

УДК 550.82

ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ: ПРИЛОЖЕНИЯ
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
И СЕЙМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА

*А.В. Кирюхин¹, С.А. Федотов¹, А.В. Соломатин¹,
И.Ф. Делемень¹, П.А. Кирюхин²*

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский*

²*ООО «Эксиджен Сервисис», Санкт-Петербург*

Для выявления дискретной сети сейсмоактивных разломов по данным каталогов сейсмических событий КФ ГС РАН используется методика выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений. По данным региональной сейсмичности выделяется 17 разломов, характеризующихся наиболее высокой сейсмической активностью, в целом их ориентация соответствует геомеханическим условиям нормальных сбросов. Окончание ближайшего к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивного разлома этого класса находится на расстоянии около 90 км от города, разлом направлен в сторону г. Петропавловска-Камчатского. По данным локальной сейсмичности в районе Корякско-Авачинской группы вулканов установлена система дискретных сейсмоактивных магмовыводящих разломов, частично доступная для вскрытия поисково-разведочными скважинами с последующей перспективой создания EGS. Ориентация выявленных по сейсмическим данным системы магмовыводящих разломов соответствует геомеханическим условиям радиального растяжения. Аналогичные условия установлены для системы активных (продуктивных и термовыводящих) разломов Паратунского геотермального месторождения, находящегося в пределах Восточной Камчатской вулканической зоны в 50 км на ЮЗЮ от Корякско-Авачинской группы вулканов.

Введение

Крупнейшая в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне сейсмическая брешь общей протяженностью 350 км – одно из наиболее вероятных мест следующего сильнейшего землетрясения региона [6]. По краям этой бреши (м. Лопатка – Авачинский залив, эпицентр Большого Камчатского землетрясения 4.XI 1952 г., $M = 8,5$) наблюдались самые значимые отклики (сейсмические активизации) на уникальную серию сильнейших глубоких ($H = 580-630$ км) охотоморских землетрясений 2008-2013 гг., $M = 7,7, 7,7$ и $8,3$, а также на удаленное гигантское землетрясение Тохоку 11.III 2011 г., $M = 9$, Северо-Восточная Япония. Указанные активизации могут быть связаны с существенным перераспределением напряжений, определяемым с одной стороны масштабными изменениями сейсмотектонической обстановки, отражением которых являются указанные сильнейшие события, а с другой стороны - с формированием границ очагов следующих сильнейших землетрясений, наибольшее из которых возможно в проекции на область очага 1952 г. гигантского глубокого землетрясения 24.V. 2013 г. и с началом разрыва в Авачинском заливе.

Критически сжатые разломы [8] выполняют ключевую роль в подвижках земной коры, сопровождающихся сильными землетрясениями и формировании проницаемости в EGS (Engineered Geothermal Systems) [7]. Для выявления дискретной сети таких разломов по данным каталогов сейсмических событий КФ ГС РАН используется методика выделения плоско-ориентированных кластеров землетрясений [4,5]. В частности, для выявления сейсмоопасных разломов использован региональный каталог сейсмических событий Камчатки с классом выше 10, для выявления потенциальных объектов извлечения геотермальной энергии по технологии EGS использован локальный каталог сейсмических событий Авачинско-Корякской группы вулканов. Геомеханический анализ ориентации выявленных плоско-ориентированных кластеров может быть полезен для выяснения геомеханического режима рассматриваемых участков земной коры, роли флюидов в их активизации.

Геомеханический анализ региональной сейсмичности Камчатки

01.1980 – 02.2016 гг.

В качестве исходных данных для анализа использован региональный каталог землетрясений Камчатки КФ ГС РАН, включающий 5972 события с классом выше 10 за период регистрации 01.1980 – 02.2016 гг. Соответствующие плоско-ориентированные кластеры землетрясений были выделены со следующими критериями отбора: 1. близость по расстоянию в горизонтальной плоскости ($\Delta R < 100$ км); 2. Близость к плоской ориентации (расстояние от объекта до плоскости ΔZ не более 5 км); 3. Число элементов N в кластере не менее 6.

В результате выявлено 156 плоско-ориентированных кластеров, интерпретируемых нами в качестве сейсмоактивных разломов. Большая часть указанных разломов находится на восточном шельфе Камчатки. Среди указанных выше разломов выделяется 17, характеризующихся наиболее высокой сейсмической активностью (более 100 событий).

В целом преобладают разломы с углами падения $50-70^\circ$ на $S33$ ($300-310^\circ$), параллельные линии глубоководного желоба, выделяются также поперечные системы разломов разнообразного простирания. Это указывает на геомеханические условия растяжения в направлении $S33$ (305°) ($S_v > S_{Hmax} > S_{Hmin}$) с формированием поперечных сдвиговых систем разломов.

Рис. 1 демонстрирует фрагмент карты гидротермальной, вулканической и сейсмической активности Камчатки [2], включающий г. Петропавловск-Камчатский, и проекции выявленных сейсмоактивных разломов на абс. отм. -3 км. Сведения о наиболее активных разломах (по количеству землетрясений, число элементов в кластере не менее 100) в пределах рассматриваемого фрагмента карты приводятся в табл. 1, указанные разломы показаны на рис. 1 более жирными линиями и пронумерованы. Окончание ближайшего к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивного разлома этого класса (номер 4, рис. 1, табл.1) находится на расстоянии около 90 км от города, разлом направлен в сторону г. Петропавловска-Камчатского.

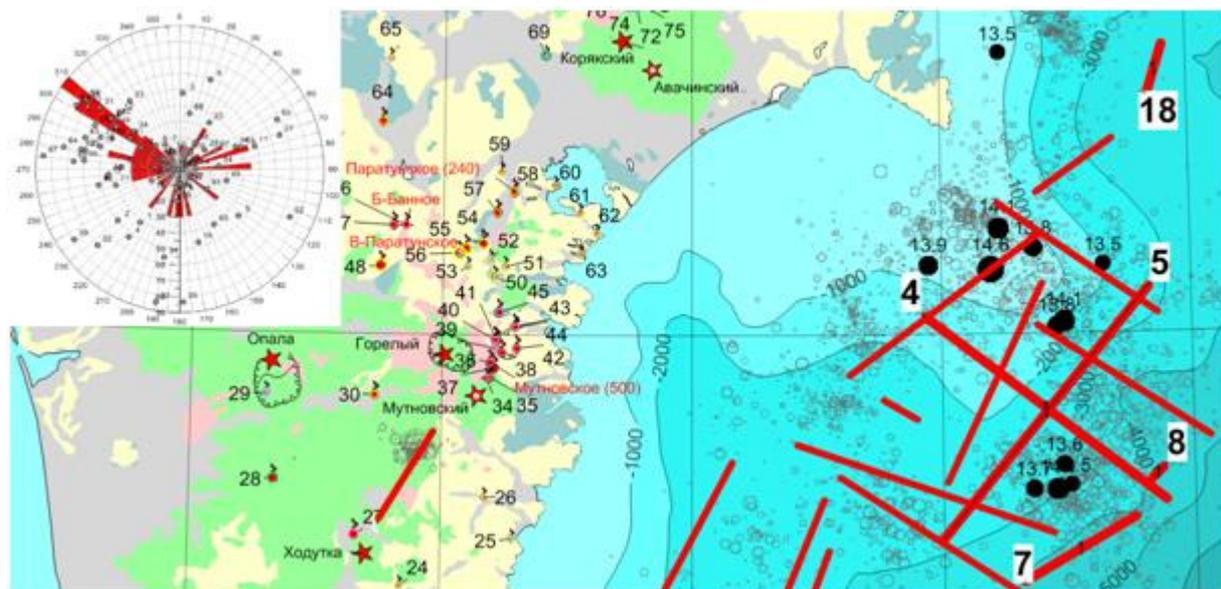


Рис. 1 Фрагмент карты, показывающей проекции сейсмически активных разломов на горизонтальную плоскость – 3 км абс (для определения плоскостей разломов использован региональный каталог КФ ГС РАН). Наиболее активные разломы показаны более жирными линиями и пронумерованы. Базовая карта и нумерация термальных источников соответствуют рис. 2.1 и каталогу [2]. Врезка в верхнем левом углу: стереограмма и роза-диаграмма соответствующих активных разломов (N>19). В качестве полярных координат используются азимут падения (направление) и угол падения (по радиусу от 0 до 90°) активных разломов.

Таблица 1. Выделенные плоско-ориентированные кластеры землетрясений (с числом событий более 100) из регионального каталога сейсмических событий Камчатки по району, прилегающему к г. Петропавловск-Камчатский (рис. 1) и параметры плоскостей, их аппроксимирующих. Примечание. X, Y, Z – координаты центров кластеров в географической системе координат WGS-84.

## кластера	Угол падения, град	Азимут падения, град.	X, град. в.д.	Y, град. с.ш.	Z км абс	Ks max	Число землетрясений в кластере	Площадь кластера, км ²
5	47	129	160.689	52.259	-29	13.9	231	1384.1
4	53	217	160.425	52.213	-26	14.4	175	34.8
7	18	329	160.135	52.552	-23	14.6	160	207.2
8	21	315	160.178	52.874	-34	13.1	144	78.9

Геомеханический анализ локальной сейсмичности в районе Корякско-Авачинской группы вулканов 01.2000 – 02.2013 гг.

Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности приводится в работе [5]. В частности показано, что вершинное парогозовое извержение Корякского вулкана 2008-2009 гг. сопровождалось 153-мя плоско-ориентированными кластерами землетрясений, интерпретируемыми как зоны внедрения даек и силлов при инъекции магмы. Подготовка извержения на-

чалась 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 x 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 избыточном 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 произошла инъекция магмы в конус Авачинского вулкана (2010 г.).

Рис. 2 показывает проекции основных магмовыводящих сейсмически активных разломов на горизонтальной плоскости – 3 км. абс. Соответствующие плоско-ориентированные кластеры землетрясений были выделены из локального каталога сейсмических событий КФ ГС РАН за период 01.2000 – 02.2013 гг. со следующими критериями отбора: 1. близость по расстоянию в горизонтальной плоскости ($\Delta R < 10$ км); 2. Близость к плоской ориентации (расстояние от объекта до плоскости ΔZ не более 1000 м); 3. Число элементов N в кластере не менее 6.

Сведения о наиболее активных из них (по количеству землетрясений, число элементов в кластере более 100) приводятся в табл. 2, указанные разломы показаны на рис. 2 более жирными линиями и пронумерованы. Общее количество выделенных магмовыводящих сейсмо-

Таблица 2. Выделенные плоско-ориентированные кластеры землетрясений из каталога сейсмических событий по району Корякско-Авачинской группы вулканов за 01.2000 – 02.2013 гг. и параметры плоскостей, их аппроксимирующих. Примечание. X, Y, Z – координаты центров кластеров (система координат UTM WGS-84).

## кластера	Угол падения, град	Азимут падения, град.	X м	Y м	Z м абс	Ks min	Ks max	Число землетрясений в кластере	Площадь кластера, км ²
7	48	74	480735	5909708	-4028	1.3	8.3	867	17.4
10	66	272	489077	5900989	981	1.6	6.9	848	10.6
2	43	69	479551	5908672	-5506	2.2	7.1	542	0.5
3	57	246	480299	5906344	-2912	1.6	7.2	502	43.3
11	66	81	478950	5905690	-4457	2	6.5	220	32.5
25	74	182	480498	5908416	-373	1.5	5.6	140	50.3
29	61	330	480373	5910473	-994	1.6	6.4	130	2.9

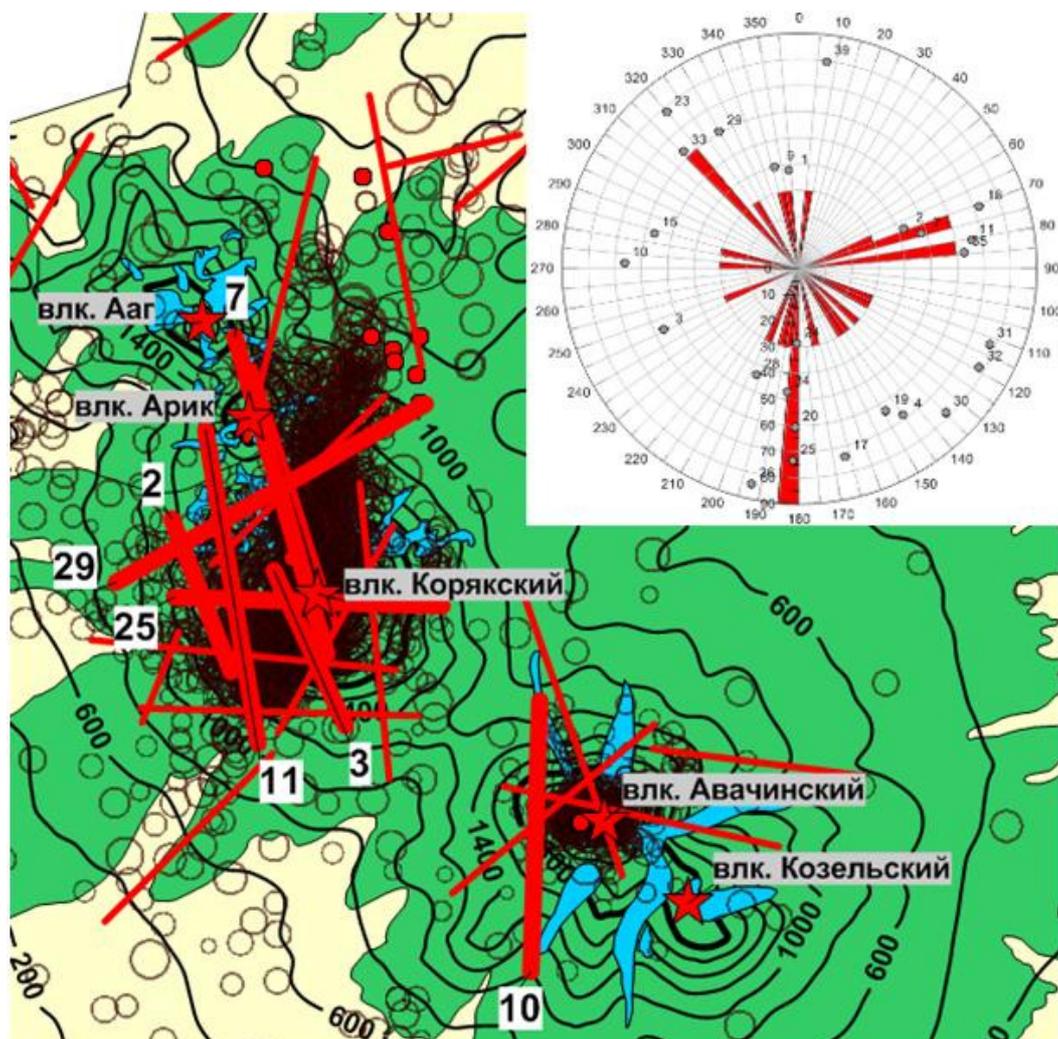


Рис. 2 Проекция магмовыводящих разломов Корякского и Авачинского вулканов на горизонтальную плоскость -3 км абс (для определения плоскостей разломов использован локальный каталог землетрясений КФ ГС РАН). Наиболее активные разломы показаны более жирными линиями и пронумерованы. Базовая карта соответствует рис. 2 (Кирюхин А.В. и др., 2016). Врезка в верхнем правом углу: стереограмма и роза-диаграмма соответствующих активных разломов ($N > 9$). В качестве полярных координат используются азимут падения (направление) и угол падения (по радиусу от 0 до 90°) активных разломов.

активных разломов составляет 41, большинство из них имеет углы падения $60-80^\circ$, различные направления падения, среди которых преобладают СЗ (320°), ВСВ ($70-80^\circ$) и Ю (180°). Это в целом указывает на геомеханические условия радиального растяжения ($S_v > S_{Hmax} = S_{Hmin}$).

Магмовыводящие сейсмоактивные разломы 2, 10, 25 и 29 на рис. 2 являются технически доступными при бурении скважин с отметок около +800 м абс. с горизонтальным отклонением. В частности, разлом 29 может быть вскрыт на глубине около 3 км при горизонтальном отклонении около 700 м.

Анализ распределения продуктивных зон Паратунского геотермального месторождения и геомеханическая интерпретация

Информация о распределении продуктивных плоско-ориентированных зон в пределах Паратунского геотермального месторождения исключительно важна, т.к. она получена по прямым данным о притоках в процессе бурения поисково-разведочных и эксплуатационных скважин. Исходными данными для расчета плоско-ориентированных кластеров продуктивных зон являются координаты вскрытия кровли продуктивных зон скважинами Паратунского геотермального месторождения [1]. Всего установлено 398 продуктивных зон с суммарным начальным притоком 1098 кг/с. В качестве критериев близости к плоскости продуктивной зоны приняты следующие параметры: стандартное отклонение от плоскости 100 м, размеры кластера в плане 4 км. Всего в пределах Паратунского геотермального месторождения выделяется 16 продуктивных плоско-ориентированных зон (рис. 3): субвертикальные продуктивные разломы, обеспечивающие приток глубинного теплоносителя в продуктивный геотермальный резервуар (1,2,3,6,11,14), наклонные продуктивные зоны (8,10) и субгоризонтальные (стратиформные) продуктивные зоны с углами падения до 15° (4,5,7,9,12,13,15,16). В дальнейшем обсуждении рассматриваются только плоско-ориентированные зоны, связанные с активными разломами (1,2,3,6,11,14) и (8,10).

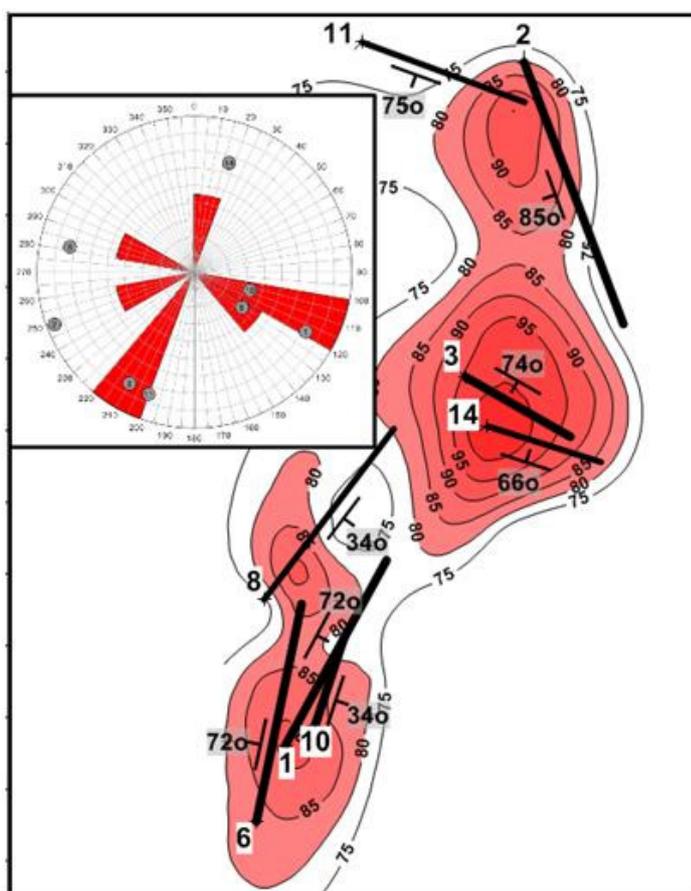


Рис. 3 Проекция активных (продуктивных и теплопроводящих) разломов на абс. отм. -750 м (наиболее продуктивные зоны показаны более жирными линиями) и распределение температуры в пределах Паратунского геотермального месторождения (-760 м абс.). На врезке: стереограмма и роза-диаграмма активных разломов, выявленных на Паратунском геотермальном месторождении. В качестве полярных координат используются азимут падения (направление) и угол падения (по радиусу от 0 до 90°) продуктивных плоско-ориентированных зон.

Субвертикальные продуктивные разломы. На Среднем участке эту роль выполняют разломы 1 и 6. Оба имеют угол падения 72° , но разлом 1 падает на ВЮВ, а разлом 6 на ЗСЗ. Разлом 1 самый продуктивный на месторождении: суммарный начальный приток из 84-х продуктивных зон составляет 267 кг/с (или 24% от всего притока по Паратунскому геотермальному месторождению). Разлом 6 вскрывает 16 продуктивных зон и характеризуется суммарным притоком 65 кг/с (или 6% от всего по месторождению). В верхней части резервуара (выше -750 м абс.) разломы пересекаются, формируя в зоне пересечения общую продуктивную зону.

На Нижне-Паратунском участке приток глубинного теплоносителя осуществляется по продуктивным разломам 3 и 14. Они имеют углы падения $66-74^\circ$, так же как и на Среднем участке разломы падают в разные стороны: разлом 3 на ЮЗЮ, разлом 14 на СВС. Разлом 3 вскрывает 21 продуктивную зону и имеет продуктивность 55 кг/с (5%), разлом 14 вскрывает 6 продуктивных зон и показывает продуктивность 7 кг/с (1%). В верхней части резервуара (выше -750 м абс.) разломы пересекаются, формируя в зоне пересечения общую продуктивную зону.

На Северном участке приток глубинного теплоносителя осуществляется по разломам 2 и 11. Разлом 2 имеет падение на ЗЮЗ под углом 85° , продуктивность 80 кг/с (7% от суммарной по месторождению). Разлом 11 имеет падение на ЮЗЮ 75° , имеет продуктивность 29 кг/с (3% от суммарной по месторождению).

Субвертикальные разломы обеспечивают 46% начальной продукции по Паратунскому геотермальному месторождению.

Наклонные продуктивные зоны выявлены на Среднем участке. Обе зоны (8 и 10) имеют ВЮВ падение, углы падения 34° . Суммарная продуктивность зон 92 кг/с (8% от общей по месторождению), при этом продуктивная зона 10 является наиболее продуктивной (ее продуктивность выше в 7 раз).

В целом система продуктивных субвертикальных разломов, питающих Паратунский геотермальный резервуар характеризуется углами падения $66-85^\circ$, различными направлениями падения, среди которых преобладают ВЮВ ($100-120^\circ$), ЮЗЮ ($200-220^\circ$) - что указывает на геомеханические условия радиального растяжения в пределах Паратунского геотермального месторождения ($S_v > S_{Hmax} = S_{Hmin}$). Геомеханический анализ с использованием диаграмм Мора показывает, что раскрытие и реактивация разломов 1, 3, 6, 11 и 14 по сдвиговому механизму могла произойти в результате притока глубинного теплоносителя с избыточным давлением над поверхностью Земли около 5 бар.

Выводы

1. Выявленные по данным региональной сейсмичности плоско-ориентированные кластеры интерпретируются в качестве сейсмоактивных разломов. Среди них выделяется 17, характеризующихся наиболее высокой сейсмической активностью. В целом преобладают разломы с углами падения $50-70^\circ$ на ЗСЗ ($300-310^\circ$), параллельные линии глубоководного желоба, выделяются также поперечные системы разломов различного простирания. Окончание ближайшего к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивного разлома этого класса находится на расстоянии около 90 км от города, разлом направлен в сторону г. Петропавловска-Камчатского.

2. Выявленная по данным локальной сейсмичности в районе Корякско-Авачинской группы вулканов система дискретных сейсмоактивных магмовыводящих разломов частично доступна для вскрытия поисково-разведочными скважинами с последующей перспективой создания EGS. Ориентация выявленных по сейсмическим данным системы магмовыводящих разломов соответствует геомеханическим условиям радиального растяжения. Аналогичные условия установлены для системы активных (продуктивных и термовыводящих) разломов Паратунского геотермального месторождения, находящегося в пределах Восточной Камчатской вулканической зоны в 50 км на ЮЗЮ от Корякско-Авачинской группы вулканов.

Качество и полнота имеющихся исходных данных, точность координат гипоцентров, которые определяют возможности данного исследования определяются каталогами, предоставляемыми КФ ГС РАН, работа над уточнением которых продолжается. Поэтому изложенные выше результаты являются предварительными и могут быть уточнены после получения более полных и точных данных о координатах очагов землетрясений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 15-05-00676.

Литература

1. *Кирюхин А.В.* Моделирование эксплуатации геотермальных месторождений // Владивосток, 2002. 195 с.
2. *Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов \ С-Петербург, Наука, 2010, 395 с.
3. *Кирюхин А.В., Манухин Ю.Ф., Федотов С.А., Лаврушин В.Ю., Рычкова Т. В., Рябинин Г.В., Поляков А.Ю., Воронин П.О.* Геофлюиды Авачинско-Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка. «Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология». №4. 2015. с. 306-320.
4. *Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А.* Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности предшествовавшей извержению Толбачинского вулкана 27.11.2012. Сборник 18-й конференции посвященной дню вулканолога, П-Камчатский, 2015, с.266-269.
5. *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 №4, 2016, 30 с. (в печати).
6. *Федотов С.А., Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2013 – VIII 2018 гг.; особенности сейсмичности дуги в период предшествовавших глубоких охотоморских землетрясений 2008, 2012 и 2013 гг. с $M = 7.7, 7.7$ и 8.3 // Вулканология и сейсмология. 2015. № 2. С. 3-19.
7. Proc. 41-th Stanford Geothermal Workshop 2016.
8. *Zoback, M.D.* Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 448 p.