

Раздел 6: СЕЙСМИЧНОСТЬ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РАЙОНОВ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КАМЧАТКИ

Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г.Петропавловск-Камчатский,
chebr@emsd.iks.ru*

В статье приведены данные о сейсмичности в районах высокотемпературных гидротермальных месторождений Южной Камчатки: Паужетского и Мутновского, где введены в эксплуатацию Паужетская (1967 г., 11 МВт), Верхне-Мутновская (1999 г., 12 МВт) Мутновская (2002 г., 50 МВт) геотермальные электростанции. По данным Камчатской региональной сети сейсмических показано, что после начала разработки гидротермальных полей зафиксированы поверхностные сейсмические события непосредственно из области эксплуатации месторождений, хотя ранее считалось, что местная сейсмичность здесь отсутствует. Необходима установка дополнительных сейсмических станций на разрабатываемых гидротермальных месторождениях Камчатки для мониторинга изменений гидротермальных систем.

SEISMICITY IN KAMCHATKAN EXPLOITED HYDROTHERMAL FIELDS

Chebrov V.N and Kugaenko Yu.A.

*Kamchatkan Branch of Geophysical Survey, RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky,
chebr@emsd.iks.ru*

In given report data about seismicity in areas of high-temperature exploited Pauzhetsky and Mutnovsky hydrothermal fields (Southern Kamchatka) are shown. Three geothermal power plants (Pauzhetsky, 11 MW, Verkhne-Mutnovsky, 12 MW and Mutnovsky, 50MW) began to work here in 1967, 1999 and 2002. By data of Kamchatkan regional seismic network it was showed that after the exploitation start, shallow earthquakes were registered immediately from zones of exploited hydrothermal fields. But earlier it was presumed than local seismicity is absent in these areas. It is necessary to organize additional seismic stations in exploited hydrothermal fields for hydrothermal system monitoring.

1. Введение

Вопросы изучения, индустриального освоения и комплексного мониторинга гидротермальных месторождений становятся все более актуальными на фоне топливно-энергетических проблем современного мира. По существующим прогнозам вклад возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в производстве электричества и тепла будет неуклонно возрастать. Уже сейчас вес геотермальной энергетики в мировом балансе применяемых ВИЭ превышает 60%.

В 2004 году в РАО «ЕЭС России» определены стратегические направления в развитии камчатской энергетики, главное из которых – переход на энергоресурсы полуострова. На Камчатке функционируют 3 геотермальные электростанции (ГеоЭС): Паужетская (с 1967 г., 11 МВт), Верхне-Мутновская (с 1999 г., 12 МВт) и Мутновская (с 2002 г., 50 МВт), они несут около четверти нагрузки по производству местной электроэнергии. Проблемы, возникающие при эксплуатации ГеоЭС, в том числе появление локальных землетрясений, важны для районов, не входящих в единую энергосистему России, где тепло Земли может с успехом заменить дорогостоящее привозное топливо, - для Камчатки, Чукотки, Курильских островов.

2. Пассивный сейсмический мониторинг

В ряде стран (США, Япония, Исландия, Италия, Филиппины) были приняты специальные правительственные программы, направленные на комплексное исследование геотермальных районов. Сложный характер циркуляции подземных вод и наличие мощного чехла четвертичных отложений делают необходимыми применение комплексных подходов к геотермальным исследованиям, в том числе обязательное включение в них геофизических методов. Применяется также пассивный сейсмический мониторинг (ПСМ) среды, использующий эндогенные источники сигнала природного происхождения: слабые локальные естественные и наведенные землетрясения и сейсмическую эмиссию [10, 11]. С помощью ПСМ при разработке гидротермальных месторождений могут решаться задачи уточнения конфигурации резервуаров и продуктивных зон, трассировки потоков флюидов и картирования термальных фронтов; обнаружения разломов. Эти данные могут служить основой для выбора мест дополнительного бурения. ПСМ может применяться для слежения за изменениями структуры месторождений в процессе бурения и разработки. Возможен контроль аварий ствола и обсадки скважин по сейсмическим данным. Микросейсмичность может являться индикатором смены режимов месторождений, связанной с глубинными механизмами их деятельности.

3. Сейсмичность гидротермальных систем

Микроземлетрясения сопровождают большинство крупнейших гидротермальных систем земного шара [12]. Подавляющее число микроземлетрясений гидротермальных систем характеризуется магнитудой $M < 4,5$ и глубиной проявления очагов до 6, редко до 13 км. Однако не все гидротермальные

системы, использующие тектонические нарушения различных порядков в качестве водоносных структур, сейсмоактивны. Например, исследования микросейсмичности на одном из крупнейших высокотемпературных месторождений Лонг Велли, показали, что интенсивная местная микросейсмичность лежит вне кальдеры, внутри которой вдоль разломов сосредоточены все горячие источники [9]. Мутновское и Паужетское месторождения на юге Камчатки до начала эксплуатации также не ассоциировались с локальной сейсмической активностью, однако сейчас на обоих гидротермальных полях по данным камчатской региональной сети сейсмических станций наблюдаются поверхностные землетрясения.

Мировой опыт свидетельствует об активизации сейсмичности на месторождениях полезных ископаемых, связанных со скважинным извлечением вещества из недр. Наиболее сильны и опасны землетрясения, происходящие вблизи месторождений в крупных тектонических разломах. Для них характерен скрытый, латентный период подготовки: они могут произойти через значительное время после начала разработки месторождений [4].

Обычно указывают три основных фактора, ответственных за появление землетрясения при вскрытии скважинами водоносного пласта [1]. Это:

- изменение эффективных напряжений в скелете горной породы за счет изменения порового или трещинного давления жидкости,
- изменение коэффициента трения вдоль трещин сдвига, ориентированных в соответствии с региональным полем напряжений,
- формирование зародышей трещин за счет быстрых геохимических реакций типа гидратация-дегидратация на контакте твердая фаза – жидкость, а также температурных деформаций.

Результаты сопоставления временного режима техногенной сейсмичности на месторождениях полезных ископаемых, в том числе подземных вод, с темпами эксплуатации неоднозначны [1]. Наряду со случаями четкой корреляции встречаются и случаи полного отсутствия зависимости параметров сейсмичности от параметров воздействия на месторождение. Это, видимо, зависит от разного уровня самоорганизации сейсмического процесса в зависимости от масштаба нарушения равновесия гидротермальной системы.

Район Паужетской ГеоЭС. Паужетская система термальных вод расположена на южной оконечности Камчатки в пределах крупной одноименной вулканотектонической структуры, характеризующейся интенсивной и разнообразной

геотермальной деятельностью и вулканической активностью. Здесь пересекаются две системы региональных разломов, активных в настоящее время. Термопроявления приурочены к крупным тектоническим нарушениям.

В 1959 году в этом районе была установлена сейсмостанция «Паужетка», одна из первых станций региональной сети Камчатки, функционирующая и сейчас. Вплоть до 2004 года здесь использовалась аналоговая запись с гальванометрической регистрацией на фотобумагу. Сейсмичность в коровой части южной Камчатки в первые годы детальных сейсмологических наблюдений была весьма незначительна: с 1961 по 1972 гг. не произошло ни одного землетрясения с энергетическим классом $K > 9$, а по данным с/с «Паужетка» отмечались лишь слабые редкие землетрясения с $T_s - p > 3$ с, что соответствует эпицентральному расстоянию больше 15 км.

В 1967 году была введена в строй Паужетская геотермальная электростанция, она расположена в нескольких сотнях метров от сейсмостанции «Паужетка». Резкая локальная сейсмическая активизация района гидротермального месторождения началась в 1973 г.: стали появляться интенсивные рои поверхностных землетрясений с $T_s - p < 2$ с (рис.1), что соответствует расстоянию до эпицентра не более 8 км. Во время роев регистрировались десятки землетрясений в течение суток. Два наиболее сильных события произошли в 1975 и 1976 г. и имели магнитуду $M=5$, они ощущались в поселке Паужетка и на сейсмостанции силой до 6 баллов. Первое и единственное сообщение в отечественной научной литературе об этом явлении отражено в статье [3]. Рои очень близких землетрясений продолжаются (рис. 1).

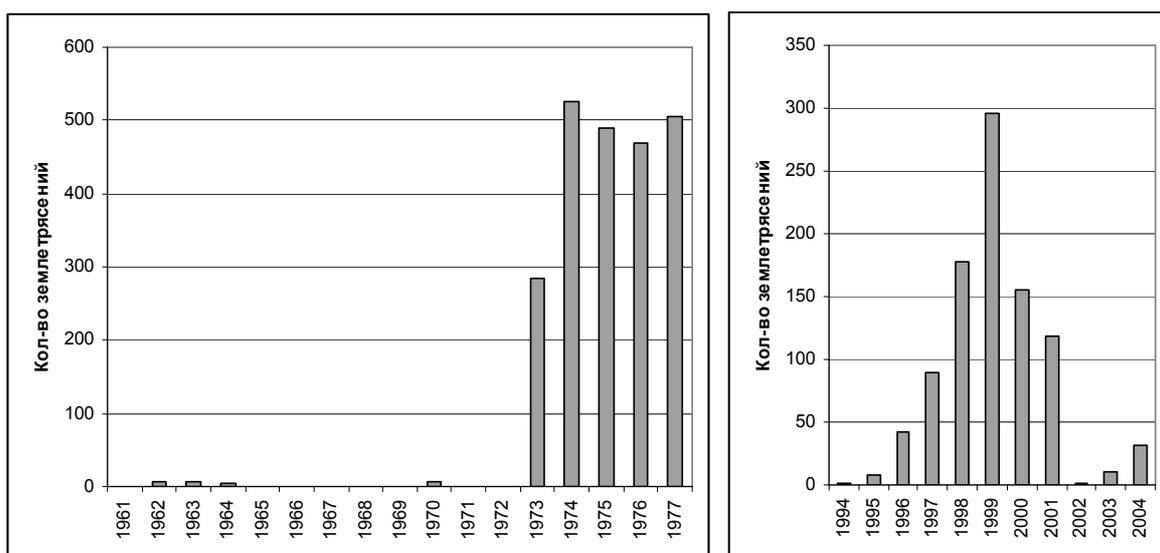


Рис. 1. Распределение по годам землетрясений с $T_s - p < 2$ с, зафиксированных сейсмостанцией «Паужетка». (Данные за 1978-1993 гг. неполны).

Уровень надежной регистрации для этого района – $K \geq 8.5$ по энергетической классификации [7]. Основное число локальных событий регистрируется только сейсмостанцией «Паужетка», поэтому параметры землетрясений не определяются. Происхождение роев может быть инициировано эксплуатацией гидротермального месторождения и связано со снижением пластового давления при непрерывном отборе термальных вод.

Ощутимые землетрясения в районе Паужетской ГеоЭС стали явлением привычным и привлекают незаслуженно мало внимания. Внезапное возникновение очага сейсмической активности в районе разрабатываемого гидротермального поля в 1973 году является первым случаем выявления наведенной сейсмичности на месторождениях термальных вод в нашей стране. Накоплен большой объем сейсмологических данных. На данном этапе исследований возбужденных сейсмических явлений этот опыт является уникальным и актуален для разработчиков месторождений. Следует отметить, что разрабатываемое месторождение лежит непосредственно в очаговой области возникающих поверхностных землетрясений и при $M=5$ балльность в локальных областях очаговых зон может превышать 6 баллов, что может привести к разрушениям построек и повреждению оборудования и скважин.

В начале 2005 года на сейсмостанции «Паужетка» установлена стационарная цифровая сейсмическая станция (СЦСС), разработанная в КФ ГС РАН. Ведется ее опытная эксплуатация и работа по обеспечению оперативной передачи цифровых данных на приемный центр «Петропавловск» для обработки. Скоро при применении соответствующих программ станет возможна оценка координат локальных землетрясений по данным одной станции в оперативном режиме.

Район Мутновского геотермического комплекса. Отсутствие здесь местной поверхностной сейсмичности подтверждается проводившимися в 80-годах XX века масштабными геолого-геофизическими работами. Их результаты отражены в серии отчетов Елизовской геофизической экспедиции Производственного геологического объединения «Камчатгеология» [2, 5, 6]. Сейсмологические исследования проводились аппаратным комплексом «Черепаша». Недостатком этих исследований является отсутствие энергетической классификации зарегистрированных землетрясений. Сейсмичность исследовалась в течение 8 полевых сезонов (1981-1988гг.), общее время регистрации составило 539 суток. За это время зафиксировано 660 землетрясений. Важным итогом этих работ было

обнаружение роев слабых землетрясений как под активными, так и под недействующими вулканами. Часть этих роев региональной сетью станций не регистрировалась. Кроме достаточно сильного Асачинского роя землетрясений 1983 года были зафиксированы Ходуткинский, Гореловский, Вилючинский, Мутновский, Толмачевский, Опалинский рои. Отмечено, что землетрясения роев концентрируются вдоль ограниченных сейсмоактивных участков. Для каждого роя характерно ограниченное время активности. В ходе проведенных работ поверхностной сейсмической активности непосредственно в районе Мутновского гидротермального месторождения выявлено не было.

Рассмотрим данные о поверхностной сейсмоактивности этого района по результатам региональных наблюдений. Ближайшими к Мутновскому месторождению являются радиотелеметрические сеймостанции «Горелый» (GRL, работает с июля 1980 года), расположенная на склоне одноименного вулкана, и «Бухта Русская» (RUS, работает с декабря 1987 года) (рис.2). По имеющимся сейсмологическим данным надежно, без пропусков для этой области формируется каталог землетрясений с 6,5 класса.

На **рис. 2** представлены карты эпицентров землетрясений, фиксированных региональной сетью сейсмических станций Камчатки с 1962 г. по май 2004 г. в районе $52.4-52.8^{\circ}$ с.ш., $158.0-158.5^{\circ}$ в.д. (размер области 34 на 44 км), куда входят вулканы Мутновский, Горелый, Вилючинский и Мутновский гидротермальный

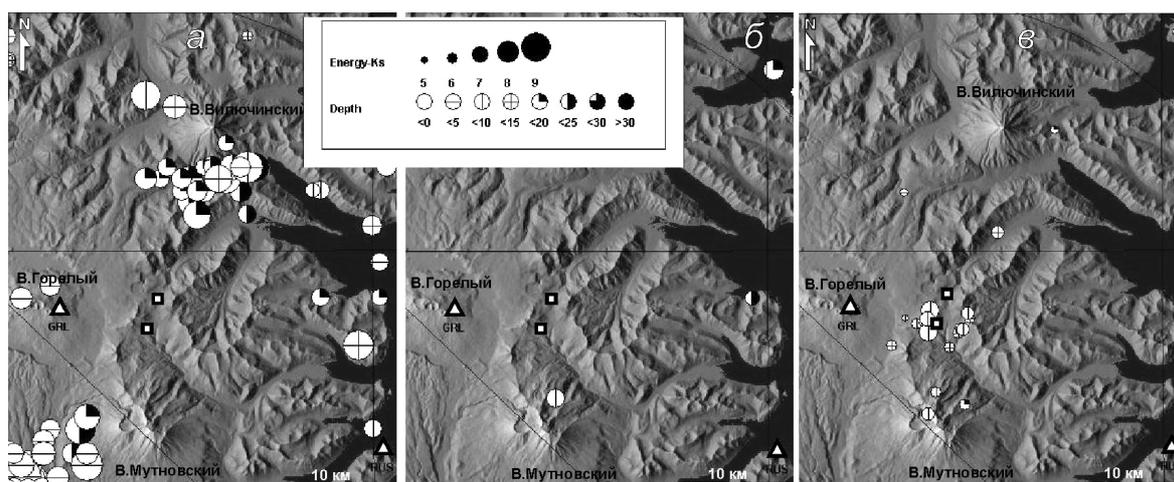


Рис. 2. Карты эпицентров землетрясений района $52.4-52.8^{\circ}$ с.ш., $158.0-158.5^{\circ}$ в.д., имеющих глубину до 20 км, для промежутков времени: а- 1962-1987 гг., б- 1988-1995 гг., в – 1996 – 2004 гг. Сейсмические станции Камчатской региональной сети отмечены треугольниками. Квадраты – Мутновская и Верхне-Мутновская ГеоЭС.

комплекс. Показаны только поверхностные события с инструментально определенной глубиной очагов $H < 20$ км. На картах также отмечено положение Мутновской и Верхне-Мутновской ГеоЭС.

Интервалы времени выбраны следующим образом:

а – период от начала детальных сейсмологических наблюдений (1962) до установки в декабре 1987 г. региональной сейсмостанции «Бухта Русская», которая вместе со станцией «Горелый» входит в пару ближайших к месторождению. Этот момент является определяющим для увеличения числа регистрируемых локальных событий и улучшения точности определения их координат. На рис.1-а слева внизу видны эпицентры, относящиеся к Асачинскому рою 1983 г. В центральной части – рой землетрясений 1981 года около Вилючинского вулкана.

Зарегистрированы также 2 события с вулкана Горелый и другие единичные поверхностные события. Землетрясений в районе Мутновского месторождения не зафиксировано. Следует отметить, что начало 80-ых годов характеризуется геодинамической активизацией всего рассматриваемого района: рои землетрясений под вулканическими постройками, извержения вулкана Горелый 1980-1981 гг. и 1984-1985 гг.

б – от установки станции «Горелый» до момента первого землетрясения из района Мутновских ГеоЭС, которое произошло в 1996 году. Этот период времени (1988-1995) очень спокоен: зафиксировано лишь одно землетрясение в прибрежной части рассматриваемой территории и одно под Мутновским вулканом.

в – период 1996-2004 гг. также характеризуется малой активностью района. Представлен эпицентр землетрясения под вулканом Мутновский и в верхней части рисунка – слабые единичные события. Внимание привлекает центральная часть иллюстрации – район гидротермального месторождения. Здесь зафиксированы слабые местные мелкофокусные землетрясения. Разброс эпицентров вызван недостаточной точностью определения координат.

Полученные данные позволяют предположить, что в районе Мутновского месторождения проявилась локальная сейсмичность, вызванная техногенным воздействием на среду и нарушением динамического равновесия гидротермальной системы. Мы не располагаем данными о фактическом начале эксплуатации месторождения и работах, которые проводились здесь до официального пуска Верхне Мутновской ГеоЭС в 1999 году. Поэтому нет возможности сопоставить во времени появление первых землетрясений с характером воздействий на

месторождение. К сожалению, эта часть уникальной информации уже безвозвратно потеряна. Видимо, сейсмический отклик гидротермальной системы на разработку не заставил себя ждать так долго, как на Паужетке. По аналогии с сейсмической активизацией в районе Паужетской ГеоЭС, можно ожидать ощутимые поверхностные землетрясения и вблизи Мутновского геотермического комплекса.

4. Заключение

На разрабатываемых гидротермальных месторождениях Камчатки (Паужетском и Мутновском) зарегистрирована местная сейсмическая активность, которая появилась после начала их эксплуатации. Землетрясения слабые: максимальная магнитуда для района Паужетской ГеоЭС $M=5$, для Мутновского комплекса $M=2$. Возникновение землетрясений (наведенная сейсмичность) под воздействием промышленной эксплуатации является серьезным экологическим последствием разработки месторождения. Эта проблема в настоящее время является одной из важнейших для геофизики и геоэкологии: явление мало изучено и характеризуется непредсказуемостью развития процесса в силу того, что вызвано комплексом причин, необычных для окружающей среды.

Наведенная сейсмичность свидетельствует об изменении свойств среды в области ее появления. Эти области теряют устойчивость свойств и приобретают исключительную чувствительность к внешним воздействиям. В частности, возможен непредсказуемый отклик таких участков среды на сейсмическое воздействие извне (на прохождение сейсмические волны сильного землетрясения, которое может произойти у южной части Камчатки) [8].

Сеть постоянных сейсмических станций Камчатки ориентирована на слежение за региональной сейсмичностью и не предназначена для анализа локальных эффектов, связанных, вероятно, с интенсивным техногенным воздействием на среду, инициировавшим землетрясения и нарушившим естественное равновесие гидротермальной системы. Для контроля за сейсмическим процессом на разрабатываемых гидротермальных месторождениях Камчатки необходима организация дополнительных пунктов наблюдений. Желательно установить плотные группы из 3-4 цифровых сейсмостанций станций как на Мутновском, так и на Паужетском месторождениях. При этом уровень надежной регистрации для этих районов достигнет $K=4.5-5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Барабанов В.Л.** Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твердых полезных ископаемых. // *Наведенная сейсмичность*. М.: Наука. 1994. С.157-165.
2. **Белоусов С.П., Осьмакова А.М., Скрипников А.П.** Отчет о проведении поисковых геофизических работ на южных флангах Мутновского Месторождения парогидротерм в 1984-1985 гг., КПГО, 1986 г. Фонды ФГУ КамТФГИ.
3. **Левина В.И., Фирстов П.П.** Сейсмичность Паужетского геотермального района на Камчатке. // *Вулканология и сейсмология*. 1980. №2, Сс.81-97.
4. **Николаев А.В.** Наведенная сейсмичности. Природные опасности России. Сейсмические опасности. М.: КРУК. 2000. С.139-164.
5. Отчет о проведении детальных поисковых геофизических работ на участке «Дачный», поисковых геофизических работ на западных флангах Мутновского месторождения парогидротерм и работ по обобщению геофизических материалов по Мутновскому геотермальному району в 1987-1990 гг. Книги 1-6. Отв. Исп. Я.Б.Шварц. Елизово 1990 268с. Фонды ФГУ КамТФГИ.
6. **Пак Г., Курносоев А.Л. и др.** Отчет о специальных комплексных геолого-геофизических исследованиях, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений в 1984-1985 гг. Т.1. г.Елизово Камчатской обл. 1986 г. Фонды ФГУ КамТФГИ.
7. **Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
8. **Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д.** Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на 2004 – 2008 гг. и ретроспективный прогноз Хоккайдского землетрясения 25 сентября 2003 г., $M=8.1$ // *Вулканология и сейсмология*. 2004. №5. С.3-22.
9. **Iyer H.M., Hitchcock T.** Seismic noise survey in Long Valley, California. *J. Geophys. Res.*, 1976, V.81, No.5. P.821-840.
10. **Maxwell C., Urbancic I.** The role of passive microseismic monitoring in the instrumented oil field. // *The Leading Edge*, 2001, V.20, N6, P.636-639.
11. **Soma N., Niitsuma H.** Identification of structures within the deep geothermal reservoir of the Kakkonda Field, Japan, by a reflection method using acoustic emission as a wave source. // *Geothermics*, 1997, V.26, N 5-6. P. 43-64.
12. **Ward P.L.** Microearthquakes: Prospecting tools and possible hazard in the development of geothermal resources. // *Geothermics*, 1972, V.1, N 1. P.1-12