

## 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 выдавливался 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

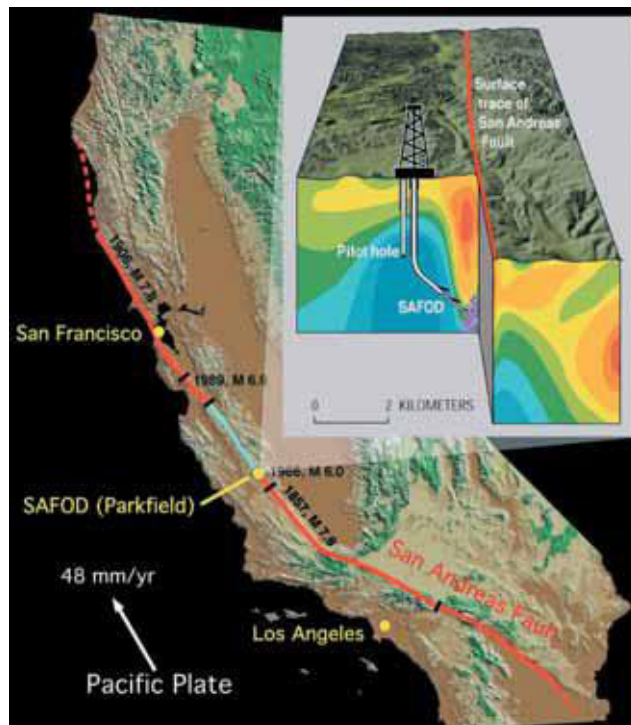
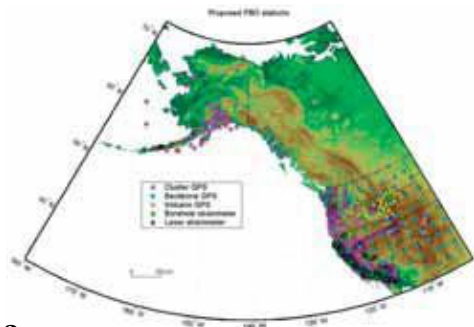


Рис. 1. строение, историю и динамику Северной Америки.

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

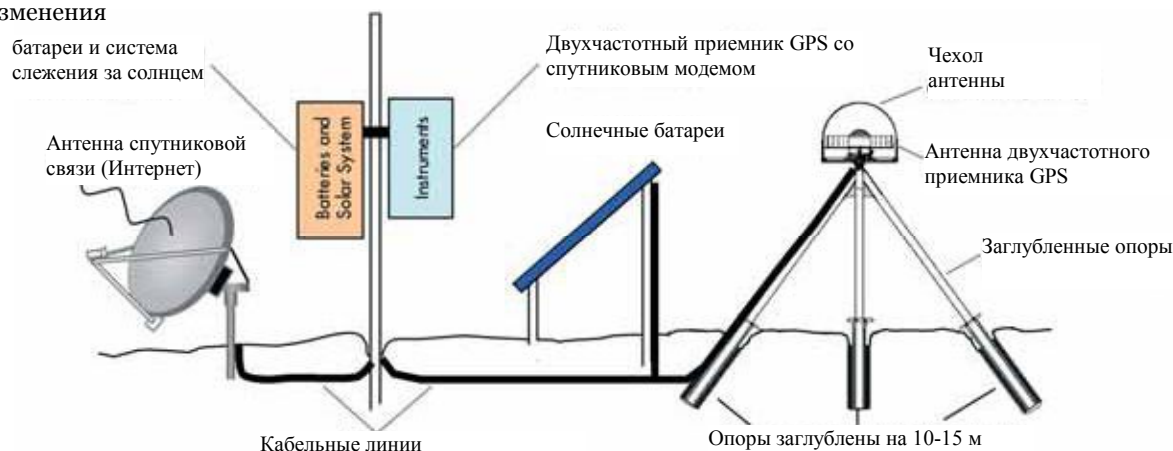


**Рис. 2.**

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 позволяют 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



**Рис. 3.**

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

# Экологическая и инженерная геофизика

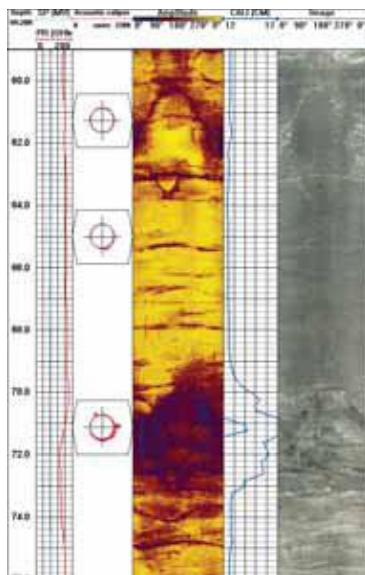


Рис. 4.

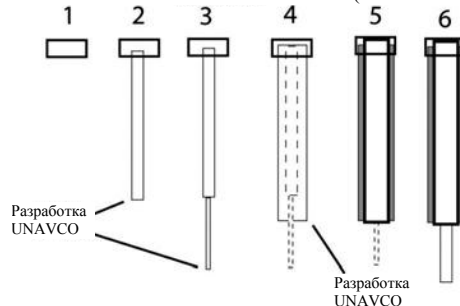
данными по Канаде и Мексике. Эту «аппаратуру поля боя» можно также применять в местах угрозы вулканической или тектонической опасности. Опорная сеть будет состоять из 116 новых и 20 существующих приемников, которые позволят осуществлять долгопериодический мониторинг всей границы плиты на большой территории, 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 «кластеры») 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<sup>тер</sup> 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 трубки (2.5 см) сейсмоприемник отделяют цементом от зазора немного ниже акустического экрана. Скважину очищают и заполняют зазор среднезернистым песком (№3 по классификации

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 наклонометры, 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 пикометра. Данные от измерителя мостовой схемы, обеспечивающего высокую стабильность сигнала, передаются по бронированному короткозамкнутому кабелю. Отсчеты снимаются 10 раз в секунду и в реальном времени передаются в центр данных PBO 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 PBO 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](http://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.

Особенности установки оборудования

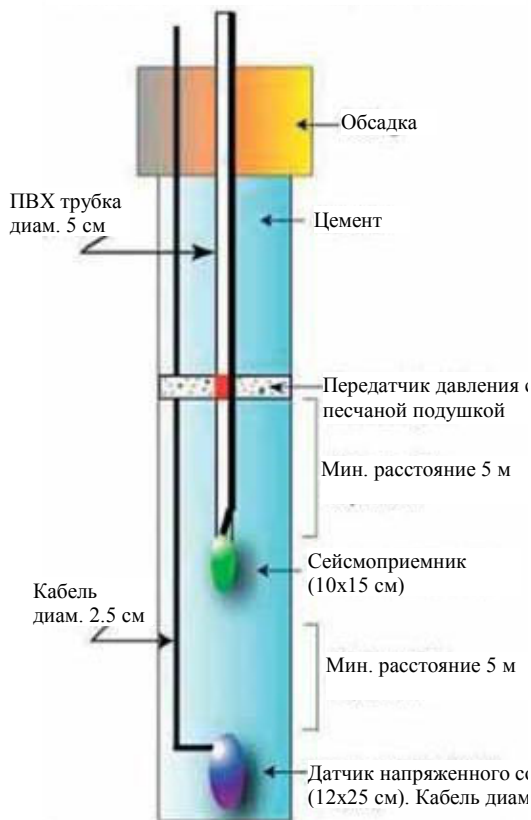


Рис. 7.