

## Сато М. и другие. Мониторинг водорода вдоль разломов Сан Андреас и Калаверас в Центральной Калифорнии в 1980-84 гг.

Matoaki Sato, A.J. Sutton, K.A. McGee, S.Russell-Robinson

### Введение.

Обычно считается, что концентрация водорода в почве является аномально высокой вдоль некоторых разломов (Wakita et al., 1980; Sugisaki et al., 1980; Ware et al., 1985) и демонстрирует большие изменения во времени, вероятно, связанные с активизацией землетрясений. В этой статье мы описываем попытку непрерывного мониторинга концентраций  $H_2$  вдоль разломов Сан Андреас и Калаверас в Центральной Калифорнии и обсуждаем вероятное происхождение наблюдаемых изменений  $H_2$  и их связь с подвижками по разломам и с землетрясениями.

### Рекогносцировочные исследования.

Стимулированные сообщением (Wakita et al., 1980) о высоких концентрациях  $H_2$  в почвах вдоль разлома Ямасаки в Японии, мы провели рекогносцировочные исследования  $H_2$  на глубине 1 м в нескольких местах смещений по разломам (Schulz et al., 1983) на разломах Сан Андреас и Калаверас в Центральной Калифорнии 17-18 декабря 1980 года с использованием портативного детектора  $H_2$ , в основе которого положен метод добавления  $SnO_2$  твердого электролита (модель Интернешнл сенсор технолоджи AG-5000- $H_2$ , 1 ppm чувствительностью 100 ppm полного масштаба). Мы выкопали шурф вручную, погрузили сенсорную головку на дно шурфа и ждали, по крайней мере, 1/2 часа до снятия окончательного показания прибора.

$H_2$  не определялся у Береговой дороги ( $H_2SH$  на рис. 1) на разломе Калаверас и у Сан Хуан Баутиста ( $H_2SJ$ ), у парка отдыха Холлистер Хилл и у Голд Хилл ( $H_2GH$ ) на разломе Сан Андреас. Едва заметные концентрации  $H_2$  определялись на ранчо Меленди ( $H_2MR$ ) и до 15 ppm  $H_2$  на ранчо Уорк и в каньоне Слак ( $H_2SC$ ) после почти часового периода наблюдений.

В дополнении к рекогносцировочным исследованиям мы провели эксперимент на ранчо Меленди, чтобы изучить можно ли использовать разработанный нами сенсор с топливной ячейкой для мониторинга  $H_2$  в почвах вдоль активных разломов, если установится режим установившегося потока  $H_2$ .

Мы опустили трубку PVC диаметром 5 см и длиной 1.5 м вертикально в грунт, ввели сенсор топливной ячейки на середину трубки и прикрыли пластиковым мешком. Сенсорное напряжение в воздухе (0.5 ppm  $H_2$ ) было -0.4 mV на 47 Kohm нагрузки. Когда мы вернулись спустя 24 часа, сенсорное напряжение изменилось до +3.7 mV, соответствуя увеличению  $H_2$  до ~18 ppm. Исследования и эксперимент показали, что эмиссия  $H_2$  происходила вдоль некоторых участков разломов и, что заглубленный и упрощенный сенсор топливной ячейки, может быть использован для продолжительного мониторинга  $H_2$ .

### Мониторинговая сеть.

Ободренные результатами рекогносцировочных исследований, мы установили пилотную телеметрированную водородную мониторинговую станцию на ранчо Меленди 20 декабря 1980 года. В последующие 6 месяцев пилотная станция показала применимость мониторингового метода. В июле 1981 года мы начали установку сети аналогичных телеметрированных станций вдоль разломов Сан Андреас и Калаверас (рис.1 и таблица 1).



Рис. 1 Расположение сети станций мониторинга водорода (черные треугольники) вдоль разломов Сан Андреас и Калаверас в центральной Калифорнии (см. таблицу 1 наименование станций и коды) и эпицентров Коалингских землетрясений  $M > 5$  1982 и 1983 годов (звездочки, частично некоторые из них перекрываются)

Таблица 1 Расположение и геология и иная информация об участках мониторинга водорода вдоль разломов Калаверас и Сан Андреас в центральной Калифорнии.

Наименование участка	Код	Дата установки	Разлом	Широта	Долгота	Геологическая и другая информация
Береговая дорога	H2SH	июль 8, 1981	Калаверас	36°56.6'	121°26.7'	аллювиальные отложения, перекрывающие третичные осадки; высокое зеркало подземных вод; батареи порошковые.
Райт роад	H2WR	июль 9, 1981	Калаверас	36°52.2'	121°24.8'	аллювиальные отложения, подстилающие третичные породы; шум на телеметрической линии; батареи
Сан Хуан Баутиста	H2SJ	июль 17 1982	Сан Андреас	36°50.2'	121°31.2'	аллювиальная равнина; батареи
Чиенег Винери	H2CW	июль 20, 1982	С.А.	36 45.0	121 23.1	аллювий маломощный, покрывающий контакт шлейфа ледниковых отложений и третичные осадки; батареи;
Ранчо Меленди	H2MR	дек. 20, 1980	С.А.	36 35.7	121 11.2	гравийные и песчаные гребни; многочисленные норы грызунов; солнечные батареи.
Каньон Слак	H2Sc	июль 8, 1981	С.А.	36 03.9	120 37.7	хребты францисканских пород; солнечные батареи; телеметрия частично по радио.
Гора Миддл	H2MM	сент.27, 1982	С.А.	35 57.5	120 30.1	гребни третичных осадков; солнечные батареи; много проблем по установке; частично телеметрия по радио.
Паркфилд	H2PK	июль 7, 1981	С.А.	35 54.1	120 26.5	небольшой аллювиальный бассейн, перекрывающий третичные морские осадки; солнечные батареи.
Голд Хилл	H2GH	июль 25, 1982	С.А.	35 49.2	120 20.9	аллювиальные осадки, перекрывающие предполагаемые метаморфические базитовые породы; солнечные батареи.

### Мониторинговый метод.

Измерения  $H_2$  в почве были сделаны топливным ячейным сенсором аналогичным тому, который описан Sato,McGee(1981). Сенсор, по существу, является миниатюрной топливной ячейкой  $H_2/O_2$ , использующей ионно-обменную полимерную мембрану в виде электролита ионов  $H^+$  [Niedrach,Crubb, 1963; Vielstich, 1970]. Мы купили мембраны перфторидный сульфатно-кислый полимер (кислотно-выщелоченный Нафлон), который имеет патентованные оболочки из металлов платиновой группы, применяемые в промышленном водородном генераторе {Fickett, Kalhammer, 1977}, и приспособили их к нашему сенсору, смонтированному в тефлоне и сплавах благородных металлов. Хотя, по существу, топливный элемент и наш датчик сконструированы для определения количества  $H_2$  в ppm в воздухе путём использования разницы скоростей каталитической реакции между окислением  $H_2$  и восстановлением  $O_2$ ; сила генерируемого тока составляла порядок микроампер. Калибровочная кривая датчика при комнатной температуре и для влажного воздуха показана на рис. 2.

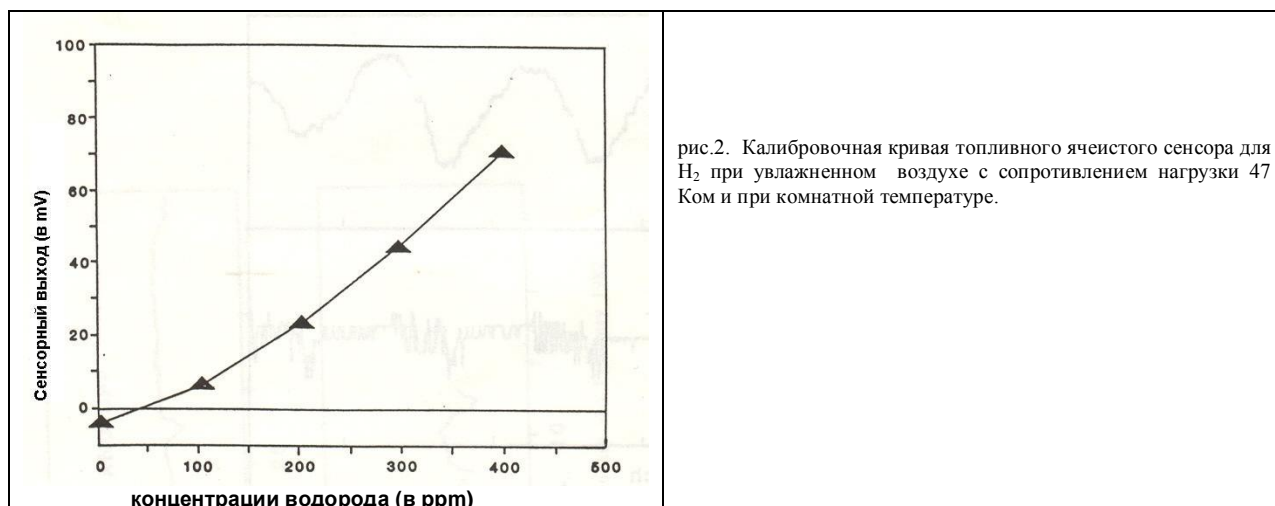


рис.2. Калибровочная кривая топливного ячейного сенсора для  $H_2$  при увлажненном воздухе с сопротивлением нагрузки 47 Ом и при комнатной температуре.

Напряжение на выходе для данной концентрации  $H_2$  является сложной функцией сопротивления нагрузки, температуры, эффективной площади элемента (ячейки) и влажности электролитной мембраны. Она может также колебаться в пределах  $\pm 25\%$ , в зависимости от того, как датчик монтировался и от воздействия механики, соединённой с мембраной. Там, где концентрация  $H_2$  низкая ( $< 10$  ppm), первоначальная реакция датчика становится очень медленной, показывая, что достаточное количество  $H_2$  должно быть абсорбировано поверхностью катализатора, чтобы достигнуть устойчивой реакции.

При высоких концентрациях датчик реагирует на 90% финального значения в пределах нескольких минут, если сопротивление нагрузки составляет 100 Ом или ниже. Реакция происходит быстрее и более

линейно, по мере уменьшения сопротивления нагрузки, но напряжение на выходе становится ниже. Первоначально мы выбрали 47 Ком, но изменили до 10 Ком во всех местах между мартом и июлем 1982 года из-за опасения, что высокие значения могли вызывать нестабильность в интервале низких ppm  $H_2$ .

Наш датчик также реагировал на  $H_2S$  и  $SO_2$  (Sato et al., 1976), но не реагировал на  $CH_4$  и другие гидрокарбонатные газы. Поскольку  $SO_2$ , по-видимому, не может быть значительным вне вулканических районов и в районах сульфидной минерализации, а также мы не чувствовали обоняние  $H_2S$  (человеческий нос может определять менее 1 ppm  $H_2S$ ), то мы не использовали газовый очиститель для серных газов. Хотя датчик топливной ячейки (элемента) может быть не подходящим для точной аналитической работы, он полезен для долговременного мониторинга относительных вариаций  $H_2$ , обладая такими чертами, как простота управления, долговечность, долговременная надёжность и слабо точное оборудование.

Наши датчики сравнивались с конвекционным газовым хроматографом, использовавшимся радиационной Лабораторией Келлогг Калифорнийского Института технологии (Shapiro et al., 1980) на 4-х скважинах в южной Калифорнии. Рисунок 3 показывает результаты полученные на дамбе Покойма между 12 июня и 18 июля 1982 г. Оба инструмента отслеживали один за другим в деталях, включая высокий пик  $H_2$ , который генерировался путём перезарядки батареи (A.Rice, Lab. Rad. Kellogg, личное сообщение, 1982).

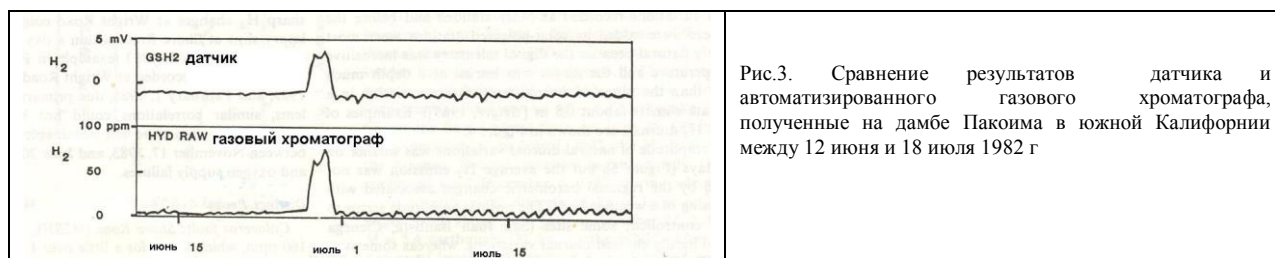


Рис.3. Сравнение результатов датчика и автоматизированного газового хроматографа, полученные на дамбе Пакойма в южной Калифорнии между 12 июня и 18 июля 1982 г

Наш метод установки датчиков в поле характеризуется рядом особенностей, которые допускают относительно свободное движение газов (Sato et al., 1985). Для того, чтобы содержать электролитную мембрану влажной (сохранять хорошую ионную проводимость и, следовательно, чувствительность), мы добавляли баблер (генератор пузырей?), содержащий вода/этиленгликолевую смесь, к кислородной питающей линии на всех станциях, за исключением Чинег Винери в марте-июле 1982 г. Мы также добавляли отдельный усилитель между датчиком и телеметрическим блоком, чтобы предотвратить возможный шум земного конура. Для обеспечения полной гарантии, мы модифицировали конструкцию датчика Sato, McGee (1981) путём (1) изменения направления (?) обнаженного проводящего провода от внешнего электрода, чтобы пройти через внутреннюю оболочку датчика и (?) изоляции внешней поверхности ячейки от внешней среды тонкой пленкой тефлона. Дополнение тефлоновой пленки не изменило характеристик датчика при лабораторных испытаниях, свидетельствуя, что  $H_2$  диффундирует через оболочку очень быстро. Мы заменили датчик старого образца всякий раз, когда его замещение становилось необходимым.

Датчик нуждается в притоке кислорода или воздуха, который не содержал бы  $H_2$ , чтобы работа проходила надлежащим образом. Сначала мы качали чистый окружающий воздух в датчик с использованием диафрагменного насоса в местах действия солнечной станции (все места южного Чинери Винери). Однако, поскольку мы обнаружили, что  $H_2$  в атмосфере может мешать измерениям (Sato, McGee, 1981), мы добавили каталитический газовый очиститель на  $H_2$  (колонка пузырьков окиси алюминия, покрытых черной пленкой) и воздушную рециркулирующую камеру. Система работала удовлетворительно за исключением случаев, связанных с поломкой насоса. После июня 1984 г мы использовали кислородные баллоны на всех станциях.

Все точки мониторинга располагались на удалении 20 м друг от друга, соединенные телеметрической системой. Все датчики ставились в 2 м от проекции разлома. Мы не устанавливали датчики далеко от разлома, так как знали (Wakita et al., 1980), что концентрация  $H_2$  быстро уменьшается по мере удаления от разлома Ямасаки. Аналоговый сигнал отдельного усилителя в цифровом виде передавался по телеметрии с инерционным интервалом 10 минут в Геологическую Службу США в Менло Парк в Калифорнии, где данные сохранялись на компьютере.

### Результаты.

Несмотря на случайные инструментальные ошибки достаточное количество данных было получено в конце 1984 года. Картина временных изменений  $H_2$  значительно отличалась в разных местах, но аномальные значения  $H_2$  легко отличались от нормальных суточных вариаций и инструментального шума. Результаты по Чинера Винери докладывались ранее (Sato et al., 1985); результаты, полученные в других точках наблюдений, описаны ниже.

### *Суточные и иные вариации скорректированные относительно метеорологических факторов.*

В большинстве точек зафиксированы суточные изменения в виде различий амплитуд и фаз во времени периодов покоя активности  $H_2$ , но величины изменений (до нескольких сотен ppm), скорректированные по метеорологическим факторам, были относительно небольшими по сравнению с изменениями аномальных значений (4 000ppm) другого происхождения, описываемые позже.

Суточные вариации могли быть вызваны, как природными, так и инструментальными факторами. Дополнение отдельных усилителей на солнечных станциях (все станции южного Чинег Винери) изменяли картину суточных вариаций, так как дневные флуктуации (колебания) напряжений на станции влияли на нулевое напряжение усилителя (но не на коэффициент усиления). Суточные вариации, записанные на других станциях, с учетом того, каким образом усилители были установлены на солнечных силовых станциях, наиболее вероятно, были естественными, потому что цифровая телеметрия была не чувствительна к температуре, так как датчик был погружен на глубину большую, чем интервал суточных температурных вариаций в данных климатических температурных условиях (около 0.8 м (Geiger, 1965)). Примеры естественных суточных вариаций  $H_2$  показаны на рис.4.

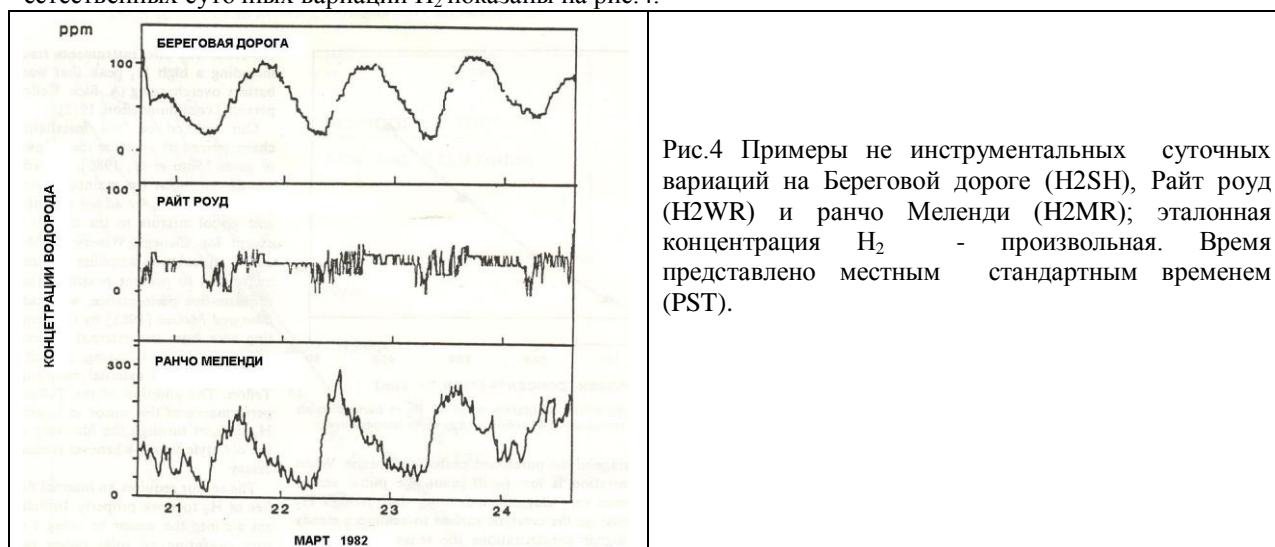


Рис.4 Примеры не инструментальных суточных вариаций на Береговой дороге ( $H_2SH$ ), Райт роуд ( $H_2WR$ ) и ранчо Меленди ( $H_2MR$ ); эталонная концентрация  $H_2$  - произвольная. Время представлено местным стандартным временем (PST).

Амплитуда естественных суточных вариаций была меньше в дождливые дни (рис. 5), но средняя эмиссия  $H_2$  не подвергалась влиянию региональных барометрических изменений, связанных с прохождением фронта погоды. Предполагается, что нормальная амплитуда является характеристикой участка; некоторые участки (Сан Хуан Бантиста, Чинег Винери) четко показали суточные вариации, тогда как на других участках (Береговая дорога, ранчо Меленди) хорошо развиты дневные.

Несмотря на повседневные флуктуации в пределах нескольких часов, время максимумов и минимумов суточных вариаций, в основном, оставались постоянными в не зависимости от сезонов и лунных циклов, но средние времена изменялись поразному на разных участках (таблица 2). Природные характеристики участков измерений фазовой синхронности также влияли на дегазацию  $H_2$  в течение периодов возраставшей эмиссии  $H_2$  (рис. 6).

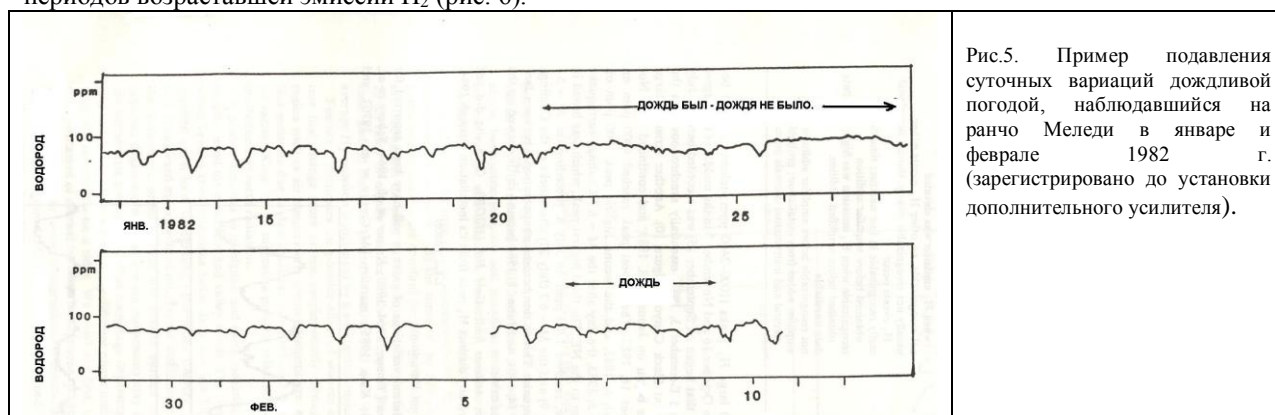


Рис.5. Пример подавления суточных вариаций дождливой погодой, наблюдавшийся на ранчо Меленди в январе и феврале 1982 г. (зарегистрировано до установки дополнительного усилителя).

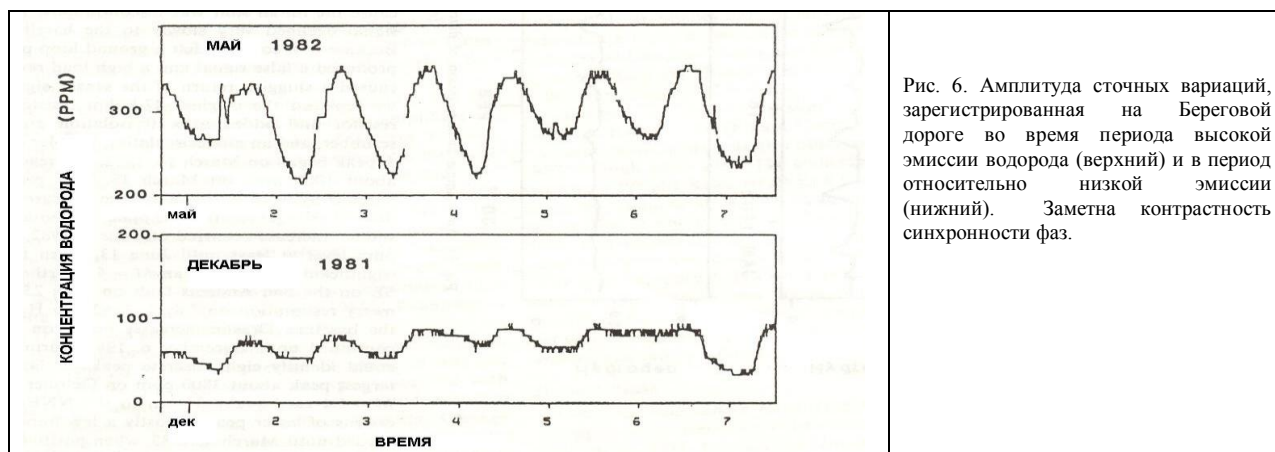


Рис. 6. Амплитуда сточных вариаций, зарегистрированная на Береговой дороге во время периода высокой эмиссии водорода (верхний) и в период относительно низкой эмиссии (нижний). Заметна контрастность синхронности фаз.

Таблица 2. Средние времена суточных максимумов и минимумов концентраций водорода в почвах.

Наименование участка (КОД)	Время максимума, LT	Время минимума, LT	заметки о суточных колебаниях H <sub>2</sub>
Береговая дорога (H2SH)	1700	0600	легко распознавались, при хорошей погоде трудно отличить из-за телеметрического шума за исключением, когда эмиссия H <sub>2</sub> была повышена
Райт роуд (H2WR)	1800	0800	
Сан Хуан Баутиста (H2SJ)	?	?	не распознавались; обычно другие события H <sub>2</sub> не распознавались, хотя случайные события H <sub>2</sub> встречались
Чинег Винери (H2CW)	?	?	
Ранчо Меленди (H2MR)	1300	0500	легко распознавались при хорошей погоде; временные данные получены до установки усилителя
Каньон Слак (H2SC)	1000	2200	
Срединная гора (H2MM)	...	...	расознавались, когда эмиссия H <sub>2</sub> была высокая; временные данные получены до установки усилителя
Паркфид (H2PK)	?	?	
Голд филд (H2GH)	0300 (?)	1400 (?)	данные ненадежные не распознались до установки усилителя усилитель установлен; вероятно природные и инструментальные суточные помехи вместе

ВРЕМЯ В МЕСТНОМ СТАНДАРТНОМ ВРЕМЕНИ

### Модели корреляции с оползевыми событиями.

Главные аномалии H<sub>2</sub>, обычно не коррелировались с дискретными поверхностными оползевыми явлениями, если последние не были одновременными с сейсмическими событиями; в качестве примеров на Чинег Винери см. Sato et al., [1985]. Однако, любопытны резкие изменения H<sub>2</sub> зарегистрированные на Береговой дороге (H2SH) в конце 1974 (рис.7, нижний) совпало с более крупным оплзевым событием, спровоцированным дождём «пульсирующие оползни» [Schulz et al., 1983], зарегистрированные на том же участке (рис. 7, верхний). Сходное совпадение наблюдалось также на Береговой дороге в конце 1982 г. – начале 1983 г. Иногда совпадения этих процессов распространялись до Райт роуд (H2WR) на удалении 8 юб км; общее количество 20 резких изменений H<sub>2</sub> на Райт роуд совпадало с пульсирующими оползнями на Береговой дороге в течение между 26 октября 1982 г. и 3 марта 1983 г (пример на рис. 8).

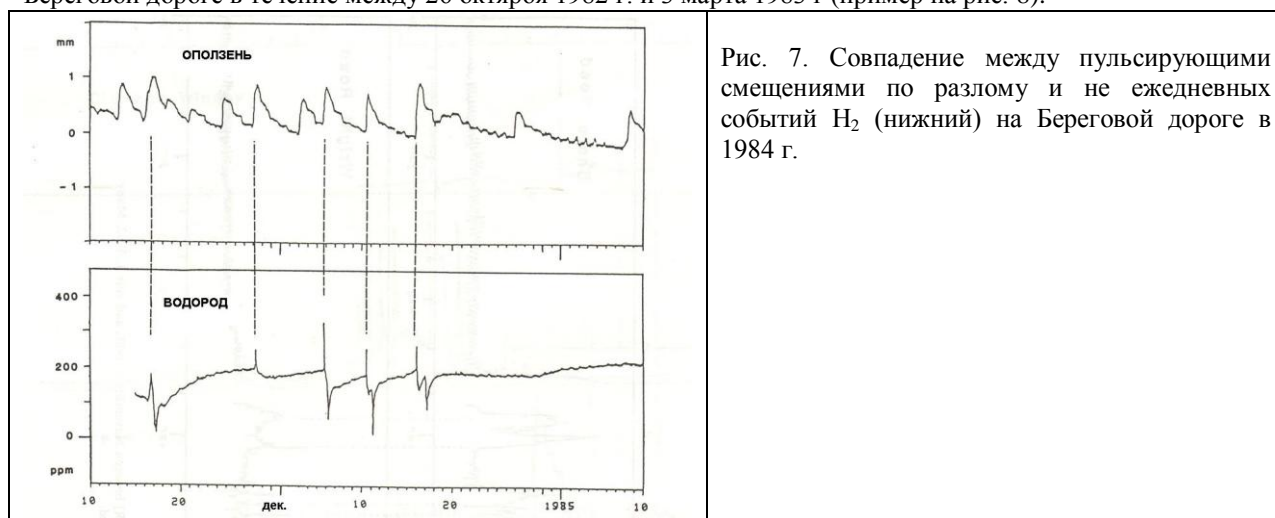


Рис. 7. Совпадение между пульсирующими смещениями по разлому и не ежедневных событий H<sub>2</sub> (нижний) на Береговой дороге в 1984 г.

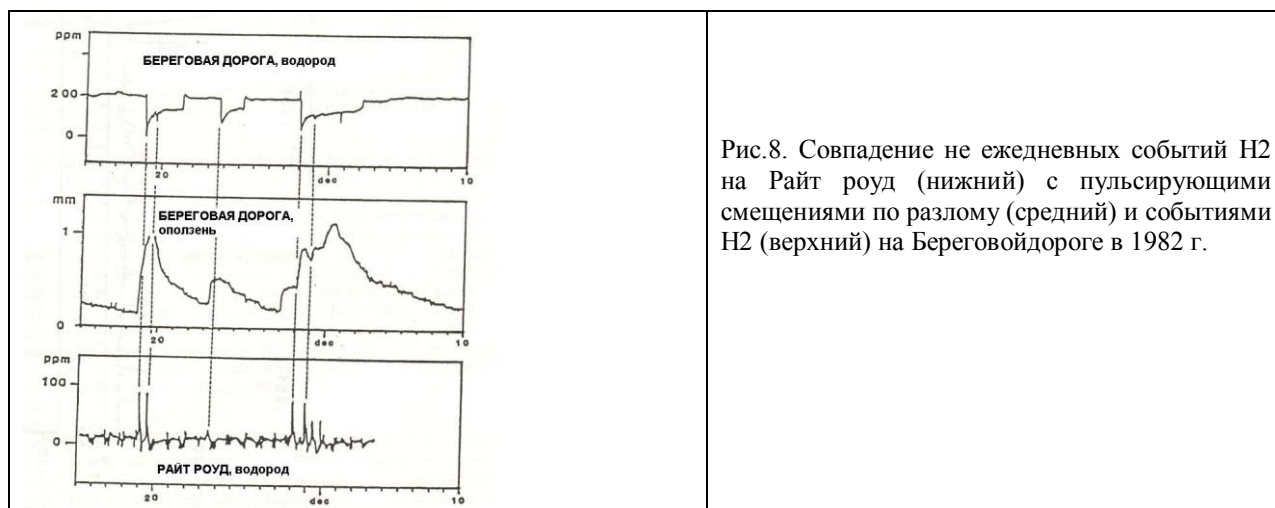


Рис.8. Совпадение не ежедневных событий  $H_2$  на Райт роуд (нижний) с пульсирующими смещениями по разлому (средний) и событиями  $H_2$  (верхний) на Береговой дороге в 1982 г.

Поскольку надёжные данные не были получены на Райт роуд между 22 октября 1983 года и 1 февраля 1985 года, из-за проблем телеметрии, то аналогичные корреляции не могут быть выполнены в течение всего периода наблюдений. Нет надёжных данных по участку Береговой дороги также между 17 ноября 1983 г. и 20 июня 1984 г. вследствие повреждений батарей и снабжения кислородом.

#### Отчетливые пики.

Разлом Калаверас; Береговая дорога ( $H_2SH$ ). Единичный пик  $H_2$  160 ppm, который продолжлся недолго на протяжении одного дня, был зарегистрирован 24-25 июля 1981 г. Начиная с 1 ноября 1981 г. серия малых пиков ( $\sim 50$  ppm) появилась на этом участке со скоростью один-три пика в день и достигла наивысшего развития в виде дискретных (прерывистых) пиков 14 ноября (400 ppm), 17 ноября (300 ppm), и 27 ноября (480 ppm), как показано на рисунке 9 (верх).

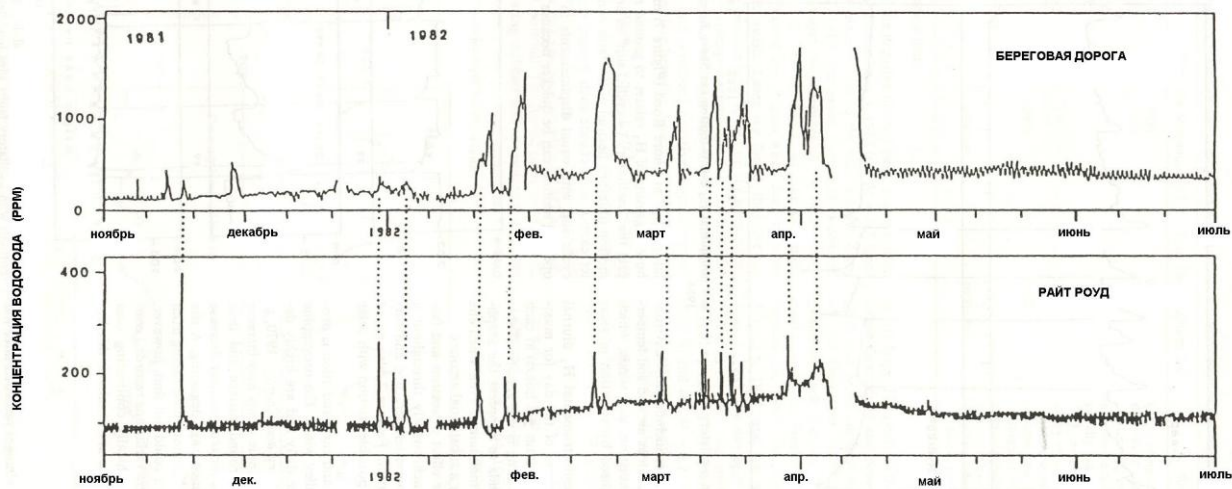


Рис.9 Кажущиеся пики  $H_2$ , зарегистрированные на Береговой дороге ( $H_2SH$ ) и на Райт роуд ( $H_2WR$ ) между 1 ноября 1981 г. и 1 июля 1982 г. Наблюдались многократные совпадения пиков.

Амплитуда суточных изменений начала увеличиваться (с переходом в несколько складок) в декабре 1981 года и оставалась такой до июня 1982 года. Дюжина групп пиков (некоторые сложные) до 1600 ppm и продолжительностью до 5 дней были зарегистрированы между 20 января 1982 года и 14 апреля 1982 года (рис. 9, верх).

Разлом Калаверас; Райт роуд ( $H_2WR$ ). Дискретный пик  $H_2$  400 ppm и продолжительностью 14 часов совпал с (в пределах дня) 300 ppm пиком на Береговой дороге (рис. 9). Другой пик (270 ppm), зарегистрированный 30 декабря 1981 года, совпал с 250 ppm пиком на Береговой дороге. Все 13 групп пиков (200-300 ppm) были зарегистрированы на Райт роуд между 1 января 1982 года и 4 апреля 1982 г.; 10 из них совпали с пиками, записанными на Береговой дороге (рис. 9). Такие чёткие совпадения простых пиков вдоль разлома Калаверас не наблюдались до тех пор, пока не поставили отдельные усилители в июле 1982 года.

Поскольку пики также совпадали с дождями (W.L. Ellsworth, Геологическая Служба США, личное сообщение, 1986). Эти пики, вероятно, были вызваны дождем, индуцировавшим электрический земной контур.

Разлом Сан Андреас: Сан Хуан Батиста (H2SJ). Пики  $H_2$  после 8 декабря 1983 года отсутствуют, когда ценная информация была в наличии.

Разлом Сан Андреас: Чинегга Винери (H2CW). Два основных пика  $H_2$  ~ 500 ppm были зарегистрированы 1-10 ноября 1982 года и 3 апреля 1983 года и маленький (50 ppm) пик был отмечен 1 ноября 1983 года [Sato et al., 1985] (также см рис. 10, верх).

Разлом Сан Андреас: Ранчо Меленди (H2MR). На этом участке нет событий заслуживающих внимание, поскольку он размещается на слабо уплотненном гребне из гравия и песка (Schulz et al., 1983), где грунт интенсивно изрыт норами грызунов.

Разлом Сан Андреас: Каньон Слак (H2SC). Более дюжины разных пиков  $H_2$  были зарегистрированы между мартом 1982 г. и февралём 1984 г. (рис.10. средний). Суточные изменения в этом месте были слабыми с начала телеметрии (17 июля 1984) до 6 января 1982 г., когда произошло резкое увеличение  $H_2$ . По-видимому, это увеличение было вызвано инструментальным шумом, поскольку начальный сдвиг был прерывистым. Повышенный сигнал датчика уменьшался медленно до базовой линии 25 января. Поскольку представляющая интерес проблема земного контура, который мог давать фальшивый сигнал и высокое нагрузочное сопротивление, что могло быть причиной медленного возврата сигнала датчика к базовой линии, мы заменили первоначальный 47 Ком резистор на 10 Ком резистор и добавили x10 отдельный усилитель, каталитический газоочиститель и воздушный рециркулирующий баблер (кипятильник, пузереобразователь?) 12 марта 1982 г. Пик начался 16 марта 1982 г. и достиг максимума ~ 1 000 ppm 18 марта. Этот пик уменьшился до базовой линии 20 апреля, но определенное увеличение амплитуды суточных колебаний (до  $\pm 50$  ppm) отмечалось после этого события. Внезапное увеличение произошло 6 июня 1982 г. стабилизировалось на 1 100 ppm, по крайней мере до 13 июня, когда телеметрия сломалась (существенно, в 12 км было землетрясение  $M=4.3$  на ЮВ разлома Сан Андреас 25 июня 1982г). До восстановления телеметрии 1 июля 1982 г, уровень  $H_2$  был ближе к базовой линии. Резкое увеличение началось 18 июля 1982 г и продолжалось до 6 декабря 1982 г. В этот период мы смогли идентифицировать восемь дискретных пиков больших амплитуд (самый большой пик ~ 3 800 ppm 27 октября; 2 дня спустя произошло землетрясение  $M = 5.4$  в 31 км на ССВ). После этого периода дюжины меньших пиков (в основном несколько сот ppm) были зарегистрированы до 4 марта 1983 г, когда положительные типы  $H_2$  прекратились и странные отрицательные суточные пики начали проявляться. Появление отрицательного суточного пика стало более частым между 28 апреля и 9 мая 1983 г ( $M = 6.7$ ). Произошло Коалинговое землетрясение в 35 км к востоку под Антиклинальным хребтом 2 мая 1983 г и множество афтершоков произошло между каньоном Слак и эпицентром главного толчка [Eaton et al., 1983]). Сигнал  $H_2$  не сопровождался событиями (чрезвычайно без событийный) после 9 мая до конца августа, когда отрицательные пики стали заметными вновь. Позже мы обнаружили, что воздушный насос не работал, поскольку птицы обгадили пометом панель солнечной батареи и напряжение стало слишком низким, чтобы завести насос. Возможно  $H_2$  просочился во внутрь и остановился внутри датчика и продуцировал негативные суточные сигналы. Станция не работала между 14 ноября 1983 и 17 июлем 1984 г.

Разлом Сан Андреас: Срединная гора (H2MM). Эта станция никогда не работала надлежащим образом дольше, чем несколько месяцев между сентябрем 1982 г и концом 1984 г.

Разлом Сан Андреас: Паркфилд (H2PK). Пики  $H_2$  до 4 000 ppm были зарегистрированы в этом месте между мартом 1982г и февралем 1984 г (рис.10. нижний). Запись до 12 марта 1982 г, когда были поставлены рециркулирующий баблер и отдельный усилитель, не зафиксировала событий и, вероятно, она не достоверная. Нагрузочное сопротивление изменялось до 10 Ком до 22 июля 1982 г. Серии из десяти больших пиков  $H_2$  ( 1 000 – 2 400 ppm; телеметрия отказала между 16 октября и 7 ноября в середине небольшого пика, который начался 15 сентября) были зарегистрированы между 29июля и 3 декабря 1982 г, по существу, синхронно с пиками каньона Слак (рис.10). Другие серии больших пиков начались 18 января 1983 года и продолжались до 16 ноября 1983 г. Самый высокий пик достигал 4 000 ppm 6 марта 1983 г, и второй самый высокий пик 1 900 ppm 3 мая 1983 г, день спустя после Коалинского землетрясения  $M = 6.7$ , происшедший в 36 км к СВ. Третий самый высокий пик, который был широким, достигал 1 700 ppm 8 июля, предшествовал афтершокам Коалинского землетрясения с  $M = 5.3$  (9 июля) и  $M = 6.2$  (22 июля). Эта станция была в нерабочем состоянии между 14 января 1984 г и 18 июня 1984 г, потому что крупный рогатый скот разжевал силовую кабель.

Разлом Сан Андреас: Коул Хилл (H2GH). На этом участке не зарегистрированы какие-либо пики с времени установки приборов до 1984 года.

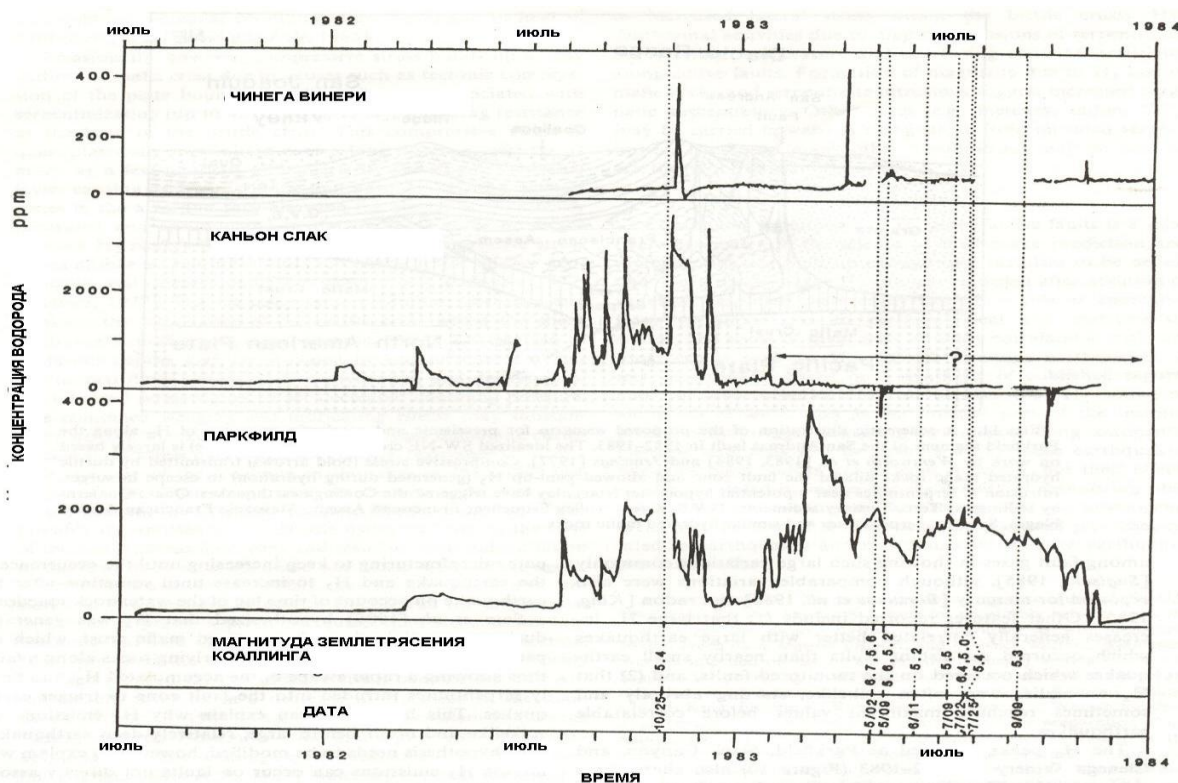


Рис. 10. Различные пики  $H_2$ , зарегистрированные в Чинега Винери (верх), каньон Слак (средний) и Паркфилд (нижний) на разломе Сан Андреас в 1982-1983 гг. Также показаны землетрясения с  $M \geq 5$ , которые произошли вблизи Коалинга (см Рис.1 расположение эпицентров).

### Обсуждение результатов.

Суточные вариации газов в почвах изучались для района [Tanner, 1964,1980; Kraner et al., 1964; Schery et al., 1984; King, 1985], ртути [McCarthy et al., 1970] и для гелия [Reiner, 1980]. Возможными причинами этих вариаций являются частью факторы, связанные с окружающими условиями, такими как дневные флуктуации воздушных и почвенных температур, барометрическое давление, влажность почв и ветер, которые взаимосвязаны и, в конечном счёте, обусловлены вариациями солнечной инсоляции.

Наблюденные характерные черты не измеряемых суточных вариаций  $H_2$  являются такие как: (1) время суточных минимумов и максимумов, являющихся константами (в пределах  $\pm 2$  часов) на каждом участке в течение года, но расчет времени является характеристикой участка (таблица 2). (2) дождливая и облачная погода приводила к уменьшению амплитуды и (3) базовые характеристики сохранялись тогда, когда средняя эмиссия  $H_2$  увеличивалась в значительных количествах.

На первом месте по влиянию из сезонных вариаций и факторов, которые изменяются более или менее синхронно по всему региону, являлись такие как температура воздуха, температура грунта, поверхностная влажность, обусловленная выпадением росы. Фактор 2, также характерный для радона [King, 1985], предполагает возможную связь с солнечной инсоляцией и земной радиацией.

Процесс чувствительный к инсоляции и земной радиации связан с орографическим ветром (или горный и долинный ветры). Орографические ветры изменяют своё направление дважды в день и сильно зависят от местной топографии (рельефа) [Waggy, Chorley, 1970 p. 91]. Нисходящие орографические ветры могут увеличить барометрическое давление у земной поверхности и, таким образом, подавлять дегазацию, тогда как восходящие потоки ветров могут уменьшить барометрическое давление и, следовательно, стимулировать дегазацию. Участок в долине может показывать полностью отличные фазовые синхронизации от фазовой синхронизации на рядом расположенном участке на хребте. Однако, мы не смогли найти документального подтверждения суточных барометрических вариаций. Записанных одновременно в двух или более топографических различных участках в пределах небольшого региона. До тех пор пока такие данные не получены, эта гипотеза остается условной.

### Циклические изменения $H_2$ , сопровождающие «пульсирующие сдвиги».

Совпадение циклических изменений  $H_2$ , записанные после дополнения отдельных усилителей, связанные с дождём «пульсирующие сдвиги» на Береговой дороге (рис. 7) могут дать ключ к определению,



как дегазация  $H_2$  связана с земными движениями. Мы интерпретируем «пульсирующие сдвиги», как открытые-и-закрытые движения (расширительное изгибание) зоны разлома, поскольку изменение ползучести не может отличать такие земные подвижки от правильного пульсирующего смещения с равномерными смещениями в обоих направлениях. Открывающее движение может происходить быстрее, поскольку пустота может заполняться воздухом и другими флюидами быстро, тогда как закрытие может происходить медленнее в результате амортизации подземных вод, которые просачивались в зазоры во время фазы открытия. Поскольку расширительное изгибание и однонаправленное латеральное смещение являются разнонаправленными подвижками, и они не зависимы друг от друга. Вероятно, дождевая вода «смазывает» грунт.

Совпадение периодических изменений  $H_2$  и более крупных пульсирующих смещений можно объяснить следующим образом. Когда зона разлома значительно открылась на глубину, где восходящий  $H_2$  аккумулирован,  $H_2$  быстро поднимается к поверхности вследствие его высокой плавучести. Как только зона разлома начинала закрываться, то лишь газы лишенные  $H_2$  выжимались и концентрация  $H_2$  уменьшалась ниже базовой линии. Постепенно просачивание  $H_2$  приобретало стационарную скорость, которая существовала до события, и концентрация  $H_2$  постепенно увеличивалась до базового уровня. Стационарная скорость просачивания  $H_2$  оставалась неизменной во время меньших пульсационных смещений, когда открытие зоны разлома не достигало глубины аккумуляции  $H_2$ . Преимущественно отрицательные изменения  $H_2$ , наблюдавшиеся на Береговой дороге в конце 1982 года и начале 1983 года (рис. 8), могли быть обусловлены беспорядочностью процесса открытия зоны разлома под этим участком, приводящей к всасыванию воздуха в грунт без увеличения скорости притока  $H_2$  из недр.

Данные, свидетельствующие о том, что многие события, связанные с вариациями  $H_2$ , происходившие одновременно на Береговой дороге и Райт роуд, на 8.6 км участке, позволяют предполагать, что подвижки грунтов, вероятно, вовлекали блоки пород, измеряемые, по меньшей мере, несколькими километрами. Пульсирующие смещения, редко регистрировавшиеся на Райт роуд, несмотря на совпадение вариаций  $H_2$ , могли быть следствием глубинных процессов, происходивших в источнике  $H_2$  и в результате расширительных изгибов, которые маскировались субповерхностной тектоникой и литологическими свойствами этих участков.

Восходящий поток  $H_2$  может на порядки величин больше, чем молекулярная диффузия в пористой среде ((дециметры в день) [Curtie, 1960a,b, 1961]).

### ***Отчетливые пики.***

Оказалось, что изменения потока  $H_2$  на порядки величин выше проявляются в зонах разломов с минеральными источниками и гидротермами в таких тектонических активных районах как Китай [Jiang, Li, 1981; Li et al., 1985] и в Японии [Sugisaki et al., 1983; Satane et al., 1985; Sugisaki, Sugiura, 1985]. Водород, по-видимому, является уникальным среди «разломных» газов, обычно показывая большие вариации в концентрациях потоков [Sugisaki, 1985], хотя относительные вариации также известны для ртути [Barsukov et al., 1983] и радона [King, 1985]. Другие факторы из известных включают: (1) что большие увеличения  $H_2$  обычно коррелируются лучше с большими землетрясениями, которые происходили на отдельных разломах, а не с ближайшими мелкими землетрясениями, которые происходили на разломах, подвергавшихся мониторингу и (2) что аномалии  $H_2$  были часто подобные пики, резко начинаясь и иногда достигая максимальных значений перед прогнозируемым (коррелируемым) землетрясением.

Пики  $H_2$ , зарегистрированные в Паркфилд, каньоне Слак и Чиенга Винери в 1982-83 гг (рис.10) также имели такие же характерные признаки. Они увеличивались до 10 раз по сравнению с базовым уровнем, коррелировались лучше с более сильными землетрясениями ( $M= 5.0 - 6.7$ ), которые происходили под районом Коалинградской антиклинали в  $\sim 35$  км от разлома Сан Андреас, а не с меньшими, рядом происходящими землетрясениями, которые происходили вдоль разлома Сан Андреас и самый большой пик (Паркфилд) зарегистрирован за месяц до главного толчка 2 мая 1983 года.

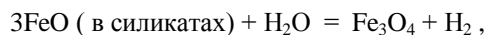
Было предложено три гипотезы, объясняющие связь эмиссии  $H_2$  с землетрясениями. Две из них приписывают генерацию  $H_2$  изменениям пород под влиянием интенсивных напряжений (в хрупкой коре) перед землетрясениями. Вероятность того, что породоы могут выделять оклюдированные газы, включая  $H_2$ , когда они напряжены вплоть до разрыва, были экспериментально продемонстрированы Giardini et al. (1976) и эти данные применили Li et. al. (1985) для объяснения своих наблюдений, проведенных около Пекина в Китае. Однако, эти гипотезы потерпели неудачу при объяснении значительного возрастания  $H_2$  по сравнению с другими оклюдированными газами ( $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ), которые выделялись в сопоставимых количествах в лаборатории [Giardini et al., 1976].

Kita et al. [1982] предполагали, что  $H_2$  может генерироваться в результате взаимодействия воды с радикалами  $Si\bullet$  и  $Si - O\bullet$ , которые, вероятно, существуют на недавно раздробленных поверхностях силикатов, образованных при подвижках по разломам. Эта гипотеза может объяснить, почему лишь  $H_2$  увеличивается на порядки величин, но она потерпела неудачу при объяснении наблюдаемых данных, которые свидетельствовали об уменьшении потока  $H_2$  перед последующими землетрясениями [т.н. Satake et al., 1985; Sato et al., 1985]. Гипотеза должна предусматривать микродробление необходимое для поддержания режима увеличения потока  $H_2$  до того как распространится землетрясение и, чтобы произошло

увеличение потока  $H_2$ , а иногда после землетрясения вследствие временного лага при взаимодействии вода-порода.

Sato et al. [1985] предполагали, что  $H_2$  генерировался во время серпентинизации глубокой мафической коры. Последняя распространялась в результате образования трещин напряжения в выше лежащих породах по разломам, таким образом, приводя к быстрому выделению накопленного  $H_2$ , и в конце концов серпентиниты, внедрившись по зоне разлома, провоцировали землетрясения. Эта гипотеза может объяснить, почему эмиссия  $H_2$  пикоподобная и происходит перед большими, относительно глубокими, землетрясениями. Однако эту гипотезу необходимо модифицировать, чтобы объяснить, почему интенсивные эмиссии  $H_2$  могли происходить на разломах непосредственно не связанных с землетрясениями.

Мы предположили следующий сценарий для до сейсмической эмиссии  $H_2$  вдоль активных разломов в центральной Калифорнии на основании многих публикаций и наших собственных наблюдений. Метеорные воды проникают в недра [O'Nei, Hanks, 1980; Wenner, Taylor, 1973, 1974] по трещинам в хрупкую верхнюю кору, достигают кровли подстилающей мафической коры [Stewart, 1968; Schulz et al., 1969; Walter, Mooney, 1982; Wentworth et al., 1983, 1984; Blümling et al., 1984; Mooney, Colburn, 1985] при РТ условиях [Turcott et al., 1980], соответствующим условиям зеленосланцевых фаций. Это взаимодействие с мафическими силикатами (такими как оливин и пироксен) и продуцируют  $H_2$  и магнетит:



а также некоторое количество гидратированных силикатов. Гидратированные породы, особенно серпентиниты, имеют низкие сдвиговые напряжения [Cowan, Mansfield, 1970] и способствуют подвижкам типа трансформных разрывов, характерных для тектонических плит [Allen, 1968; Francis, 1981]. Смазывающая природа гидратированного слоя обычно способствует отделению верхней коры от нижней коры и мантии, создавая широкие полосы умеренно повышенного теплового потока вдоль системы разломов Сан Андреас [Lachenbruch, Sass, 1980] вследствие горизонтального распределения теплоты трения (А.Н. Lachenbruch лич.сообщение. 1985) и теплоты гидратации [MacDonald, Fyfe, 1985].

Однако, эпизодически напряжения сжатия возникают локально в мафической коре вследствие таких причин, как тектоническое сжатие на границах плит, увеличение объёма, вызванного серпентинизацией (до 45% [Hess, 1955]) и сопротивление волочению у основания хрупкой коры. Это напряжение сжатия квазипластично передается на большие расстояния (возможно на первые сотни километров) эластичным гидратированным слоем, вызывая асейсмичное деформирование и эпизодическое расширение зон разломов в районе и, таким образом, способствуя миграции  $H_2$  уже генерированного и накопившегося в гидратированном слое, в виде пульсаций (различные пики  $H_2$ ). Дальнейшее увеличение сил напряжения сжатия продвигает серпентиниты в зоны разлома способами хорошо известными в геологии [Taliaferro, 1943; Coleman, 1977; Jennings, 1977]. Внедрение серпентинитов смазывает и ослабляет базальную зону хрупкой коры, где сопротивление сдвигу, по-видимому. Наибольшее [Sibson, 1982]. Смазка на меньшей глубине может быть обусловлена дегидратацией и дегазацией внедрившихся серпентинитов при уменьшенном приграничном давлении. Комбинированные эффекты расклинивания и смазывания могут существенно ослабить зону разломов и, таким образом, провоцировать разрушительные землетрясения, если напряжение превысит остаточное сопротивление.

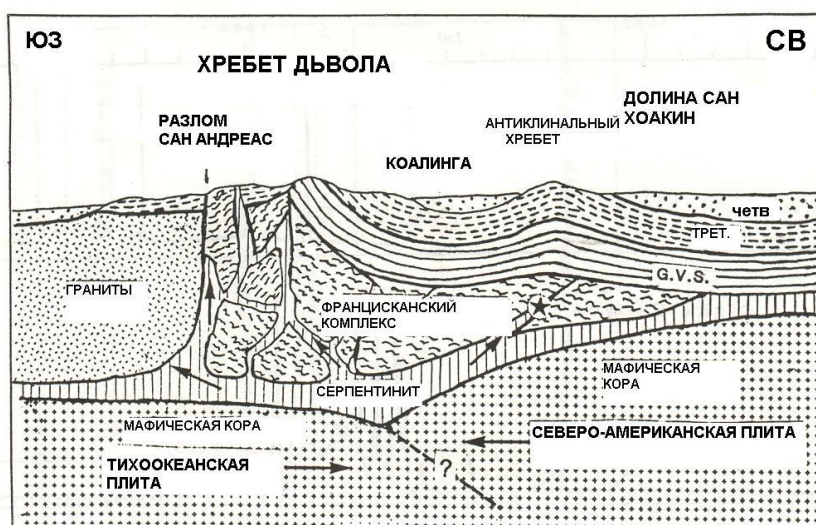


Рис. 11 Схематическая иллюстрация предполагаемого сценария до сейсмической и пост сейсмической эмиссий  $H_2$  вдоль сегмента Паркфилд разлома Сан Андреас в 1982-83гг. Идеализированный разрез ЮЗ – СВ (без масштаба), в основном сделанный по работе Wentworth et al.[1983, 1984] и Jennings [1977]. Напряжение сжатия (наклонные стрелки) передается пластичным гидратированным мафическим породам, расширившим зону разлома и способствующим подъёму  $H_2$  (генерированному во время гидратации). Внедрение серпентинитов вблизи потенциального гипоцентра (звездочка) могла спровоцировать Коалингские землетрясения. G.V.S. – толща Грит Велли.

В случае Коалингских землетрясений в 1982-83 гг (см. рис.11 для иллюстрации) всестороннее напряжение, которое возникло под Коалингского антиклиналью [Eaton et al., 1983], возможно передалось по эластичному гидратированному горизонту к основанию разломной зоны Сан Андреас и привело к эпизодическому расширению зоны разлома около Паркфилд и каньона Слак (в соответствии Mavko et al., [1985] здесь было напряженное состояние сжатия) и произошло выделение  $H_2$  через хрупкую кору, что проявилось в серии пиков. Предполагаемое сжатие серпентинитов в районе антиклинали (R.G.Coleman, лич. Сообщение 1984) подготовило район к землетрясениям, которые привели к ослаблению и уменьшению всестороннего давления под разломом Сан Андреас, сопровождавшееся уменьшением  $H_2$  перед главным толчком 2 мая 1982 года. Так же пики, зарегистрированные в Чиенеге Винери в начале ноября 1982 г и в апреле 1983 г были, вероятно, связаны с Коалингскими землетрясениями; косейсмичные изменения базовой линии [Sato et al., 1985] показали, что этот удаленный участок (110км) находился в пределах влияния поля напряжений, связанного с землетрясениями. Отсутствие положительных пиков  $H_2$  в каньоне Слак после февраля 1983 г, по-видимому, было вызвано инструментальными нарушениями, обсуждавшимися ранее, поскольку отрицательные суточные пульсации, зарегистрированные после этого времени трудно объяснить иначе.

Пики записанные одновременно на Береговой дороге и Райт роуд между ноябрём 1981 г и апрелем 1982 г, вероятно, были случайными явлениями, обусловленными электрическим земным контуром. Как уже рассматривалось выше. Землетрясение Морган Хилл,  $M = 6.1$  24 апреля 1984 г произошло в  $\sim 50$  км к ССЗ от Береговой дороги или на разломе Калаверас. К сожалению все наши  $H_2$  мониторинговые станции не работали между январем 1984 и июлем 1984 гг, вынудив нас не учитывать возможные изменения  $H_2$ , связанные с этим землетрясением.

Предлагаемые гипотезы, связывающие аномальные  $H_2$  события с динамикой разломов, подразумевают ряд сопутствующих действий, относящихся к мониторингу других геофизических и гидрогеологических параметров. Это относится к первичной роли воды, способствующей плитовой тектонике и, связанных с этим процессом, землетрясений (в соответствии с наблюдаемым отсутствием поверхностных проявлений плитовой тектоники на безводной Венере [Fimmel et al., 1983]). Это позволяет предполагать деформирование и изменение наклона земной поверхности вдоль активных разломов вблизи потенциального эпицентра при уменьшении или развитии нормальных напряжений (характерные черты до сих пор интерпретируемые, как растяжение пород вследствие возросших латеральных напряжений в хрупкой коре). Гидротермальная активизация вследствие диапировых внедрений серпентинитов подразумевает повышение температуры и уменьшение электрического сопротивления вдоль активных разломов. Образование магнетита, вследствие потери  $H_2$  в мафических породах и и внедрения серпентинитов, позволяют предполагать увеличенную магнитную восприимчивость. Другие газы (т.н. ртуть, радон,  $CO_2$ ) могут подниматься в верх в восходящем паре от внедряющих серпентинитов. Эти и многие другие, сопутствующие, процессы, могут использоваться для проверки гипотезы.

### Закключение.

Непрерывный мониторинг  $H_2$  вдоль активных разломов является относительно новым подходом в науке прогноза землетрясений, следовательно, не имеет достаточно длительной истории, чтобы ожидать надежных результатов. Тем не менее, большие изменения потока  $H_2$ , зарегистрированные после дополнения отдельных усилителей, легко определяются в виде аномальных значений, отличающихся от вариаций, вызванных метеорологическими и инструментальными причинами и некоторые из них хорошо коррелировались с тектоническими событиями такими как Коалингское землетрясение с  $M = 5.0 - 6.7$ . Тектонический сценарий, основанный на синтезе опубликованных данных и наших наблюдениях, могут объяснить, что эмиссия  $H_2$  вдоль активных разломов может быть интегральной частью тектонических процессов, которые спровоцировали разрушительное землетрясение вдоль границ континентов и, таким образом, могут быть прогнозным признаком этих землетрясений. Факторы, определяемые в качестве контролируемых строением участка, трудно избежать, но их влияние может быть смягчено увеличением плотности сети наблюдений. Мы предполагаем, что непрерывный мониторинг  $H_2$  в сейсмоактивном районе может быть полезным при диагностике глубинных коровых процессов, связанных с землетрясениями и могут содействовать прогнозу последних.

### Литература

- Allen, C. R., The tectonic environments of seismically active and inactive areas along the San Andreas fault systems, Proceedings of Conference on Geological Problems of San Andreas Fault Systems, *Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.*, 11, 70-82, 1968.
- Barry, R. G., and R. J. Chorley, *Atmosphere, Weather, and Climate*, 320 pp., Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1970.
- Barsukov, V. L., V. S. Serebrennikov, A. A. Belyaev, Yu. A. Bakaldin, and R. V. Arsenyeva, Some experience in unraveling geochemical earthquake precursors, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 157-163, 1985.
- Blumling, P., W. D. Mooney, and W. H. K. Lee, Crustal structure of the southern Calaveras fault zone, central California, from seismic refraction investigations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 193-209, 1984.
- Coleman, R. G., *Ophiolites—Ancient Oceanic Lithosphere*, 229 pp., Springer-Verlag, New York, 1977.
- Cowan, D. S., and C. F. Mansfield, Serpentine flows in Joaquin Ridge, Southern Coastal Ranges, California, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 2615-2628, 1970.
- Currie, J. A., Gaseous diffusion in porous media, part 1, A non-steady state method, *Br. J. Appl. Phys.*, 11, 314-317, 1960a.

- Currie, J. A., Gaseous diffusion in porous media, part 2, Dry granular materials, *Br. J. Appl. Phys.*, 11, 318-324, 1960&.
- Currie, J. A., 1961, Gaseous diffusion in porous media, part 3, Wet granular materials, *Br. J. Appl. Phys.*, 12, 275-281, 1961.
- Eaton, J. P., R. Cockerham, and F. Lester, Study of the May 2, 1983 Coalinga earthquake and its aftershocks, based on the USGS seismic network in northern California, *Spec. Publ. 66*, Calif. Div. of Mines and Geol., Sacramento, 1983.
- Fickett, A. P., and F. R. Kalhammer, Water electrolysis, in *Hydrogen: Its Technology and Implications*, vol. 1, *Hydrogen Production Technology*, edited by K. E. Cox and K. D. Williamson, pp. 4-41, CRC Press, Cleveland, Ohio, 1977.
- Fimmel, R. O., L. Colin, and E. Burgess, Pioneer Venus, *NASA Spec. Publ.*, SP-461, 252 pp., 1983.
- Francis, T. J. B., Serpentinization faults and their role in the tectonics of slow spreading ridges, *J. Geophys. Res.*, 86, 11,616-11,622, 1981.
- Geiger, R., *The Climate Near the Ground*, 611 pp., Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1965.
- Giardini, A. A., G. V. Subbarayudu, and C. E. Melton, the emission of occluded gas from rocks as a function of stress: Its possible use as a tool for predicting earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 3, 355-358, 1976.
- Hess, H. H., Serpentine, orogeny, and epeirogeny, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 62, 391-407, 1955.
- Jennings, C. W., Geologic map of California, Santa Cruz and San Luis Obispo sheets, Calif. Div. of Mines and Geol., San Francisco, 1977.
- Jiang, F., and G. Li, The application of geochemical methods in earthquake prediction in China, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 469-472, 1981.
- King, C.-Y., Impulsive radon emanation on a creeping segment of the San Andreas fault, California, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 347-349, 1985.
- Kita, T., S. Matsuo, and H. Wakita, H<sub>2</sub> generation by reaction between H<sub>2</sub>O and crushed rocks: An experimental study in H<sub>2</sub> degassing from the active fault zone, *J. Geophys. Res.*, 87, 10,789-10,795, 1982.
- Kraner, H. W., G. L. Schreder, and R. D. Evans, Measurements of the effects of atmospheric variations in radon-222 flux and soil-gas concentrations, in *The Natural Radiation Environment*, edited by J. A. S. Adams and W. M. Lowder, pp. 191-215, University of Chicago, Chicago, 111., 1964.
- Lachenbruch, A. H., and J. H. Sass, Heat flow and energetics of the San Andreas fault zone, *J. Geophys. Res.*, 85, 6185-6222, 1980.
- Li, G., F. Jiang, J. Weng, and P. Zhang, Preliminary results of seismo-geochemical research in China, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 218-230, 1985.
- MacDonald, A. H., and W. F. Fyfe, Rate of serpentinization in sea-floor environments, *Tectonophysics*, 116, 123-135, 1985.
- Mavko, G. M., S. Schulz, and B. D. Brown, Effects of the 1983 Coalinga, California, earthquake on creep along the San Andreas fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 475-489, 1985.
- McCarthy, J. H., J. L. Menschke, and W. H. Ficklin, Mercury in the atmosphere, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 713, 37-39, 1970.
- Mooney, W. D., and R. H. Colburn, A seismic-refraction profile across the San Andreas, Sargent, and Calaveras faults, west-central California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 175-191, 1985.
- Niedrach, L. W., and W. T. Grubb, Ion exchange membrane fuel cells, in *Fuel Cells*, edited by W. Mitchell, pp. 253-298, Academic, Orlando, Fla., 1963.
- O'Neil, J. R., and T. C. Hanks, Geochemical evidence for water-rock interaction along the San Andreas and Garlock faults in California, *J. Geophys. Res.*, 85, 6286-6292, 1980.
- Reimer, G. M., Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction: Limitations imposed by diurnal variation, *J. Geophys. Res.*, 85, 3107-3114, 1980.
- Satake, H., M. Ohashi, and Y. Hayashi, Discharge of H<sub>2</sub> from the Atotsugawa and Ushikubi faults, Japan, and its relation to earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 185-193, 1985.
- Sato, M., and K. A. McGee, Continuous monitoring of hydrogen on the south flank of Mount St. Helens, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 1250, 209-219, 1981.
- Sato, M., S. D. Malone, R. M. Moxham, and J. E. McLane, Monitoring of fumarolic gas at Sherman Crater, Mount Baker, Washington, *Eos Trans. AGU*, 57, 88-89, 1976.
- Sato, M., A. J. Sutton, and K. A. McGee, Anomalous hydrogen emissions from the San Andreas fault observed at the Cienega Winery, central California, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 376-391, 1985.
- Schery, S. D., D. H. Gaedert, and M. H. Wilkening, Factors affecting exhalation of radon from a gravelly sandy loam, *J. Geophys. Res.*, 89, 7299-7309, 1984.
- Scholz, C. H., M. Wyss, and S. W. Smith, Seismic and aseismic slip in the San Andreas fault, *J. Geophys. Res.*, 74, 2049-2069, 1969.
- Schulz, S., R. O. Burford, and B. Mavko, Influence of seismicity and rainfall on episodic creep on the San Andreas fault system in central California, *J. Geophys. Res.*, 88, 7475-7484, 1983.
- Shapiro, M. H., J. D. Melvin, and T. A. Tombrello, Automated radon monitoring at a hard-rock site in the southern California transverse ranges, *J. Geophys. Res.*, 85, 3058-3064, 1980.
- Sibson, R. H., Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 151-163, 1982.
- Stewart, S. W., Preliminary comparison of seismic travel times and inferred crustal structure adjacent to the San Andreas fault in the Diablo and Gabilan Ranges of central California, *Proceedings of Conference on Geological Problems of San Andreas Fault System*, edited by W. R. Dickinson and A. Grantz, *Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.*, 11, 218-230, 1968.
- Sugisaki, R., Relation between hydrogen emission and seismic activities, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 175-184, 1985.
- Sugisaki, R., and T. Sugiura, Geochemical indicator of tectonic stress resulting in an earthquake in central Japan, 1984, *Science*, 229, 1261-1262, 1985.
- Sugisaki, R., H. Anno, M. Adachi, and T. Ui, Geochemical features of gases and rocks along active faults, *Geochem. J.*, 14, 101-112, 1980.
- Sugisaki, R., M. Ido, H. Takeda, Y. Isobe, Y. Hayashi, N. Nakamura, H. Satake, and Y. Mizutani, Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity, *J. Geol.*, 91, 239-258, 1983.
- Taliaferro, N. L., Franciscan Knoxville problem, *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, 27, 109-212, 1943.
- Tanner, A. B., Radon migration in the ground: A review, in *The Natural Radiation Environment*, edited by J. A. S. Adams and W. M. Lowder, pp. 161-190, University of Chicago Press, Chicago, 111., 1964.
- Tanner, A. B., Radon migration in the ground: A supplementary review, *Natural Radiation Environment III Symposium Proceedings*, edited by T. F. Gesell and W. M. Lowder, vol. 1, *Rep. CONF-780422*, pp. 5-56, U.S. Dep. of Energy, Houston, Tex., 1980.

- Turcott, D. L., P. H. Tag, and R. F. Cooper, A steady state model for the distribution of stress and temperature in the San Andreas fault, *J. Geophys. Res.*, 85, 6223-6230, 1980.
- Vielstich, W., *Fuel Cells*, translated by D. J. G. Ives, 501 pp., Wiley-Interscience, New York, 1970.
- Wakita, H., Y. Nakamura, J. Kita, N. Fujii, and K. Notsu, Hydrogen release: New indication of fault activity, *Science*, 210, 188-190, 1980.
- Walter, A. W. and W. D. Mooney, Crustal structure of the Diablo and Gabilan ranges, central California: A reinterpretation of existing data, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 72, 1567-1590, 1982.
- Ware, R. H., C. Roeken, and M. Wyss, The detection and interpretation of hydrogen in fault gases, *Pure Appl. Geophys.*, 122, 392-402, 1985.
- Wenner, D. B., and H. P. Taylor, Jr., Oxygen and hydrogen isotopic studies of serpentinization of ultramafic rocks in oceanic environments and continental ophiolite complexes, *Am. J. Sci.*, 273, 207-239, 1973.
- Wenner, D. B. and H. P. Taylor, Jr., D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  studies of serpentinization of ultramafic rocks, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38, 1255-1286, 1974.
- Wentworth, C. M., A. W. Walter, J. A. Bartow, and M. D. Zoback, Evidence on the tectonic setting of the 1983 Coalinga earthquake from deep reflection and refraction profiles across the southern end of Kettleman Hills, *Spec. Publ. 66*, pp. 113-126, Calif. Div. of Mines and Geol., Sacramento, 1983.
- Wentworth, C. M., M. C. Blake, Jr., D. L. Jones, A. W. Walter, and M. D. Zoback, Tectonic wedging associated with emplacement of the Franciscan assemblage, California Coast Ranges, in *Franciscan Geology of Northern California*, edited by M. C. Blake, Jr., vol. 43, pp. 163-173, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, Bakersfield, Calif., 1984.