

Микросейсмический мониторинг гидравлического стимулирования в усовершенствованной геотермальной системе Paralana в Южной Австралии

V. Oye,^{1*} J. Albaric,¹ N. Langet,¹ M. Hasting², I. Lecomte,¹ M. Messeiller³ и P. Reid³ разъясняют процесс определения местоположения микроземлетрясений, который тесно связан с созданием и реактивацией системы трещин в усовершенствованной геотермальной системе, и демонстрируют необходимость надёжной скоростной модели. Пример взят из проекта в Южной Австралии.

Основа усовершенствованных геотермальных систем (EGS) заключается в создании или реактивации систем трещин в геологической среде, которые подсекаются дублетами или мультиплетами скважин. Для успешной работы EGS при достаточно высоких температурах должна существовать система трещин с достаточно большой проницаемостью, чтобы гарантировать высокие скорости флюидного потока между скважинами, а контактная поверхность между флюидом и разогретой породой должна быть такой обширной, чтобы флюид разогревался без сильного охлаждения вмещающих пород. Затем геотермальная энергия доставляется к поверхности, где она может быть превращена в электричество с помощью турбин или использоваться для других целей (рис. 1). Одним существенным преимуществом геотермальной энергии по сравнению с другими воспроизводимыми видами энергии, такими как энергия ветра и солнца, является то, что она может обеспечить работу базисной электростанции.

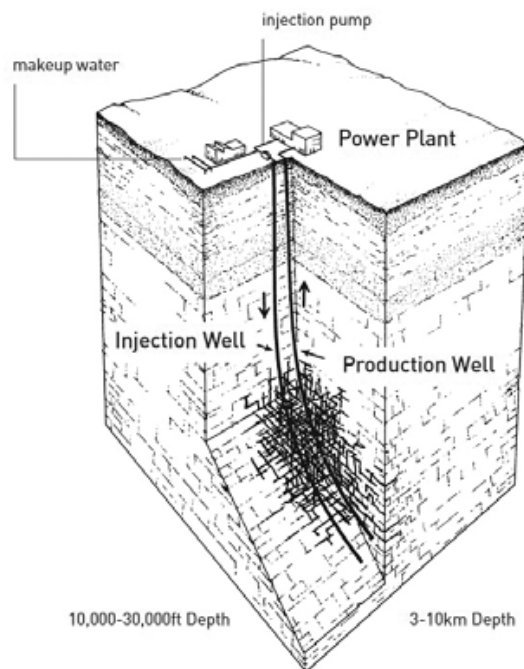


Рис. 1. Схематическое изображение концепции усовершенствованной геотермальной системы. Холодная вода поступает в систему трещин через скважину нагнетания, в которой она нагревается и выносится обратно к поверхности через эксплуатационную скважину. На электростанции с помощью теплообменных агрегатов и турбин вырабатывается электричество, а затем вода снова закачивается в резервуар (Figure from Tester et al., 2006).

¹ NORSAR.

² Hasting Micro-Seismic Consulting, former IESE, NZ.

³ Petratherm.

*Автор для переписки, e-mail: volker@norsar.no

Концепция усовершенствованной геотермальной системы (EGS) не нова, и научно-исследовательские работы по исследованию возможностей её применения (например, Fenton Hill, US; Rosemanowes, UK; Soultz, France; Hijioro, Japan; Cooper Basin, Australia; и др.) начались уже в 1970-х годах. В свете поисков новых экологически чистых видов энергии концепция EGS стала вновь привлекательной, и в настоящее время по всему миру появляется множество проектов по использованию геотермальной энергии промышленного значения. Подробный обзор будущего геотермальной энергии даётся в работе Tester и др. (2006).

В этой статье мы акцентируем внимание на этапе гидравлической стимуляции EGS и необходимых условиях для выявления вновь созданного объёма повышенной проницаемости. Мы объясняем процесс определения местоположения микроземлетрясений, с которыми тесно связано создание и реактивация трещинной системы, и демонстрируем необходимость надёжной скоростной модели.

Проект по использованию геотермальной энергии Paralana

Проект по использованию геотермальной энергии Paralana расположен примерно в 600 км к северу от города Аделаида в Южной Австралии и граничит с Mt Painter Inlier в северной части хребта Флиндерс. Этот проект исследует перспективные геотермальные источники, создаваемые в результате радиоактивного распада в продуктивных на тепло породах мезо-протерозойского фундамента провинции Mt Painter. Во время выполнения проекта сначала планируется построить электростанцию промышленного значения мощностью 3,75 МВт для электроснабжения расположенного вблизи месторождения; долгосрочная цель заключается в обеспечении его электроэнергией в большом масштабе (более 260 МВт) через государственную сеть (Reid et al., 2011). В настоящее время на территории проекта Paralana пробурены две глубокие скважины, одна неглубокая разведочная скважина глубиной около 1800 м (Paralana 1b) и скважина нагнетания Paralana 2 (глубина 4003 м), на основе которых выполняется гидравлическое стимулирование.

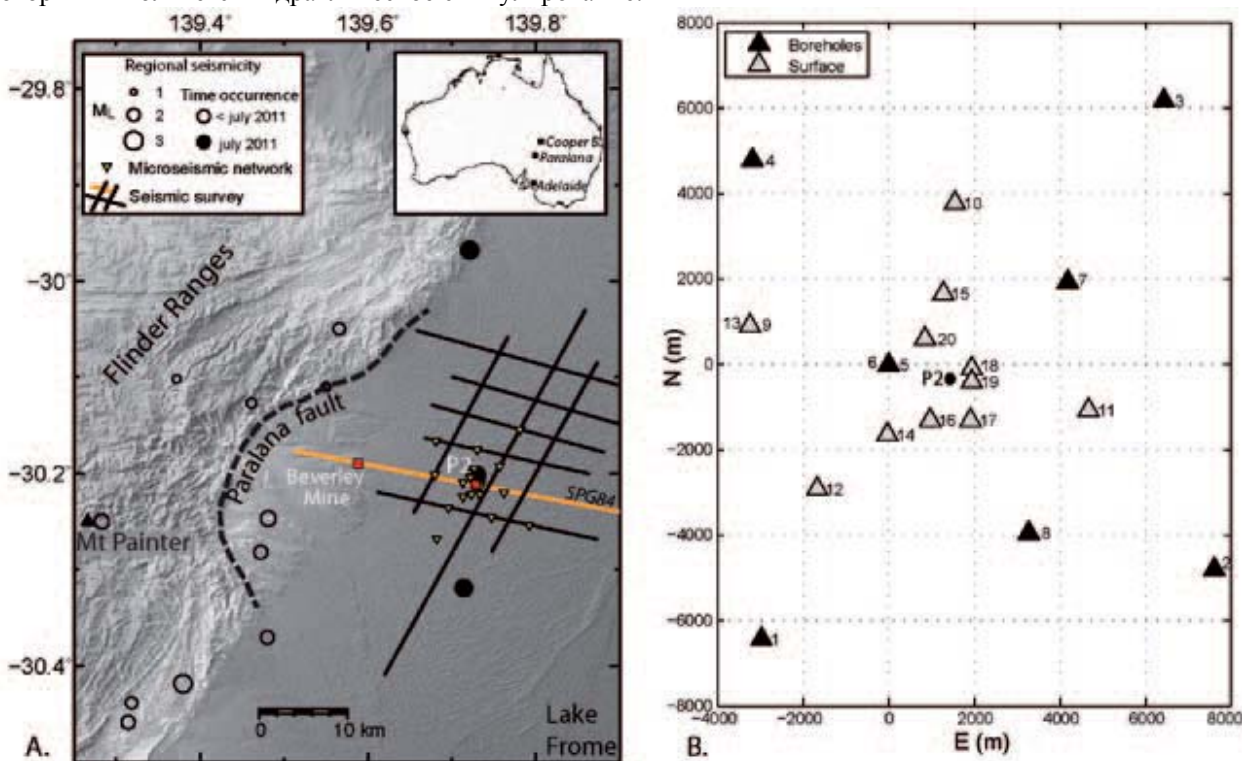


Рис. 2. Обзорная карта проекта по использованию геотермальной энергии Paralana, местоположение геотермального объекта и конфигурация сейсмической сети наблюдений. Оранжевая линия показывает положение сейсмического профиля, представленного на рис. 3. Справа: чёрные треугольники показывают скважинные станции на глубине 160 м, глубинная буровая скважина Paralana 1b является скважинной станцией 5.

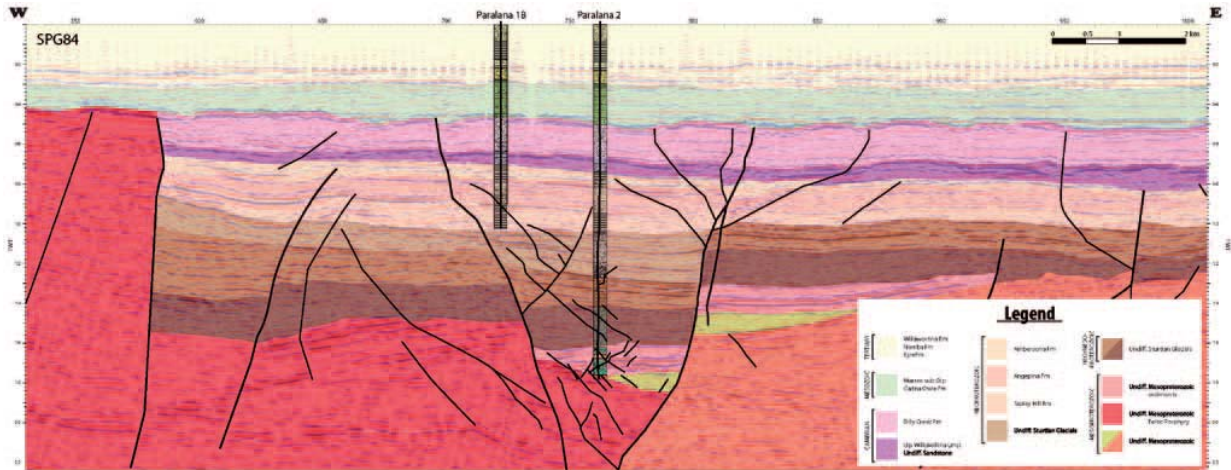


Рис. 3. Двумерный сейсмический профиль, совмещённый с геологической интерпретацией сейсмического разреза. Положение сейсмического профиля показано на рис. 2. Отметим сравнительно сложные разломные структуры и сильный перепад импеданса на отдельных субгоризонтальных слоях.

Перед стимуляцией гидроразрывом пласта была установлена сейсмическая сеть наблюдений, функционирующая с апреля 2008 г., которая осуществляла мониторинг фоновой сейсмичности в районе. Для мониторинга фактической пятидневной фазы основной стимуляции в июле 2011 г. была установлена более обширная сеть микросейсмического мониторинга в реальном времени для управления процессом нагнетания, связанным с риском сейсмичности. На рис. 2 показана полная сеть наблюдений, состоящая из одного глубинного скважинного сейсмографа внутри скважины Paralana 1b на глубине 1800 м, шести малоглубинных скважинных пунктов до глубины около 160 м и 13 пунктов на поверхности.

Создание трёхмерной скоростной модели

В большинстве случаев при геотермальных исследованиях информация по скоростной модели в основном очень плохая и однородная либо приходится использовать простые одномерные скоростные оценки. Во многих случаях применения микросейсмического мониторинга при разведке углеводородов содержится гораздо больше сведений (VSP, профили сейсмических отражённых волн, трёхмерная сейсмика, интервалы перфорации, данные каротажа и т. д.), однако такая дополнительная информация часто не учитывается. В случае проекта Paralana до проведения бурения были повторно обработаны или сняты и проинтерпретированы девять профилей сейсмических отражённых волн. На рис. 3 показан один сейсмический профиль, содержащий интерпретацию горизонтов и несколько систем нарушений. Эта часть Южной Австралии в настоящее время находится в режиме сжатия с широтной деформацией (Leopard, 2008), выраженной в данном районе реверсивной сбросовой деятельностью, такой как контакт между хребтом Флиндерса и заливом Фром вдоль сброса Paralana (например, Quigley et al., 2006; рис. 1). Впрочем, анализ сейсмических профилей указывает на грабеноподобные структуры в окрестности скважины. Информация, собранная по девяти двумерным профилям сейсмических отражённых волн, их мигрированные во временной области горизонты, суммирование скоростей и скважинный каротаж, выполненный для скважины Paralana-2, послужили входными данными для расчёта трёхмерной скоростной модели. Мы использовали двумерное лучевое прослеживание, чтобы оценить изменчивость по латерали интервальных скоростей и конвертированных в глубину временных горизонтов по каждому профилю с соответствующей погрешностью. Из-за большой погрешности скорости, полученной для глубин более 2 км, главным образом, в результате небольших максимальных удалений, мы использовали другой подход. Исходя из разных значений скоростей суммирования, имеющихся вдоль всех профилей, мы рассчитали куб интервальных скоростей (по формуле Дикса), который использовали как промежуточное данное для построения трёхмерной скоростной модели самой верхней части разреза до глубины 1,6 км. Затем мы задали возрастающие с глубиной скорости по каротажным диаграммам для более глубоких слоёв и временных горизонтов, конвертированных в глубинные (растягивание по вертикали). Слоистая скоростная модель, включающая сбросы, и полученная в результате модель скоростей Р-волн, показаны на рис. 4 (более подробно см. работу Albaric et al., 2012).

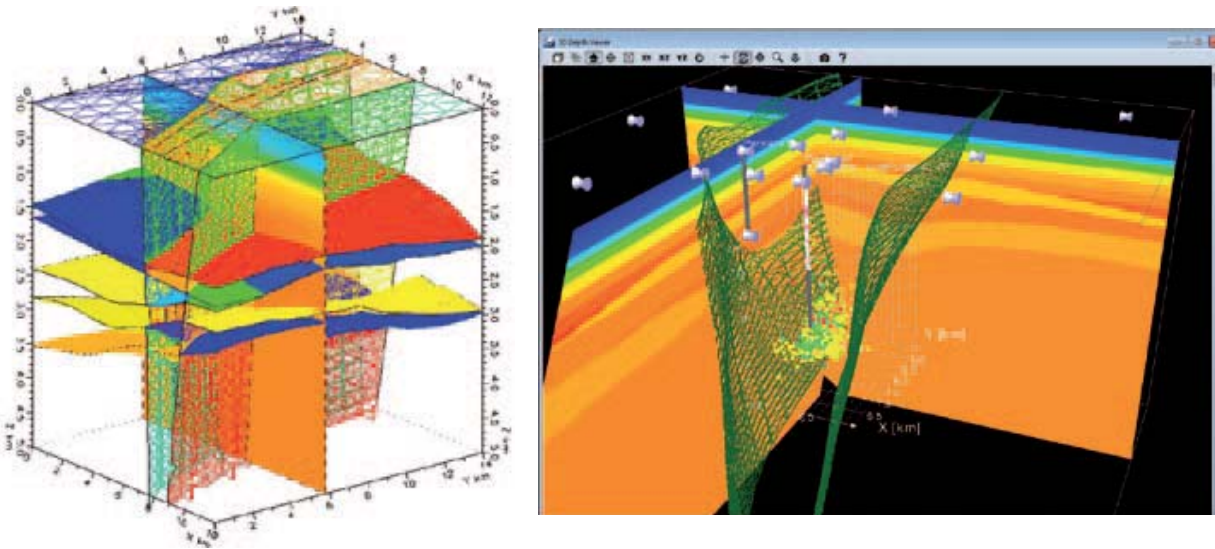


Рис. 4. Слева. Сейсмическая модель, содержащая горизонты и сбросы, полученные по интерпретации сейсмических профилей и диаграмм скважинного каротажа. Справа. Вся информация теперь преобразована в модель, пригодную для лучевого прослеживания, и визуализирована вместе с основными сбросами, скважинами, сетью приёмников и микросейсмическими явлениями.

Обработка микросейсмических данных

В течение пяти дней стимулирования на участке Paralana было зарегистрировано и локализовано в режиме реального времени более 7000 событий (Hasting et al., 2011). Мы даём краткое описание методологии, использованной для обработки волн, поскольку она подробно изложена в работе Oue и Roth (2003). Первым этапом является алгоритм многоканального детектирования, основанный на отношении амплитуд короткопериодного и длинопериодного усреднений, и последующее объединение обнаружений с помощью обобщённого метода формирования луча для Р- и S-волн. Вступление считается заданным, как только определяется необходимое множество обнаружений для заранее установленной в геологическом разрезе сети, соответствующее минимальной невязке времён пробега.

Вторым этапом является определение времени вступления Р-волн с применением критерия Akaike и последующим поляризационным анализом. Затем точно так же определяется время вступления S-волн, но по чередующимся трассам. На третьем этапе используется время вступления и углы поляризации наряду с определяемыми пользователем весами для разных данных, чтобы инвертировать в местоположение с помощью направленного сетевого поиска и предварительно рассчитанных таблиц времени пробега. На последнем этапе вычисляется начальное время и параметры основного источника, такие как моментная магнитуда, угловая частота, падение напряжения B_{rupt} , радиус источника, излучаемая сейсмическая энергия и др. Кроме того, могут быть автоматически определены полярности Р-волн, которые в дальнейшем можно использовать для определения, например фокального механизма.

На рис. 5 показан пример микроземлетрясения с моментной магнитудой M_w 0,43, зарегистрированного по ближайшим приёмникам. Отметим значительное расхождение в отношениях амплитуд Р- и S-волн между скважинными приёмниками, расположенными на глубине, и в пунктах на поверхности. Эти расхождения вызваны характером излучения микроземлетрясения, распространяющего разные объёмы энергии Р- и S-волн по разным направлениям. Кроме того, довольно сложными были формы сигналов с относительно сильным хвостом Р-волны и наиболее интенсивными конвертированными фазами между вертикальными фазами Р- и S-волн. Эти сложности связаны в основном со сложными скоростными структурами, как можно было ожидать на основании сейсмического профиля, представленного на рис. 3. Для того чтобы в дальнейшем понять и определить наиболее интенсивные конвертированные фазы, наблюдаемые по сейсмограммам, Albaric и др. (2012) ввели трёхмерное лучевое прослеживание (Vinje et al., 1996) и смогли связать происхождение конвертированных Р- и S-волн на менее глубинных границах раздела и исключить возможную конвертированную энергию около разломов.

Визуализация и интерпретация микросейсмичности

После того как все данные обработаны, повторно обработаны, а также часто вручную проверены на качество, конечная задача заключается в интерпретации результатов. Для упрощения интерпретации гидравлического стимулирования местоположение микросейсмических явлений следует визуализировать вместе со всей остальной важной информацией. Кроме того, важными при визуализации являются начальное время явлений, оценки магнитуды и погрешностей определения местоположения.

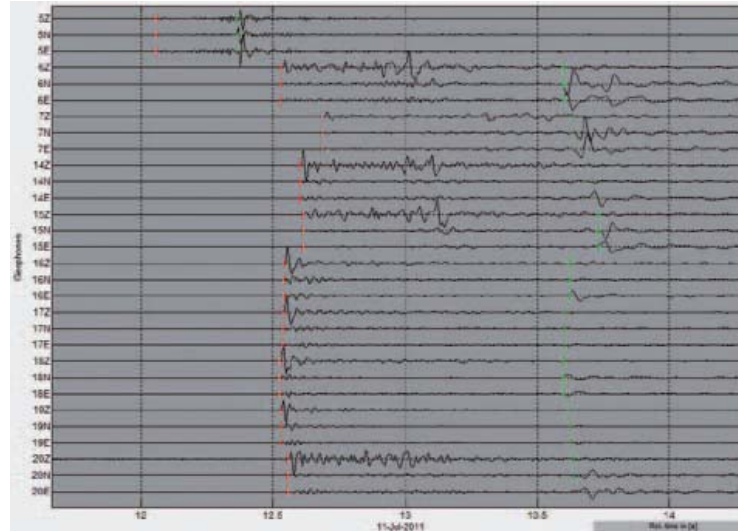


Рис. 5. Нефильтрованные сейсмограммы с моментной магнитудой микроземлетрясения M_w 0,43, зарегистрированные на близлежащих станциях сейсмической сети наблюдений Paralana. Все трассы представляют нормализованные сейсмографы, красным и зелёным показаны вступления P- и S-волн. Отметим чёткие вступления P-волны на всех каналах. Три самых верхних канала (5ENZ) связаны с датчиком в забое скважины на глубине 1,8 км.

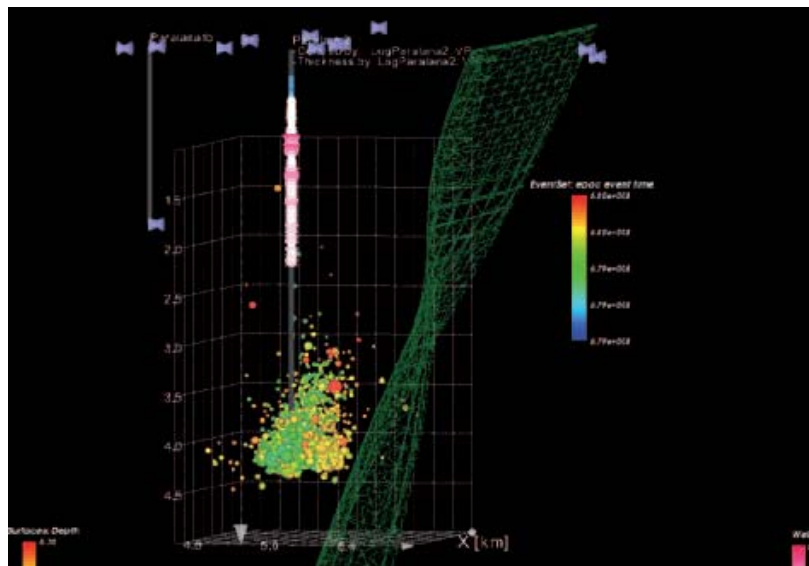


Рис. 6. Автоматически определённые микросейсмические волны, выявленные в течение пятидневного этапа стимулирования. Синие конусы обозначают сейсмические станции, информация диаграммы каротажа по скорости выделена с помощью цветового кода вдоль скважины закачивания, зелёный каркас показывает фланг структуры грабена. Микросейсмические волны выделены цветом по времени возникновения (от синего цвета в 1 день до красного цвета на 5 день), а размер окружностей масштабирован по сейсмическому моменту. При непрерывном закачивании сейсмичность распространяется в широтном направлении в разные стороны от скважины закачивания.

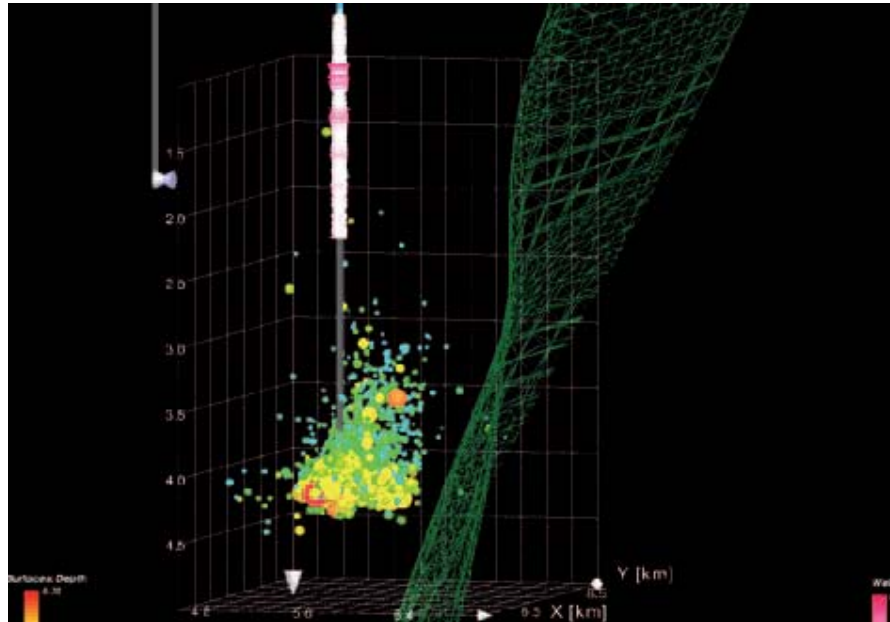


Рис. 7. Тот же участок, что и на рис. 6, но здесь условная цветовая раскраска представляет падение напряжения V_{dip} каждой волны (синий — низкие значения, красный — высокие значения). Наблюдается тренд более высокого падения напряжения у основания сейсмического облака.

Общей проблемой при визуализации погрешностей является то, что визуальное представление часто фокусируется на волнах с самыми большими погрешностями, например, если на график наносятся эллипсоиды ошибок или функции плотности вероятности. Более того, если необходимо визуализировать много тысяч волн, рисунок будет переполнен, а интерпретация невозможна. Следовательно, интерпретатору следует рассматривать много разных способов графического представления результатов, включая масштабирование по цвету, по свойствам и прозрачности. Один простой способ отвлечения внимания от волн с плохой достоверностью местоположения заключается в том, чтобы задать высокое значение прозрачности этих волн, одновременно увеличивая размер с увеличением магнитуды.

Рассмотрение отдельных фаз в течение этапа нагнетания позволяет вскрыть важные особенности закачивания, такие как переход сейсмичности от одной системы нарушений к другой. Кроме того, может быть полезно одновременное проигрывание микросейсмичности в подвижном временном окне. На рис. 6 и 7 представлены примеры микросейсмического облака пятидневного нагнетания в системе Paralana EGS. Сначала сейсмичность наблюдалась только вблизи скважины нагнетания, а затем, в более поздний период закачивания, распространилась в северо-восточном направлении. Наибольшая сейсмическая активность имела место в пределах грабенообразной структуры, представленной на рис 4, 6 и 7.

Любая интерпретация вызванной сейсмичности должна быть рассмотрена с точки зрения параметров нагнетания и извлечения. На рис. 8 показан набор данных нагнетания вместе с результатами анализа микросейсмических данных. Например, количество микросейсмических волн, выявленных в течение часа, не соответствует во всех деталях профилям нагнетания и давления. Несмотря на это, при вычислении кумулятивного сейсмического момента в течение каждого часа имеет значение связь этого нового параметра со скоростью закачивания. Впоследствии связь между использованием сейсмического момента и количеством явлений может быть легко понята, когда нанесённые на график b -значения соотносятся в подвижном временном окне. Высвобождение сейсмического момента уменьшается как раз после прекращения закачивания, но количество выявленных локализованных явлений существенно возрастает. Это вызвано увеличением b -значений после прекращения закачивания и указывает на то, что отношение количеств малых и крупных событий внезапно увеличивается. Данная информация в дальнейшем может быть проанализирована относительно явлений возможного замыкания трещин, перераспределения напряжения на границах резервуара или совокупного влияния температуры и давления.

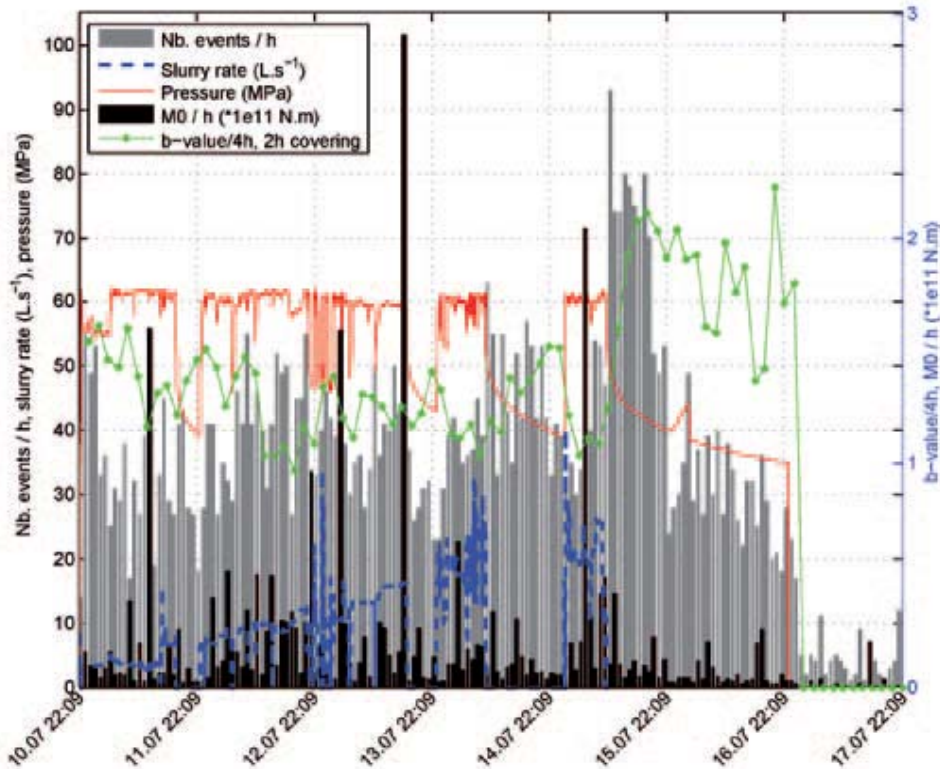


Рис. 8. Набор данных закачивания и результаты анализа микросейсмических данных.

Комментарии и выводы

Во время осуществления проекта по использованию геотермальной энергии Paralana успешно стимулировались разогреты породы на глубине около 4 км, охватывая более 7000 обнаруженных и локализованных микроземлетрясений. Чтобы более точно определить местоположение микросейсмичности, в качестве отдельного этапа мы ввели создание трёхмерной скоростной модели. Мы обнаружили, что подробная модель очень подходит для определения абсолютного местоположения и понимания сложных сейсмограмм со многими приходящими волнами. Успешное выполнение автоматической обработки возможно только при наличии адекватно представленной скоростной структуры.

Кроме того, мы установили высокую степень сходства формы сигнала внутри рассматриваемых данных микроземлетрясений. Albaric и др. (2012) определили двойную разность повторно определённого местоположения подгруппы данных Paralana и обнаружили отчётливую линейную структуру в новых местоположениях в соответствии с режимом регионального поля напряжения. Чрезвычайно ценный вклад в точность определения местоположения вносит геофон, расположенный на глубине 1800 м в скважине Paralana 1b. Этот глубинная станция в скважине просто неоценима для последующих работ, направленных на дальнейшее улучшение скоростной модели с помощью томографии локальных землетрясений. Возможно, этот анализ также может быть использован для выявления временных изменений скорости, связанных с процессом распространения трещин, в области вблизи резервуара.

Благодарности

Выражаем благодарность организаторам проекта EU FP7 GEISER за финансовую поддержку и компании Beach Energy за доступ к данным.

Список литературы

Albaric, J., Langet, N., Hasting, M., Lecomte, I., Oye, V., Iranpour, K., Messellier, M., Llanos, E. and Reid, P. [2012] The importance of coupling passive and active seismic methods in geothermal fields - A case study at Paralana, Australia. 74th EAGE Exhibition and Conference, Copenhagen. Extended Abstract.



- Hasting M., Albaric, J., Oye, V., Reid, R., Messeiller, M., Llanos, E., Malin, P., Shalev, E., Hogg, M., Alvarez, M., Miller, A., Walter, C., Boese, C. and Voss, N., [2011] Real-time induced seismicity monitoring during wellbore stimulation at Paralana-2, South Australia, *New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland, New Zealand.
- Leonard, M. and Kennett, B. [1999] Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **113**, (1–4), 247–263.
- Oye, V. and Ellsworth, W.E. [2007] Monitoring Microearthquakes with the San Andreas Fault Observatory at Depth. *69th EAGE Exhibition and Conference*. Extended Abstract.
- Oye, V. and Roth, M. [2003], Automated seismic event location for hydrocarbon reservoirs, *Computers & Geosciences*, **29**, 851–863.
- Quigley, M. C., Cupper, M. L. and Sandiford, M. [2006] Quaternary faults of south-central australia: Palaeoseismicity, slip rates and origin. *Australian Journal of Earth Sciences*, **53**, 285–301.
- P.W. Reid, Messeiller, M. and Llanos, E.M [2011], Paralana EGS Project – Findings from the fracture stimulation. *Australian Geothermal Conference*, Australia
- Tester, J.F. and panel members [2006] The Future of Geothermal Energy - The Future of Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. *Massachusetts Institute of Technology*, http://www1.eere.energy.gov/geothermal/egs_technology.html
- Vinje, V., Iversen, E., Åstebøl, K. and Gjøystdal, H. [1996] Estimation of multivalued arrivals in 3D models using wavefront construction-part I. *Geophysical Prospecting*, **44**, 819-842.