

УДК 550.82

МАГМАТИЧЕСКИЕ ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ КОРЯКСКО-АВАЧИНСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И РЕЖИМА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

© 2017 г. А. В. Кирюхин^{1,*}, С. А. Федотов¹, П. А. Кирюхин², Е. В. Черных¹

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9

² ООО “Эксиджен Сервисис”
196158 Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 40-1

*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

Поступила в редакцию 02.11.2016 г.

Анализ локальной сейсмичности в пределах Авачинско-Корякской группы вулканов в период 2000–2016 гг. позволяет выявить последовательность плоско-ориентированных кластеров землетрясений, интерпретируемых как процесс внедрения даек и силлов. Наиболее активная магматическая деятельность синхронизирована с парогазовым извержением Корякского вулкана 2008–2009 гг., после чего процесс инъекции магмы переместился в конус Авачинского вулкана (2010–2016 гг.). Геометрия магматических тел отражает геомеханические условия NF (растяжения, нормальных сбросов Normal Fault conditions, $S_v > SH_{max} > Sh_{min}$) в фундаменте Корякского вулкана с доминированием вертикальных напряжений S_v , причем максимальное горизонтальное напряжение SH_{max} ориентировано в северном направлении. CFRAC моделирование инъекции магмы в трещину с характерными для условий фундамента Корякского вулкана свойствами (угол падения 60° , размеры 2×2 км², глубина – 4 км абс.) показывает, что при расходе магмы 20 000 кг/с в течение 1 сут, раскрытие трещины увеличивается до 0.3 м, процесс инъекции магмы сопровождается сдвиговыми деформациями, происходящими со скоростью до $2 \cdot 10^{-3}$ м/с, что соответствует условиям локальных сейсмических событий с M_w до 4.5. Таким образом, использование плоско-ориентированных кластеров землетрясений для идентификации магматических внедрений – физически обосновано. Процесс сейсмической активизации 02.08.2011 в районе Изотовского горячего источника (7 км от вершины Корякского вулкана), интерпретируемый как внедрение дайки, подтверждается повышением температуры источника 10–12 °С в период с октября 2011 г. по июль 2012 г.

DOI: 10.7868/S0203030617050017

1. ВВЕДЕНИЕ

Описание магматических питающих систем вулканов: их строения, эволюции и механизма функционирования – находится в ряду основных проблем вулканологии, их решение имеет важные приложения для прогноза вулканических извержений, оценки геотермальных ресурсов, условий формирования геотермальных, рудных и некоторых типов нефтегазовых месторождений, а также в связи с технологиями создания искусственных циркуляционных систем (методом гидроразрыва) для извлечения или захоронения флюидов различного состава (EGS (“горячих сухих пород”), сланцевого газа, трудноизвлекаемой нефти и др.). Одной из фундаментальных причин транспорта флюидов в верхней хрупкой оболочке земной коры является гидроразрыв и активизация критически сжатых плоско-ориентированных трещин

и разломов в процессе ее эволюции [Zoback, 2010]. Условиями реализации гидроразрыва (магморазрыва) применительно к магматическим резервуарам могут быть повышение давления магмы в очаге или уменьшение минимального стресса вмещающих горных пород [Gudmundsson, 2015]. Сейсмичность, сопровождающая формирование сдвиговых трещин при гидроразрыве (триггерная сейсмичность), достаточно хорошо описана в работах [Zoback, 2010; Nicolas et al., 2011; McClure, Horne, 2013] и может быть использована для выявления геометрии продуктивных геофлюидных резервуаров.

Исследования извержений вулканов на Камчатке показывают яркие примеры внедрения даек, проявляющиеся линейно ориентированными центрами локальных извержений или образованием трещин разрыва на поверхности земли. Анализ данных Большого трещинного

Толбачинского извержения в 1975–1976 гг. привел к серии работ [Федотов, 1976, 1982], в которых, с использованием гидродинамических и тепловых расчетов, оцениваются минимальные и максимальные скорости движения магмы в дайках при заданных входных и выходных температурах магмы, температуре вмещающих горных пород, раскрытии трещины и избыточном давлении в питающем магматическом очаге. При извержении в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана между центрами извержений зафиксированы трещины разрыва, связанные с внедрением дайки с предполагаемой длиной 4.7 км и мощностью 0.7 м в плотных слоях коры [Федотов, 1997].

Понимание важной роли плоско-ориентированных магматических тел (даек и силлов) в осуществлении транспорта магмы от коровых к периферическим магматическим очагам и далее к поверхности Земли особенно углубилось в последнее время благодаря использованию сейсмических данных, высокоточных геодезических измерений: спутниковых радарных съемок и сетей станций GPS/GLONASS [Lundgren et al., 2015].

Так, например, в работе [Sigmundsson et al., 2015] описывается формирование гигантской сегментированной дайки и извержение вулкана Барпарбунга (Barðarbunga) в Исландии 2014–2015 гг. Вулкан Барпарбунга (кальдера 8×11 км, 23 извержения за последние 1100 лет) находится в центральной части рифтовой зоны Исландии (скорость растяжения 19 мм/год). Питающий магматический очаг предполагается на глубине 10–15 км. Объем изверженной оливин-толеитовой лавы оценивается в 1.4 км^3 (самое крупное излияние лавы в Исландии с 1783 г.). В частности, по сейсмическим данным установлена форма 50 км дайки питающей извержение, состоящей из 11-ти плоско-ориентированных сегментов (кластеры с числом землетрясений от 57 до 1181, магнитуда отдельных землетрясений превышала 5), внедрение дайки произошло за 22 сут. Интересно, что 1-й сегмент дайки ориентирован по нормали к границе кальдеры, в то время как последующие сегменты – вдоль простирания рифтовой зоны. Извержение началось на дальнем окончании дайки и продолжалось в течение 6 мес. Помимо сейсмичности, по данным спутниковых радарных съемок (Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X) и GPS данных установлено раздвижение стенок дайки на 320 см, объем дайки оценивается в 0.6 км^3 , средний расход магмы $260 \text{ м}^3/\text{с}$. Проседание кальдеры вулкана Барпарбунга оценивается в 60 м за 6 мес., объем проседания 1.9 км^3 , уменьшение объема питающего магматического очага – 0.3 км^3 .

В работе [Dumont et al., 2017] приводятся данные об активизации рифтовой системы Афар (Эфиопия) в 2005–2010 гг., сопровождавшейся

интрузиями даек (зона внедрения даек вытянута вдоль рифта на 60 км и имеет ширину около 5 км), что обосновывается сейсмическими и геодезическими (InSAR) данными. В качестве источника магмы рассматривается сегментированный магматический очаг (mid-segment magma chamber MSMC), включающий неглубокозалегающий периферический магматический очаг (~4 км) и более глубокий коровый магматический очаг (на глубине более 15 км), при этом интрузии даек (длиной ~15 км) происходили в различных направлениях от исходного магматического очага вдоль оси рифтовой зоны.

Корякско-Авачинский вулканогенный бассейн является одним из эталонных объектов для мониторинга и анализа процессов, сопутствующих инъекции магмы из магматических очагов вулканов в периоды их активизации, наиболее значительная из которых произошла в 2008–2009 гг. [Гордеев и др., 2009; Селиверстов, 2009; Сенюков, Нуждина, 2010; Лемзиков, Лемзиков, 2015]. Регистрация сейсмичности Авачинско-Корякской группы вулканов производится шестью станциями [Сенюков, Нуждина, 2010], для оценки динамики изменения тепловой мощности фумарол в кратерах вулканов используется тепловизионная съемка [Гордеев, Дроздин, 2010], в юго-западной части бассейна осуществляются непрерывные наблюдения за гидрогеологическим режимом подземных вод Пиначевских источников и скв. Е-1 [Копылова, Болдина, 2012], на северном склоне Корякского вулкана с 2009 г. осуществляются наблюдения за температурным и газогидрохимическим режимом разгружающихся там термальных источников [Кирюхин и др., 2015].

Структура магматических питающих каналов Корякского и Авачинского вулканов тесно связана с условиями формирования геотермальных ресурсов в рассматриваемом вулканогенном бассейне. Существуют геолого-геофизические предпосылки для приблизительной оценки геометрии магматического очага под Авачинским вулканом в форме эллипсоида [Федотов, 2006; Федотов и др., 2007]: положение верхней кромки магматического очага оценивается в пределах интервала от нулевой отметки уровня моря и не ниже 2 км от этого уровня, размер горизонтальной и вертикальной полуосей эллипсоида по изотерме $900 \text{ }^\circ\text{C}$ не меньше 2.3 и 1.53 км, по изотерме $700 \text{ }^\circ\text{C}$ – 4.5 и 3 км соответственно. При длительной эксплуатации подземной циркуляционной системы в течение 100 лет блок нагретых пород объемом порядка 50 км^3 может обеспечить получение около 250 МВт электроэнергии [Федотов, 2006; Федотов и др., 2007].

В отчете по контракту № 25/12/14 от 25.12.2014 г. “Исследование геотермальных ресурсов Авачин-

ской группы вулканов, полуостров Камчатка, Камчатский Край” <https://cloud.mail.ru/public/Hu5r/MjhiTXRfD> (руководитель д.т.н. Р. И. Пашкевич, НИГТЦ ДВО РАН) в результате обзора опубликованных данных [Штейнберг и др., 1963; Поляк, 1964; Федотов, 2006; Федотов и др., 2007] отмечается, что 1) в постройке Авачинского вулкана выделяются геофизические аномалии различной природы (гравиметрическая, магнитная, по скорости прохождения сейсмических волн) аномальное тело имеет форму эллипсоида (интерпретируемого как магматический очаг с температурой 700 °С) с кровлей не ниже –2 км абс. и размерами горизонтальной и вертикальной полуосей 4.5 км и 3 км соответственно; 2) в поисково-разведочных скважинах на расстоянии 20 км от вулкана до глубин 1.1–1.5 км температура не превышает 24–33 °С; 3) авторами отчета построена 3D термогидродинамическая модель Авачинского вулкана и прилегающего бассейна подземных вод (на расстоянии 13 км от вулкана), на основании результатов моделирования авторами отчета утверждается, что формируется зона перегретых вод с температурой более 150 °С на глубинах до 1.5 км и расстоянии менее 7 км от активного кратера (с. 75); 4) на основе моделирования выполнены оценки технико-экономических показателей пилотной геотермальной станции с тепловой мощностью до 120 МВт (с. 75). Однако упомянутые выше результаты нуждаются, очевидно, в дополнительном обосновании геометрии продуктивных магматогенных резервуаров.

В связи с возобновившейся разведкой источников геотермального теплоэлектроснабжения в районе Корякско-Авачинской группы вулканов (Р. И. Пашкевич, личное сообщение, 2015 г.) уточнение условий распределения активных магматических тел, механизмов транспорта магмы в питающих каналах вулканов также является достаточно актуальной задачей.

В работах А. В. Кирюхина и др. [2015, 2016] предложен метод выявления и оценки геометрии магматических питающих систем вулканов (даек и силлов) по данным локальной сейсмичности, метод подробно изложен на примере извержения Толбачинского вулкана 2012–2013 гг., кратко описываются результаты по активизации Корякско-Авачинской группы вулканов 2008–2010 гг. В данной статье дается более подробное и дополненное с учетом данных 2014–2016 гг. описание магматической питающей системы Корякско-Авачинской группы вулканов, оцениваются геомеханические условия в фундаменте указанной группы вулканов, выполняется моделирование внедрения магмы в характерную для указанных условий трещинную зону, приводятся фактические данные по тепловому воздействию дайки на разгрузку находящегося вблизи термального источника.

2. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ АВАЧИНСКО-КОРЯКСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ 2000–2013 гг.

2.1. История инъекции магмы, геомеханическое состояние Корякско- Авачинской группы вулканов

Исходные данные, методика и критерии выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений для периода активизации Корякского и Авачинского вулканов в 2008–2010 гг. описаны в работе [Кирюхин и др., 2016]. В настоящей работе исходный каталог сейсмических данных (01.2000–01.2013 гг.) был дополнен опубликованными данными [Землетрясения ..., 2015, 2016] и данными оперативного каталога КФ ГС РАН за 2015–2016 гг. В итоге общее число рассматриваемых сейсмических событий составило 5160 ($\max K_s = 9.8$). Абсолютная точность расчета координат гипоцентров и эпицентров микроземлетрясений по рассматриваемому району Корякско-Авачинской группы вулканов оценивается в 1 км [Землетрясения ..., 2015, 2016]. Для выявления и оценки характеристик плоско-ориентированных кластеров используется программа Frac-Digger (№ гос. рег. 2016616880), для визуализации – программа Surfer v.13.

В частности показано, что вершинное парогазовое извержение Корякского вулкана 2008–2009 гг. сопровождалось 153 плоско-ориентированными кластерами землетрясений, интерпретируемыми как зоны внедрения даек и силлов при инъекции магмы. Подготовка извержения началась с насыщения магмой корового очага (глубина кровли –3 км абс., поперечник 2.5 км) у юго-западного подножия Корякского вулкана (июль 2008 г. – январь 2009 г.). Далее инъекция магмы в субмеридиональной зоне (7.5 × 2.5 км, основной диапазон глубин –2 – –5 км абс.) в северном секторе Корякского вулкана происходила параллельно с наиболее интенсивным периодом вершинного парогазового извержения (февраль 2009 г. – март 2010 г.). Процесс инъекции магмы при давлении 53 МПа (на глубине 6 км) сопровождался внедрением даек (84–87°) синхронно с образованием наклонных даек (углы падения 34–82°). Наибольшая плотность магморазрыва наблюдалась в объеме 45 км³, который насыщался магматическим расплавом в различной степени. Наличие более пологих кластеров с углами падения 4–30°, не попадающих в зону сдвигового разрушения на диаграмме Мора, указывает на возможность существования локальных расплавленных магматических очагов и проницаемых стратиформных резервуаров в указанном выше объеме. После насыщения магматической питающей системы Корякского вулкана началась инъекция

Таблица 1. Дайки и силлы в районе Корякско-Авачинской группы вулканов (интерпретируемые по выделенным плоско-ориентированным кластерам землетрясений из каталога сейсмических событий КФ ГС РАН за 2000–2016 гг. с числом событий в кластере не менее 10) и параметры плоскостей, их аппроксимирующих

№№ кластера	Угол падения, град	Азимут падения, град	X, м	Y, м	Z, м абс.	Начало кластера DD/ММ/YY HH:MM	Число землетрясений в кластере	K_s min	K_s max	Площадь кластера, км ²
7	80	118	481308	5913651	-9441	24.03.08 0:00	17	3.7	6.3	12.6
6	63	285	480999	5912853	-9754	24.03.08 0:00	13	3.6	6.7	10.4
9	54	245	481393	5912645	-9893	25.03.08 0:00	15	3.3	6	16.0
26	59	123	483982	5908675	-7575	29.06.08 0:00	12	3.1	4.2	13.5
39	64	46	478293	5905493	-4010	14.10.08 0:00	10	3.2	4.7	6.3
46	60	331	478903	5905418	-4027	27.10.08 0:00	11	2.7	4.1	5.6
72	85	87	480279	5908557	-3577	02.03.09 22:10	11	2.2	5.9	4.4
77	85	278	480060	5910791	-4207	06.03.09 1:04	19	2.9	7.1	10.9
80	68	283	480504	5906585	-2934	17.03.09 14:01	10	2.2	4.3	3.5
98	81	96	480408	5907387	-2818	13.04.09 5:17	13	2.3	4.7	13.0
112	35	326	480863	5909482	-4587	29.04.09 7:48	13	2.3	4.7	6.7
113	67	84	480841	5911609	-4876	29.04.09 12:39	37	2.6	8.3	7.3
114	71	62	480714	5911438	-4694	30.04.09 1:13	15	2.2	4.6	4.2
115	36	344	480983	5911373	-5059	30.04.09 1:19	13	2.8	6.1	6.4
116	4	326	480937	5911113	-5326	30.04.09 1:24	11	2.9	4.9	4.8
121	35	63	481347	5909341	-4370	02.05.09 11:01	10	2.8	3.8	7.2
152	79	293	479722	5910923	-2609	23.08.09 3:41	15	3.6	6.7	3.3
153	50	251	480192	5909566	-3145	23.08.09 15:11	17	2.3	6.2	6.1
154	53	30	479888	5909135	-3258	23.08.09 20:05	11	2.5	6.5	2.3
155	47	72	480710	5908242	-3723	23.08.09 21:38	10	2.6	4.8	5.1
168	87	74	480050	5909994	-4764	25.03.10 0:00	11	2.1	7.2	23.5
175	64	249	489367	5901006	1446	09.04.11 21:04	10	2.6	4.1	1.2
176	50	209	489466	5900842	1554	10.04.11 12:23	11	2.1	4	0.6
187	71	204	489233	5900817	1578	30.04.11 10:03	10	2	4.1	0.8
188	68	23	489393	5900789	1723	01.05.11 2:19	12	1.7	4.1	0.3
192	53	16	489296	5900882	1761	04.05.11 9:58	11	1.7	5.1	0.5

Примечание. В данной таблице первые 21 кластер позиционированы с Корякским вулканом, последние 5 кластеров позиционированы в конусе Авачинского вулкана. X, Y, Z – координаты центров кластеров (система координат UTM WGS-84).

магмы в конус Авачинского вулкана (2010 г.), которая продолжается по настоящее время (октябрь 2016 г.). За указанный период в конус Авачинского вулкана внедрилось 30 даек. В табл. 1 приводятся характеристики даек и силлов, выявленных по плоско-ориентированным кластерам землетрясений с числом событий не менее 10. Отметим также магматическую активность на северном склоне Корякского вулкана в районе Изотовского источника и Корякских Нарзанов (4 дайки за период с 10.2009 г. по 02.2016 г., табл. 2).

На рис. 1–4 показаны проекции магматических внедрений (даек и силлов) и распределение землетрясений в постройках и фундаменте Авачинско-Корякской группы вулканов на горизонтальных срезах –3000 м абс., –1000 м абс. и +1500 м абс., вертикальных сечениях АВ и CD (ССВ простирания) и EF (СЗ простирания). Более детальный анализ ориентации даек и силлов (с использованием стереограмм и гистограмм) показывает их следующие особенности: 1) под Корякским вулканом дайки фиксируются преимущественно в диапазоне глубин –5000 м

Таблица 2. Дайки в районе Изотовского источника и Корякских Нарзанов (интерпретируемые по выделенным плоско-ориентированным кластерам землетрясений из каталога сейсмических событий КФ ГС РАН за 2000–2016 гг.) и параметры плоскостей, их аппроксимирующих

№№ кластера	Угол падения, град	Азимут падения, град	X, м	Y, м	Z, м абс.	Начало кластера DD/MM/YY HH:MM	Число землетрясений в кластере	K_s min	K_s max	Площадь кластера, км ²
163	76	290	481738	5913884	-4343	08.10.09 21:04	8	2.9	3.8	12.8
165	73	298	481745	5912929	-4682	22.11.09 7:18	6	3.1	3.6	2.5
194	39	115	479151	5914685	-2413	02.08.11 14:13	7	2.5	7.4	1.5
204	70	64	480792	5914003	-2187	28.02.16 1:42	7	2.3	6.4	1.7

Примечание. X, Y, Z – координаты центров кластеров (система координат UTM WGS-84).

абс. до 0 м абс., они имеют преимущественно субмеридиональное простирание (75% даек с азимутом простирания от 320° до 40°) и углы падения более 50° (70% даек); 2) под Авачинским вулканом дайки фиксируются преимущественно в диапазоне глубин от +1000 м абс. до +2000 м абс., их простирание равномерно распределено по всем направлениям, но при этом отмечается локальный максимум даек с субмеридиональным простиранием (25% даек с азимутом простирания от 350° до 10°), явного преобладания крутопадающих даек не наблюдается (61% имеет угол падения более 45°).

Изложенная выше информация позволяет оценить геомеханическое состояние под рассматриваемыми вулканами следующим образом (здесь и далее для обозначения главных напряжений будем использовать обозначения в соответствии с работой [Zoback, 2010]): 1) под Корякским вулканом фиксируются условия растяжения с формированием нормальных разломов (сбросового типа), вертикальный стресс S_v является максимальным, горизонтальные главные напряжения совпадают с меридиональным (SH_{max}) и широтным (Sh_{min}) направлениями, $S_v > SH_{max} > Sh_{min}$; 2) в конусе Авачинского вулкана фиксируются условия, более близкие к радиальному растяжению $S_v > SH_{max} \approx Sh_{min}$. Диаграммы Мора (рис. 5, рис. 6), построенные для указанных выше геомеханических условий, позволяют оценить давление магмы на момент внедрения даек, рассматриваемых выше: для Авачинского вулкана – 7 МПа на глубине 1000 м (≈ 1500 м абс.) (см. рис. 5), для Корякского вулкана – 45 МПа на глубине 6000 м (≈ -3000 м абс.) (см. рис. 6).

Исходя из вышесказанного, для Корякского вулкана в диапазоне глубин –5000 м абс. до 1000 м абс. и для Авачинского вулкана в диапазоне глубин от 0 м абс. до 2000 м абс. соответствует геомеханическому состоянию NF (нормальных разломов или растяжения), которое может быть записано в виде тензора напряжений в географической системе

координат X, Y, Z (X – направление на восток, Y – направление на север, Z – направление вверх) следующим образом:

$$S_g = \begin{pmatrix} S_{xx} - P_f & 0 & 0 \\ 0 & S_{yy} - P_f & 0 \\ 0 & 0 & S_{zz} - P_f \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $S_{xx} = Sh_{min}$, $S_{yy} = SH_{max}$, $S_{zz} = S_v$, P_f – давление флюида (магмы).

Составляющие напряжения под Корякским вулканом на глубине $z_0 = 6000$ м (≈ -3000 м абс.) оцениваются следующим образом: $S_v = \int_0^{z_0} \rho \cdot g \cdot dz = (2200 \cdot 9.81 \cdot 4000 + 2700 \cdot 9.81 \cdot 2000) = 139$ МПа (где ρ – плотность горных пород принимается равной 2200 кг/м³ для верхних частей разреза (вулканогенного бассейна) и 2700 кг/м³ для пород до мелового фундамента; $Sh_{min} = S_v/3.1 = 44.8$ МПа; SH_{max} принято равным $(S_v + Sh_{min})/2 = 92$ МПа. После этого начальный тензор эффективного стресса для Корякского вулкана (1) при давлении флюида (магмы) 45 МПа в географических координатах (X – направление на восток, Y – направление на север, Z – направление вверх) определится следующим образом:

$$S_g = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 47 & 0 \\ 0 & 0 & 94 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Составляющие напряжения под Авачинским вулканом на глубине $z_0 = 1000$ м (≈ 1500 м абс.) оцениваются следующим образом: $S_v = \int_0^{z_0} \rho \cdot g \cdot dz = 2200 \cdot 9.81 \cdot 1000 = 21.6$ МПа (где ρ – плотность горных пород принимается равной 2200 кг/м³ для

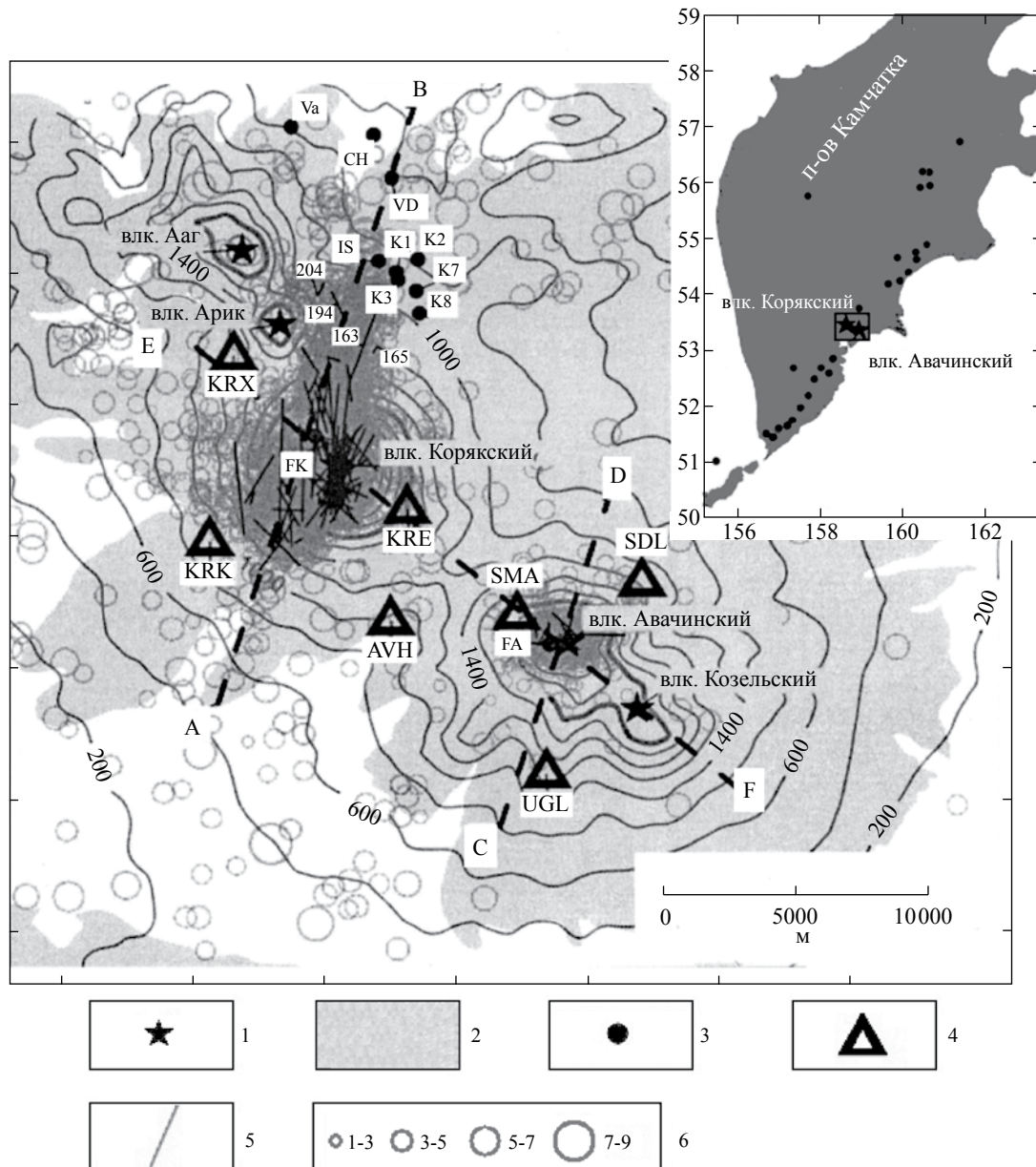


Рис. 1. Распределение землетрясений (данные КФ ГС РАН) и интерпретируемые по данным локальной сейсмичности проекции внедрений даек за период 2000–2016 гг. в пределах Корякско-Авачинской группы вулканов. Проекция даек в районе Изотовского источника и Корякских Нарзанов отмечены цифрами 163, 165, 194 и 204 (см. табл. 1). 1 – вершины вулканов Авачинский, Корякский, Козельский, Арик и Ааг; 2 – продукты извержений вулканов, указанные выше; 3 – термопроявления: FA – фумаролы Авачинского вулкана, FK – фумаролы Корякского вулкана; термоминеральные источники: K1, K2, K3, K7, K8 – Корякские Нарзаны, IS – Изотовский, VD – Водопадный, CH – Чистинские, Va – Вакинский; 4 – сейсмостанции КФ ГС РАН; 5 – проекции даек (следы площадок плоскоориентированных кластеров землетрясений) на абс. отметках –3000 м абс. под Корякским вулканом и на +1500 м абс. под Авачинским вулканом; 6 – эпицентры землетрясений 2000–2016 гг. (данные КФ ГС РАН) показаны кружками (пропорционально энергетическому классу K_s от 1.1 до 8.5, $M = 0.5 \cdot K_s - 0.75$). АВ, CD, EF – линии разрезов на рис. 2–4. Изолиниями показана топографическая поверхность, разметка осей – 5 км. Площадки рассчитываются с использованием программы Frac-Digger, как выпуклые многоугольники, включающие проекции гипоцентров всех землетрясений рассматриваемого кластера на плоскость $z = ax + by + c$ (см. уравнение (1) в работе [Кирюхин и др., 2016]).

верхних частей разреза (вулканогенного бассейна); $Sh_{min} = SH_{max} = S_v/3.1 = 7$ МПа. Далее начальный тензор эффективного стресса для Авачинского вулкана рассчитывается по формуле (1) при давлении

флюида (магмы) 7 МПа в географических координатах (X – направление на восток, Y – направление на север, Z – направление вверх) определяется следующим образом:

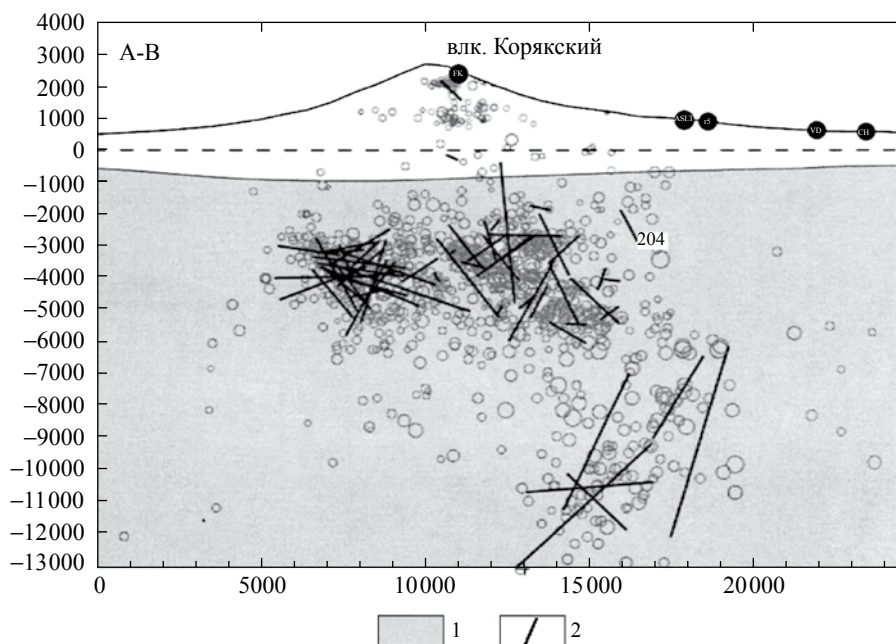


Рис. 2. Распределение землетрясений (данные КФ ГС РАН) и интерпретируемые по данным локальной сейсмичности проекции внедрения даек и силлов в плоскости вертикального разреза АВ (см. рис. 1), помечена проекция дайки 204 в районе Изотовского источника и Корякских Нарзанов. 1 – домеловой фундамент, 2 – проекции внедрения даек и силлов в плоскости разреза АВ. Остальные условные обозначения соответствуют рис. 1. Разметка осей – 1000 м.

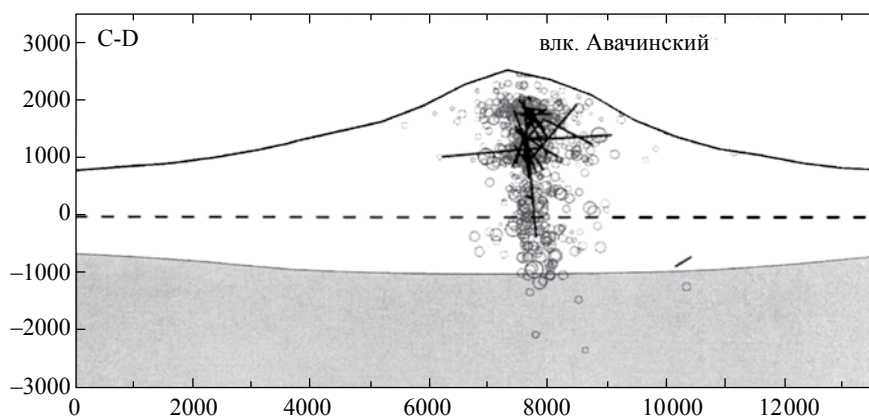


Рис. 3. Распределение землетрясений (данные КФ ГС РАН) и интерпретируемые по данным локальной сейсмичности проекции внедрения даек и силлов в плоскости вертикального разреза CD (см. рис. 1). Условные обозначения соответствуют рис. 1 и 2. Разметка осей – 1000 м.

$$S_g = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 14.6 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

При переходе от географической системы координат X, Y, Z к системе координат трещины X_2, Y_2, Z_2 (азимут простирания α , угол падения β , ось X_2 в плоскости трещины по направлению падения, ось Y_2 в плоскости трещины по направлению простирания,

ось Z_2 перпендикулярна плоскости трещины и направлена вверх) матрица преобразования координат A записывается следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha) & -\cos(\beta) \cdot \sin(\alpha) & -\sin(\beta) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ \sin(\beta) \cdot \cos(\alpha) & -\sin(\beta) \cdot \sin(\alpha) & \cos(\beta) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

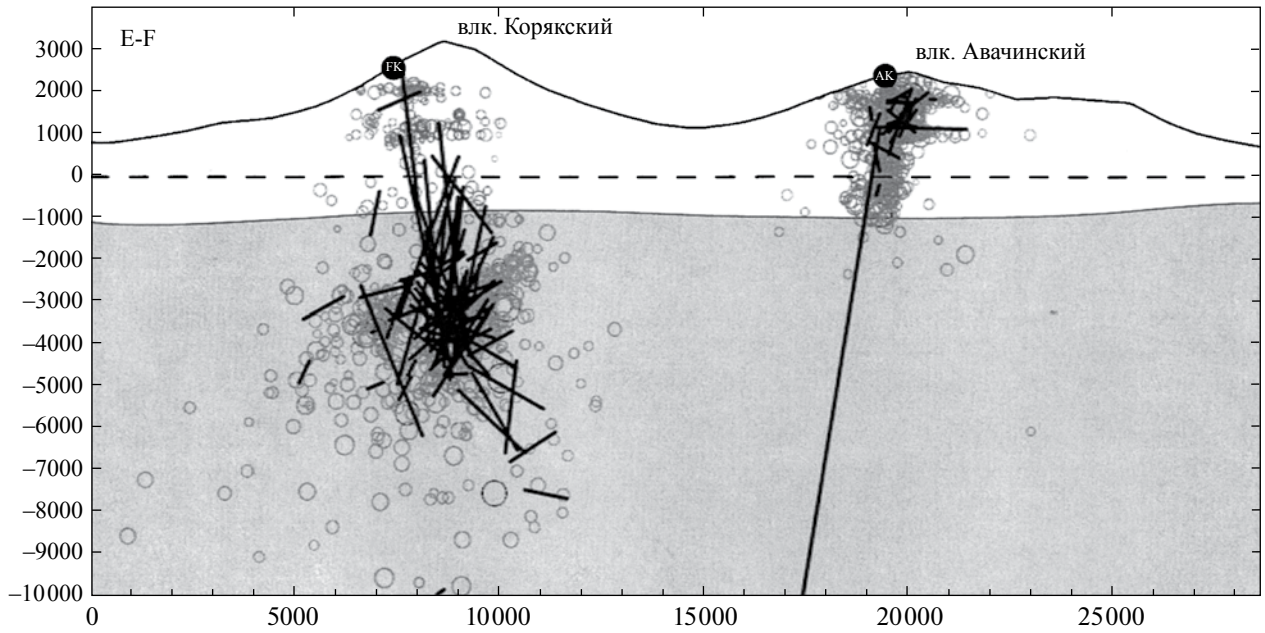


Рис. 4. Распределение землетрясений (данные КФ ГС РАН) и интерпретируемые по данным локальной сейсмичности проекции внедрения даек и силлов в плоскости вертикального разреза EF (см. рис. 1). Условные обозначения соответствуют рис. 1 и 2. Разметка осей – 1000 м.

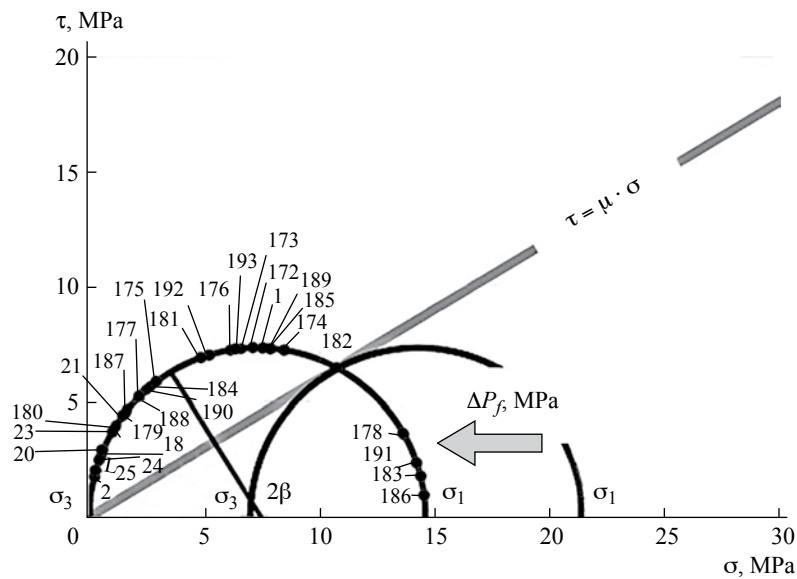


Рис. 5. Диаграммы Мора, показывающие изменение напряженного состояния при инъекции магмы в конусе Авачинского вулкана на глубине 1000 м (≈ 1500 м абс.). Круг справа покрывает диапазон нормальных и сдвиговых напряжений до инъекции магмы, круг слева – после инъекции магмы; точки с номерами соответствуют дайкам и силам (плоско-ориентированным кластерам землетрясений). Для позиционирования точки на круге из центра откладывается угол 2β от горизонтальной оси (где β – угол падения плоско-ориентированного кластера).

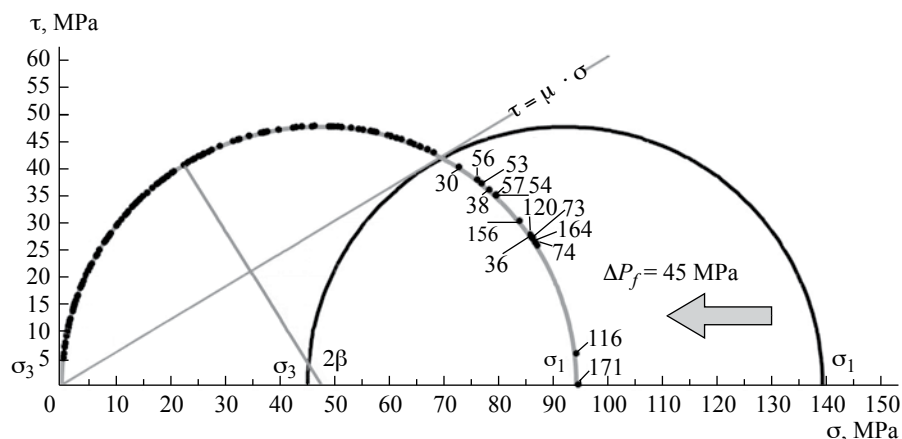


Рис. 6. Диаграммы Мора, показывающие изменение напряженного состояния при инъекции магмы в фундаменте Корякского вулкана на глубине 6000 м (≈ -3000 м абс.). Круг справа покрывает диапазон нормальных и сдвиговых напряжений до инъекции магмы, круг слева – после инъекции магмы; точки соответствуют дайкам, точки с номерами соответствуют пологим дайкам и силам (плоско-ориентированным кластерам землетрясений). Для позиционирования точки на круге из центра откладывается угол 2β от горизонтальной оси (где β – угол падения плоско-ориентированного кластера).

Соответственно пересчитывается тензор стресса в системе координат трещины:

$$S_f = A \cdot S_g \cdot A^T, \quad (5)$$

где A^T – транспонированная матрица преобразования координат.

2.2. CFRAC моделирование инъекции магмы в наклонную трещину (формирования дайки)

2.2.1. Краткое описание программы CFRAC для моделирования геомеханических процессов при инъекции флюидов в системы трещин

Программа CFRAC [McClure, 2012, 2014; McClure, Horne, 2013] осуществляет решение системы уравнений гидродинамики, геомеханики и условий возникновения микроземлетрясений (rate and state earthquake) для 3D дискретных систем трещин при инъекции в них флюидов из скважин. Элементы трещин могут сдвигаться или открываться, при этом стресс (поле напряжений), вызванный деформациями, рассчитывается с использованием метода конечных элементов. В программе матричная проницаемость рассматривается равной нулю, т.е. все флюидные потоки определяются в трещинах. Соответствующие граничные условия применяются к сдвигающимся и открывающимся элементам трещин, при этом гарантируется отсутствие взаимопроникновения трещин или деформаций против сдвиговых напряжений.

2.2.2. Концептуальная модель, исходные данные для CFRAC моделирования

Рассмотрим формирование дайки в трещине с углом падения 60° и размерами $2 \text{ км} \times 2 \text{ км}$ в результате инъекции магмы на глубине $z_0 = 6000$ м (или -3000 м абс.) под Корякским вулканом (рис. 7). Для моделирования процесса инъекции магмы воспользуемся программой CFRAC [McClure, Horne, 2013]. На модели с использованием программы CFRAC рассматривается процесс

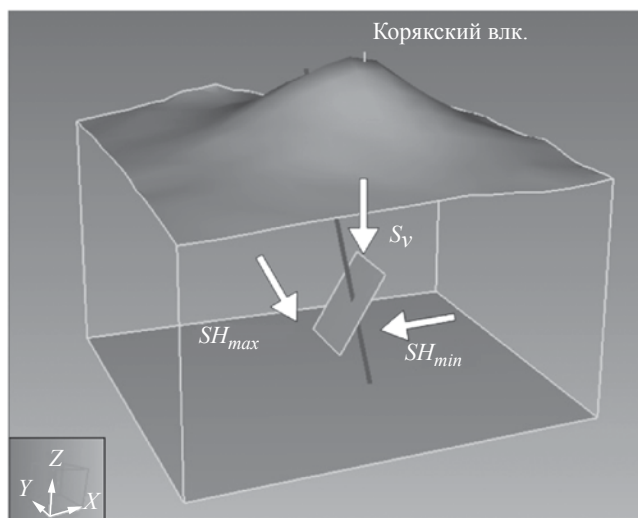


Рис. 7. Концептуальная модель образования дайки при инъекции магмы в условиях растяжения в широтном направлении. S_v , SH_{max} и SH_{min} – направления вертикального, максимального горизонтального и минимального горизонтального стрессов в географической системе координат XYZ (X – направление на север, Y – направление на восток, Z – абс. отметка).

внедрения дайки из цилиндрического питающего канала вулкана центрального типа, к которым относятся вулканы Корякский и Авачинский (по оценкам С. А. Федотова [1982] радиус таких каналов находится в диапазоне 50–100 м).

При моделировании примем следующие условия: инъекция магмы в рассматриваемую трещину происходит в течение 1 сут, расход инъекции магмы 20 000 кг/с, максимальное давление инъекции 200 МПа. Свойства магмы определены следующим образом: плотность 2800 кг/м³, вязкость 200 Па·с. Начальное давление магмы 45 МПа.

Пересчет тензора эффективного стресса в систему координат, связанных с плоскостью трещины с центром на глубине 6000 м (–3000 м абс.), углом падения 60° на запад и азимутом простирания 0° (X – по направлению падения, Y – по направлению азимута простирания, Z – вверх перпендикулярно плоскости трещины) приводит к следующей матрице:

$$S_f = \begin{pmatrix} 70.5 & 0 & -40.7 \\ 0 & 47.0 & 0 \\ -40.7 & 0 & 23.5 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Таким образом, стресс в новой системе координат, привязанной к плоскости трещины, определяется в терминах программы CFRAC следующим образом: $sxx_bc = 70.5$ МПа, $sxx_z_trend = 18.0$ МПа/км, $syu_bc = 47$ МПа, $syu_z_trend = 14.3$ МПа/км, $sxy_bc = -40.7$ МПа, $sxy_z_trend = 0.0$ МПа/км, $szz_bc = 23.5$ МПа, $szz_z_trend = 10.6$ МПа/км. Кроме того, для моделирования определяются $G = 15\,000$ МПа (модуль сдвига), $\nu = 0.25$ (коэффициент Пуассона), $E_0 = 0.0005$ (референсное раскрытие трещины (м)), $e_0 = 0.00005$ (гидравлическое референсное раскрытие трещины (м)), в программе CFRAC $E_0 = e_0$.

2.2.3. Результаты CFRAC моделирования инъекции магмы

Рис. 8, 9 иллюстрируют результаты CFRAC моделирования (setting_file_7778) спустя 1 сут после начала инъекции магмы в трещину: распределение давления флюида и нормального стресса в трещине (см. рис. 8), распределение раскрытия трещины, направления сдвига (“висячего” блока трещины относительно “лежащего” блока) и распределение скорости относительного сдвига (м/с) стенок трещины (см. рис. 9).

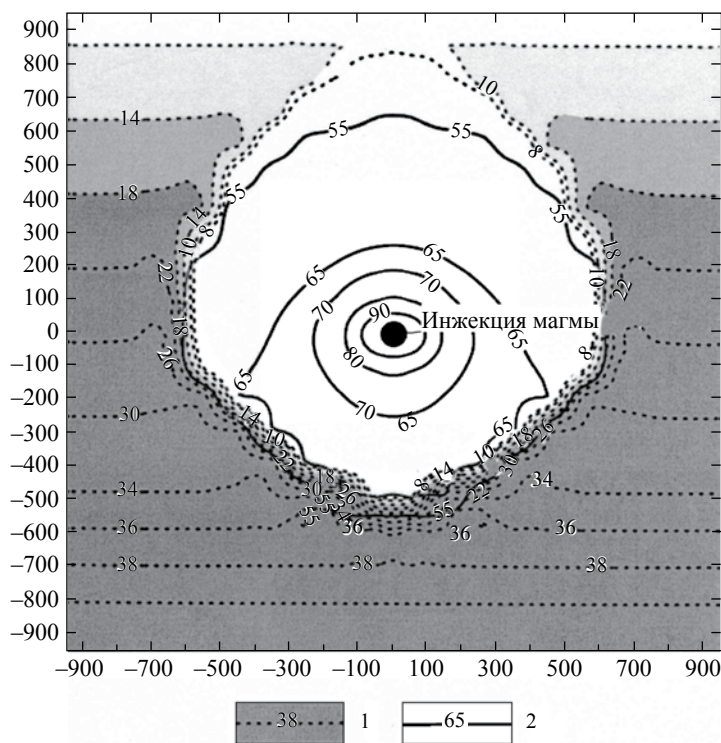


Рис. 8. Результаты гидромеханического моделирования инъекции магмы под Корякским вулканом (глубина инъекции 6 км) с использованием программы CFRAC [McCluer, 2014]. Распределение давления магмы и эффективного нормального стресса в плоскости трещины (положение трещины изображено на рис. 7) через 1 сут после начала инъекции магмы, разметка осей в м. 1 – изолинии эффективного нормального стресса (МПа), 2 – изолинии давления магмы (МПа).

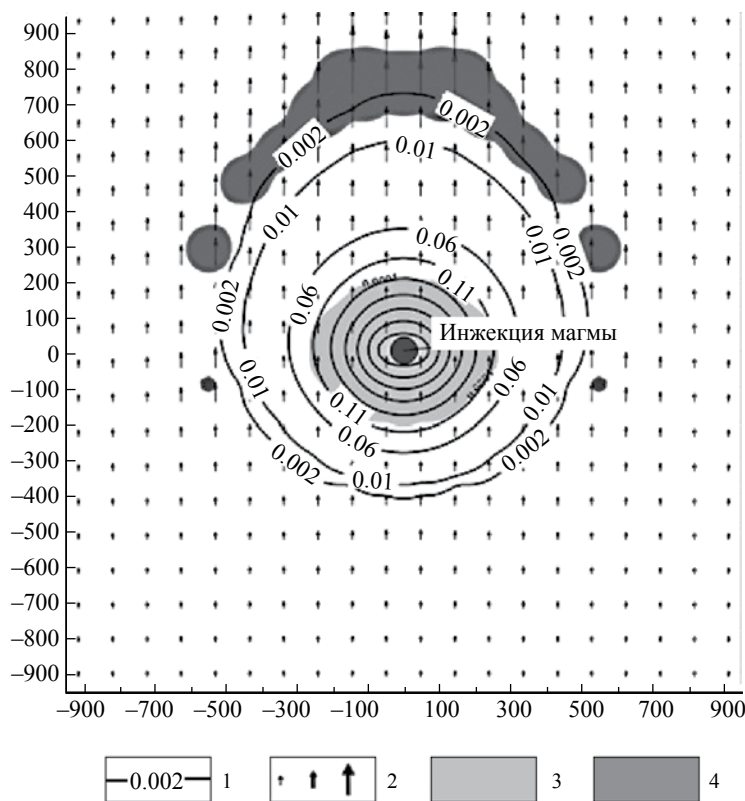


Рис. 9. Результаты гидромеханического моделирования инъекции магмы под Корякским вулканом (глубина инъекции 6 км) с использованием программы CFRAC [McCluer, 2014]. Распределение раскрытия трещины (положение трещины изображено на рис. 7), направления сдвиговых деформаций через 1 сут после начала инъекции магмы и гипоцентральные зоны плоско-ориентированных кластеров землетрясений. Разметка осей в м. 1 – изолинии раскрытия трещины (м); 2 – векторы направления сдвига (“лежачего” блока трещины относительно “висячего” блока, размеры векторов пропорциональны величине сдвига), размеры стрелок показанных в легенде соответствуют сдвиговым деформациям 1 м, 2 м и 3 м; 3, 4 – зоны с повышенными скоростями относительного сдвига стенок трещины: 3 – скорости свыше 10^{-4} м/с через 570 с после внедрения магмы, 4 – скорости свыше $3 \cdot 10^{-6}$ м/с через 1 сут после внедрения магмы.

Внутренняя часть трещины (радиусом около 500 м) характеризуется давлением флюида 60–90 МПа (избыточное давление 15–45 МПа) и раскрытием от 0.02 м на периферии до 0.3 м в центральной части, нормальные напряжения равны в указанной области нулю. Объем образованной при инъекции магмы дайки соответствует расходу магмы и составляет 60.8 тыс. м³. При инъекции магмы происходит соскальзывание верхней плоскости трещины относительно ее нижней плоскости (деформации сбросового типа), что хорошо проявлено в кумулятивном сдвиге в плоскости трещины от 1 м (на периферии) до 3 м (в верхней части). Скорости сдвиговых деформаций в верхней части трещины достигают $7.8 \cdot 10^{-6}$ м/с (на время 1 сут после начала инъекции магмы в трещину). Максимальные скорости сдвига стенок трещины достигаются в начальный момент ее раскрытия, например, спустя 570 секунд они достигают $2.9 \cdot 10^{-4}$ м/с. На рис. 9 изображены области, характеризующиеся максимальными скоростями сдвига стенок

трещины, они же представляют собой гипоцентральные зоны плоско-ориентированных кластеров землетрясений.

В программе CFRAC пороговое значение скорости сдвига для инициирования землетрясения при инъекции воды принимается равным $1 \cdot 10^{-3}$ м/с, в этот момент фиксируется элемент модели, в котором достигнуто указанное выше условие и начинается сейсморазрыв (earthquake rupture), запись микроземлетрясения заканчивается, когда максимальная скорость сдвига снижается до порогового значения. Характеристики зафиксированных таким образом землетрясений (время, координаты гипоцентра, сейсмический момент и магнитуда, динамика распространения фронта области сейсморазрыва) сохраняются в результирующих файлах. Опыт использования программы CFRAC (J. Norbeck, pers. com) показывает, что продолжительность микроземлетрясений, определяемых по указанной выше методике составляет до 1 секунды,

в то время как интервал времени между событиями может достигать суток и месяцев.

Сейсмический момент M_0 рассчитывается применительно к сдвиговой трещине следующим образом: $M_0 = G \cdot \int \text{slip} dA$, где G – модуль сдвига, slip – сдвиг, A – площадь сдвига, при этом расчет интеграла осуществляется суммированием сдвигов в период сейсморазрыва, умноженных на площади поверхности соответствующих элементов трещины. После этого рассчитывается магнитуда: $M_w = \lg(M_0)/1.5 - 6.06$ (где размерность M_0 выражается в Н · м).

Для областей с повышенными скоростями сдвиговых деформаций, показанными на рис. 9, оценки сейсмического момента по указанной выше формуле дают величину $M_0 = 5.7 \cdot 10^{15} - 6.8 \cdot 10^{15}$ Н · м, что соответствует магнитудам землетрясений 4.4–4.5 ($K_s = 7.4 - 7.6$).

2.2.4. Результаты CFRAC моделирования инжекции магмы с пониженной вязкостью

Моделирование инжекции магмы с пониженной вязкостью (2–20 Па · с) показывает асимметричное распространение трещины магморазрыва вверх, увеличение сдвиговых скоростей стенок трещины до $2 \cdot 10^{-3}$ м/с, т.е. внедрение менее вязких базальтовых магм характеризуется более выраженной микросейсмичностью.

3. ТЕПЛОЙ ЭФФЕКТ ВНЕДРЕНИЯ ДАЕК НА ПРИМЕРЕ ИЗОТОВСКОГО ИСТОЧНИКА

На Изотовском источнике (IS на рис. 1), характеризующемся температурой до 50 °С и расположенном в 7 км от вулкана Корякский,

в 2010–2016 гг. осуществлялась автоматическая запись температуры при помощи логгера НОВО U12 (частота записи 15 мин). В районе Изотовского источника и Корякских Нарзанов за период 2000–2016 гг. по сейсмическим данным зафиксировано 4 плоско-ориентированных кластера землетрясений 163, 166, 194 и 204, интерпретируемых как внедрение даек (см. табл. 2, рис. 1, рис. 2).

На рис. 10 отчетливо видно постмагматическое повышение температуры на 6–12 °С в зимний период 10.2011 г. – 06.2012 г. после предполагаемого внедрения дайки 02.08.2011: зафиксировано повышение максимальной месячной температуры T_{\max} на 6–12 °С по сравнению со среднесезонной максимальной месячной температурой T_{av} . Т.е. температурная волна от остывающей дайки пришла в источник спустя 2 месяца после ее внедрения, и аномальный тепловой режим источника сохранялся после этого в течение 10 месяцев. Повышение температуры Изотовского источника до 10 °С, синхронизированное с внедрением дайки 28.02.2016 г., зафиксировано также в 2015–2016 гг.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Активизация Корякского вулкана в 2008–2009 гг. нашла отражение в серии работ, посвященных анализу ее геологических причин и сопутствующих аномальных гидрогеологических изменений. В работе [Селиверстов, 2009] сейсмическая активизация Корякского вулкана объясняется геодинамической обстановкой формирования раздвиговой зоны субмеридионального простираения. В рассматриваемом случае растяжение в широтном направлении приводит к снижению

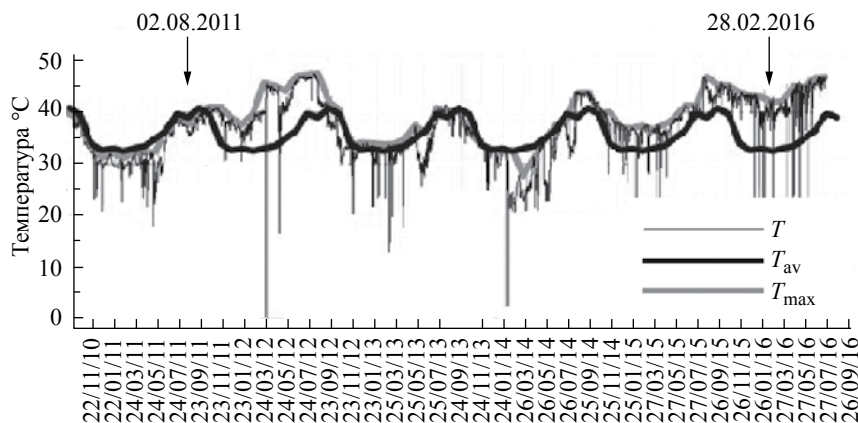


Рис. 10. Изменение температуры источника Изотовский и зафиксированные по результатам интерпретации локальной сейсмичности инжекции даек (№ 194, 2.08.2011 г. и № 204, 28.02.2016 г., см. табл. 1) в непосредственной близости от выхода источника в северном секторе Корякского вулкана.

T – зарегистрированные данные, T_{av} – среднесезонная максимальная месячная температура, T_{\max} – максимальная месячная температура.

минимального горизонтального стресса Sh_{min} и может теоретически (при снижении Sh_{min} на 45 МПа на глубине 6 км) привести к формированию нормальных разломов (сбросов) в соответствии с условиями разрушения, изображенными на диаграмме Мора (см. рис. 6). В работе [Гордеев и др., 2009] высказывается идея о сейсмической активизации гидротермального резервуара под Корякским вулканом в результате интрузий магмы. Этот механизм, очевидно, также может быть реализован с активизацией нормальных разломов, изображенных на диаграмме Мора (см. рис. 6), но тогда уже избыточное давление магмы должно составлять 45 МПа на глубине 6 км (–3 км абс.) и магма должна являться агентом гидроразрыва (этот случай и рассматривается в данной статье).

Наблюдения за изменением уровня в скв. Е1, расположенной в 15 км от Корякского вулкана, показали повышение уровня на 1.2 м в период активизации вулкана 2008–2009 гг. [Копылова, Болдина, 2012]. Это объясняется указанными авторами как результат сжатия водовмещающих горных пород и роста порового давления (на 0.12 бар). На наш взгляд, повышение уровня могло быть также вызвано усилением процессов газогенерации метана в Корякско-Авачинском вулканогенном бассейне в результате магматических интрузий. Поэтому уровневые наблюдения в целом скорее указывают на процессы инъекции флюидов в вулканогенном бассейне в период 2008–2009 гг., чем на его растяжение в результате глобальных тектонических процессов.

Кроме тектонических сил (см. выше), альтернативой магме для создания трещин гидроразрыва является только вода. Но в пределах Корякско-Авачинского вулканогенного бассейна не обнаружены артезианские скважины с АВПД (аномально высоким пластовым давлением), поэтому генерация трещин гидроразрыва водой по схеме Мора с указанными на рисунках 5 и 6 избыточными давлениями (45 МПа/–3000 м абс. и 7МПа/+1500 м абс.) – невозможна.

Постмагматический разогрев Изотовского источника (зима 2012, зима 2016 гг., см. рис. 10), находящегося в 7 км к северу от Корякского вулкана, также свидетельствует в пользу идеи о сейсмической активизации гидротермального резервуара в результате магматических интрузий [Гордеев и др., 2009].

Анализ механизмов очагов вулканических землетрясений 2008–2009 гг. [Лемзиков, Лемзиков] по полярности вступлений Р-волн указывает на плоскоориентированный характер разломов, ассоциирующихся с землетрясениями, их субмеридиональную ориентацию и позиционирование на разных глубинах (1.8–4.2 км) к югу от вершины Корякского вулкана и (4.2–12.7 км) к северу от

нее, что хорошо согласуется с полученными нами характеристиками плоскоориентированных кластеров землетрясений, изображенными на рисунках 1 и 2, и их (вероятно, гидравлическую) связь с центральным каналом вулкана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ локальной сейсмичности в пределах Авачинско-Корякской группы вулканов в период 2000–2016 гг. позволяет выявить последовательность плоскоориентированных кластеров землетрясений, интерпретируемых как процесс внедрения даек и силлов. Наиболее активная магматическая деятельность синхронизирована с парогазовым извержением Корякского вулкана 2008–2009 гг. (преобладающие глубины внедрений от –5 до –2 км абс.), после чего процесс инъекции магмы переместился в конус Авачинского вулкана 2010–2016 гг. (преобладающие глубины внедрений от 1 до 2 км абс.). Геометрия магматических тел отражает геомеханические условия растяжения в фундаменте Корякского вулкана с доминированием вертикальных напряжений S_v , причём максимальное горизонтальное напряжение SH_{max} ориентировано в северном направлении.

Гидрогеомеханическое моделирование инъекции магмы в трещину с характерными для условий фундамента Корякского вулкана свойствами (угол падения 60° , размеры 2×2 км², глубина – 4 км абс.) с использованием программы CFRAC [McCluer, 2014] показывает, что при расходе магмы 20000 кг/с в течение 1 сут раскрытие трещины увеличивается до 0.3 м, процесс инъекции магмы сопровождается сдвиговыми деформациями, происходящими со скоростью до $2 \cdot 10^{-3}$ м/с, что соответствует условиям локальных сейсмических событий с M_w до 4.5. Таким образом, использование плоско-ориентированных кластеров землетрясений для идентификации магматических внедрений обосновано результатами гидромеханического моделирования.

Процесс сейсмической активизации 02.08.2011 в районе Изотовского горячего источника (7 км от вершины Корякского вулкана), интерпретируемый как внедрение дайки, подтверждается повышением температуры источника 10–12 °С в период с октября 2011 г. по июль 2012 г. Оснащение логгерами (автономными устройствами регистрации температуры) для записи температурного режима Корякских Нарзанов (№ 1, № 2 и № 8) позволит получить дополнительную информацию о тепловом воздействии системы магматических каналов Корякского вулкана на прилегающую гидротермальную систему.

Качество и полнота имеющихся исходных данных, точность координат гипоцентров, которые

определяют возможности данного исследования механизма деятельности Корякско-Авачинской группы вулканов, определяются каталогами, предоставляемыми КФ ГС РАН, работа над уточнением которых и координат гипоцентров землетрясений продолжается. Поэтому некоторые изложенные выше результаты могут быть уточнены после получения более полных и точных данных о координатах очагов землетрясений. Независимые оценки скоростей внедрения и мощностей даек могут быть получены при их тепловых расчетах. В задачи дальнейших исследований входит использование высокоточных геодезических данных: радарных спутниковых съемок (InSAR) и более плотных сетей GPS/GLONASS станций. Такие новые сведения дополняют и позволят уточнить знания о свойствах магматической питающей системы крупной активной Корякско-Авачинской группы вулканов и о механизме вулканической деятельности.

Авторы выражают признательность за помощь в организации полевых работ, обработке и обсуждении полученных результатов Т. В. Рычковой, В. К. Григорьеву, П. О. Воронину, А. Ю. Полякову, А. В. Мушинскому, Т. Г. Чуриковой, И. К. Дубровской, Д. В. Мельникову, Я. Д. Муравьеву, И. Ф. Делеменю, В. К. Лемзикову, С. Л. Сенюкову, В. В. Иванову, С. Н. Рычагову, Г. Н. Копыловой, М. В. Лемзикову. Авторы также признательны М. McClure and R. Hogue за предоставление лицензии для использования программы CFRAC.

Работа выполнена при поддержке РНФ по проекту № 16-17-10008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К. и др. Корякский вулкан – современное состояние и активизация 2008–2009 гг. // Материалы IV Всеросс. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Вулканизм и геодинамика. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 588–590.
- Гордеев Е.И., Дроздин В.А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 349–351.
- Землетрясения России в 2013 году. Обнинск: ГС РАН, 2015. 224 с.: ил. + 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
- Землетрясения России в 2014 году. Обнинск: ГС РАН, 2016. 204 с.: ил. + 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
- Кирюхин А.В., Манухин Ю.Ф., Федотов С.А. и др. Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 5. С. 400–414.
- Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3–20.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями 2012 г. // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.
- Лемзиков В.К., Лемзиков М.В. Изучение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений в период подготовки и извержения вулкана Корякский (2008–2009 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 34–43.
- Поляк Б.Г. О характере геотемпературного поля в районе Авачинского вулкана // Докл. АН СССР. 1964. Т. 154. № 2. С. 329–332.
- Селиверстов Н.И. Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 7–9.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-технической конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91–95.
- Федотов С.А. О подъеме основных магм в земной коре и механизме трещинных базальтовых извержений // Известия АН СССР. Сер. геологическая. 1976. № 10. С. 5–23.
- Федотов С.А. Расчет питающих каналов и магматических очагов вулканов, имеющих устойчивые размеры и температуру // Вулканология и сейсмология. 1982. № 3. С. 3–17.
- Федотов С.А. О внедрении даек и механизме трещинных извержений // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5. С. 79–95.
- Федотов С.А. Об извержениях в кальдере Академии Наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3–37.
- Федотов С.А. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
- Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 32–46.
- Штейнберг Г.С., Зубина М.И. О глубине залегания магматического очага под Авачинским вулканом // Докл. АН СССР. 1963. Т. 152. № 4. С. 968.
- Gudmundsson A. Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments // J. of Volcanol. and Geotherm. Res. 2015. № 237–238. P. 19–41.

- Dumont S., Klinger Y., Socquet A. et al.* Magma influence on propagation of normal faults: Evidence from cumulative slip profiles along Dabbahu-Manda-Hararo rift segment (Afar, Ethiopia) // *J. of Structural Geology*. 2017. № 95. P. 48–59.
- Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S.* Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2015. № 307. P. 79–88.
- McClure M.W.* Modeling and characterization of hydraulic stimulation and induced seismicity in geothermal and shale gas reservoirs // PhD Thesis. Stanford, California: Stanford University, 2012.
- McClure M.W., Horne R.N.* Discrete Fracture Network Modeling of Hydraulic Stimulation: Coupling Flow and Geomechanics. Springer, 2013. doi: 10.1007/978-3-319-00383-2.
- McClure M.* CFRAC (version 1.2) Complex Fracturing Research Code User's Guide (version 20), December 2014. 88 p.
- Nicolas C., Michel F., Catherine D. et al.* Induced Microseismic Activity During Recent Circulation Tests At The EGS Site of Soultz-Sous-Forest (France) // Proc. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California: Stanford University, January 31 – February 2, 2011. SGP-TR-191.
- Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdottir S. et al.* Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Barrparbunga volcanic system, Iceland // *Nature*. 2015. V. 517. P. 191–194. doi:10.1038/nature14111.
- Zoback M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge: University Press, 2010. 448 p.