

Экологическая и инженерная геофизика

Американский проект по исследованию причин движений земной коры

US project focuses on what makes the Earth move

Джон Р. Стоуэлл (John R. Stowell) президент компании Mount Sopris Instrument, шт. Колорадо, США, рассказывает о геофизических исследованиях верхней части разреза в рамках американского проекта EarthScope, нацеленного на изучение геологического строения, истории геологического развития и геодинамики Северной Америки.

В геологической истории есть масса напоминаний о том, что «terra firma – твердая земля», на которой мы живем, не столь тверда. Вспомнив древнее извержение Везувия, уничтожившее Помпеи,

современные извержения Кракатау и Маунт Хелен и землетрясения в Сан-Франциско и Кобе, неизбежно приходишь к выводу, что верхняя часть земной коры – динамическая система.

В конце XVIII в. Хаттон (Hutton) и ряд других ученых удивили научное (и богословское) сообщество, предложив совершенно новую модель строения планеты Земля. Данные наблюдений по нескольким континентам, резко изменили представления о возрасте и составе земных недр. В течение следующего века эти радикальные идеи находили все большую поддержку и, наконец, были, в общем, приняты учеными. А на протяжении последних 30 лет Хесс (Hess) и другие подтвердили общую теорию тектоники плит данными глобальных и внеземных наблюдений. Земля оказалась не просто очень старым слоистым шаром; земная кора подвергалась пусть очень медленным, но непрерывным деформациям. В океанических хребтах выдавливается новый материал, а плиты размером с континент уносили старые породы обратно в глубины Земли.

Катастрофы, подобные извержению Маунт Хелен и землетрясению в Кобе, показывают, что неожиданные изменения в верхней части разреза приводят к серьезным экономическим и экологическим последствиям. Неудивительно, что государственные органы и международные организации обратились к мировому научному сообществу за помощью в минимизации эффектов таких событий. В Японии и США для этой проблемой работают несколько программ.

Национальному научному фонду (ННФ, National Science Foundation) США поручено вести программу EarthScope. ННФ – независимое агентство при правительстве США, созданное на основании Закона о Национальном научном фонде 1950 г. Задача программы EarthScope состоит в использовании современных методов наблюдения, анализа и передачи данных для исследования строения и истории Североамериканского континента и физических процессов, приводящих к землетрясениям и извержениям вулканов. В рамках программы используются разнообразные инструменты на многих наблюдательных пунктах, что существенно повышает возможности наук о Земле и позволяет лучше понять

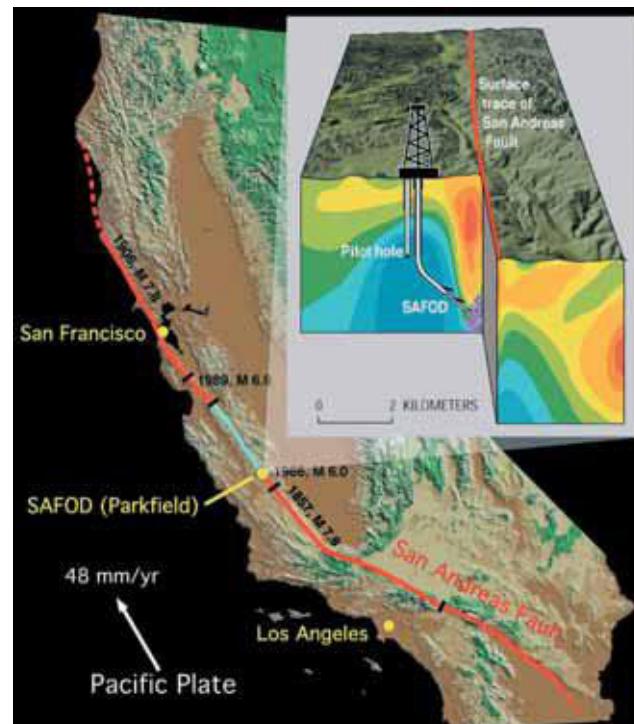


Рис. 1.

строительство, историю и динамику Северной Америки.

В рамках EarthScope исследованиями верхней части разреза занимаются два подразделения. Одно из них – Подземная обсерватория разлома Сан-Андреас (San Andreas Fault Observatory at Depth – SAFOD; рис. 1) ведет отбор проб горных пород и флюидов непосредственно из разломной зоны, измерение большого числа параметров разломной зоны и мониторинг подвижной сейсмически активной зоны на глубине. Через зону разлома Сан-Андреас будет пробурена скважина глубиной 3.2 км, которая пройдет вблизи очага Паркфилдского землетрясения 1966 г. (магнитуда 6 баллов), где разлом идет через область скопления очагов землетрясений малой и средней магнитуды и сейсмических сбросов. К августу 2004 г. Скважина достигла глубины около 1450 м и начата подготовка обсадной колонны диаметром 34 см (13 3/8 дюйма) для следующего этапа бурения. На глубине примерно 3 км будет сделана попытка повернуть ствол скважины, чтобы разбурить саму разломную зону.

Обсерватория SAFOD позволит по-новому, изнутри, взглянуть на состав и физические свойства вещества разломной зоны. Она также даст возможность напрямую

Экологическая и инженерная геофизика

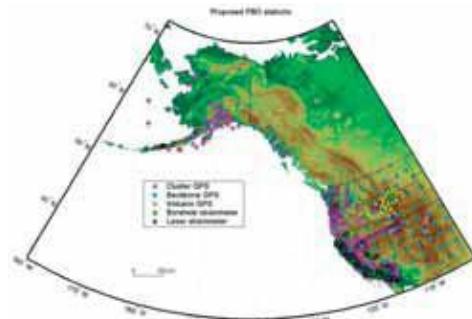


Рис. 2.

Имеется множество непроверенных и неопробованных лабораторных и теоретических моделей физики процесса образования разломов и землетрясений. Бурение, отбор образцов и скважинные измерения непосредственно внутри разломной зоны Сан Андреас позволят проверить многие из этих гипотез.

Проект SAFOD позволит получить образцы пород и флюидов разломной зоны и провести детальные геофизические измерения в скважине. Планируется установка датчиков для длительного мониторинга разломной зоны и примыкающих областей. По завершении бурения эти датчики будут в широком

диапазоне измерять сейсмические сигналы (от землетрясений) в прискважинной зоне и отслеживать напряжения, при которых возникают землетрясения и распространяются упругие волны, и изменения

порового давления, температуры и напряжений в ходе землетрясения. Есть надежда, что данные обсерватории SAFOD позволят проводить лабораторное и математическое моделирование для прогноза землетрясений.

В рамках программы EarthScope работает также геодезическая Обсерватория границы плит (Plate Boundary Observatory – PBO), предназначенная для трехкомпонентных измерений поля напряжений поперек активной пограничной зоны на западе США, разделяющей Североамериканскую и Тихоокеанскую плиты. Обсерватория состоит из ряда станций GPS, расположенных у поверхности Земли и датчиков давления на глубине несколько сотен метров. Проект PBO осуществляет некоммерческая организация UNAVCO, объединяющая 30 американских университетов и 6 зарубежных организаций. UNAVCO финансирует применение высокоточных геодезических технологий и способов измерения напряжений.

Используя три различных элементарных установки, на обсерватории PBO предполагается измерять поле напряжений на границе плит в целом, а также локальные напряжения вблизи разломных зон и очагов магмы на западе Северной Америки и на Аляске. Дополнительно имеется набор переносных средств, которые позволят дополнить данные стационарных пунктов измерения

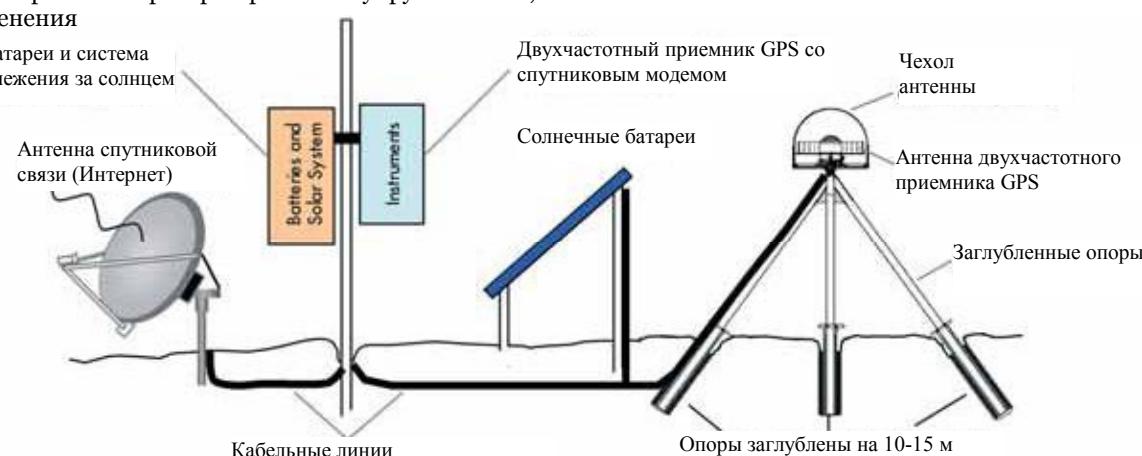


Рис. 3.

Экологическая и инженерная геофизика

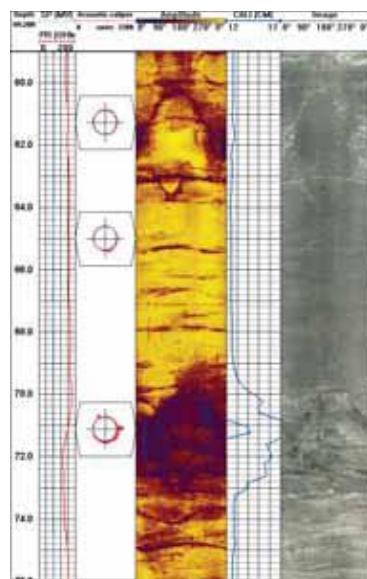


Рис. 4.

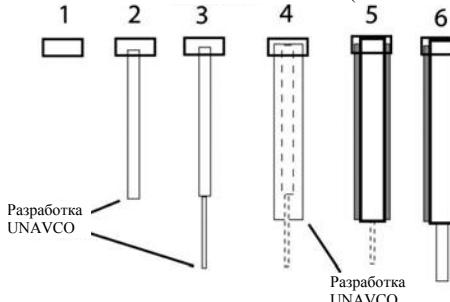
данными по Канаде и Мексике. Эту «аппаратуру поля боя» можно также применять в местах угрозы вулканической или тектонической опасности. Опорная сеть будет состоять из 116 новых и 20 существующих приемников, которые позволят осуществлять долгопериодический мониторинг всей границы плиты на большой территории, включающей и восточную часть США. На западе Северной Америки и на Аляске расстояние между приемниками составит 200 км, а на востоке США – 500 км (рис. 2). Типичная опорная станция GPS показана на рис. 3.

Второй основной комплекс аппаратуры (так называемые «клusterы») устанавливается вблизи разломных зон и очагов магмы на западе Северной Америки и на Аляске (см. карту). Будет установлено около 775 станций GPS и 145 скважинных датчиков напряженного состояния.

Датчики напряженного состояния будут установлены в коренных породах в течение пяти лет, начиная с конца 2004 г. Начать планируется с области Каскадия (Cascadia) на Олимпийском полуострове, шт. Вашингтон. Там будет установлено 12 датчиков; еще 4 – в области Паркфилд на севере Калифорнии. Остальное оборудование будет установлено через 3–5 лет. Глубина заложения датчиков будет, в зависимости от места, от 80 до 200 м. При бурении скважин будет проведен каротаж в составе термометрии, съемки ПС, кавернометрии и исследования с помощью ориентированных акустических камер. Для оценки механических свойств пород и состояния цементации возможно применение акустического каротажа. Типичные каротажные диаграммы показаны на рис. 4.

В скважинный комплекс входит также видеосъемка, позволяющая геологу как бы видеть полный керн скважины. Акустические данные говорят о прочности

БУРЕНИЕ ДЛЯ УСТАНОВКИ ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ (СПОСОБ 2)



- 1) установить металлическую колонну (25-30 см) на глубину более 6-7 м.
- 2) пробурить турбобуром (12-15 см) 150 м или до достижения подходящих пород
- 3) пробурить с отбором керна 30-50 м, определить место для датчика
- 4) разбурить до диаметра 30-35 см участок длиной 12-15 м выше места для датчика
- 5) в расширенной части установить и зацементировать стальную колонну (16 см)
- 6) разбурить до диаметра 15 см минимум интервал отбора керна и еще 2-3 м

Рис. 5.

породы, а механическая и акустическая кавернометрия позволит выбрать глубину для заложения трехкомпонентного датчика напряжений. Типовой набор методов исследования скважин представлен на рис. 5.

Бурение производится с отбором полного керна с целью выбора мест для заложения датчиков напряжений и для отслеживания упругих эффектов в порах в возможных проницаемых пластах. Информация по керну дополняется данными каротажа. Скважины частично обсаживаются стальной колонной диаметром 16.8 см (6 5/8 дюйма) с цементацией. Трехкомпонентный датчик напряжения помещается в необсаженной части скважины в 12-15 м после конца обсадной колонны на расстоянии 0.3 – 0.6 м от забоя в месте, где по данным каротажа и по керну нет трещин и каверн. При необходимости



Рис. 6.

Экологическая и инженерная геофизика

скважина заполняется цементом от забоя в направлении устья до тех пор, пока не найдется подходящее место для датчика. Подготовка необсаженной части скважины к размещению датчика ведется с большой осторожностью (рис. 6). Датчик помещается в мягкую цементную смесь, которую аккуратно подают через спускаемый в скважину дозатор.

В ходе установки работа датчика напряжения постоянно проверяется. После затвердевания цемента в течение ночи через тонкую трубку добавляют еще цемента. Примерно в 5 м выше датчика напряжения устанавливают трехкомпонентный скважинный сейсмоприемник L-22. Устройство устанавливают в поливинилхлоридной трубке. Для приема порового давления трубку закрепляют и акустически изолируют. С помощью тонкой трубы (2.5 см) сейсмоприемник отделяют цементом от зазора немногого ниже акустического экрана. Скважину очищают и заполняют зазор среднезернистым песком (№3 по классификации

Особенности установки оборудования

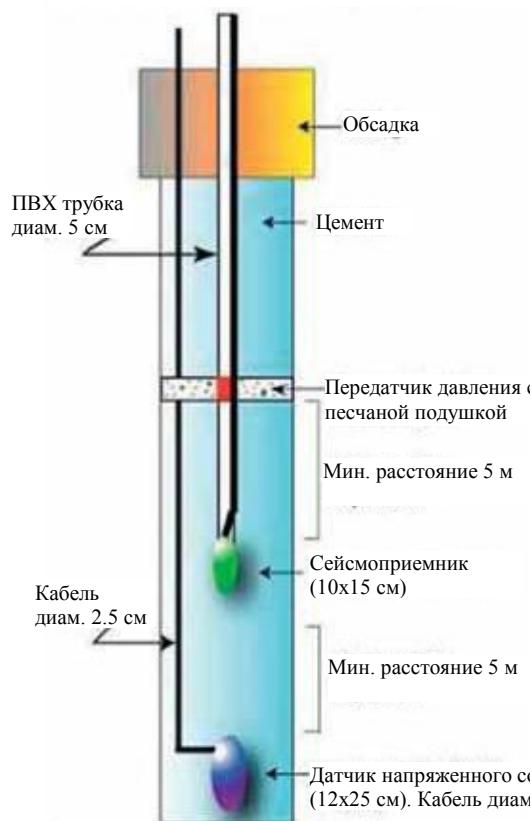


Рис. 7.

США) до точки примерно в 3 м выше экрана. Песок покрывают бентонитом, который через 2-4 часа запечатывает зазор сверху. На первых скважинах в 60-70 м над датчиками напряжения можно поставить также наклономеры, от которых позднее можно отказаться. Датчик давления опускают в скважину с упругим прижимом в оцинкованной трубке диаметром 1 см. Все провода от датчиков выводятся через кабелепровод на поверхность (рис. 7).

В датчике тензора напряжений Gladwin GTSM (Gladwin Tensor Strainmeter) используются пакеты из плоских конденсаторных пластин, позволяющие проводить трехкомпонентные измерения напряженного состояния с точностью 2 микрометра. Данные от измерителя мостовой схемы, обеспечивающего высокую стабильность сигнала, передаются по бронированному каротажному кабелю. Отсчеты снимаются 10 раз в секунду и в реальном времени передаются в центр данных РВО в г. Боулдер (Boulder), шт. Колорадо. Отсчеты с сейсмоприемников снимаются тремя отдельными 24-разрядными АЦП не реже 100 раз в секунду и регистрируются на месте. Питание оборудования осуществляется, в зависимости от местоположения, от сети, солнечных батарей или гальванических элементов. Предусматривается передача данных в реальном времени по проводным или беспроводным каналам.

GPS и скважинное оборудование дополняют друг друга. GPS более чувствителен к долгопериодическим изменениям напряженного состояния, несущим информацию о движении плиты и более медленных процессах. Датчики напряженного состояния наиболее чувствительны к изменениям с периодом одна неделя. В режиме реального времени на периодах от нескольких месяцев до нескольких лет чувствительность GPS на один-два порядка лучше. На средних периодах (недели – месяцы) их чувствительность примерно одинакова, а на более коротких периодах уже чувствительность датчиков на 1-3 порядка лучше, чем у GPS.

Таким образом, оборудование обсерватории РВО позволяет проводить как долгосрочный мониторинг долгопериодических изменений в движении плит, так и фиксировать более высокочастотные разломные и магматические явления, что дает основания ожидать более глубокого понимания взаимосвязи этих процессов. Более подробная информация доступна на интернет-сайте www.earthscope.org/pbo.

Литература

- McPhee, John [2000] *Annals of a Former World*. Farrar, Straus and Giroux.
 GEO-PBO [2001] *White Paper* (PDF format). Pasadena CA.
 UNAVCO PBO [2004] *Critical Design of PBO Borehole Strainmeter Network* (PDF format).
 PBO Strainmeter Meeting [2004] Hotel Boulderado, Boulder CO, July 26-28.