

Изотопы в исследованиях геотермальной энергии

И. Барбье, М. Фанелли и Р. Гонфиантини*

Многим читателям Бюллетеня МАГАТЭ, который обычно посвящается проблемам ядерной энергетики, публикация данной статьи о геотермальной энергии может показаться несколько странной. Какой вклад может внести изотопная техника в развитие и исследование этой формы энергии, которая представляет собой лишь очень незначительную долю от производимой в настоящее время в мире энергии? Данная статья является попыткой коротко проиллюстрировать развитие геотермальной энергетики и роль изотопных методов в геотермальных исследованиях, являющихся одним из видов широкого применения изотопов в гидрологии, геохимии и геологии.

Нелегко ответить на вопрос и относительно будущего геотермальной энергетики. Пока ясно одно, что до настоящего времени эксплуатировались только сравнительно легко доступные геотермальные районы, а также и то, что в ближайшем будущем геотермальная энергия может стать важным фактором в индустриальном и социальном развитии многих районов развивающихся стран. Однако особенно привлекательна геотермальная энергия тем, что ее первичный источник практически неисчерпаем: это внутреннее тепло Земли. Вопрос заключается лишь в том, как использовать даже в отдаленном будущем такой неисчерпаемый резервуар имеющейся в изобилии энергии.

Тепло из глубин Земли

Еще в 18 веке произведенные в шахтах измерения температуры показали, что с глубиной она возрастает: другими словами, существует постоянный тепловой поток из глубин Земли к поверхности. Средний температурный градиент составляет 3°C при углублении на 100 метров.

Земля как бы состоит из трех участков, считая от поверхности к центру: земная кора, мантия и металлическое ядро. Земная кора, состоящая, главным образом, из гранитов в верхней и базальтов в нижней частях, имеет толщину около 35 километров под континентами; под океанами земная кора имеет толщину только 5 км и состоит, в основном, из базальтовых пород. Она плавает на поверхности более плотного и пластичного вещества типа перидотита, из которого состоит мантия, имеющая тол-

щину 2900 км. Земная кора делится на шесть основных платформ, которые перемещаются относительно друг друга.

Вдоль так называемых срединноокеанических хребтов вещество мантии поднимается к поверхности Земли, определяя рост смежных платформ. Поэтому платформы отодвигаются друг от друга со скоростью от 2 до 20 см в год. По геологическим понятиям это огромная скорость. Этот рост компенсируется в других зонах, зонах сочленения, где одна платформа уходит под другую в мантию. Эти зоны часто связаны с океаническими впадинами, ограниченными цепочкой островов или горными хребтами по краям континентов. Обычно срединноокеанические хребты и зоны сочленения являются областями, в которых внутреннее тепло Земли достигает поверхности и где расположено большинство вулканов и геотермальных областей.

Геотермальные области

Геотермальные области — это области, в которых температура грунтовых вод значительно выше нормальной величины и где вода может использоваться для различных целей, таких как обогрев помещений или производство энергии (температура выше 150°C). Источником тепла являются интрузии магмы на глубине от 7 до 15 км или, в случае более тонкой земной коры, сама магма. Тепло передается в примыкающие к поверхности области первоначально теплопроводностью, а затем конвекцией грунтовых вод. Непроницаемые породы охватывают проницаемые образования, содержащие горячую воду (геотермальные резервуары), предотвращая или ограничивая потери тепла и поддерживая давление в горячей жидкости. Если скважины достигают геотермального резервуара, горячая жидкость может быть извлечена и использована.

При особо благоприятных условиях может быть получен перегретый сухой пар с температурой часто превышающей 250°C . Такой пар может непосредственно направляться в турбины для вращения генераторов и производства электроэнергии. Такая геотермальная электроэнергия является самой дешевой по сравнению с любыми другими способами производства электроэнергии. Примерами таких областей являются Лардерелло и Монте Амьята (Италия), Гейзерс (Калифорния, США) и Мацукава (Япония).

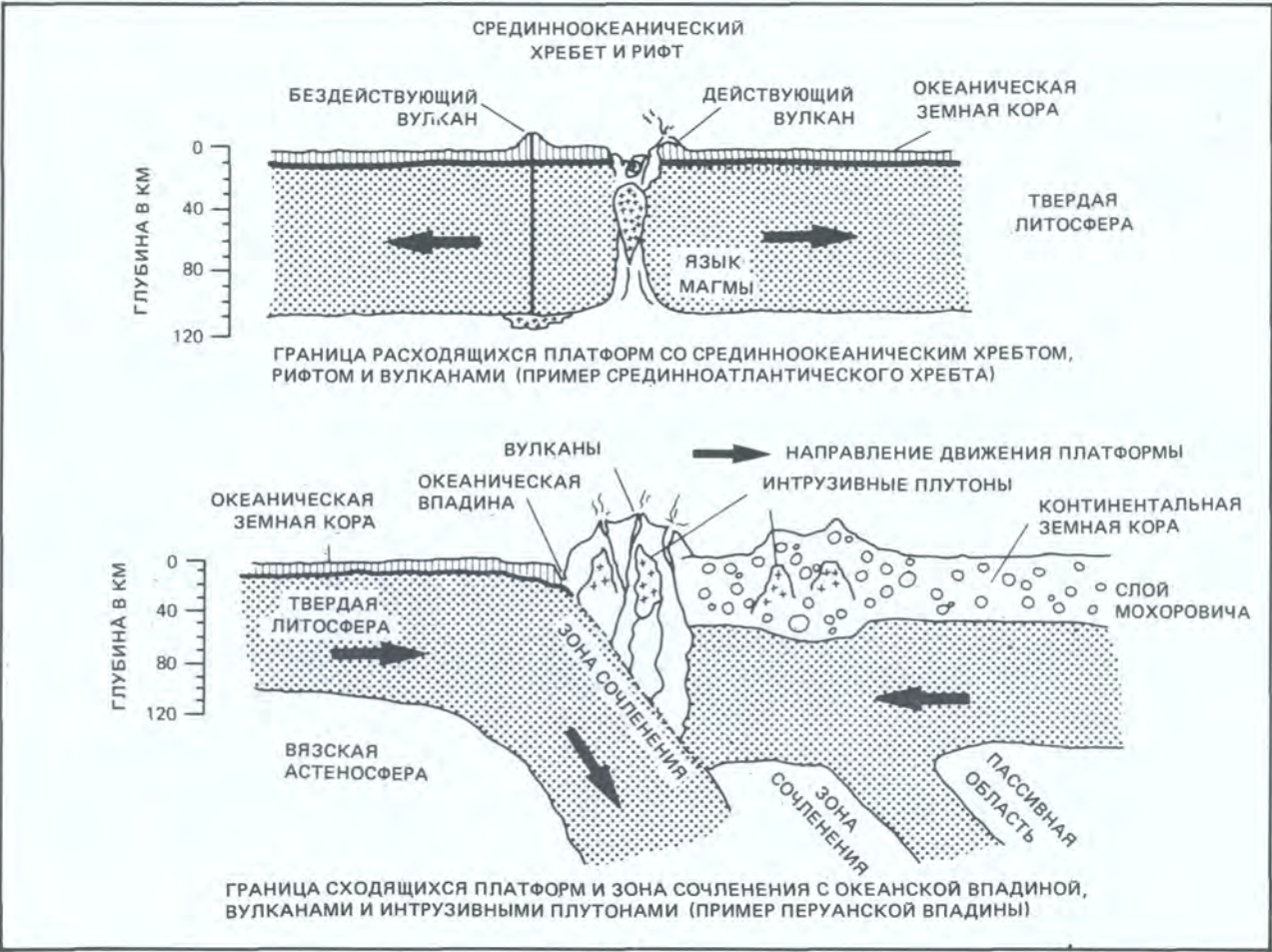
Геотермальные области, поставляющие смесь пара и горячей воды, менее благоприятны, но все же экономически пригодны для выработки энергии.

* Г-да Барбье и Фанелли представляют Международный институт геотермических исследований, Виа дель Буонгусто 1, 56 100, Пиза, Италия. Г-н Гонфиантини является сотрудником секции изотопной гидрологии отдела исследований и лабораторий МАГАТЭ.



Карта, показывающая местоположение большинства выявленных геотермальных областей. Они расположены вдоль простира-
ния хребтов и континентальных рифтов, в особенности вдоль зон сочленения.

Схема срединноокеанического простира-ния хребта и зона сочленения (журнал Geoth. Energy Mag., февраль, 1976)



В этом случае перед направлением пара в турбины необходимо отсепарировать воду. К таким областям относятся Вайракеи (Новая Зеландия), Сьерро Прието (Мексика) и другие геотермальные области в Японии, на Филиппинах и в других местах планеты. Горячая вода обычно несет большое количество растворенных солей, что может приводить к возникновению проблемы коррозии и отложения солей.

Когда температура горячих грунтовых вод составляет только 50–100 °С, такие воды используются, главным образом, для отопления жилых помещений, теплиц и т.п., как это делается в Китайской Народной Республике, Франции, Венгрии, Исландии, СССР и во многих других странах. Они также широко применяются для лечебных ванн.

Хотя геотермальные станции уже давно эксплуатируются по всему миру, их суммарная установленная мощность только около 2 700 МВт (э) (см. таблицу), что соответствует примерно 2% от мощности всех атомных электростанций мира. Однако к этой мощности следует добавить неэлектрическое использование геотермальной энергии. Кроме того, существует ряд уже определенных геотермальных областей, которые будут эксплуатироваться в 80-х годах. Они расположены в следующих странах: Чили, Греция, Гватемала, Индия, Никарагуа и Вест-Индия (владения Франции). Геотермальные исследования проводятся и во многих других странах, особенно многообещающие результаты получены в Аргентине, Боливии, Болгарии, Колумбии, Коста Рике, Джибути, Эквадоре, Эфиопии, Иране, Израиле, Перу, Польше, Испании (Канарские острова), Тай-

ланде. Во многих развивающихся странах геотермальное производство энергии может в будущем удовлетворить значительную долю их энергетических потребностей.

Геотермальные электростанции мира

Страна	Установленная электрическая мощность в 1982 г., МВт (э)
Китайская Народная Республика	4
Сальвадор	95
Исландия	41
Индонезия	30
Италия	440
Япония	174,5
Кения	30
Мексика	180
Филиппины	570
Португалия (Азорские острова)	3
Турция	0,5
США	936
СССР	11
Всего	2717

В будущем можно надеяться на извлечение внутреннего тепла Земли из еще более глубоких слоев, включая плотные и сухие горячие породы. В этом случае можно было бы пробурить две скважины и гидравлически соединить их между собой сетью искусственно созданных трещин. Холодная вода нагнеталась бы в одну скважину, а из другой извлека-

Вид на геотермальную область Лардерелло со стороны деревни Монтечерболи в Тоскане, Италия. Для ландшафта характерны градиры геотермальных электростанций и выбрасываемые в атмосферу облака пара из скважин. Название деревни происходит от латинского Mons Cerberi „гора Цербера“, трехглавого пса, охраняющего ад. И, по мнению первых обитателей этой области, возможно, что ад был не слишком далеко. Большинство из горячих серных источников и фумарол пропало после начала интенсивной эксплуатации геотермальных областей



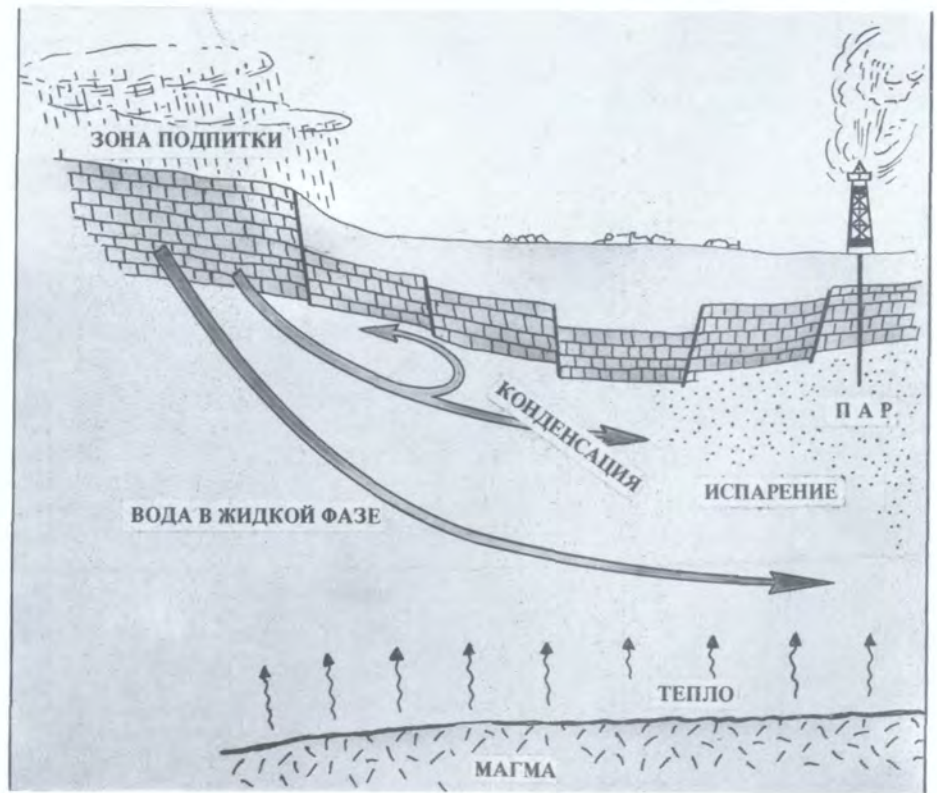
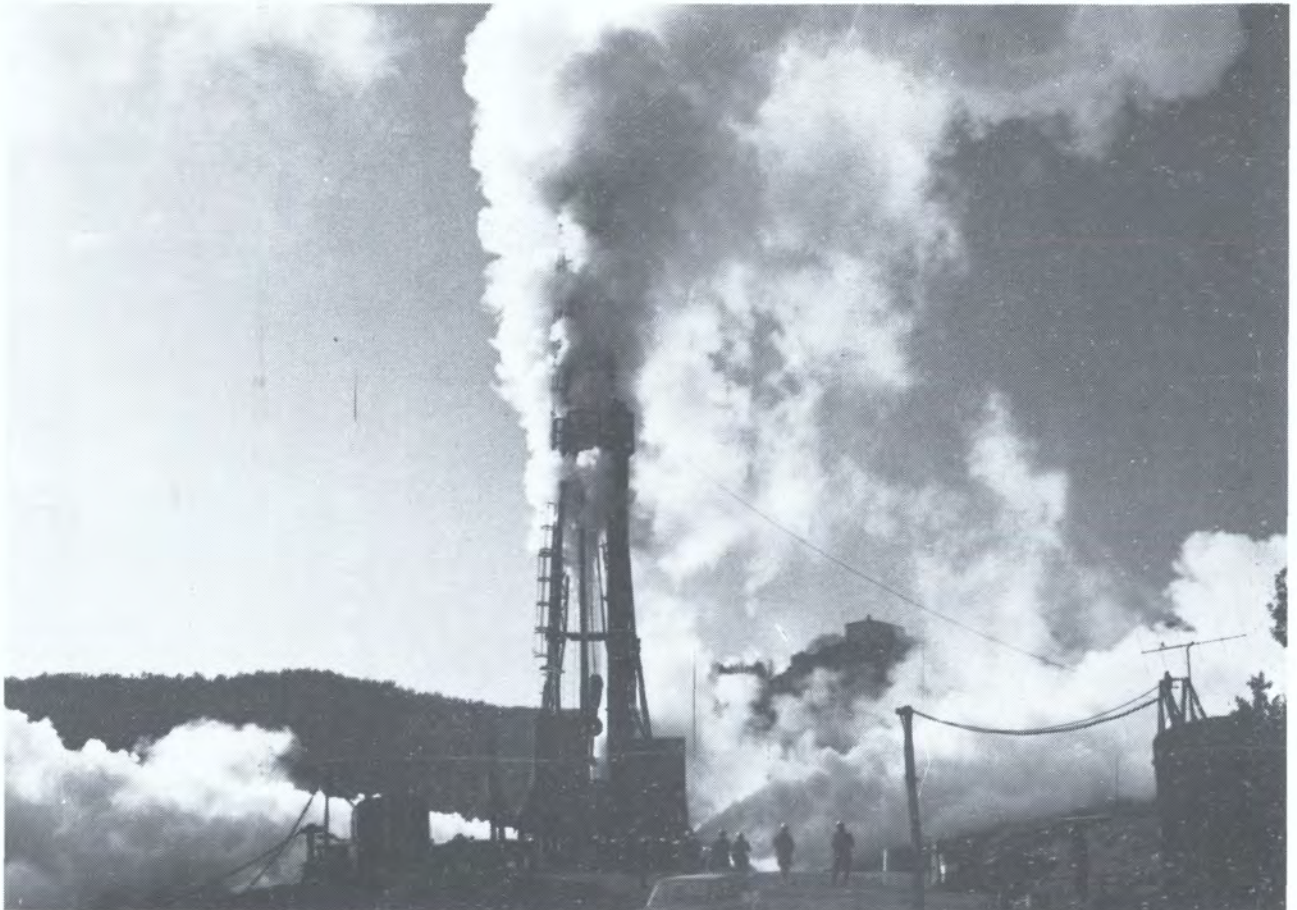


Схема геотермальной области

Паропроизводящая скважина в Лардерелло, Италия, в момент выброса пара, что бывает при достижении буром геотермального резервуара. Эта скважина была пробурена в январе 1972 г. и производит 326 т/ч перегретого пара при температуре 184 °С и давлении 8 атм. Производительность скважины имеет тенденцию к медленному уменьшению со временем



лась бы горячая вода. Предварительные эксперименты на глубине 3000 м, проведенные в Лос-Аламосе, Нью-Мексико, США, показали осуществимость таких проектов. Такие эксперименты продолжаются в США и начаты в Великобритании (Корнуол) для разработки и отладки технологии.

Естественные изотопы как инструмент в геотермальных исследованиях

Вода — основной компонент геотермальной жидкости и переносчик энергии, так как вода обладает большой теплоемкостью и большой скрытой теплотой парообразования. Среди других газовых компонентов, сопутствующих паровой фазе геотермальной жидкости, присутствуют двуокись углерода (0,5–5%); сероводород, аммиак, азот, метан, водород (вместе 2–3%); борная кислота и инертные газы.

Первым вкладом, который изотопные методы внесли в понимание природы геотермальных областей, была демонстрация того, что горячая вода и пар получают из дождевой воды, которая просачивается через обнажение пород геологических формаций,

составляющих геотермальный резервуар. Эта гипотеза, общепризнанная в наше время далеко не всеми, признавалась еще 30 лет тому назад, пока измерения содержания дейтерия и кислорода-18 не продемонстрировали это со всей определенностью. До этого момента ученые считали, что геотермальный пар имеет ювенильное происхождение, что он возникает в глубинах Земли и впервые появляется на ее поверхности.

Изотопные измерения, особенно когда они выполняются параллельно с обычными геохимическими анализами, дают информацию о характеристиках геотермальных областей: например, о смешивании вод разной температуры и происхождения, о моделях подземного течения горячих жидкостей, о степени взаимодействия с породами резервуара, о происхождении различных компонентов жидкости и т.п. Однако наиболее важное применение изотопных методов в геотермальных исследованиях, вероятно, заключается в оценке глубинной температуры. Обычно этот параметр нелегко получить, а

Внутренний вид электростанции Лардерелло, Италия. Лардерелло, расположенное в 65 км к юго-западу от Флоренции, явилось первой в мире эксплуатируемой геотермальной областью. В 1827 г. Франческо де-Лардерелл, бывший офицер армии Наполеона, эмигрировавший в Тоскану (он родился в графстве Вьеннуа, Дофине, Франция), решил разрабатывать геотермальные воды, испаряя часть их и извлекая борную кислоту. Впоследствии местность была названа в его честь Лардерелло. В 1904 г. на геотермальном паре вначале вырабатывал электроэнергию небольшой турбогенератор, а спустя год была сооружена электростанция мощностью 20 кВт. Производство электроэнергии в самой крупной в мире известной геотермальной области Гейзерс в Калифорнии, США, началось только в 1960 г., хотя первые разведывательные скважины были пробурены в 1921 г. (Фото ENEL, Италия)



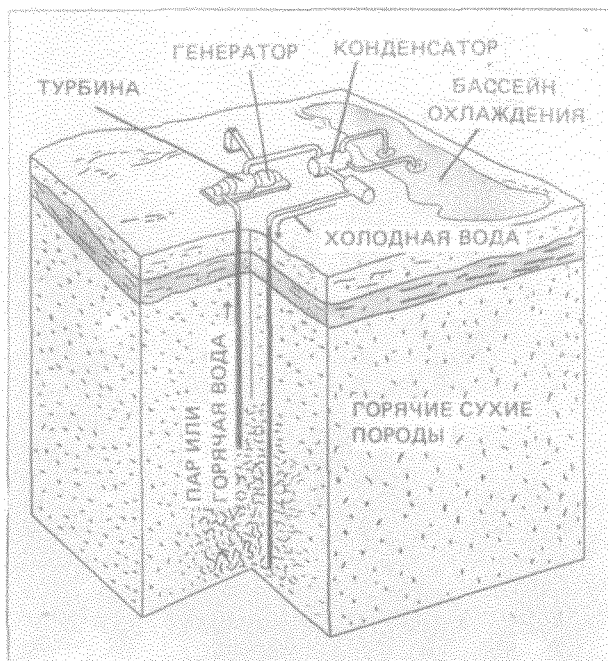


Схема искусственной геотермальной области. Две скважины гидравлически связаны на глубине между собой сетью искусственных трещин, образованных в плотных и сухих горячих породах. В одну из скважин нагнетается холодная вода, а из другой извлекается пар. Предварительные эксперименты такого типа были успешно проведены в Лос-Аламосе, Нью-Мексико, США. Была достигнута глубина 3000 м, трещины были образованы нагнетанием воды под давлением. Недавно началось проведение подобного эксперимента на глубине 4000 м

он существенен при оценке потенциала геотермальной области. Особенно бесценно применение изотопов при предварительных геохимических исследованиях геотермальных областей. Пока еще не пробурены скважины, образцы отбираются в источниках, гейзерах и мофетах. Изотопы также важны в случаях, когда скважины еще не достигли соответствующей глубины или когда их количество недостаточно.

Принцип действия изотопных геотермометров основан на том факте, что распределение изотопов между двумя компонентами при термодинамическом равновесии зависит только от температуры. Наиболее широко используемыми изотопными геотермометрами являются термометры, основанные на изотопах водорода в системе метан/газообразный водород и вода/газообразный водород, на изотопах кислорода в системе вода/растворенные сульфаты и на изотопах углерода в системе двуокись углерода/метан.

Были также разработаны геохимические термометры, основанные на содержании кварца в горячих водах или на относительных концентрациях натрия, калия и кальция, или на составе газо-паро-

вой фазы. На все эти геотермометры, включая и изотопные, воздействуют в разной степени процессы, происходящие на пути к поверхности, как-то процессы перемешивания, потери с испарением, взаимодействие с окружающими породами, частичное смещение равновесия при более низких температурах и т.п. Однако параллельное применение максимально возможного числа геотермометров помогает оценить условия корректировки и получить правильный результат.

Тритий использовался для выявления наличия современной воды в геотермальных жидкостях. Как известно, термоядерные испытания в атмосфере ввели в гидрологический цикл большое количество трития, особенно в период с 1952 по 1962 гг. Следовательно, тритий можно использовать для оценки перемешивания поверхностных грунтовых вод и для выявления моделей поступления и течения подпитывающих современных вод с краев геотермальных областей.

Недавно изотопы были применены для определения судьбы повторно инжектированных геотермальных жидкостей. Это новое и интересное применение, которое появилось в результате попыток уменьшить воздействие геотермальных жидкостей на окружающую среду: вместо выбрасывания их в поверхностные воды после использования они повторно инжектируются в геотермальную область и „рециркулируют“. Помимо всего прочего, это может также увеличить производительные возможности области.

Деятельность МАГАТЭ

Деятельность Агентства по применению изотопных методов в геотермальных исследованиях осуществляется секцией изотопной гидрологии отдела исследований и лабораторий. Секция принимает участие в проектах геотермальных исследований в Коста Рике, Индии, Мексике и Тайланде. Возможно, будут включены другие проекты в скоординированную программу исследований с применением изотопных методов гидрологии и геотермических условий Латинской Америки, финансируемую Федеративной Республикой Германии и осуществляемую Агентством. В настоящее время программа находится на стадии подготовки, а полевые работы, возможно, начнутся в конце этого года.

Агентство недавно (ноябрь 1981 г.) организовало консультативное совещание по применению изотопных методов в геотермии, труды которого будут опубликованы в специальном выпуске журнала *Geothermics*.

В заключение следует упомянуть о продолжающемся сотрудничестве между Агентством и Международным институтом геотермических исследований, Пиза, Италия и Министерством научных и промышленных исследований, Пиктон и Лоуэр-Хатт, Новая Зеландия.