

## особая тема

## Инженерная геология и геоэкология

## Усиление геохимических изображений: улучшение представлений для оптимизации результатов измерений

## Amplified geochemical imaging: an enhanced view to optimize outcomes

Гарри С. Андерсон(Harry S. Anderson)\* из W. L. Gore & Associates описывает преимущества усиления геохимических изображений в различных ситуациях, включая геоэкологические нефтяные и газовые исследования.

Перед тем, как хирурги начинают сложную операцию, они используют современные методы получения изображений, чтобы получить улучшенное представление о человеческом теле. Вне всякого сомнения, точность и детальность КТ(САТ) или МРТ(MRI) снимка повышает их шанс на успех операции. При таком ценному ресурсе (человеческой жизни), кто же не будет использовать наилучшую технологию? Так же и современные ученые-геологи применяют сложные инструменты, для получения изображений, предоставляющие им улучшенное представление, необходимое для сосредоточения их усилий, сохранения времени и денег и приносящие большие запасов и прибыли. 3D-сейсмическое получение изображений – первый инструмент, о котором мы чаще всего думаем для применения в нефтяных исследованиях, однако последние достижения дали возможность использовать дополнительную методику: усиление геохимических изображений (метод УГИ). Этот передовой геологический инструмент применяется в различных приложениях, таких как оценка запасов месторождения и управление трубопроводом, а также при разведке месторождений нефти и руд.

Начиная с 1930, геологи применяли поверхностные геохимические методы для исследования углеводородов. Этими методами исследовали поведение мельчайших слоев углеводородов, мигрирующих через неплотную оболочку, покрывающую любой резервуар, миграция происходила либо как макроутечка через разломы, либо как микропросачивание – вертикально через верхнюю крышку резервуара. (Klusman, 1993, Coleman et al., 1977)

Некоторые из этих ранних методов были грубыми и включали почвенный анализ, почвенный газовый анализ, йодное картирование и подсчет количества микроорганизмов. К сожалению, результаты исследований, использующих эти ранние геохимические методы, часто были разочаровывающими.

\*[handerso@wlgore.com](mailto:handerso@wlgore.com)

*GORE модуль.*

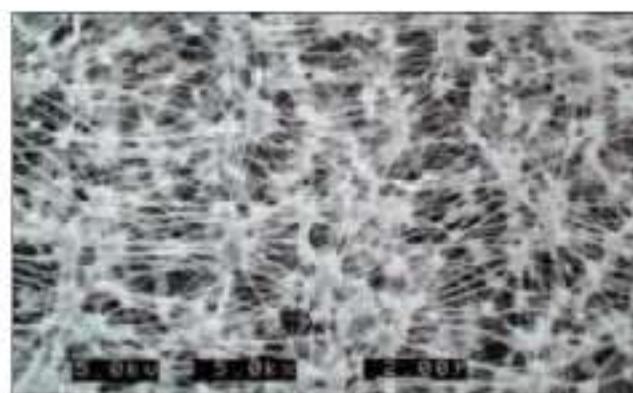
Это является прямым результатом нескольких фундаментальных факторов:

- Невозможности выборочного метода справиться с неоднородными характеристиками почвы, включая проницаемость, влажность и органические составляющие
- Ошибки в сложных средах из-за методов отбора (Hewitt and Lukash, 1996)
- Отслеживание косвенных эффектов (таких как содержание йода и микроорганизмов), а не прямых эффектов
- Низкая чувствительность (ppm, а не ppb или ppt)
- Очень ограниченный набор составов, не представительных для целевых объектов (только C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>)
- Не использование статистических методов для четкого различия шума от сигнала

Современные поверхностные геохимические методы, разработанные Рональдом В. Клусманом (Ronald W. Klusman, Colorado School of Mines) (1993) и В.Л. Горе и партнерами(W. L. Gore & Associates) с их методом GORE Survey, преодолели эти ограничения, создав надежный, чувствительный инструмент для точного получения изображений погребенных углеводородов и месторождений руд, образованных как в результате природных процессов, так и при техногенных загрязнениях.

Чтобы разобраться с многочисленными локальными и региональными вариациями в характеристиках почв, таких как водонасыщенность, а также чтобы повысить чувствительность был разработан новый метод пассивной адсорбции при отборе проб. Эта методика, названная «GORE модуль», использует специально разработанный гидрофобный адсорбент, заключенный в микропоры, расширенные политетрафлюороэтиленом (polytetrafluoroethylene)

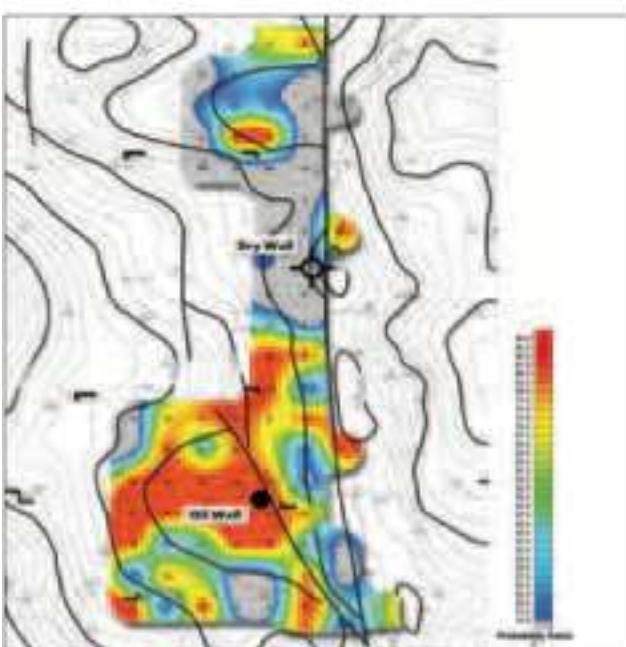
*Микрофотография ePTFE мембранны со специально сконструированными порами*



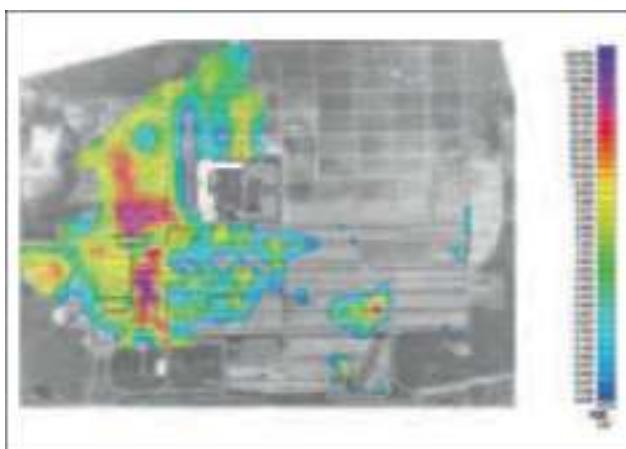
## Инженерная геология и геоэкология



Установка модуля в почву.



Типичная карта месторождения с результатами съемки, цветом обозначено распределение вероятности углеводородного состава территории.



Карта тетрахлорэтинового (TCE) загрязнения LaPlant, 2002.

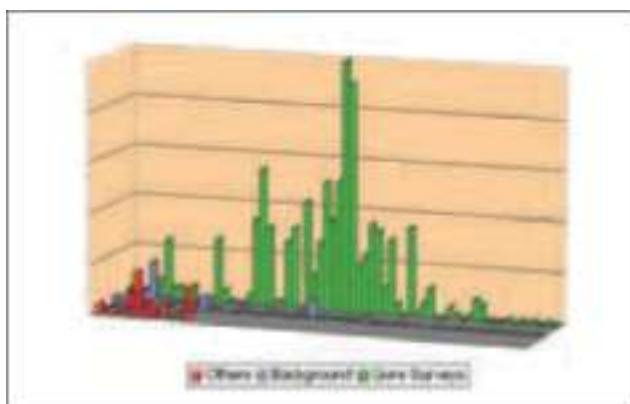
-(ePTFE) мембрану. Центральный стержень под названием GORE-TEX – имеет поры достаточно мелкие, чтобы избежать проникновения частиц почвы и воды, но примерно в 1000 раз крупнее целевых молекул. Таким образом, целевые молекулы беспрепятственно попадают в адсорбент. Это позволяет погружать модуль в сухие или влагонасыщенные почвы или даже воду на глубину около 10 метров. Чтобы исключить попадание посторонних примесей, эти модули производятся в стерильных лабораториях, кроме того, они содержат добавочный сорбент для устранения сложностей, возникающих при анализе. Модули обладают водопоглощением 3-4 литра/час на открытом воздухе и при зондировании в почве в течение недель или месяцев собирают интегральный химический сигнал. Это увеличивает массу пробы на 2-3 порядка по сравнению с обычной пробой, а также позволяет сгладить временные вариации, вызываемые атмосферным давлением, осадками и перепадами температуры.

Используя чувствительные современными методами анализа, включающими термодесорбцию, газовую хроматографию и масс-спектроскопию, можно выделить нанограммные ( $10E^{-9}$  грамм) уровни компонентов при концентрации порядка 1 ppt. Такая высокая чувствительность позволяет выделять компоненты в любом типе почвы, включая насыщенные глины и пески, скементированные породы и даже через тысячи футов эвапоритов или вулканических пород. В соответствии с задачей, можно измерить свыше 150 летучих компонентов. В их числе летучие газы типа этана, легкоиспаримые жидкости типа бензина, а также слабоиспаримые жидкости и твердые типа пирена, TNT, серы, поскольку для них давление насыщенного пара порядка  $2E^{-6}$  мм.рт.ст. В условиях высокой влажности предполагается, что константы закона Генри превышали  $10E^{-7}$  atm/cu\*m/Моль. Отдельные компоненты, представляющие интерес в геоэкологических исследованиях, такие как пентахлорфенол, 135TNB, VX, RDX, выходят за данные ограничения. Молекулы меньше, чем молекулы этана практически не задерживаются адсорбентом, тем не менее, природный газ с содержанием метана более 99% может быть откартирован по содержанию высокомолекулярных алканов, сопутствующих этому газу.

Установка зонда дешева и проста с использованием простых ручных инструментов в почвах или ручных буров в твердых или многолетнемерзлых породах. Модуль с прикрепленным шнуром для извлечения опускается в скважину диаметром 15 мм и глубиной 60-100 см. Затем скважина затыкается пробкой или просто заваливается породой для изоляции от атмосферы. Время экспозиции зависит от задачи и может варьироваться от 15 минут для воды до 2 месяцев над погребенными месторождениями железных руд. Обычное время экспозиции для почв составляет 10-17 дней.

Окончательное техническое усовершенствование, необходимое для метода УГИ – это интерпретация данных с использованием многомерных статистических методов. После устранения компонентов не проходящих порог сигнал/шум, применяются такие статистические методы, как анализ главных компонент (АГК), дискриминантный анализ (ДА) и иерархический кластерный анализ (ИКА). В результате преобразований выделяется интересующий характерный химический признак и модельные признаки, используемые для интерпретации. По данным интерпретации строятся карты с использованием стандартных программ для построения карт, и результаты представляются заказчику в требуемом формате.

## Инженерная геология и геоэкология



**Диаграмма распределения фоновых и нефтесодержащих образцов.**

По сравнению с традиционными геохимическими технологиями, метод УГИ имеет такие достоинства как усовершенствованный способ отбора проб, высокую чувствительность, надежный набор параметров и многомерную статистическую интерпретацию. Эта технология доказала свои высокие качества в течение более 10 лет при решении задач, таких как: картирование загрязнений, определение протечек трубопроводов, разведка нефтяных и рудных месторождений.

### Оценка экологических загрязнений

Наиболее сложной частью в программе исследования любого экологического загрязнения для оценки характера и путей устранения последствий загрязнения почв или подземных вод является получение точного размера участка и контура загрязнения. Поскольку многие загрязненные территории эксплуатировались несколькими предприятиями в течение ряда лет, часто существуют неизвестные источники, затрудняющие мониторинг и восстановление территории. В одном случае применение метода УГИ позволило обнаружить неизвестный трихлорэтиленовый (TCE) сепаратор на военной территории, что позволило сократить время восстановительных работ методом выпаривания почвы на десятки лет и сократило стоимость на несколько миллионов долларов. (LaPlant, 2002). Этот метод успешно применялся на территории предприятий, в аэропортах,

на газовых станциях, химических предприятиях, мусорных свалках, трубопроводах и терминалах и газоперерабатывающих заводах.

Метод УГИ с использованием пассивного газового исследования почв позволяет не только аккуратно картировать интенсивность загрязнения, но также проявляет индикаторы естественного ослабления загрязнения, указывая тем самым более дешевые методы рекультивации. Это надежное картирование указывает на места отбора проб и воды, места расположения скважин для мониторинга, планировку и проект мест для восстановительного нагнетания химикатов, и мониторинга и верификации очистки участка. Во всех случаях применение этой методики для получения улучшенного представления сохраняет средства во всей программе работ. Группа аналитических технологий, включающая термодесорбцию, газовую хроматографию и масс-спектроскопию производит количественные измерения наиболее легкоиспаримых реагентов, включая хлорсорбящие растворители, различные вид топлив, полиарomaticкие углеводороды, пестициды, растворимые в воде компоненты, взрывчатые вещества и продукты их химического распада, и даже ртуть. Другое применение метода геохимического улучшения изображений – документирование состояния территории при передаче собственности для уменьшения будущей ответственности продавца за очистку и уменьшения ее стоимости.

В последнее время, скорость отбора проб компонент модулями GORE позволяет отбирать пробы одновременно в воде и в воздухе, что дает возможность прямого измерения концентрации. Это позволяет их использование в таких задачах, как длительный мониторинг и определение появления испарений и оценка риска для человеческой жизни. Типичные пределы обнаружения в воздухе порядка 1 ppb, но при необходимости могут быть расширены до 1 ppt. Так как чувствительность предполагает возможные приложения по мониторингу охраняемых скважин и качеству питьевой воды.

При погружении в воду, уникальная гидрофобная ePTFE мембрана этого пробоотборника позволяет проникать летучим компонентам, растворенным в воде из воды в воздух, содержащийся внутри по закону Генри, и захватываться гидрофобным адсорбентом. Это существенно в экспресс-задачах *in-situ* с пропусканием и захватом целевых компонентов без полного комплекса лабораторных исследований. Этот процесс настолько быстр, что позволяет при экспозиции в воде в течение нескольких минут для большинства приложений (до нескольких часов при малых концентрациях) измерять концентрации большого количества компонент, включая испаряемые и полуиспаряемые органические включения (VOC, SVOC) и растворимые в воде включения. Поскольку это очень

*Проведение исследований на море.*



## Инженерная геология и геоэкология

простой пассивный подход, стоимость длительного мониторинга в скважинах существенно сокращается за счет сокращения стоимости полевых работ, упрощения обработки данных и исключения стоимости обработки проб с водой или льдом.

### Контроль целостности трубопроводов

Всем государствам в мире требуется мониторинг подземных газовых и нефтяных трубопроводов, чтобы избежать взрывов и риска загрязнения территории. Частота контроля утечек часто пропорциональна уровню риска для общества. Выключение линий для таких проверок очень дорого и не всегда выявляет небольшие утечки. Чувствительность современных пассивных геохимических исследований совместно с современным многокомпонентным статистическим анализом позволяет выделять очень слабые утечки как имеющие так и не имеющие запах в газовых и жидкостных трубах. Эта технология очень экономична и выгодна для коротких труб малого диаметра и со многими ответвлениями. Когда утечки обнаружены, становится понятна область последующих ремонтных работ.

### Разведка нефти и газа

Получение сейсмических разрезов является мощным инструментом, увеличивающим успех в нефтяных исследованиях. Тем не менее, сейморазведка имеет некоторые ограничения, такие как невозможность получать изображение тонких и плохо проявленных глубоких резервуаров, сложности при зондировании сквозь вулканические слои или толстые соляные наслаждения, сложности отображения круто падающих слоев, высокой стоимости одного зондирования, и полной неспособности определения процентного углеводородного состава резервуара (шихты). Современные мировые ограничения исследовательских мощностей вызывают все больший интерес и повышают важность альтернативных не-сейсмических методов. Применяя метод УГИ, там, где сейморазведка не эффективна, или комбинируя его с сейморазведкой можно существенно увеличить продуктивность исследований. Углеводородный состав резервуаров, как глубоких (7500 м), так и мелких (300 м) был подтвержден методом УГИ, несмотря на перекрывающие тысячи футов вулканических обломков или эвапоритов.

При нефтяных исследованиях очень важно искать нанограммовые количества ( $10^9$  г) порядка 80 углеводородов и соединений серы в диапазоне от этана ( $C_2$ ), до фитана ( $C_{20}$ ). Этот диапазон, шире чем остальные в геохимической технологии, вместе с очень высокой чувствительностью позволяет выделять характерный химический признак приповерхностного микропросачивания нефтепродуктов в диапазоне от сухого газа до зрелой/тяжелой нефти (Viforeanu). Построив отношения пристана/фитана( $C_{17}/C_{20}$ ) и алкан/алкен можно также пролить свет на свойства резервуара и стадию нефти. Метод УГИ был применен на более чем 130 бассейнах в более чем 50 странах во всех местностях, включая пустыни, джунгли, равнины, тунду, и морские шельфы. Приложения включают в себя предварительные изыскания, детальные исследования, производственные исследования, разведка остатков запасов.

### Передний край

Применение метода УГИ в перспективных задачах позволит анализировать очень большие блоки ( $8000 \text{ км}^2$ ) в сравнительно недалеком будущем при стоимости порядка  $\$350/\text{км}^2$ , или менее чем 10% от стоимости 3D сейморазведки. В этих задачах, он будет использоваться с выгодой для оценки нефтяной системы, для принятия решения о сохранении или оставлении блока, оценивать запасы, и фокусировать программу сейсмических исследований на выделенном участке (по углеводородному составу). В последнем случае это может снизить стоимость разведочных работ на как минимум 40%.

### Оценка объекта исследования

Метод УГИ может использоваться для подтверждения и картирования углеводородного состава, что может служить для успешного выбора приоритета участков под бурение. В окрестности промысловых или сухих скважин, предпочтительно отбирать 10-15 образцов для сбора химических признаков, используемых в качестве моделей в статистическом анализе. Это повышает точность предсказания в более сложных условиях со множеством источников. При адекватном моделировании, фазовый тип может быть разделен на газовый, конденсатный и нефтяной для нефти с существенно другим составом или плотностью. При сотнях пробуренных скважинах, метод УГИ позволяет предсказывать сухие скважины с вероятностью 95% (Potter et al., 1996). При комбинировании с другими геофизическими методами, по отзывам пользователей, метод УГИ удваивает их успех в работе. Эта технология обычно не позволяет определить объем резервуара или его коэффициент фильтрации и таким образом не может дать оценку экономической привлекательности объекта. Однако эта технология является на 90% точной в определении углеводородного состава, что может существенно повысить вероятность безотказной работы (POS) и уменьшить риск.

При широком применении в бассейнах с многочисленными скважинами, таких как Woodbine Trend of Polk County(Техас, США), Anadarko (Оклахома, США) и San Jorge (Аргентина), была выявлена корреляция с первичной нефтеотдачей или произведением мощности резервуара и его коэффициента проницаемости, помогая оценить его экономическую эффективность. При правильном выборе шага для отбора проб, метод УГИ часто может обнаруживать сбросы и разломы, что очень критично для резервуаров с необычным поведением газов или резервуаров с блочным строением. Метод УГИ также используется для выбора наилучшего сейсмического глубинного построения: снизу вверх, прямого или сверху вниз (Lee, et al., 2005).

### Разработка месторождения

С появлением на рынке частично выработанных месторождений уточнение запасов играет все большую роль. Выявление углеводородного состава, сложное при помощи только сейморазведки является простой задачей для метода УГИ. Это открывает неосвоенные возможности для молодых компаний раннего поступления прибыли.

### Исследования на море

Уникальный дизайн геохимического модуля Gore позволяет погружать на небольшие глубины (порядка 10 м). Возможно, это единственный инструмент, позволяющий определять углеводородный состав резервуара, продолжающегося с суши в мелководный залив. Для более глубинных морских исследований, образец с морского дна вместе с модулем отбора помещается в закрытый стеклянный сосуд и далее обрабатывается как обычный образец. Успешные исследования проводились в Мексиканском заливе, Южно-Китайском море, у побережья Перу, в Северном море и в Черном море при глубинах от 30 до 1000 м. Замороженные образцы также могут успешно применяться при соответствующей методике отбора.

При исследованиях на море применяются те же аналитические и статистические методы, что и при работе на суше с равным или большим успехом в силу более низкого уровня шума от донных осадков.

Также при разработке месторождений в морских условиях используется специальное устройство для отбора пятен с поверхности для определения их природного или искусственного происхождения и характеристики их состава. Они могут быть проанализированы при помощи TD/GC/MS на наличие полуиспаримых компонент или при выделении растворителем для тестирования на присутствие высокомолекулярных компонентов.

## Инженерная геология и геоэкология

### Поиск рудных полезных ископаемых

В настоящее время усиливаются поиски погребенных рудных залежей, поскольку большинство известных приповерхностных уже выработано. Стандартные геохимические технологии выявления металлов в почве, например, методом индуктивно связанной плазмы (ICP), не эффективны для погребенных рудных месторождений. Погребенные рудные тела, в условиях отложения, таких как окисление, растворение, электрохимические процессы, могут быть выявлены методом GORE. Эти руды включают золотые, медные и полиметаллические. Метилированные органические и неорганические компоненты, также как другие легкоиспаримые компоненты часто обнаруживаются в минералосодержащих зонах с сульфидными компонентами над поверхностью рудного тела или в виде оболочки вокруг него в зависимости от стадии окислительного процесса. Эта современная технология открывает целый новый мир возможностей геологов для исследования месторождений полезных ископаемых.

### Выводы

Современные достижения в геохимическом отборе проб, анализе и интерпретации привели к разработке надежного метода УГИ. Этот метод использует пассивное устройство для отбора проб, которое может работать как в сухих так и во влажных почвах или в воде. Он достаточно чувствителен в перекрытиях, практически непроницаемых областях, имеющих очень низкие приток концентрации. Он позволяет обнаруживать более 150 различных компонентов с высокой точностью. В комбинации с многокомпонентными статистическими методами этот высокоточный и широкий по набору данных по компонентам метод имеет широкий набор приложений в геоэкологии, энергетике, и в горнодобывающей промышленности. Это дает геологам новый инструмент, сохраняющий время, улучшающий анализ и уменьшающий стоимость с помощью улучшения представлений об объекте исследования.

### Литература

Coleman, D. D., Meents, W. F., Liu, C L., and Keogh, R. A. [1977] Isotopic identification of leakage gas from under-

ground storage reservoirs - a progress report. *Illinois State Geological Survey, Report 111*, 10.

Hewitt, A. D. and Lukash, N. J. E. [1996] Obtaining and transferring soils for in-vial analysis of volatile organic compounds, USA Cold Regions Research and Engineering laboratory. *Special Report 96-5*.

Klusman, R. W. [1993] *Soil Gas & Related Method for Natural Resource Exploration*. ISBN 0-471-93892-0.

Klusman, R. W. and Saeed, M. A. [1996] Comparison of Light Hydrocarbon Microseepage Mechanisms. *AAPG Memoir 66*, 157-166.

LaPlant, L. [2002] Innovative Strategy to Locate VOC Sources Deep in the Subsurface. *Proceedings of the Third International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Chlorines*

Lee, N. et al. [2005] Surface Geochemistry: A Case Study of New Risk Reduction Technology Applied in Algeria. *2nd North African/Mediterranean Petroleum & Geosciences Conference & Exhibition, Algiers*.

Potter, R. W. et al. [1996] Significance of Geochemical Anomalies in Hydrocarbon Exploration: One Company's Experience. *AAPG Memoir 66*, 431-439.

Viforeanu, A. et al. [2003] Passive Geochemical Survey leads to Dry Gas Discoveries. *World Oil*, June, 53-38.