

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 502.52+550.34+550.065

Ю. А. КУГАЕНКО, Д. В. МЕЛЬНИКОВ

ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕНЕЗА В ГЕОДИНАМИЧЕСКИ АКТИВНОМ РАЙОНЕ МУТНОВСКОГО ГЕОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНАЯ КАМЧАТКА)

Приведены данные о техногенных явлениях в районе Мутновского месторождения парогидротерм на Камчатке, где в 1999–2002 гг. введен в эксплуатацию комплекс геотермальных электростанций общей мощностью 62 МВт. Показано, что его интенсивное воздействие на среду нарушает естественное равновесие гидротермальной системы, меняет ее параметры, вызывает появление локальных землетрясений. Зафиксирован и описан гидротермальный взрыв в пределах эксплуатируемой площади, в результате которого образовалось новое поверхностное термопроявление. В условиях планируемой интенсификации разработки месторождения можно ожидать дальнейшей активизации геодинамики района.

Presented are the data on man-caused phenomena in the area of the Mutnovsky field of steam and thermal springs on Kamchatka, where a set of geothermal power plants, with the power totaling 62 MW, was commissioned during 1999–2002. It is shown that its intensive environmental impact disturbs the natural equilibrium of the hydrothermal system, alters its parameters, and triggers local earthquakes. A hydrothermal explosion was recorded within the area under development, resulting in a new surface thermal manifestation. Given the planned intensification of the development efforts, a further activation of the region's geodynamics might be anticipated.

Геотермальная энергия в России — один из самых перспективных нетрадиционных возобновляемых источников энергии, прежде всего для решения проблем теплоснабжения и локального электроснабжения ряда регионов — Камчатки, Курильских островов, Сибири, Северного Кавказа, Калининградской области и др. Энергия геотермальных ресурсов России в 10–12 раз превышает весь потенциал органического топлива [1, 2]. Строительство геотермальных станций (ГеоЭС) позволяет частично заменить традиционную выработку электроэнергии экологически чистым способом на основе использования энергии геотермальных источников. В последние годы развитию геотермальной энергетики уделяется все больше внимания, о чем свидетельствует строительство и пуск на Камчатке комплекса геотермальных электростанций: в 1999 г. Верхнемутновской ГеоЭС (12 МВт) и в 2002 г. двух энергоблоков Мутновской ГеоЭС общей мощностью 50 МВт.

В статье представлены данные о техногенных явлениях в районе Мутновского гидротермального месторождения — появлении поверхностных землетрясений, изменении параметров гидротермальной системы, гидротермальном взрыве и возникновении нового поверхностного термопроявления. Эти события относятся к важным экологическим последствиям разработки месторождения.

Камчатка — геодинамически активный регион, характеризующийся высокой тектонической, сейсмической и вулканической активностью. Геодинамика и техногенез — новая проблема развития цивилизации на Земле, проблема противоречий между человеком и средой его обитания.

Среда жестко реагирует на внешние и внутренние воздействия, а последствия такой реакции еще не до конца изучены. Техногенная деятельность способна не только активизировать или, наоборот, замедлять развитие природных геологических процессов, но может также вызывать инженерно-геологические процессы, которые раньше на территории не отмечались. В рамках современных представлений при нарушении естественного равновесия геофизической среды возможен ее нелинейный отклик на внешние воздействия и быстрое, катастрофическое развитие геодинамических процессов, особенно в таком активном регионе, как Камчатка.

© 2006 Кугаенко Ю. А., Мельников Д. В. (e-mail: ku@emsd.ru; dvm@kcsiks.ru)

Планируемая мощность Мутновского геотермического комплекса — 300 МВт. В ближайшие годы предполагается интенсификация эксплуатации месторождения. Это ведет к дальнейшему нарушению естественного равновесия среды в области гидротермальной системы, развитию опасных эндогенных процессов и выдвигает на первый план проблему организации комплексного мониторинга месторождения.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МУТНОВСКОМ ГИДРОТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

Мутновское месторождение теплоэнергетических вод (Южная Камчатка, рис. 1) в соответствии с принятой в России классификацией относится к типу высокотемпературных месторождений парогидротерм с пароконденсатной (двухфазной) зоной. Среди известных в настоящее время камчатских термопроявлений (более 150 групп) оно наиболее доступно для эксплуатации природного теплоносителя и перспективно по ресурсам и тепловым параметрам [3].

Термопроявления пространственно связаны с областями молодого и современного вулканизма, что свидетельствует о тесной связи магматизма и гидротерм. Месторождения гидротерм молодого и современного вулканизма чрезвычайно сложны. Обычно пористость толщ вмещающих пород мала, поэтому в большинстве случаев условия для локализации подземных вод имеются лишь в трещинных зонах, секущих эти структуры. Источники тепла и горячих водных масс, обеспечивающих наблюдаемую интенсивность теплотерм в течение продолжительного времени, связаны с внедрением в водоносные слои глубинного теплоносителя — магмы или надкритического флюида [3, 4].

На территории Мутновского геотермального района расположены два действующих вулкана — Мутновский (последние извержения в 1961 и 2000 гг.) и Горелый (он спокоен с 1986 г.), молодые шлаковые конусы и множество выходов на поверхность термальных вод. Разгрузка гидротермальных систем в виде выходов пара и горячих вод происходит на площади около 60 км². Основные типы естественных поверхностных термопроявлений — паровые струи, кипящие грязевые котлы, теплые озера, участки рассредоточенного пропаривания грунта, в кратерах Мутновского вулкана — фумаролы с температурой до 500–700 °С.

Мутновское месторождение парогидротерм расположено на выс. 800–900 м, на участке пересечения крупного тектонического шва северо-восточного простирания и широкого грабена, образованного систе-

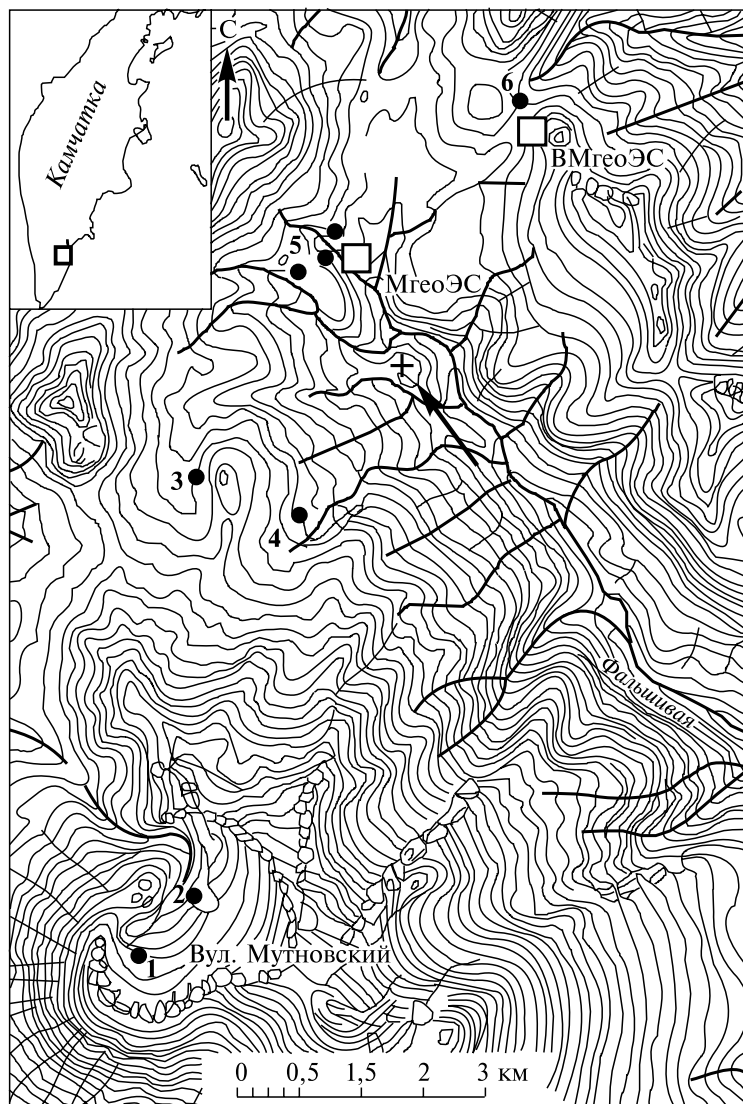


Рис. 1. Схема Мутновского геотермального месторождения.

Естественные термопроявления: 1 — активная воронка кратера вулкана Мутновского; 2 — донное поле кратера вулкана; 3 — Северо-Мутновские западные, 4 — Северо-Мутновские восточные; 5 — Дачные, 6 — Верхнемутновские. Геотермальные электростанции: МгеоЭС — Мутновская, ВМгеоЭС — Верхнемутновская. Стрелкой и крестиком показано место гидротермального взрыва и образовавшееся в результате этого термопроявление.

мой субмеридиональных сбросов. Здесь же проходят разломы северо-западного простирания и неявно выраженная на местности система широтных нарушений. Этот уникальный по сложности дробления блоковый узел создает условия, благоприятные для локализации парогидротерм. Главная отличительная особенность парогидротерм — двухфазное (пар и вода) состояние теплоносителя в очаге разгрузки. Перегретые воды вскипают на глубине. На уровне вскипания происходят пароотделение, дегазация, резкое падение температуры.

Деятельность парогидротерм сопровождается сложными физико-химическими процессами. Ниже зоны вскипания наблюдается ощелачивание гидротерм, а выше образуется «паровая шапка», в которой идут процессы формирования кислых агрессивных вод. Характер циркуляции теплоносителя по всей исследованной глубине месторождения трещинно-жильный, при этом наиболее обводненные участки связаны с зонами повышенной тектонической трещиноватости [3, 4]. Согласно карте общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 [5, 6] Мутновское месторождение находится в 9-балльной зоне. Для района ГеоЭС вероятность сотрясений с интенсивностью 9 баллов в течение 50 лет составляет 10 %.

Рельеф территории месторождения типично горный. Растительность характерна для высокогорной тундры и крайне бедна. Район не населен, и обслуживание геоэнергетического комплекса осуществляется вахтовым методом. Буровые работы на месторождении ведутся с 1978 г., пробурено около 90 скважин глубиной от 250 до 2500 м, вскрывающих двухфазный теплоноситель с температурой 200–250 °С и зону перегретых вод с температурой до 320 °С, обеспечивающих функционирование Мутновского геоэнергетического комплекса общей мощностью 62 МВт.

Экономическая эффективность и надежность наряду с экологической безопасностью — главные факторы, благодаря которым геотермальная энергетика получает все более широкое применение во многих странах. В настоящее время Мутновская ГеоЭС по уровню автоматизации и экологическим параметрам считается лучшей геотермальной станцией в мире. Можно говорить о практически полной экологической чистоте Мутновского геоэнергетического комплекса относительно атмосферы и естественных водоемов, поскольку технология, применяемая при его эксплуатации, почти полностью исключает контакт теплоносителя с окружающей средой. Однако не следует забывать и о других сторонах воздействия аналогичных промышленных объектов на окружающую среду, в том числе о геодинамическом отклике литосферы на отбор термальных вод и изменение температурных условий.

Обычно к экологическим последствиям разработки гидротермальных ресурсов относят следующее [7, 8]: выпуск в атмосферу пароводяной смеси; загрязнение естественных водоемов вследствие сброса отработанных термальных вод; понижение гидростатического уровня водоносного комплекса, что ведет к ослаблению и даже исчезновению естественных поверхностных проявлений, как это уже наблюдалось на Паужетском и Налычевском месторождениях на Камчатке; оседание земной поверхности; карст; появление (активизация) наведенной сейсмичности.

На Мутновском геоэнергетическом комплексе отработанный теплоноситель закачивается обратно в недра для сохранения ресурсов месторождения. При этом происходит и захоронение вредных компонентов теплоносителя, содержание которых превышает предельно допустимую концентрацию — сероводорода, бора, мышьяка, ванадия, хрома. На территории геотермального поля проводится рекультивация. Карстовые явления не характерны для районов современного вулканизма. Однако интенсивное техногенное воздействие ГеоЭС на среду нарушает естественное равновесие гидротермальной системы, меняет ее параметры и вызывает локальные землетрясения.

МЕСТНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Детальные сейсмологические исследования Камчатки начаты в 1962 г. В настоящее время на полуострове функционирует региональная сеть из 37 сейсмических станций, ориентированная на исследование региональной сейсмичности Камчатки и Командорских островов. Конфигурация и технические возможности этой сети не позволяют осуществлять необходимый контроль тонкой структуры сейсмичности в локальных районах, в частности вблизи зоны эксплуатации Мутновского геотермального поля, где до сих пор нет сейсмической станции.

В 1980-е гг. в районе Мутновского геотермального месторождения проводились масштабные геолого-геофизические работы [9], в том числе исследования местной сейсмичности с помощью временных локальных станций на более низком энергетическом уровне, чем это позволяет региональная сеть. В ходе этих работ поверхностной сейсмической активности непосредственно в районе Мутновского гидротермального месторождения выявлено не было.

Целесообразно рассмотреть данные о поверхностной сейсмоактивности этого района по результатам региональных наблюдений. Ближайшими к Мутновскому месторождению являются сейсмостанция Горелый (GRL, работает с июля 1980 г.), расположенная на склоне одноименного вулкана в

Рис. 2. Эпицентры землетрясений района (52.4° – 52.6° с. ш., 158.0° – 158.5° в. д.), имеющих глубину до 20 км, для промежутков времени: 1962–1995 гг. (а), 1996–2004 гг. (б).

Треугольниками отмечены сейсмические станции Камчатской региональной сети, квадратами — Мутновская и Верхнемутновская ГеоЭС.

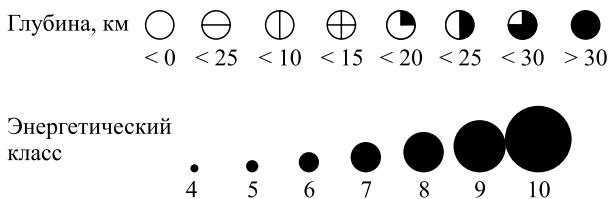
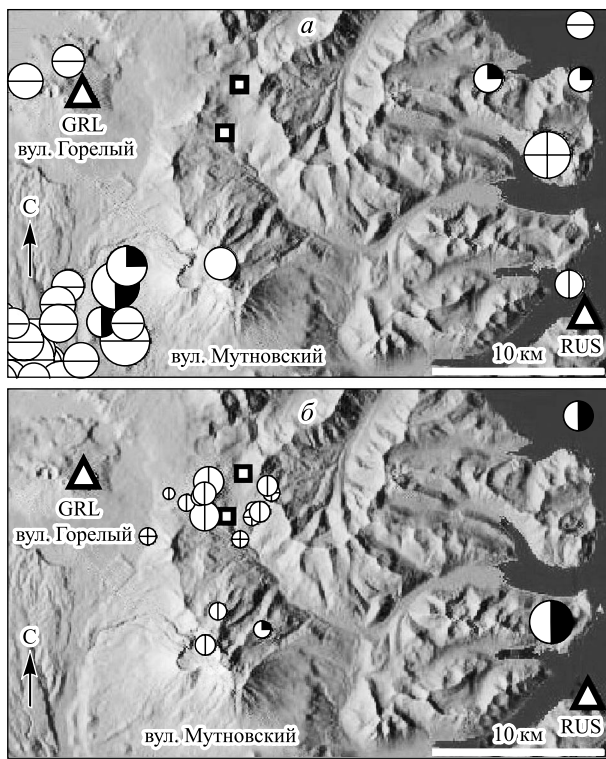
12 км от электростанции, и сейсмостанция Бухта Русская (RUS, работает с декабря 1987 г.). На рис. 2 представлены карты эпицентров землетрясений, фиксированных региональной сетью сейсмических станций Камчатки с 1962 по 2004 г. в районе 52.4° – 52.6° с. ш., 158.0° – 158.5° в. д., включая вулканы Мутновский и Горелый, а также Мутновский геотермальный комплекс. Энергетическая классификация землетрясений соответствует опубликованной С. А. Федотовым [10]. Показаны только поверхностные события с инструментально определенной глубиной очагов $H < 20$ км. На картах отмечено положение Мутновской и Верхнемутновской ГеоЭС.

Рассматривались два периода наблюдений: первый — от начала детальных сейсмологических исследований (1962 г.) до появления в 1996 г. первых землетрясений непосредственно в районе разработки месторождения; второй — с 1996 г. до конца 2004 г. На рис. 2 (см. а) слева внизу видны эпицентры, относящиеся к мощному рою землетрясений под вулканом Асача в марте–апреле 1983 г. [11]. Зарегистрированы также единичные поверхностные проявления на вулканах Горелый и Мутновский. Землетрясений в районе Мутновского месторождения не отмечено. В период 1996–2004 гг. (см. рис. 2, б) внимание привлекает район геотермального комплекса, где в это время зафиксированы слабые местные землетрясения. Разброс эпицентров вызван недостаточной точностью определения координат.

Появление поверхностных землетрясений непосредственно в области разрабатываемого гидротермального поля вызывает определенное беспокойство, поскольку ранее землетрясения здесь не фиксировались. Это свидетельствует об изменении напряженного состояния среды под влиянием разработки месторождения, которая вызывает изменение естественных физических полей, прежде всего механического и геотермического. Адаптация к новому напряженному состоянию сопровождается возникновением слабых землетрясений, а в тектонически активных районах возможны умеренные и даже сильные сейсмические события.

Наведенная сейсмичность связана с изменением свойств горных пород и их напряженного состояния, с блоковой дифференциацией среды, степенью активности разломов, с интенсивностью и темпами разработки месторождений, поэтому ее изучение — одна из ключевых и приоритетных проблем современной геофизики [7, 12]. Несмотря на то, что исследованию техногенной сейсмичности уделяется значительное внимание, проблема эта изучена недостаточно. Значительная часть сведений получена на основе макросейсмических данных (когда на месторождениях отмечались уже ощутимые землетрясения), а не инструментальных наблюдений.

В обзоре работ, посвященных техногенным геофизическим явлениям на месторождениях полезных ископаемых, в том числе подземных вод, показано, что результаты сопоставления временного режима техногенной сейсмичности с темпами эксплуатации неоднозначны [13]. Наряду с четкой корреляцией наблюдается и полное отсутствие зависимости параметров сейсмичности от степени воздействия на месторождение, что связано с разным уровнем самоорганизации сейсмического процесса и масштабом нарушения равновесия гидротермальной системы. Как свидетельствует богатый опыт разработки нефтяных и газовых месторождений, также связанных с отбором вещества из недр, сильные землетрясения могут произойти даже через много лет после начала работ [7, 14].



ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Результаты мониторинга гидрологических параметров в скважинах в течение первого года работы Мутновской ГеоЭС (2003 г.) опубликованы [15]. Объем добычи теплоносителя в это время составил 6397 тыс. т пароводяной смеси и 2303 тыс. т пара. Только в марте–ноябре 2003 г. объем добычи теплоносителя плавно снизился на 14 %. Снижение температуры за год эксплуатации по всем скважинам составило от 10 до 27 °С. Отмечены изменения химического состава теплоносителя на скважинах зоны «паровой шапки» месторождения. Наблюдается линейное равномерное снижение пластового давления в гидротермальном резервуаре со скоростью 0,005 бар/сут, что является характерным признаком превышения расхода отбора теплоносителя над расходом притока глубинного теплоноси-

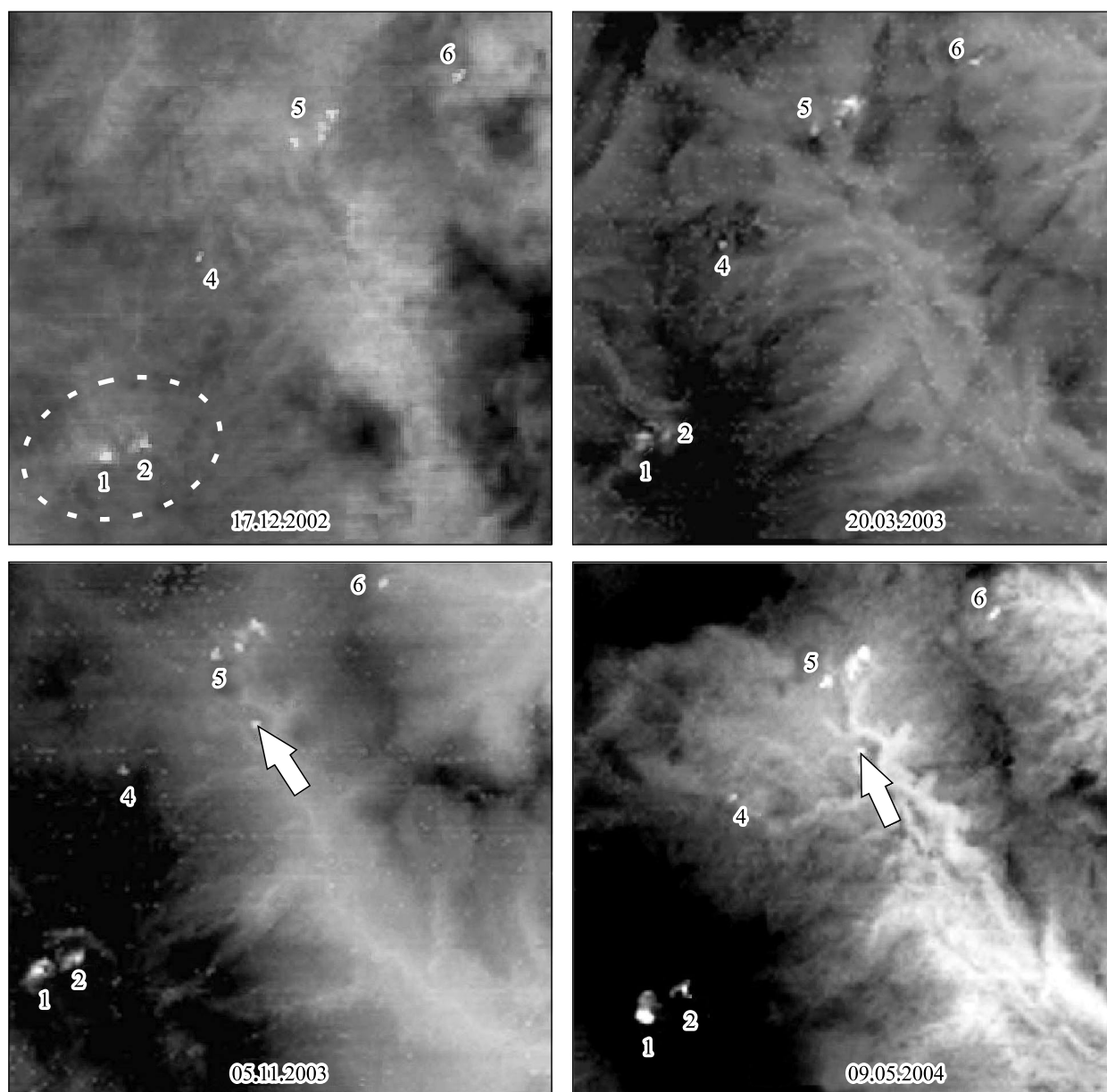


Рис. 3. Спутниковые снимки района Мутновского гидротермального месторождения в тепловом диапазоне спектра (космический аппарат Тегга, сенсор ASTER).

Более светлый тон соответствует большей температуре. Термальные аномалии пронумерованы в соответствии с номерами естественных термопроявлений Мутновского геотермального месторождения (см. рис. 1). Верхние снимки сделаны до взрыва, нижние — после. На нижних снимках термоаномалия, соответствующая новому термопроявлению, образовавшемуся в результате взрыва, отмечена стрелкой.

теля в геотермальный резервуар. Продуктивные скважины сосредоточены на площади около 0,2 км², что обуславливает их интенсивное взаимодействие и снижение продуктивности.

В августе 2003 г. в районе Южного полигона реинжекции, расположенного на соответствующей периферийной площади разрабатываемого Дачного участка месторождения, около ликвидированной несколько лет назад скважины, вследствие нарушения естественного природного гидродинамического равновесия произошел гидротермальный взрыв. Это явление известно также как «гидротермальное извержение» [16], а в практике разработчиков месторождений используется термин «грифон». Глубина скважины, пробуренной в 1983 г. и находящейся в 20 м от места взрыва, 1369 м. По данным на 2000 г. она была уже ликвидирована.

В результате взрыва возникло новое поверхностное термопроявление: вытянутый примерно на 50 м кипящий грязевой котел (температура кипения на высоте месторождения 97 °С), из которого вытекает горячий ручей. Борта кратера пронизаны парящими трещинами и продолжают разрушаться. Образовавшаяся воронка обследована сотрудниками Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. С осени 2003 г. термопроявление отчетливо выделяется на космических снимках в тепловом диапазоне спектра (спутник системы наблюдения Земли (Тerra) (рис. 3). Образовавшаяся термоаномалия по уровню тепловой эмиссии сопоставима с основными естественными термопроявлениями Мутновского месторождения — зонами разгрузки парогидротерм.

Характеристика гидротермального извержения (см. таблицу) основана на схеме, использованной новозеландскими исследователями [17] при описании аналогичных явлений. За скорость выброса материала принята наименьшая, необходимая для достижения обломками границы площади, покрытой отложениями взрыва. Оценки объема изверженного материала и энергии гидротермального взрыва проведены на основе материала полевых наблюдений в соответствии с рекомендациями [17, 18].

Таким образом, масштаб нарушения равновесия гидротермальной системы вследствие эксплуатации не определен. Отсутствие целенаправленного разностороннего, в том числе сейсмического, мониторинга месторождения не позволяет произвести оценку происходящих изменений. Наведенная сейсмичность, падение пластового давления в гидротермальном резервуаре, понижение гидростатического уровня водоносного комплекса, гидротермальные взрывы относятся к важным экологическим последствиям разработки месторождений полезных ископаемых, в частности гидротермальных систем. Эти явления взаимосвязаны и характеризуют процессы техногенного изменения состояния среды. Для контроля за этими процессами необходим их комплексный мониторинг с использованием различных методов.

Возникновение землетрясений и снижение пластового давления в резервуаре, которое привело к вскипанию перегретых вод на глубине, могли повредить скважину и обусловить продвижение глубинного теплоносителя к дневной поверхности по затрубному пространству и трещинам. Подъем теплоносителя, видимо, был временно задержан плотным приповерхностным слоем туфов. Дальнейшее разрушение, предшествовавшее гидротермальному взрыву, произошло либо в момент очередного локального землетрясения, либо из-за дальнейшего увеличения давления вскипающего теплоно-

Характеристика гидротермального извержения Мутновского геотермального поля, Камчатка (52.31° с. ш., 158.11° в. д.)

Показатели	Параметры
Дата	Август 2003 г.
Тип образовавшегося термопроявления	Кипящий грязевой котел, температура 97 °С
Характеристика гидротермального резервуара	Зона напорных перегретых вод
Размеры кратера	Длина 50 м, ширина 20–30 м, глубина 1–1,5 м
Максимальный радиус выброса материала	200 м
Максимальная мощность взрывных отложений	0,5 м
Площадь взрывных отложений	50 000 м ²
Объем изверженного материала	2000 м ³
Максимальные размеры бомб	0,3 м
Скорость выброса материала	64 м/с
Оценка глубины извержения	Поверхностный очаг
Оценка энергии	10 ⁷ кДж
Иницирующий механизм	Образование паровой шапки вследствие падения давления в резервуаре в ходе эксплуатации; землетрясение

Примечание. Визуальных данных нет; место взрыва мало посещаемо, жертв нет; растительность уничтожена; в 20 м от кратера находится ликвидированная скважина (1369 м).

сителя, когда был превышен предел прочности поверхностных пород. При резком сбросе давления до атмосферного газ высвобождается из термальных вод в виде взрывов или пароводяного фонтанирования (извержения) со скоростью выбросов до сотен метров в секунду с разрушением среды, окружающей место первичного нарушения.

Приведенные данные свидетельствуют об изменении геодинамических свойств литосферы в области гидротермальной системы. Зоны нарушения равновесия приобретают особую чувствительность к внешним воздействиям. В частности, возможен непредсказуемый отклик таких участков среды на сейсмическое воздействие. Для южной части Камчатки это может быть сильное землетрясение, возможное здесь по данным долгосрочного прогноза [19].

Значительное сейсмическое воздействие может оказать также извержение вулканов Мутновского и Горелого. Эффект влияния сейсмических волн такого землетрясения на выведенную из динамического равновесия среду в окрестностях геотермальных объектов способно вызвать местную сейсмическую активизацию, и могут произойти землетрясения значительно сильнее происходящих там сейчас. Это укладывается в рамки современных представлений о возможности нелинейного отклика геофизической среды на внешние относительно слабые воздействия. Вызывает также обоснованное беспокойство возможность последующих гидротермальных взрывов, которые в условиях нарушенного естественного равновесия среды могут быть инициированы как сильным удаленным землетрясением, так и появившимися в последние годы локальными сейсмическими событиями.

Проблема всестороннего контроля и исследования промышленно эксплуатируемых гидротермальных месторождений является новой для российских геологии, сейсмологии и геофизики. Необходимо имеющийся опыт и данные, полученные на Камчатке, использовать и в других районах, где планируется или уже ведется разработка гидротермальных систем. Прежде всего это относится к Курильским островам и Северному Кавказу, которые, как и Камчатка, являются районами активной геодинамики и высокой сейсмичности. Наиболее эффективным при контроле процессов, происходящих на разрабатываемом месторождении, представляется комплексный подход, который можно рассматривать как геологический мониторинг.

Мутновский геотермальный комплекс может рассматриваться как сложная горная природно-техническая система, ведущая роль в стабильности функционирования которой принадлежит геологической среде. Техногенная часть этой системы, воздействуя на напряженно-деформированное состояние массива пород, вызывает развитие и активизацию опасных эндогенных процессов, отличающихся от их природных аналогов большой непредсказуемостью, поскольку вызывающие их факторы недостаточно изучены и малообычны для окружающей среды. В условиях планируемой интенсификации разработки месторождения можно ожидать дальнейшей активизации геодинамики района.

Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Интеграция» (Э0334/946).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Поваров О. А.** Тепло Земли — эффективное энергообеспечение удаленных районов и ЖКХ России // Возобновляемая энергия. — 2003. — Декабрь.
2. **Никольский А. И.** Локальные системы тепло- и электроснабжения на основе использования тепла Земли // Энергия России. — 2004. — № 20.
3. **Геотермические** и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм. — М.: Наука, 1986.
4. **Гидротермальные** системы и термальные поля Камчатки. — Владивосток, 1976.
5. **Страхов В. Н., Уломов В. В., Шумилина Л. С.** Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных стран // Физика Земли. — 1998. — № 10.
6. **Уломов В. В., Шумилина Л. С.** Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации ОСР-97 м-ба 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. — М., 1999.
7. **Николаев А. В.** Наведенная сейсмичность. Природные опасности России. Сейсмические опасности. — М., 2000.
8. **Опасные** экзогенные процессы. — М.: ГЕОС, 1999.
9. **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. — Елизово, 1990. — Кн. 1–6.
10. **Федотов С. А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. — М.: Наука, 1972.
11. **Токарев П. И.** Асачинский рой землетрясений и его природа (Камчатка, март–апрель 1983 года) // Вулканол. и сейсмол. — 1984. — № 3.
12. **Николаев А. В.** Проблемы наведенной сейсмичности // Наведенная сейсмичность. — М.: Наука, 1994.
13. **Барабанов В. Л.** Техногенные геофизические явления на месторождениях подземных вод, нефти, газа и твердых полезных ископаемых // Там же.

14. **Харькина М. А.** Добыча полезных ископаемых и окружающая среда // Энергия. — 2003. — № 5.
15. **Чернев И. И.** Результаты первого года (2003) эксплуатации Дачного участка Мутновского месторождения парогидротерм. [Электронный ресурс]. — Петропавловск-Камчатский, 2004.
16. **Smith T., McKibbin R.** An investigation of boiling processes in hydrothermal eruptions // Prossiding world hydrothermal congress 2000. — Kyushu-Tohoku, 2000.
17. **Brown P. R. L., Lawless J. V.** Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // Earth-Science Reviews. — 2001. — Vol. 52, Is. 4.
18. **Wohletz K., Heiken G.** Volcanology and Geothermal Energy. Univ. — California Press, 1992.
19. **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., $M = 8.1$ // Вулканол. и сейсмол. — 2004. — № 5.

*Камчатская опытно-методическая партия Геофизической службы РАН
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-
Камчатский*

*Поступила в редакцию
20 апреля 2005 г.*