основании которых составлено представление о магматическом питании вулкана по столбообразному каналу, пересекающему земную кору, то противо-



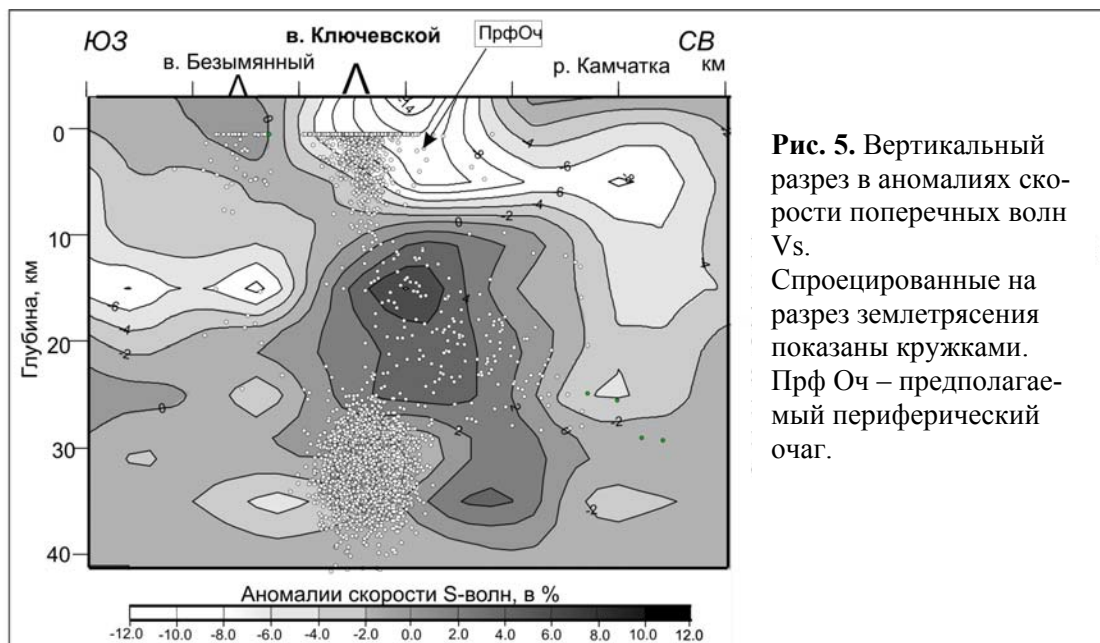


**Рис. 4.** Карты аномалий скорости продольных волн  $V_p$ . Карты приведены для слоев земной коры 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-35 км. Спроецированные на карты землетрясения показаны кружками.

речий между результатами обоих методов не существует. Вероятность поступления расплавов из очага в нижней части земной коры к вершине вулкана очевидна. Однако пути поступления магматических расплавов в нашей интерпретации [26] и в публикации [1] - разные.

В *верхней части земной коры* под активными вулканами скорость значительно понижена (до -15% по отношению к средней). Обращает на себя внимание, что низкоскоростная аномалия в интервале 0-5 км смещена к северо-восточной части конуса Ключевского вулкана. К аномалии

в верхней части земной коры приурочены ВТ землетрясения под вулканами Ключевской, Безимьянный, Крестовский, которые, вероятно, связаны с активными процессами вокруг магматических каналов.



**Рис. 5.** Вертикальный разрез в аномалиях скорости поперечных волн  $V_s$ . Спроецированные на разрез землетрясения показаны кружками. Прф Оч – предполагаемый периферический очаг.

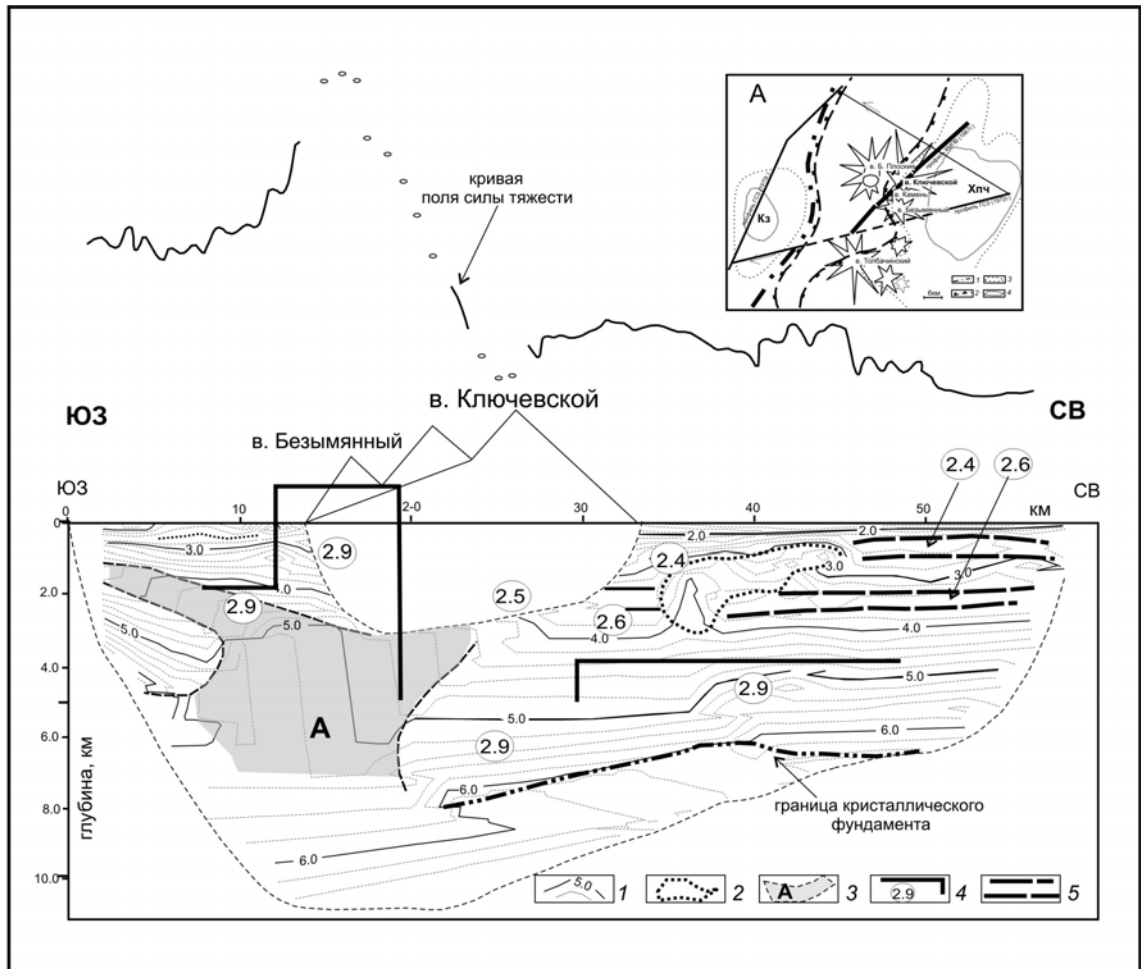
На рис. 5 показано распределение аномалий скорости поперечных волн ( $V_s$ ) вдоль вертикального сечения объемной модели. Профиль ориентирован по направлению юго-запад-северо-восток и пересекает Ключевской вулкан. Его положение соответствует профилю КМПВ, вдоль которого одновременно выполнялись детальные гравиметрические наблюдения. Из приведенного рисунка следует, что наиболее контрастная низкоскоростная аномальная зона шириной не менее 10 км наблюдается в верхней части земной коры до глубины примерно 5 км. Скорость  $V_s$  в ее пределах понижена на 8-14%, что вероятно обусловлено присутствием расплавов (флюидов). Эта зона несколько смещена относительно вершины вулкана к северо-востоку и находится под латеральными конусами. Аналогичный рисунок скоростного поля, хотя и менее контрастно выраженный, характерен и для восточного склона вулкана Ключевской. Очевидно, полученные данные позволяют предполагать, что выявленная низкоскоростная зона связана с малоглубинным периферическим магматическим очагом.

Более детально верхняя часть земной коры (до глубины примерно 7-8 км) под вулканом Ключевской изучена методами КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) и гравиметрии [3, 8]. Сейсмические исследования выполнялись с использованием Р-волн от взрывов. При просвечивании толщи верхней коры под столь гигантским вулканом был отмечен такой феномен как отсутствие в динамике наблюдаемых волн явных признаков существования аномальной зоны его магматического питания. Хотя на основании интерпретация кинематических параметров и данных гравитационного моделирования присутствие разуплотненной области под постройкой вулкана устанавливалось надежно. Она располагалась в интервале глубин 0-5 км и ее ширина достигала не менее 10 км. Столь же надежно были выделены разуплотненные слои под северо-восточным склоном вулкана и аномальные включения, которые по значениям скорости и плотности можно предположительно связывать с основными и ультраосновными закристаллизованными интрузиями – корнями исторических и доисторических латеральных извержений. Результаты этих исследований схематично могут быть проиллюстрированы на рис. 6. Совместно с данными сейсмотомографического моделирования эти результаты позволяют с большой долей уверенности предполагать существование под Ключевским вулканом периферического магматического очага. Его кровля по геофизическим данным не устанавливается однозначно и вероятно расположена не глубже уровня моря.

### **Заключение**

Результаты комплексных геофизических исследований в районе вулкана Ключевской позволили надежно выделить под вулканом и его северным, северо-восточным и восточным склонами в интервале глубин 0-5 км аномальную зону, которую можно связывать с долгоживущим малоглубинным очагом латеральных и терминальных извержений магнезиальных и высокоглиноземистых андезибазальтов и базальтов. Пути поступления магмы из низов коры в ее среднюю часть и далее в малоглубинный очаг наиболее вероятно фиксируются под северо-восточным склоном вулкана Ключевской.

Результаты геофизического изучения земной коры под вулканом Ключевским находится в хорошем соответствии с результатами петрологического изучения терминальных и латеральных андезибазальтов. Обязательное присутствие в андезибазальтах и базальтах латеральных прорывов 1938 г. ксенокристаллов высокомагнезиальных оливинов с хромистой шпинелью, являющихся неравновесными по составу с транспортирующей их андезибазальтовой и базальтовой магмой, полная аналогия их составов ксенокристам латеральных магнезиальных базальтов [26], наличие единого геохимического тренда высокоглиноземистых терминальных андезибазальтов 1986, 1993, 1994, 2005, 2007 гг., латеральных андезибазальтов и базальтов 1938 г. свидетельствует о возможной принадлежности высокоглиноземистых расплавов к продуктам фракционной кристаллизации исходных магнезиальных магм в промежуточном очаге. Однако балансо-



**Рис. 6.** Сейсмоплотностной разрез вдоль профиля КМПВ. Условные обозначения: 1 - изолинии абсолютных значений скорости  $V_p$ ; 2- высокоскоростные включения; 3 - аномальная зона с постоянным скоростным градиентом; 4 - зоны повышенных значений плотности; 5 - низкоскоростные слои (волноводы). Значения скорости подписаны на изолиниях, плотности ( $г/см^3$ ) - кружках. На врезке А показаны положения профилей ГСЗ и КМПВ на схеме основных тектонических элементов района исследований (взято из [2]): 1- Центрально-Камчатский разлом; 2- границы погребенных поднятий; 3-впадины; 4 - контуры наиболее глубоких частей впадин: Кз – Козыревская впадина. Хпч – Хапическая впадина. Стрелками отмечены сейсмические лучи, которые ограничивали область просвечивания вулканов.

вые расчеты, проведенные с латеральными магнезиальными базальтами не позволяют рассматривать подобный процесс, в качестве единственной причины образования высокоглиноземистых расплавов [26]. Он осложняется процессами конвективного перемешивания магм в промежуточной камере вулкана Ключевской. На возможность подобного образования терминальных высокоглиноземистых андезибазальтов прямо указывают вулканологические наблюдения, последовательность извержения терминальных и латеральных высокоглиноземистых андезибазальтовых и базальтовых лав 1937-1938 гг. [11, 13]. Терминальное извержение андезибазальтов вулкана Ключевской в 1937 г. перешло в латеральное извержение на западном склоне его постройки с образованием высокоглиноземистых прорывов Камули, Радист, Перевальный, а позднее в 1938 г. на его восточном склоне с образованием высокоглиноземистых прорывов (сверху вниз) Козей, Невидимка и магнезиальных – Тиранус, Билюкай. Магма поднялась из расслоенного малоглубинного очага по дайке северо-восточного простирания. Верхняя часть дайки состояла из «плюма» высокоглиноземистой андезибазальтовой магмы, а нижняя часть состояла из магнезиальных магм (но не расплавов) уже насыщенных вышеописанными крупными ксенокристаллами оливинов и пироксенов. При этом либо в

периферическом очаге, либо в поднимающееся дайке между латеральными верхними высокоглиноземистыми и нижними магнезиальными магмами протекали процессы перемешивания или взмучивания горизонтов кумулятивного оливина и клинопироксена, в результате которых, ксеногенные высокомагнезиальные оливины и клинопироксены фиксируются в продуктах латеральных высокоглиноземистых магм. Реальность подобной модели образования высокоглиноземистой андезибазальтовой магмы подтверждается многочисленными наблюдениями по обогащению оливинами и пироксенами (до 9% от объема породы) конечных порций потоков высокоглиноземистых базальтов и андезитобазальтов [4, 16]. Плагиоклаз и магнетит также участвуют в процессе гравитационного разделения минералов в промежуточной камере вулкана, как это видно из многочисленных лейкократовых и магнетитовых гомеогенных включений в андезибазальтах 1994 г. или в потоке высокоглиноземистых базальтов прорыва Пийпа в 1966 г. [4]. Здесь в начале извержения в изливающимся потоке лав фиксировалось увеличение количества плагиоклаза и лишь к концу извержения лава была сильно обогащена высокомагнезиальными пироксенами и оливинами.

Изучение высокоглиноземистых андезибазальтов терминальных извержений вулкана Ключевской показало, что магма с ксеногенными оливинами и пироксенами не могла достичь вершины постройки, вероятно из-за ее большой высоты. В то же время высокоглиноземистые андезибазальты латеральных прорывов 1938 г. и все высокоглиноземистые базальты исторических и доисторических извержений содержат подобные ксенокристаллы. Наиболее вероятно, в 1937, 1986, 1993, 2005, 2007 гг. на поверхность была извергнута только верхняя часть магматической камеры. В 1994 и 1938 гг., в результате терминальных и латеральных извержений была захвачена магма с более глубоких горизонтов малоглубинного очага.

Авторы выражают благодарность Я.Д. Муравьеву, А.А. Овсянникову за предоставленные образцы андезибазальтов, Ю.В. Демянчук – за предоставленные образцы пеплов, С.Л. Сенюкову за плодотворное обсуждение извержений 2003, 2005 и 2007 гг., И.Л. Беловой и И.Л. Ототюк за помощь в оформлении рукописи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аносов Г.И.* Геологическое строение и геодинамика вулканов // В кн. Природные опасности России, сейсмические опасности. Москва. 2000. С. 200-205.
2. *Аносов Г.И., Бикенина С.К., Попов А.А. и др.* Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М. 1978. 130 с.
3. *Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргопольцев В.А. и др.* Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3-18.
4. *Важеевская А.А.* Базальты ареальных зон Камчатки // Автореферат диссертации канд. геол.-мин.наук. Владивосток. 1972. 28 с.
5. *Гонтовая Л.И., Степанова М.А., Хренов А.П., Сенюков С.Л.* Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3-11.
6. *Горельчик В.И., Сторчеус А.В.* Глубокие длиннопериодные землетрясения под Ключевским вулканом Камчатка // В сб. Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. Петропавловск-Камчатский. 2001. С. 173-189.
7. *Заварицкий А.Н.* Некоторые вулканические породы окрестностей Ключевской сопки на Камчатке // Записки Российского минералогического общества. 1931. Сер.11. С. 10-15.
8. *Зубин М.И., Козырев А.И., Лучицкий А.И.* Гравитационная модель строения Ключевского вулкана (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 76-93.
9. *Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Петрография (ид. 4-е, исправленное и дополненное). М.-Л.: гл. ред. геолого-разведочной и геодезической литературы, 1935. 495 с.
10. *Маневич А.Г., Гирина О.А., Малик Н.А. и др.* Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // В сб.: Материалы международного симпозиума «Проблемы Экспло-

- живного вулканизма» (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 76-86.
11. *Меняйлов А.А.* Динамика и механизма извержений Ключевского вулкана в 1937-1938 гг. // Труды Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. М.-Л.: изд-во Академии наук СССР, 1947. Вып. 4. С. 3-91.
  12. *Набоко С.И.* Извержение Билокая, побочного кратера Ключевского вулкана в 1938 г. М.-Л.: изд-во АН СССР, 1947. Вып. 5. 136 с.
  13. *Набоко С.И.* Продукты извержения Ключевского вулкана в 1937-1938 гг. / Труды Лаборатории вулканологии и Камчатской вулканологической станции. М.-Л.: изд-во Академии наук СССР, 1947. Вып. 4. С. 92-135.
  14. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября - 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3-16.
  15. *Озеров А.Ю., Хубуная С.А.* Химизм оливинов и пироксенов как показатель связи глиноземистых и магнезиальных базальтов Ключевского вулкана // Постэруптивное минералообразование на активных вулканах Камчатки. Владивосток. 1992. Ч. 2. С. 37-61.
  16. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-45 гг. и в прошлом. М.: изд. АН СССР, 1956. 310 с
  17. *Пийп В.Б., Ефимова Е.А., Гонтовая Л.И.* Интерпретация годографовсейсмических волн вдоль профиля КМПВ в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 5. С. 83-91.
  18. *Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И. и др.* Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49-59.
  19. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.* Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3-42.
  20. *Федотов С.А., Иванов Б.В., Гуценко И.И. и др.* Вулканическая деятельность в Курило-Камчатской зоне в 1980-1984 гг. // Вулканология и сейсмология. 1986. № 2. С. 3-20.
  21. *Федотов С.А., Иванов Б.В., Двигало В.Н. и др.* Деятельность вулканов Камчатки и Курильских островов в 1984 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 3-23.
  22. *Федотов С.А., Хренов А.П., Жаринов Н.А.* Ключевской вулкан, его деятельность в 1932-1986 гг. и возможное развитие // Вулканология и сейсмология. 1987. № 4. С. 3-16.
  23. *Федотов С.А., Хубуная С.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения вулканов Шивелуч и Ключевской в 1993 г. и их влияние на окружающую среду // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 8. С. 117-131.
  24. *Хренов А.П., Антипин В.С., Чувашова Л.А., Смирнова Е.В.* Петрохимические и геохимические особенности базальтов Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1989. № 3. С. 3-15.
  25. *Хубуная С.А., Аносов Г.И.* Малоглубинный магматический очаг под Ключевским вулканом (Камчатка) // Тезисы докладов международной конференции по вопросам сейсмологии, вулканологии и процессам субдукции Камчатско-Алеутского региона. Петропавловск-Камчатский. 1998. С. 12-13.
  26. *Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.М.* Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46-68.
  27. *Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В.* Магматические очаги под Ключевским вулканом (Камчатка) // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный)». 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский. 2006. С. 22-30.
  28. *Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В.* Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С.
  29. *Aloisi M., Cocina O. et al.* Seismic tomography of the crust undernerth the Etna volcano, Sicily // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2002. V. 134. P. 139-155.
  30. *Hoffman A.W.* Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle continental crust and oceanic crust // Earth and Planet. Sci. Lett. 1988. V. 73. P. 287-310.

31. *Lees Jonathan M., Neill Symons, Olga Chubarova et al.* Tomographic Images of Klyuchevskoy Volcano P-Wave velocity // *Volcanism and Subduction The Kamchatka Region Geophysical Monograph Series 172*. P. 293-302. Copyright 2007 by the American Geophysical Union. 10/ 1029/172GM09 (350pp).
32. *Londono J.M., Sudo Y.* Velocity structure and a seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia) // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2003. V. 119. N 1-4. P. 61-87.
33. *Mironov N.L., Portnyagin M.V., Pletchov P.Yu., and Khubunaya S.A.* Final Stages of Magma Evolution in Klyuchevskoy Volcano, Kamchatka: Evidence from Melt Inclusions in Minerals of High-Alumina Basalts / *Petrology*, Vol. 9. No. 1. 2001. PP. 46-62.
34. *Nizkous I., Kissling E., Gontovaya L. et al.* Correlation of Kamchatka Lithosphere Velocity Anomalies With Subduction Processes // *Volcanism and Subduction The Kamchatka Region Geophysical Monograph Series 172*. P. 97-106. Copyright 2007 by the American Geophysical Union. 10/ 1029/172GM09 (350pp).
35. *Sherburn S., Bannister S., Bibby H.* Seismic velocity structure of the central Taupo Volcanic Zone, New Zeland, from local earthquake tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2003. V. 122. N 1-2. P. 69-88.
36. *Evans J.R., Ritter J.R.R.* Deep structure of Medicine Lake volcano, California // *Tectonophysics*. 1997. V. 275. N 1-3. P. 221-241.
37. *De Natale G., Zollo A. et al.* An image of mt. Vesuvius obtained by 2D seismic tomography // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1998. V. 82. P. 161-173.

## **SHALLOW MAGMATIC CHAMBER OF KLYUCHEVSKOY VOLCANO (ON PETROLOGIC AND GEOPHYSICAL DATA)**

**S.A. Khubunaya, L.I. Gontovaya, S.V. Moskaleva**

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006  
e-mail: hubsa@kscnet.ru*

Geophysical and petrologic studies that have been conducted for many years revealed a shallow subsidiary magmatic chamber beneath Klyuchevskoy Volcano. Growth of basaltic andesites occurring during the summit eruptions of Klyuchevskoy continues due to the gravity crystallization-differentiation and mixing of magma in the intermediate chamber.