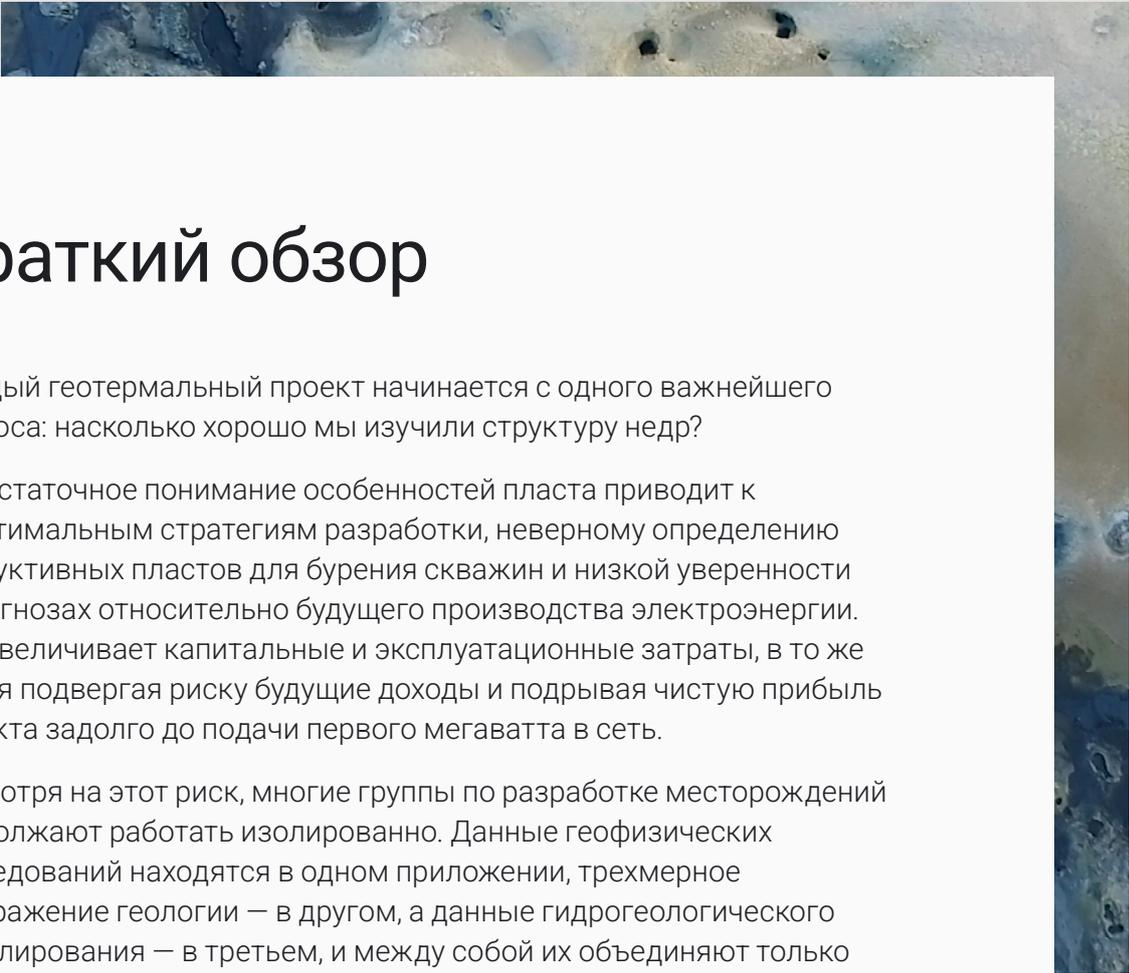


ИНФОРМАЦИОННЫЙ БУКЛЕТ

НОВЫЙ СТАНДАРТ В ИЗУЧЕНИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Как взаимосвязанный рабочий процесс Seequent повышает эффективность геологоразведки, снижает риски бурения и оптимизирует эксплуатационные показатели месторождения.

Краткий обзор	03
<hr/>	
ГЛАВА 1 Путь от рисков геологоразведки к прибыльному ресурсу	04
<hr/>	
ГЛАВА 2 Преобразование междисциплинарных данных в динамическую трехмерную модель	08
<hr/>	
ГЛАВА 3 Уверенное моделирование потоков, давления и выходной мощности	11
<hr/>	
ГЛАВА 4 Обеспечивая понимание строения недр с помощью комплексного решения для изучения геотермальных ресурсов	14
<hr/>	
ГЛАВА 5 Передовые решения для геологических наук будущего: инновации, образование и совместная работа	16
<hr/>	



Краткий обзор

Каждый геотермальный проект начинается с одного важнейшего вопроса: насколько хорошо мы изучили структуру недр?

Недостаточное понимание особенностей пласта приводит к неоптимальным стратегиям разработки, неверному определению продуктивных пластов для бурения скважин и низкой уверенности в прогнозах относительно будущего производства электроэнергии. Это увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты, в то же время подвергая риску будущие доходы и подрывая чистую прибыль проекта задолго до подачи первого мегаватта в сеть.

Несмотря на этот риск, многие группы по разработке месторождений продолжают работать изолированно. Данные геофизических исследований находятся в одном приложении, трехмерное отображение геологии — в другом, а данные гидрогеологического моделирования — в третьем, и между собой их объединяют только

электронные таблицы и несистематизированные сценарии. Истории версий не поддаются точному отслеживанию, важные физические процессы и циклы обратной связи часто упускаются из виду, и потому трудно доказать достоверность окончательной версии модели, когда для одобрения совета директоров или проверки кредиторов требуется прозрачность.

Этот информационный буклет написан для инженеров-разработчиков геотермальных резервуаров, геологов и проектировщиков, которым необходимо снизить уровень неопределенности, ускорить разработку и обосновать инвестиционные решения. Здесь описывается взаимосвязанный рабочий процесс Seequent, в котором задействованы Oasis montaj, Leapfrog Energy и Volsung и который объединяет геофизическое и геологическое моделирование, интерпретацию и моделирование пластов, обеспечивая возможность быстрее и эффективнее принимать проверяемые решения.

Далее подробно рассказывается, как этот взаимосвязанный рабочий процесс повышает эффективность геологоразведки, снижает риски бурения и максимально увеличивает стоимость активов, что подтверждается реальными результатами компаний Fervo (проектирование усовершенствованных геотермальных систем на новом месторождении), Contact Energy (ускоренная разработка) и Ormat (оптимизация месторождения).



ГЛАВА 1

Путь от рисков геологоразведки к прибыльному ресурсу

До того, как рабочие группы приступят к проектированию электростанции, переговорам о закупке электроэнергии и получению разрешений от природоохранных органов, успех геотермальной энергетики определяется первыми несколькими скважинами. Стоимость одной глубокой добывающей или нагнетательной скважины обычно составляет от 4 до 12 миллионов долларов¹, и если она вскрывает зону с низкой проницаемостью или температурой, эти средства списываются в убыток, и реализация проекта замедляется еще до того, как начнется заливка бетона.

Изучение портфелей активов показывает, что для усовершенствованных геотермальных систем (EGS) или проектов по разработке глубоких осадочных пластов капитальные затраты на геологоразведку могут составлять 15% от общих затрат на проект, в то время как коммерческая успешность скважин остается на уровне около 50%².

Если на начальном этапе совершить ошибку, то проект заглохнет; но если на ранней стадии попасть в продуктивный пласт, то все последующие этапы — финансирование, строительство, ввод в эксплуатацию — ускорятся.

1. Стэнфордский университет, «Обновление кривой расходов геотермального бурения в 2025 году.» 2025 г.

2. Организация Climate Policy Initiative, «Роль государственных финансов в активном внедрении геотермальной энергетики: справочный документ», 2014 г.

Проблемы из-за устаревших рабочих процессов

Рабочие процессы геологоразведки по-прежнему удивительно похожи на те, что применялись десятилетие назад:

- **Геофизика:** Инверсии, выполняемые в пакетах специализированного программного обеспечения, экспортируются в формате растровых сеток.
- **Геология:** Разрезы и условные модели повторно создаются с нуля в отдельном программном продукте.
- **Предварительный анализ пластов:** Объемные параметры и простые оценки потенциальных тепловых запасов рассчитываются в электронных таблицах.

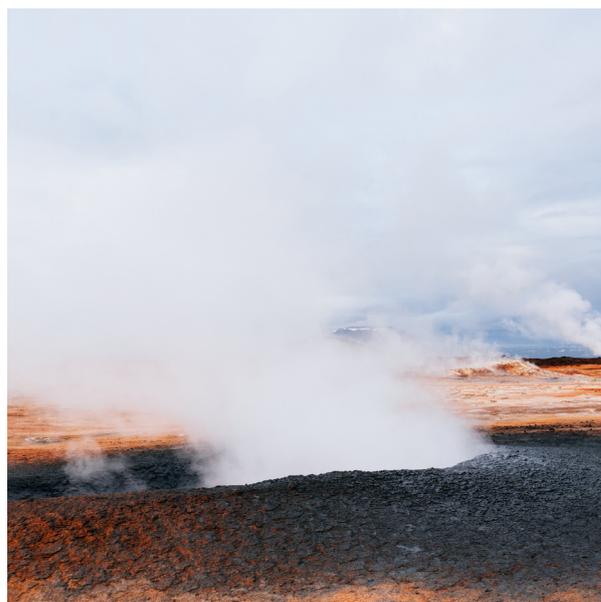
Для каждой передачи данных между программными продуктами часто требуется изменение формата или интерполяция данных, например, корректировка разрешения сеток, преобразование единиц измерения и документирование предположений, выполняемое вручную.

История версий разрознена, предположения скрываются в макросах, а проверка концептуальной теории может занять месяцы. В результате применяется цикл «интерпретация-фиксация-бурение» — вместо цикла, в основе которого лежат данные, в котором уточняются и детализируются структуры, выполняется повторная оценка площадок и согласование геологических данных

с экономическими аспектами в режиме реального времени.

Скорость имеет значение. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии прогнозирует, что к 2050 году доля геотермальной генерации может составить 15% от общего объема потребляемой энергии³, но только при условии существенного снижения неопределенности относительно геологического строения и сокращения сроков освоения ресурсов.

Каждый месяц, потраченный на согласование несогласованных инверсий или сохранение моделей в другие форматы в целях перемещения между программными продуктами, увеличивает расходы на финансирование и создает риск истечения срока действия лицензии. В геотермальной энергетике реальным ограничением роста является не тепло в земле, а тот уровень ясности и скорости, с которым мы можем показать потенциал актива.



3. Международное энергетическое агентство, «Будущее геотермальной энергетики», 2024 г.

Представляем комплекс технологий для взаимосвязанной обработки данных геологоразведки

Взаимосвязанный рабочий процесс Seequent помогает восполнить нехватку ясности и скорости:

- Oasis montaj поддерживает геологоразведку геотермальных месторождений путем обработки и визуализации данных гравиразведки, магнитометрии и электромагнитной съемки.
- Модели удельного сопротивления по данным магнитотеллурического метода можно импортировать и просматривать вместе с вышеупомянутыми наборами данных, чтобы помочь геологам интерпретировать геологические структуры, уточнять гипотезы относительно строения геологической среды и предоставлять информацию для концептуального моделирования.
- Leapfrog Energy обрабатывает эти данные вместе с диаграммами каротажа бурового раствора, данными об изменениях пород и замеров при помощи прибора PTS (измеряющего давление, температуру и расход) для создания динамической условной геологической 3D-модели.
- Volsung импортирует модель Leapfrog, выполняет имитационное моделирование пласта методом конечных объемов, в котором объединены модели скважин и наземных объектов, генерирует сопоставления архивных данных и прогнозы добычи — все в рамках одной экосистемы.

Поскольку на каждом этапе используется общая структура данных, группы специалистов переходят от инверсии к прогнозированию за считанные дни, а не месяцы, и ведут единый контрольный журнал на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Как компания Fervo Energy ускорила запуск усовершенствованной геотермальной системы, которая теперь снабжает электричеством центры обработки данных Google

Чтобы продемонстрировать, что горизонтальные скважины усовершенствованной геотермальной системы могут обеспечивать непрерывную поставку электроэнергии без выбросов углерода, компании Fervo Energy сначала пришлось визуализировать трещиноватые коридоры в гранитном фундаменте Невады — в условиях, где получаемая в процессе бурения информация ограничена. Геофизики использовали Oasis montaj в целях интерпретации данных гравиразведки, магнитометрии и электромагнитной съемки, формируя концептуальное понимание бассейна. Эти данные были переданы геологам, которые построили условную трехмерную модель в Leapfrog Energy и уточнили ее с помощью геологических наблюдений, проведенных на поверхности, и данных бурения. Интегрированная интерпретация способствовала серии корректировок траекторий скважин, а также принятию более масштабных решений относительно разработки месторождения в целом.

Переход на новое ПО предоставил ключевые преимущества, в том числе:



Четкое определение целевых пластов при бурении и меньше неожиданных сложностей: Объемы, очерченные на основе значений удельного сопротивления и отображенные в высоком разрешении, выявили наиболее проницаемые зоны для парных горизонтальных скважин длиной 8000 футов.



Быстрая итерация: Перенос обновленных инверсий в модели Leapfrog выполнялся за считанные часы и способствовал корректировке геометрии перед забуриванием.



Уверенность покупателей будущей продукции: Соглашение Fervo с Google о круглосуточных поставках электроэнергии без выбросов углерода основывалось на проверяемых прогнозах.

[Читать полный текст →](#)



Обмен данными между Leapfrog Energy и Oasis montaj может осуществляться через Central интуитивно понятным и удобным способом, что позволило нам наладить бесперебойную связь между несколькими специалистами, которые работают в пяти офисах, разбросанных по территории США и разным часовым поясам, и обеспечить им возможности для передачи необходимой информации и сотрудничества.

Стив Ферчо (Steve Fercho), Руководитель отдела геологоразведки в Fervo Energy

Преобразование междисциплинарных данных в динамическую трехмерную модель

Ценность традиционных разрезов нельзя недооценивать. Однако поскольку быстро развивающиеся проекты получают новые данные каждый квартал, выдерживать темп становится нелегко.

В рамках взаимосвязанного рабочего процесса механизм Радиальной базисной функции (РБФ) в Leapfrog Energy генерирует геологические поверхности непосредственно на основе точек в скважинах и структурных геофизических ограничений, учитывая сложные геологические условия. Независимо от того, является ли геотермальный резервуар кальдерой с разломами, залегающей в осадочных породах системой или же трещиноватым гранитным фундаментом, геологи переходят от необработанных данных к структурно согласованной модели за считанные часы, а не за долгие недели, и время специалистов освобождается для интерпретации, вместо того, чтобы тратить его на создание чертежей.

Новаторская технология РБФ

Технология, лежащая в основе Leapfrog, изначально была разработана для создания изображений в целях медицинской диагностики и протезирования. Эта технология, известная как радиальная базисная функция (РБФ), вскоре стала применяться в различных отраслях — в Голливуде для создания спецэффектов в таких фильмах, как «Властелин колец», и даже в НАСА для картографирования астероидов.

Ряд двумерных и трехмерных данных, полученных из геологических, геофизических, геохимических источников и в результате проведения картографических исследований, подвергается анализу с целью выявления взаимосвязей (например, литология в сопоставлении с температурными данными, изменение горных пород в сопоставлении с данными удельного сопротивления), которые предоставляют информацию для построения интегрированных моделей. Когда геологическая модель уже определена, то создаваемая в Leapfrog числовая модель назначает статические переменные, такие как температура, пористость и другие. Такой подход к моделированию сохраняет геометрию и свойства материалов в рамках одного унифицированного объекта на протяжении всего рабочего процесса.

Любое изменение контакта, разлома или числового параметра инициирует автоматическое повторное создание поверхностей, объемов и рассчитываемых

сеток. Динамические объемные параметры, заверочные графики и стереографические сетки обновляются за считанные секунды, показывая, как вновь обнаруженный разлом или очередной вскрытый скважиной пласт

изменяют интерпретацию геологических данных. Leapfrog экспортирует графики планируемых скважин и концептуальную информацию о геотермальном ресурсе, продолжая обеспечивать тот уровень прослеживаемости, который был установлен кредиторами и независимыми инженерами.

Когда данные готовы к динамическому моделированию и прогнозированию, Leapfrog может преобразовать условные поверхности в дискретную сетку и внести в нее параметры горных пород, связанные с концептуальной моделью. Поскольку данные остаются в одной и той же системе координат, не требуется заново создавать сетки перед тем, как экспортировать их в Volsung, TOUGH2, Eclipse или CMG. При последующих обновлениях геологических данных экспорт выполняется вновь за считанные минуты, интегрируя геологические и геофизические данные и моделирование геотермальных резервуаров, поддерживая тем самым достоверность данных.



ЗАНИМАТЕЛЬНЫЙ ФАКТ

Однажды Leapfrog был включен в варианты ответа на вопрос телевизионного шоу-викторины «Jeopardy!» в США

Как компания Contact Energy ускорила реализацию проекта Таухара мощностью 174 МВт

Проект второго этапа развития электростанции Таухара компании Contact Energy представляет собой крупнейшую в Новой Зеландии геотермальную электростанцию с одним расширительным баком, строительство которой продолжалось более десяти лет. Чтобы подтвердить местоположение кустовых площадок и получить разрешения органов охраны окружающей среды, группе геологов требовалась интегрированная трехмерная модель, способная быстро обрабатывать новые данные и выдерживать проверки регулирующих органов.

Используя Leapfrog Energy, геологи объединили слои, гравитационные модели, инверсии магнитотеллурических данных и более 70 разведочных скважин — в общей сложности 60 000 точек литологических интервалов и 1200 профилей давления и температуры — в единой среде для условного моделирования. Обновления интегрировались в модель за считанные минуты, благодаря чему инженеры могли тестировать альтернативные планы отклонения стволов скважин во время бурения.

Ключевые преимущества:



Циклы моделирования, которые ранее занимали четыре дня, были сокращены до четырех часов: После ввода новых данных температурного каротажа, литологии и пиковых значений изменения пород модель перестраивалась и была полностью готова к утру следующего дня, до начала бурения.



Оптимизированная компоновка кустовых площадок: Динамические модели помогли изменить местоположение двух кустовых площадок, благодаря чему ожидаемые объемы бурения сократились примерно на 15%.



Доверие со стороны регулирующих органов: Leapfrog обеспечивает ведение полного контрольного журнала для ускоренного получения согласия на добычу ресурсов.

[Читать полный текст истории успешного применения ПО →](#)

“Динамическое моделирование в Leapfrog предоставило нам возможность уточнять целевые пласты в то время, как буровые установки еще работали, — без ущерба для контрольного журнала, требуемого регулируемыми органами.”

Старший геолог-разработчик, Contact Energy (Проект Таухара)



ГЛАВА 3

Уверенное моделирование потоков, давления и выходной мощности

Анализ данных объемного метода измерения запасов тепловой энергии, плотности энерговыделения и кривой истощения теплового потенциала позволяет оценить ресурсный потенциал, но не учитывает обратную связь между падением давления в пласте, добычей из скважин и повторной закачкой, а также то, как неконденсирующиеся газы могут повлиять на выработку электроэнергии.

Коммерческие кредиторы теперь настаивают на прогнозах для всего месторождения, в которых учитываются эти взаимодействия, сообщается об оценке предполагаемой мощности в мегаваттах с использованием вероятностных методов (P10, P50 и P90) и наглядно показано, что пределы индуцированной сейсмичности и проседания пород будут соблюдены. Для предоставления таких доказательств необходим инструмент имитационного моделирования, в который загружается геологическая интерпретация, созданная в Leapfrog Energy, и который быстро выполняет итерации по мере поступления новых данных.

Формула метода конечных объемов применяется в Volsung для решения уравнений материально-энергетического баланса с целью расчета массового расхода и теплового потока через породу пласта-коллектора, включая пористые и трещиноватые среды.

Модели скважин можно объединить с моделями пласта в целях прогнозирования производительности скважин на основе термодинамики пласта и скважинных условий, что, в свою очередь, дает информацию для моделей наземных сооружений, способствуя расчетам выработки электроэнергии. Вычислительные алгоритмы обрабатывают однофазный или двухфазный поток воды / пара, сверхкритические условия, смеси воды, солей и неконденсирующихся газов, перенос меченых частиц, а также эффектов микрогравитации и оседания пород.

Параллельные подходы к вычислениям с использованием ускорения центрального и графического процессоров сокращают время решения до 25 раз по сравнению с традиционными подходами, за счет чего инженерам удастся разрабатывать более подробные модели за меньшее время.

Рабочие процессы калибровки начинаются с сопоставления выходных данных модели пласта с данными замеров

температуры и давления в скважине в процессе, известном как калибровка модели по данным естественного состояния.

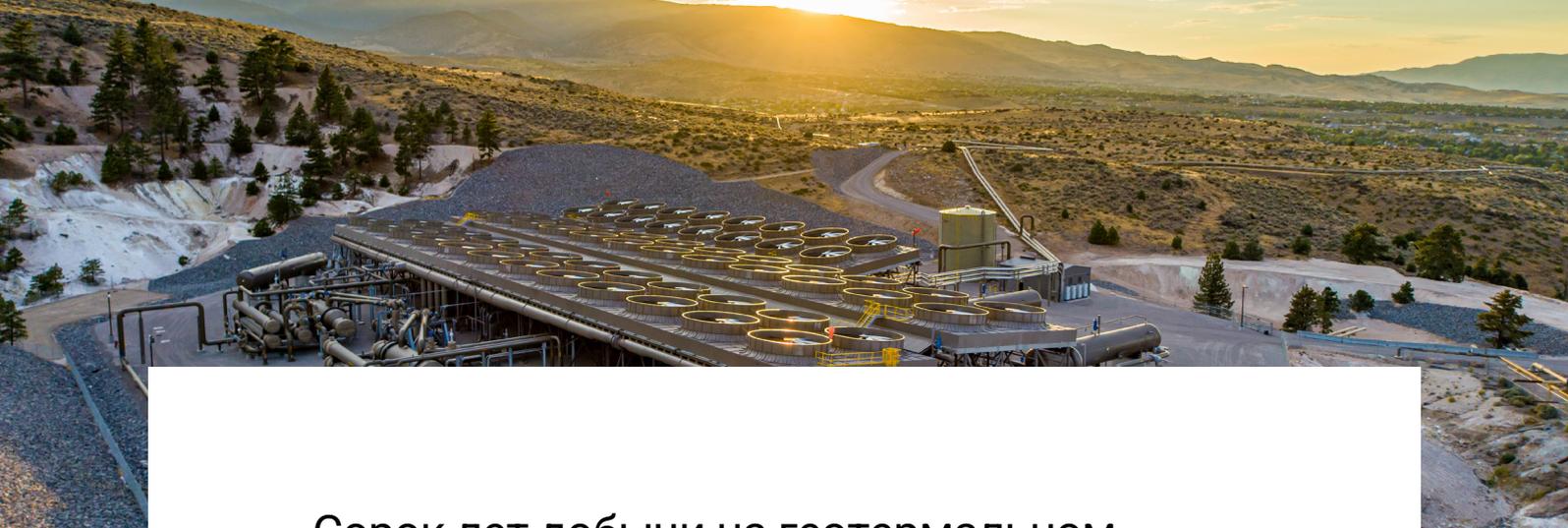
Калибровка продолжается путем моделирования истории добычи ресурса с начала разработки и сравнения смоделированных и замеренных показателей добычи по скважинам, энтальпии и

падения пластового давления. Калибровка может также включать в себя данные об эффектах микрогравитации и данных тестирования с использованием меченых частиц. Калибровку можно выполнять вручную или с помощью методов обратного моделирования. После достижения удовлетворительных результатов калибровки можно приступить к прогнозированию, в ходе которого моделируются будущее поведение пласта и производительность скважин при различных стратегиях разработки.

Для составления таких прогнозов в условиях неопределенности могут применяться методы Монте-Карло.

Затем заинтересованные стороны могут сравнить результаты, чтобы оценить оптимальную стратегию освоения ресурсов. Volsung предоставляет данные по энтальпии, доле пара, расходу рассола и выработке электроэнергии по каждой скважине.





Сорок лет добычи на геотермальном месторождении Стимбоут

Компания Ormat Technologies разработала численную модель резервуара для поддержания устойчивого уровня температуры и давления. Численное моделирование использовалось для лучшего понимания путей движения жидкости, прогнозирования долгосрочной производительности при различных сценариях и оптимизации стратегий повторной закачки для устойчивой добычи.

Применение модели привело к более точному соответствию между полевыми наблюдениями и компьютерными моделями, углубленному пониманию взаимосвязи между структурами резервуара и путями движения жидкости, а также к более обоснованному принятию решений в области прогнозирования и управления ресурсами.

«Наша численная модель сыграла ключевую роль в принятии решений по эксплуатации и управлению резервуаром на Стимбоут. Она предоставила ценные сведения о сложном поведении геотермальной системы.»

Sulav Dhakal

Geothermal Reservoir Engineer, Ormat Technologies

Чтобы узнать больше о том, как Ormat использовала Volsung для оптимизации 40 лет геотермальной добычи и улучшения управления резервуаром на месторождении Стимбоут, прочитайте **полную историю** →

Этот кейс был разработан компанией **Ormat самостоятельно и отражает её внутренний анализ и операционный опыт** →

Обеспечивая понимание строения недр с помощью комплексного решения для изучения геотермальных ресурсов

Работы по геологоразведке, построению моделей и имитационному моделированию продвигаются быстрее, когда специалисты по всем дисциплинам видят нужные данные в едином рабочем пространстве, не тратя время на поиск папки с новейшими данными.

В рабочем процессе Seequent для геотермальной энергетики продукт Oasis montaj поддерживает раннюю стадию геологоразведки геотермальных месторождений путем обработки и моделирования данных гравиразведки и магнитометрии, а также визуализации объемов, построенных на основе замеров удельного сопротивления по данным магнитотеллурического метода в стороннем программном обеспечении. Это помогает геологам интерпретировать геологические структуры и выявлять такие особенности, как разломы, зоны изменения пород или пути перемещения флюидов — ключевые вводные данные для уточнения концептуальных моделей перед началом геологического моделирования.

Эти наборы данных экспортируются и переносятся в Leapfrog Energy — программное обеспечение, в котором геологи объединяют их с каротажными диаграммами, данными об изменении пород и замеров при помощи прибора PTS (измеряющего давление, температуру и расход) для создания динамической концептуальной 3D-модели. Затем эта модель импортируется в Volsung, где создается имитационная модель пластового потока, технологических показателей скважин и выработки электроэнергии с использованием метода конечных объемов.

В то время как обмен данными между программными продуктами выполняется вручную, Seequent Central предоставляет общую для всех пользователей проверяемую среду для контроля версий, сравнения моделей и совместной работы, гарантируя согласованность действий многопрофильных рабочих групп на протяжении всего жизненного цикла проекта.

Рабочий процесс взаимосвязанных продуктов для геотермальных исследований



Oasis montaj



leapfrog | ENERGY



Volsung

Свыше 7400

клиентов используют ПО Seequent в более чем 140 странах

Leapfrog Energy

используется при производстве 60% мирового объема геотермальной энергии

Более 95%

Высокая удовлетворенность пользователей работой нашего контактного персонала и специалистов технической поддержки

Передовые решения для геологических наук будущего: инновации, образование и совместная работа

Мы в Seequent глубоко преданы развитию геотермальной энергетики. Наша компания создана геологами для геологов, и мы постоянно расширяем границы возможного с помощью инновационных инструментов и технологий. Объединив технические знания и ориентированный на пользователя дизайн, мы создали портфель программных решений, таких как Oasis montaj, Leapfrog Energy и Volsung, которые не только расширяют наши познания в строении недр, но и делают традиционно разрозненные процессы более интегрированными, доступными и интуитивно понятными.

Вдохновляя новое поколение ученых-геологов

Мы осознаем необходимость вдохновлять следующее поколение геологов и предоставлять им необходимые инструменты. Поэтому мы разработали [Visible Geology](#) – бесплатное веб-приложение, воплощающее геологические концепции в жизнь для студентов и преподавателей. Visible Geology выходит за рамки традиционных методов обучения на базе двумерных изображений и предоставляет студентам захватывающий опыт обучения в трехмерном пространстве.

Благодаря интуитивно понятным возможностям 3D-моделирования, функциям совместной работы в учебной аудитории и оцифрованным стереографическим сеткам приложение Visible Geology помогает студентам усваивать фундаментальные геологические концепции – и все это при помощи увлекательного интерфейса. Преподаватели могут с легкостью интегрировать этот инструмент в свою учебную программу, модернизируя процесс обучения и вовлекая студентов в работу с интерактивными топографическими поверхностями, разрезами, образцами керна и т. д.

Вдохновляя студентов исследовать подземный мир в инновационной цифровой среде, Seequent вносит важный вклад в формировании будущего наук о Земле.

Ознакомьтесь с Visible Geology для получения более подробной информации →

Откройте для себя возможности взаимосвязанного рабочего процесса в области геотермальных технологий уже сегодня

Посетите seequent.com/leapfrog-energy Вы можете просмотреть видеоролики о продуктах, изучить истории успешного применения ПО от клиентов либо отправить запрос на получение бесплатной 14-дневной пробной версии или проведение демонстрации в режиме онлайн

Познавайте недра Земли, чтобы создать лучший мир.

Являясь подразделением компании Bentley по изучению недр, Seequent помогает организациям улучшить уровень понимания геологического строения, придавая им больше уверенности для принятия более эффективных решений с большей оперативностью.

Seequent создает лучшие в мире технологии, в которых задействованы передовые знания в области наук о Земле, и побуждает своих клиентов трансформировать подход к работе.

Ежедневно мы помогаем им разрабатывать жизненно важные минеральные ресурсы с соблюдением принципов экологической ответственности, проектировать и строить более совершенную инфраструктуру, вырабатывать энергию из возобновляемых источников и снижать негативное воздействие на окружающую среду.

Seequent ведет операционную деятельность в более чем 145 странах, а гордостью компании является ее штаб-квартира в Новой Зеландии.