

## Поиск полезных ископаемых

## Использование трехкомпонентного вертолетного градиентометра при поисках полезных ископаемых

### Development of a tri-directional helicopter gradiometer for mineral exploration applications

**Greg Hollyer и Ivan Hrvoic, старшие сотрудники лаборатории магнитометрии GEM, приводят данный обзор принципов работы калиевых магнитоизмерительных приборов с оптической накачкой и тринеправленного градиентометра. В данный обзор включены соображения относительно конструкции прибора и в заключение приведен вывод о роли магнитных градиентов при поиске полезных ископаемых.**

**Т**рехкомпонентный вертолетный градиентометр стал первым градиентометром, производящим измерения в направлении 3-х осей, который стал использоваться в мировом масштабе. Он впервые появился в середине 80-х и затем был оснащен калиевыми датчиками с оптической накачкой и нашел свое применение, в том числе при поиске полезных ископаемых.

Градиентометр, разработанный GEM, состоит из буксируемого прибора, состоящего из трех частей, оснащенного 4-мя датчиками для расчета магнитных градиентов, включая вертикальный и горизонтальный градиенты в направлении вдоль и перпендикулярно движению. В качестве дополнительной оснастки используется GPS с целью точной привязки координат измерений во время полета. Запись данных осуществляется на GSMP-30A или внешнее регистрирующее устройство.

**Калиевые магнитометры с оптической накачкой**

Магнитометры с оптической накачкой состоят из одного протонного (Гелий 3) и 4-х электронно-резонансных магнитометров (Гелий 4, Рубидий, Цезий и калий). Преодолев технические трудности, GEM удалось разработать систему, отвечающую следующим условиям:

- Высокая частота дискретизации (скорость выполнения). Это условие необходимо для выполнения мобильных задач, подразумевающих высокую эффективность сбора данных в автоматическом режиме.
- Чистые измерения геофизического сигнала (сигнал не смешивается с курсовыми ошибками).
- Высокая чувствительность. Вследствие происходящих процессов, калий обеспечивает максимально возможную чувствительность.
- Высокая точность измерений.

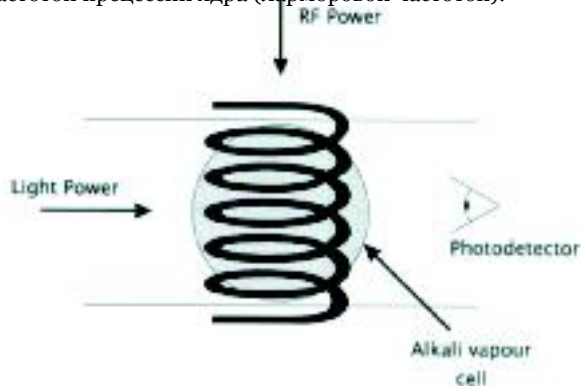
#### Принципы работы

В щелочно-газовых магнитометрах с оптической накачкой применяются щелочные металлы (из первого столбца периодической таблицы) в виде газа. Примерная схема работы магнитометров данного типа приведена на рис. 1.

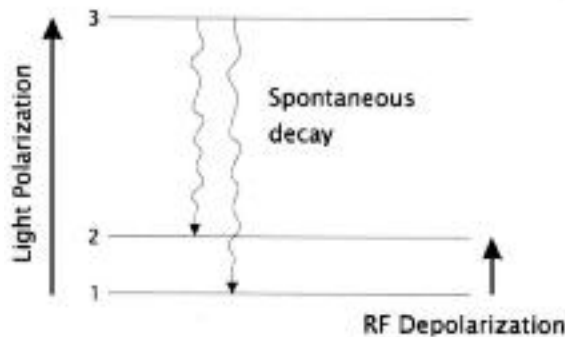
Вначале стеклянная камера, содержащая металл в газообразном состоянии, накачивается светом с определенной длиной волны – это явление носит название световой поляризации. Частота светового излучения специально подбирается и излучение подвергается круговой поляризации для каждого элемента (т.е. спектральная линия D1), чтобы переместить электроны с начального уровня 2 в возбужденное неустойчивое состояние 3 (Рис. 2).

Вы можете связаться с авторами: [greg.hollyer@gemsys.ca](mailto:greg.hollyer@gemsys.ca) или [ivan.hrvoic@gemsys.ca](mailto:ivan.hrvoic@gemsys.ca).

Электроны на уровне 3 являются неустойчивыми и случайным образом перескакивают на 1 и 2 энергетические уровни. В итоге 1 уровень оказывается полностью заполненным (уровень 2 при этом обеднен). При этом поглощение поляризованного света прекращается и газовая камера становится более прозрачной. На этом этапе задействуется RF спад вызванной поляризации. К газовой камере прикладывается RF энергия, соответствующая разнице энергии между уровнями 1 и 2, чтобы передвинуть электроны с уровня 1 обратно на уровень (после чего камера опять становится непрозрачной). Частота RF поля, необходимая для того, чтобы снова заполнить уровень 2, зависит от внешнего магнитного поля и называется частотой прецессии ядра (ларморовой частотой).



**Рис. 1** Схема работы щелочно-газового магнитометра.



**Рис. 2** Квантовая механика щелочно-газовой системы.

## Поиск полезных ископаемых

Спад вызванной поляризации под действием магнитного поля с ларморовой частотой меняет баланс заполненности двух уровней, и газовая камера поглощает большую часть поляризованного света.

Эффект поляризации и деполяризации заключается в том, что интенсивность света модулируется частотой RF. Определяя световую модуляцию и измеряя частоту, вычисляется значение магнитного поля.

### Устройство калиевого магнитометра с оптической накачкой

При разработке калиевого магнитометра учитывался ряд основных принципов.

*Высокая чувствительность, отклонение градиента и полоса частот.* Чувствительность представляет собой статическую величину, характеризующую относительную неопределенность повторяющихся показаний при одинаковой интенсивности магнитного поля. Ее значение определяется как среднее квадратическое отклонение (СКО) квадратного корня единицы полосы пропускания ( $\Gamma^{1/2}$ ). Например, чувствительность  $1 \text{ pT} / \Gamma^{1/2}$  означает, что  $1 \text{ pT}$  СКО (приблизительно  $3 - 4 \text{ pT}$  от пика к пику в зависимости от характера шума) будет представлять собой разброс результатов любого "эталонного" (фиксированного) значения приложенного магнитного поля на  $1 \text{ Гц}$  измерительной полосы пропускания.

Чувствительность квантового магнитометра определяется отношением сигнал-помеха, получаемым с его датчика, шириной спектральной линии и гиромагнитной постоянной, вычисляемой при помощи сле

$$\Delta B = k \Gamma / \gamma_n S_n \quad (1)$$

где  $k$  – коэфф. пропорциональности,  $\Gamma$  – ширина спектр. линии,  $\gamma_n$  – гиромагнитная постоянная и  $S_n$  – отношение сигнал-помеха. Чувствительность зависит не только от ларморовой частоты. Например, магнитометры Оверхаузера с чувствительностью  $0,042 \text{ Гц/нТ}$ , в зависимости от ширины спектральной линии, могут быть так же чувствительны, как цезиевые магнитометры с параметрами  $3,5 \text{ Гц/нТ}$ . В исходном варианте калиевого аэромагнитометра GEM встроен датчик диаметром  $70 \text{ мм}$ , при помощи которого достигается чувствительность  $1$  отсчет в секунду при погрешности  $< 0,001 \text{ нТ}$  (без фильтрации) с соответствующим градиентным отклонением  $2500 \text{ нТ/м}$ . Этой точности вполне достаточно практически для всего спектра применения аэромагнитометра.

Частота Найквиста составляет  $1/2$  частоты дискретизации (т.е.  $2,5 \text{ Гц}$  от  $5 \text{ Гц}$  частоты дискретизации). Для практических целей число отсчетов в секунду ограничивают полосу пропускания каждого магнитометра. Полоса частот является наиболее быстро определяемой характеристикой, измеряемой при помощи контрольно-измерительного оборудования.

Гиромагнитная частота любого магнитометра моментально, без каких бы то ни было задержек реагирует на изменения магнитной индукции. Помимо этого, собственная полоса пропускания зависит от электронного устройства магнитометра и его способности быстро реагировать на изменения, не теряя сигнала прецессии. У калиевых магнитометров полоса пропускания варьирует от  $5 \text{ Гц}$  при частоте дискретизации  $10$  отсчетов в секунду до  $10 \text{ Гц}$  при частоте дискретизации  $20$  отсчетов в секунду.

Калий обеспечивает широкую полосу пропускания и возможность различать высокочастотные геофизические аномалии.

*‘Чистый’ геофизический сигнал и ошибки курса*  
В случае магнитометров с оптической накачкой, понятие «чистого» геофизического сигнала сводится к зависимости между откликом системы и ошибками курса. Калиевый магнитометр обладает минимальной курсовой ошибкой. Чтобы понять природу этих ошибок, необходимо рассмотреть магнитные состояния ядра, энергетические переходы между электронами и соответствующие им спектральные линии, последние являются основным измеряемым параметром при определении измеренного магнитного поля с использованием магнитометров с оптической накачкой.

Ядро обладает некоторым количеством разрешенных магнитных состояний, соответствующих их квантовым числам. Например, значения магнитных моментов для щелочных металлов составляют  $I = 3/2$  ( $^8\text{рубидий}$ , калий) и  $I = 7/2$  (цезий). Количество спектральных линий для каждого типа ядра определяется по формулам Breit-Rabi (см. ссылки).

К примеру, для цезия количество спектральных линий составляет  $14$ , с интервалом  $20 \text{ нТ}$ . В этом случае расстояние между спектральными линиями мало и на практике их нельзя разделить с помощью магнитометра. С целью практического применения их делают очень широкими и перекрывающимися. При постоянных условиях (в случае постоянной ориентации магнитного поля) образуется широкий максимум, при котором происходит авто-осцилляция системы. Это явление позволяет определить частоту и осуществить вспомогательные измерения магнитного поля.

Тем не менее, это может оказаться затруднительным в случае, когда магнитное поле изменяет ориентацию, поскольку при этом изменяется положение максимума. Это явление наблюдается ввиду того, что амплитуды спектральных линий изменяются следующим образом:

- При небольших углах (от  $10$  до  $45^\circ$ ), линия наименьшей частоты (при постоянном поле) является наиболее выраженной, а линия наибольшей частоты является наименее выраженной.
- При углах больших  $45^\circ$  ситуация изменяется на противоположную. При этом максимум спектральных линий смещается от наименьшей частоты при малых углах к наибольшей при больших углах. Смещение максимума может достигать  $20 \text{ нТ}$  при одном и том же значении магнитного поля.

Поскольку рабочей областью магнитометра обычно является максимум спектральных линий, присутствуют искажения данных, или «ошибки измерителя», отражающие геометрию датчика. Системы, основанные на использовании цезия, компенсируют эти явления использованием методики разделения лучей, симметрично отображающей спектральные линии в одну и таким образом сокращающей ошибки измерителя до величин  $1 - 2 \text{ нТ}$ . Но поскольку эти магнитометры обладают

чувствительностью, составляющей десятки  $\text{нТ} / \sqrt{\Gamma^{1/2}}$ ,

ошибки измерителя могут полностью исказить магнитный отклик системы. В менее строгих случаях, показания являются совокупностью геофизического отклика и ошибок измерителя.

Для сравнения, Калий обладает  $6$  энергетическими переходами и расстояниями между спектральными линиями порядка  $100 \text{ нТ}$ . При наличии магнитного поля

## Поиск полезных ископаемых

определенной величины, спектральные линии калия расположены строго определенным образом. Подобранный конструкция датчика позволяет сузить каждую спектральную линию примерно до 0.15 -1.0 нТ. Система, таким образом, позволяет выделить определенную линию для произведения измерений. Результат обладает высокой чувствительностью и малой (обычно менее 0.1 нТ) погрешностью.

В этом случае погрешность измерений зависит от нежелательных сдвигов фаз в электронном оборудовании и от вероятных включений в механизме датчика, а не от смещения спектральных линий, как это наблюдается в системах, использующих цезий. Специально подобрав конструкцию датчика и электронной схемы можно снизить погрешность измерений до нескольких десятков пТ.

#### Частота дискретизации

Частота дискретизации (количество отсчетов в секунду) является важным параметром в случае воздушных измерений, поскольку она (совместно со скоростью полета) определяет разрешающую способность.

Чувствительность и точность должны быть определены для каждого интервала, поскольку уровень помех не просто предсказать математически (т.к. он не подчиняется общему правилу о своей пропорциональности квадратному корню из частоты отсчетов).

Снижение чувствительности (и возрастание помех) являются функцией от частоты дискретизации; но и в этом случае КМ показывает наилучшие результаты:

- 1 х в секунду - 0.001 нТ
- 10 х в секунду - 0.007 нТ
- 20 х в секунду - 0.018 нТ

#### Низкая абсолютная погрешность

Абсолютная погрешность определяет максимальное отклонение от истинного значения измеренного магнитного поля. Одним из основных воздействий высокой абсолютной погрешности является то, что результаты могут содержать систематические линейные сдвиги, особенно это касается систем с погрешностью измерений. Вдобавок, установка датчиков с высокой абсолютной погрешностью приводит к несогласованности результатов. Абсолютная погрешность также имеет значение для конфигурации градиентометра, где сдвиги в одном датчике влияют на абсолютные измерения градиента.

Абсолютная погрешность не может быть непосредственно установлена, поскольку никому на самом деле не известно истинное значение поля. Поэтому она определяется учетом факторов, влияющих на измерения значений поля, и точности учета. Эти факторы включают в себя неточность гиромагнитной постоянной, максимум временной частоты, алгоритмы перехода через нуль и т.п. Имеет значение также курсовая погрешность.

Абсолютная погрешность для КМ была рассчитана GEM с точностью +/- 0.1 нТ. Результаты полевых наблюдений показывают, что какие бы то ни было дополнительные факторы, относящиеся ко времени наблюдений, ориентации или замене датчика, влияния не оказывают.

#### Конструкция трехкомпонентного градиентометра

В случае трехкомпонентного градиентометра используются 4 калиевых датчика, расположенных особым образом, как показано на рис. 4. Датчики расположены на



Рис. 3 Панель калиевого магнитометра выглядит примерно следующим образом.



Рис. 4 Полностью собранный аппарат, готовый к проведению аэромагнитных исследований.

задней части прибора и в виде трех ребер, на расстоянии от 3 до 4 м друг от друга. Средние периоды четырех частот прецессии определяются специальным измерителем частоты, подобным изображенному на рис. 3, и затем пересчитываются в единицы магнитного поля.

Различия в показаниях снимаются и делятся на расстояние между датчиками. Горизонтальный поперечный градиент вычисляется непосредственно согласно показаниям двух нижних (горизонтальных) датчиков; вертикальный определяется исходя из среднего значения поля, измеренного горизонтальным датчиком и датчиком на вертикальном ребре. Горизонтальный продольный градиент определяется исходя из среднего значения показаний трех датчиков, размещенных на ребрах, и одного, расположенного на окончании снаряда. Вычисляются четыре разницы значений для трех градиентов и четыре абсолютные величины магнитного поля.

#### Снаряд

При проектировании снаряда были использованы обычные для электромагнитных измерительных снарядов элементы конструкции. Снаряд показан на Рис. 4. В отношении ЭМ измерительных снарядов особую роль играет жесткость. Градиенты необходимо измерять с точностью порядка



## Поиск полезных ископаемых

0.1% (до 25 нТ/м). Каркас снаряда был спроектирован с соответствующим диаметром и соответствующей толщиной стенок, достаточной для того, чтобы удерживать датчик магнитного поля и вес всех датчиков, ребер, фурнитуры и свой собственный таким образом, чтобы изменения расстояний между датчиками, происходящие вследствие изгибания каркаса, не превышали 0.1%.

Ребра расположены под углом  $120^\circ$ , что упрощает вычисление градиентов во всех трех направлениях. Среднее значение магнитного поля, измеренное на двух нижних ребрах, отлично от измеренного датчиком, расположенным на верхнем ребре, что позволяет вычислить вертикальный градиент. Среднее поле всех трех датчиков приходится на центр снаряда, что позволяет измерить продольный градиент.

Длина всех трех ребер составляет 2.0 м, таким образом расстояние между датчиками для вертикального градиентометра составляет 3.0 м. Горизонтальный поперечный и продольный градиенты измеряются расстояниями между датчиками соответственно 3.45 и 3.76 м, при этом датчики можно передвигать вдоль каркаса, подстраиваясь под параметры конкретного профиля.

Юбка снаряда была спроектирована с учетом возможности переменного буксирования, с целью оптимизации устойчивости и полетных характеристик снаряда экспериментальным образом. С целью оптимизации распределения веса вдоль каркаса снаряда, ребра расположены напротив юбки, уравновешивая ее и утяжеляя передний край в стационарном состоянии. Хотя жесткость и не является критическим параметром, точки крепления выбраны близкими к Эйлеровому минимуму изгибаемости.

#### Поиски полезных ископаемых

Измерения градиентов в последние несколько лет обрели популярность по ряду следующих причин:

- Независимость от суточных вариаций и помехозащищенность
- Поправка за высоту для всей полевой магнитометрии
- Улучшенное магнитное картирование
- Расширенные возможности интерпретации

Суточные вариации являются результатом воздействия солнечного ветра на земную атмосферу. В зависимости от амплитуды, эти эффекты могут сказываться весьма ощутимо и может потребоваться их исключение из данных. Обычно это делается путем измерения разницы показаний между магнитными датчиками. Эти измерения содержат градиент и устраняют суточные вариации, поскольку они одинаковы на обоих датчиках.

Как описано Scott Hogg и др., 2004, измерение вертикального градиента может быть использовано в качестве поправки за изменения высот. Таким образом устраняются ложные изменения формы и амплитуды аномалии, возникшие в результате изменения высоты летательного аппарата, а не вследствие каких-либо геологических причин или суточных вариаций. Hogg также отмечает, что данный метод является 'относительно простым и обладает высокой эффективностью, особенно в условиях высоких значений магнитных и вертикальных градиентов'

Улучшенное магнитное картирование является одной из наиболее привлекательных возможностей градиентометрии. Данная возможность появляется вследствие использования мощной разрешающей способности вертикального градиента, интерполяции

ния аномалий с помощью горизонтальных градиентов.

Отличительной чертой вертикального градиента является его большая сфокусированность. Как показано на рис. 5, изображение для вертикального градиента отличается от всего поля большей локализованностью, что позволяет более четко выделить небольшие аномалии, в особенности – расположенные по краям более крупных.

Горизонтальные градиенты также могут содействовать при картировании, выступая в качестве дополнения к измерениям вертикального градиента. Как показано на Рис. 5, точка, в которой горизонтальные градиенты переходят через нуль, представляет собой максимум общего поля. Если линии полета ограничивают аномалию, и одна из них записывает высокие, а другая – низкие значения, то максимум находится между ними.

Кроме того, измерение горизонтальных градиентов способно улучшить интерполяцию данных между линиями полета, таким образом, увеличив точность и разрешающую способность карты без увеличения стоимости. Одним привлекательным свойством горизонтальных градиентов является возможность более точного расположения аномалий на картах. Этот способ подразумевает вычисление псевдо-общего поля (посредством сложения градиентов). Таким образом, обеспечивается более точное определение местоположения небольших аномалий на картах, устраняются суточные вариации и обеспечивается большая точность измерений при небольших углах к направлению полета. Программное обеспечение позволяет также нанести на карту аномалии параллельно к направлению полета, правильно отображая длинноволновую информацию.

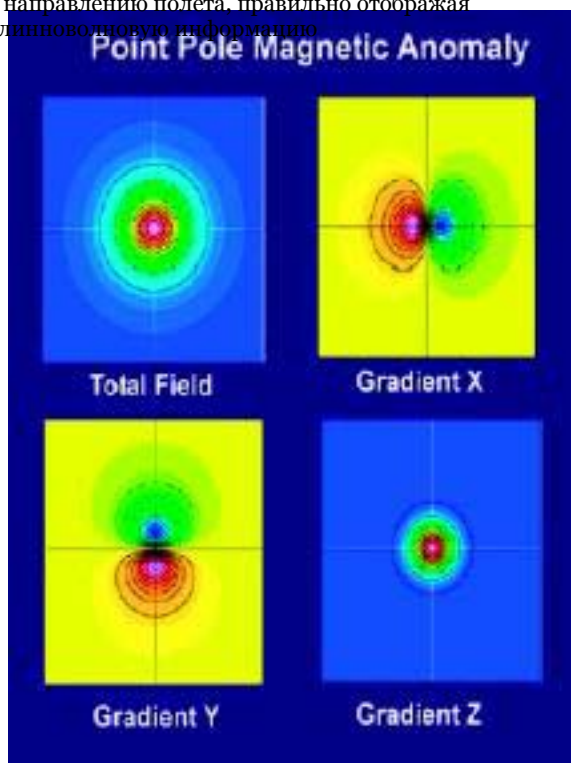


Рис. 5 Сравнение результатов измерения общего поля и градиентометрии. (no Hogg et al., 2004)

## Поиск полезных ископаемых

и убедиться в том, что все вычисленные аномалии общего поля находятся в соответствии с измеренными.

Результаты градиентометрии могут быть использованы при геологической интерпретации, в особенности при их использованных совместно с результатами измерения общего поля. Стандартные методы интерпретации, включая карты вертикальных градиентов, аналитические и Эйлеровы методы основаны на градиентометрии. Аналитические и Эйлеровы методы, основанные на использовании градиентов, могут оказать существенную помощь при уточнении местоположения аномалий (по горизонтали и по вертикали). Градиентометрия также становится возможным вычислить «действительные» значения аналитических сигналов – эти результаты используются как для установления местоположения, так и для проведения инверсии (построения псевдо-геологической модели, основываясь на результатах геофизических исследований). Суммарный градиент (аналитический сигнал) не зависит от ошибок ориентации датчика, переменных магнитной широты и от остаточной намагниченности. Всенаправленные измерения магнитного поля сводят к минимуму ошибки направленности, свойственные обычной магнитометрии.

И в заключение, горизонтальный градиент сам по себе обладает ценностью в плане интерпретации. Установлено, что в случае разломных аномалий горизонтальный градиент представляет собой чувствительный индикатор (см. ссылки W. C. Pearson).

### Преимущества

- Три-направленная система уникальна, поскольку она использует калиевый магнитометр с наибольшей разрешающей способностью из всех подобных коммерческих приборов, выводя обнаружение небольших аномалий на новый уровень.
- Система из 4-х датчиков производит точные вычисления «действительных» градиентов, датчики расположены особым образом в виде треугольника и еще один датчик расположен на окончании снаряда.
  - Обеспечивается стабильное и помехозащищенное получение данных с высоким разрешением в любых условиях рельефа.
  - С помощью встроенного GPS обеспечивается высокая точность привязки
  - Не требуется магнитная компенсация; расстояния от вертолета достаточно, чтобы избежать влияния помех, создаваемых лопастями и прочими движущимися частями вертолета.
  - Конфигурация снаряда может изменяться с целью оптимизации полета и уменьшения помех.

### Сравнение с измерениями типа «fixed wing»

Измерения «fixed-wing» являются неотъемлемым компонентом многих исследований земной коры. Но при определенных обстоятельствах использование три-направленного градиентометра гораздо более эффективно.

Например, исследования возможно проводить на такой же или меньшей высоте, таким образом получая данные с большим разрешением. Кроме того, системе не требуется какая-либо компенсация (в режиме реального времени или при обработке), и уменьшение скорости полета при получении большего объема данных. Возможно проведение исследований на одинаковых высотах с целью минимизации воздействия помех от различных наземных образований.

### Сравнение с исследованиями на вертолете

Исследования «fixed helicopter» проводятся с использованием штанги или набора штанг, прикрепленных вокруг вертолета. Три-направленные исследования превосходят исследования *fixed helicopter* по ряду параметров:

- Не требуется компенсация
- Возможна работа в таких же условиях рельефа
- Простота установки и эксплуатации

### Заключение

В данной статье мы рассмотрели улучшенную систему три-направленной градиентометрии (вертикального, горизонтального поперечного и горизонтального продольного градиентов) с использованием инновационных калиевых датчиков, позволяющих достичь большей чувствительности, снижения помех, низкой абсолютной погрешности и снизить временные затраты при проведении исследований. Три-направленный градиентометр представляет собой улучшенную магнитную систему, предоставляющую множество возможностей, которыми обладают исследования с использованием набора датчиков, включая устранение суточных вариаций и помех, поправку общего магнитного поля за высоту, улучшенное магнитное картирование и дополнительные возможности интерпретации. Дальнейшие усилия будут направлены на содействие организациям в области применения данной технологии при поиске и разведке полезных ископаемых.

### Ссылки

- Berger, Zeev et al. [1999] Exploration applications of three dimensional gradient magnetics in the Western Canada sedimentary basin and the fold belt region.
- Breit, G. and Rabi, I.I. 1931. Measurement of Nuclear Spin *Phys. Rev.* 38, 2082, 1931
- Hogg, Scott and Associates [2004] Practicalities, pitfalls and new developments in airborne gradiometry. *Presented at the Prospectors and Developers Annual Meeting, Toronto, Canada.*
- Hrvoic, I. and Hollyer, G.[2004] A brief review of quantum magnetometers.
- Pearson, W. C., 2001. Finding Faults in a Gas Play. [www.aapg.org/explorer/geophysical\\_corner/2001/05gpc.cfm](http://www.aapg.org/explorer/geophysical_corner/2001/05gpc.cfm).

Посетите наш сайт [www.eage.org](http://www.eage.org)