

Несейсмические и аэрометоды В компании ARKeX рождается разведочный вариометр

ARKeX on the way to hatching an EGG

Молодая британская компания замыслила прорыв в аэрогравиразведке, внедрив новый аэровариометр. Эндрю Мак-Барнет (Andrew McBarnet) говорил с руководством компании о ее стратегии, технологии и возможных рынках сбыта ее услуг в нефтяной и рудной отраслях.

Символично, что в Доме Ньютона (бизнес-парке на окраине Кембриджа) появилась компания, занимающаяся силой тяжести. Компания ARKeX, созданная в марте 2004 г., намерена добиться знаковых перемен в нарождающейся методике аэровариометрии (измерении вторых производных потенциала силы тяжести), добившись исключительно высокого разрешения путем применения сверхпроводниковых технологий. Компания, как и сэр Исаак Ньютон, стала своего рода пионером в исследовании силы тяжести.

В традиционной аэрогравиразведке всегда пытались измерять величины, представляющие непосредственный интерес для разведки, исследовались лишь крупные структуры, дающие аномалии больших пространственных периодов. ARKeX полагает, что ее результаты в области аэровариометрии дают «долгожданную» возможность получать высококачественные данные в ходе работ по гравиразведке с воздуха. Компания утверждает, что вариометры будут превосходить современные гравиметры для всех объектов, порождающие аномалии с пространственным периодом менее 40 км. Упрощенно говоря, в установленной на летательном аппарате системе с одним чувствительным элементом ускорения, связанные с перемещениями аппарата, забивают малые ускорения, связанные с изменением силы тяжести. Если же сила тяжести измеряется дважды – двумя чувствительными элементами, расположенными на одной вертикали – сила, то ускорения-помехи можно устранить вычитанием.

Это простое решение наталкивается на много трудностей при осуществлении, но, по утверждению ARKeX, аэровариометрия, со всеми ее преимуществами, станет реальностью в течение года или чуть позже, особенно после внедрения решений, разработанных компанией. Даже сейчас большинство практиков согласится, что аэрогеофизические работы выполняются



Дом Ньютона, Кембридж, Великобритания

быстрее наземных – меньше времени занимают не только сами измерения, но и организация транспортного обеспечения. В некоторых регионах доступ к месту для проведения сейсморазведочных работ затруднен природными условиями – болотами, джунглями, дюнами. Применяя аэровариометрию, можно не только избежать проблем, с которыми сталкивается наземная сейсморазведка, но и получить возможность собрать ценную информацию, о магнитном поле и данные лазерного высотомера, пригодные для решения как региональных, так и сверхдетальных разведочных задач.

Китти Холл (Kitty Hall), управляющий директор ARKeX, говорит, что связь с именем Исаака Ньютона – просто удачное совпадение. Свое помещение компания получила при создании. Компания – «совместный филиал» фирм Oxford Instruments (OI), известного британского производителя научного оборудования, и ARK Geophysics, также британской, специализирующейся на обработке и интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки при работах на нефть и газ.

Доктор Джон Ламли (Dr John Lumley), технический директор ARKeX, ранее работавший в OI, говорит, что партнерство этих компаний было несколько неожиданным, поскольку связь их занятий была неочевидна. В 1990-е годы OI участвовала в разработке вариометра для Европейского космического агентства (ЕКА). Замысел состоял в измерении силы тяжести по всей Земле из космоса. По ходу дела, OI не успела к сроку подготовить опытный образец своего прибора для ЕКА, и агентство воспользовалось традиционной аппаратурой, но некоторое время продолжало финансировать проект OI.

OI, тем не менее, была уверена, что ее опыт в работе со сверхпроводниками мог быть весьма полезен при внедрении на рынок аэровариометров нового поколения – стабильных, малошумящих, с высоким



Руководство ARKeX: Китти Холл (Kitty Hall), управляющий директор, и Джон Ламли (John Lumley), технический директор

Несейсмические и аэрометоды

разрешением. «OI всегда интересовалась коммерческим применением», продолжает Ламли, «поэтому мы начали обхаживать нефтяные и газовые компании. Вскоре мы поняли, что рынок сбыта такой аппаратуры очень узок, может быть штук десять по всему миру, поэтому лучше самим заняться выполнением работ».

По словам Ламли, в одной из крупных геофизических фирм им сказали, что их прибор – это не законченный продукт, который могли бы приобрести нефтегазовые компании, и что есть смысл поговорить с фирмой ARK Geophysics. Так три года назад Китти Холл, работавшая тогда управляющим директором ARK Geophysics, с энтузиазмом включилась в работу. Она говорит, что создание ARKeX было столь же захватывающим и трудным, как в свое время (18 лет назад) создание самой ARK Geophysics – партнерства Энди Мак-Грендла (Andy McGrandle), Ричарда Глива (Richard Gleave) и Китти Холл, названного по первым буквам их имен – A-R-K.

ARK Geophysics завоевала репутацию почти единственного эксперта по гравимагниторазведке, специализирующегося на обработке и интерпретации. Несколько лет назад компания создала пакет ARKFIELD для совместной интерпретации данных грави-, магнито- и сейсморазведки, совместимый с системами Landmark и Schlumberger. Ею же поддерживается Интернет-сайт Fieldbank.com, предоставляющий доступ к коллекции данных по потенциальным полям.

Как научно-исследовательская компания, ARK Geophysics активно интересовалась возможностями вариометрии, поэтому обращение Oxford Instruments Superconductivity, дочернего предприятия OI, не было совсем неожиданным, в отличие от последствий этого обращения. Идея создать новую компанию, которая доведет до внедрения опытный образец, созданный OI, была логичной. Но накопление средств для создания ARKeX заняло два с половиной года, хотя ободряющий шум издавали многие, в частности – фонд NOVA Technology Fund из Абердина.

Оглядываясь назад, Холл говорит, что хуже быть не могло. «Это было как раз по завершении эры сайтов. С 2000 по 2002 г. инвестиции в новые молодые компании сократились в Европе на 75%. Геофизика также не имела тогда хорошей репутации, так что нас считали слишком рискованным предприятием, как с технической, так и с инвестиционной точки зрения.»

Дело пошло лучше после вмешательства британской некоммерческой организации Industry Technology Facilitator (ITF) из Абердина, которую создали и финансируют несколько крупных нефтедобывающих и разведочных компаний для внедрения новшеств в своей отрасли. ITF счел разработку перспективной и помог занять около 1 млн. долл. у Shell, Amerada Hess и Anadarko Petroleum. Этот стартовый капитал позволил начать переделку космического прибора в разведочный,



Станина, подготовленная для монтажа сверхпроводящего контура при -269°C



Ниобиевый акселерометр в сборе, готовый к монтажу



Контур, предназначенный для использования в разведочном вариометре EGG

Несейсмические и аэрометоды

а также разработку устойчивого крепления прибора, системы регистрации и создание программы решения обратной задачи для вторых производных потенциала силы тяжести для пакета ARKFIELD.

ARKeX полностью заработала в марте 2004 г., когда инвестиции достигли почти 4 млн. долл. Главными источниками были фонд RWE Dynamics, созданный немецким конгломератом RWE, в который входит нефтяная компания RWE-DEA, а также компания Scottish Equity Partners из Глазго. Средства поступили также от NOVA Technology Fund, компании Eurovestech, от самой OI, как от юридического лица, и от основателей OI сэра Мартина (Martin) и леди Вуд (Wood).

Конечная цель компании состоит во внедрении и дальнейшей эксплуатации первого в мире вариометра, работающего на принципе сверхпроводимости, коммерческое применение которого планируется начать в 3-м кв. 2006 г. В приборе, который окрестили Exploration Gravity Gradiometer (EGG, разведочный вариометр), будут использованы преимущества работ при температуре 4K (-269°C) – высокие чувствительность, разрешение и стабильность. EGG создан на основе опытного образца, сделанного Oxford Instruments для ЕКА. Он менее чувствителен, что связано с работой в условиях сильных динамических нагрузок на борту летательного аппарата. Усилия сосредоточены на изготовлении и сборке деталей и узлов, производимых на месте и решением вопросов изготовления и доводки узлов, производимых сторонними организациями. В кембриджском офисе ARKeX работает целая команда инженеров, и еще столько же в других организациях в Европе и Северной Америке.

ARKeX не собирается бездействовать, дожидаясь рождения EGG (в оригинале – *'until EGG is hatched'* – «пока высиживается яйцо (egg)»; прим. перев.). «Наша компания занимается вариометрией», говорит Холл, «и скорейшее начало полетов и сбор данных для наших заказчиков являются для нас приоритетными задачами».

Через несколько недель компания получит у Lockheed Martin вариометр для измерения полного тензора вторых производных потенциала силы тяжести (full tensor gravity gradiometer, FTG). Коммерческие работы планируется начать в следующем году, после испытаний в Северной Америке. В приборе используется система FTGeX, такая же как в нескольких экземплярах FTG, с которыми работает Bell GeoSpace, но адаптированная к специфическим задачам ARKeX. Система FTG ранее использовалась на подводных лодках «Трайидент» ВМС США, но сейчас снята с вооружения.

Полеты с FTGeX будет проводить Fugro Airborne Surveys на одномоторном самолете «Сессна», оснащенном, кроме того, хорошим лазерным высотомером и трехкомпонентным магнитометром-градиентометром. Холл рассчитывает на заказы как нефтяных, так и горнодобывающих компаний, и работать для начала в Северной Америке и Южной Африке. Она понимает, что начало новой технологии – это процесс обучения, требующий информировать заказчиков о возможных преимуществах «Преимущества

Использование сверхпроводимости в вариометре EGG

Хорошие характеристики вариометра EGG связаны с использованием сверхпроводимости. В 1933 г. Вальтер Мейснер показал, что сверхпроводник не намагничивается никаким магнитным полем ниже некоторой критической величины. Эффект Мейснера позволяет, пропуская ток по сверхпроводящему контуру, удерживать в воздухе пробную массу, расположенную вблизи контура. Движение этой массы можно отслеживать более просто, чем позволяет механический подвес. Кроме того, квантование потока, связанное с квантовомеханической природой сверхпроводимости, обеспечивает небывалую стабильность EGG, поскольку токи в контурах абсолютно неизменны.

аэровариометрии общепризнанны в горнодобывающей отрасли: BHP-Billiton за несколько лет налетала 700,000 км со своей системой Falcon. В нефтяной отрасли FTG нашли ограниченное применение в морских работах, а работ в аэроварианте было совсем мало. Поэтому возможности открываются большие. Мы полагаем, что комбинация ARKeX, Fugro и Lockheed окажется выигрышной. Мы надеемся помочь наземной сейсморазведке, которую часто считают методом дорогим, сложным и не обязательно высококачественным. Общаясь с сейсморазведчиками, мы пришли к выводу, что могли бы, например, быть иногда полезны в зонах с высокими градиентами, а в других случаях давать дополнительные данные для повышения устойчивости решения задач сейсморазведки».

При сравнении с наземной 3D сейсморазведкой, аэровариометрия привлекательна также по ценам. Холл оценивает стоимость аэроработ с FTGeX в 1-3 тыс. долл. за 1 кв. км., цена же за 3D сейсморазведку составит 15-50 тыс. долл. и выше, зависимости от местоположения и рельефа.

Тем временем, ARKeX заканчивает программу решения 3D обратной задачи вариометрии (FTG) для заказчика из США. Система позволяет интегрировать миграцию сейсмических разрезов до суммирования по ОГТ, вариометрию и данные по скважинам при определении строения подошвы солевых комплексов – задача, при решении которой сейсморазведка в одиночку дает невнятные результаты. Возможности перевода куба скоростей в куб плотностей, а также получения интерпретируемых горизонтов на больших глубинах используются для построения 3D моделей. Результат решения прямой задачи вариометрии для этой модели сравнивается с наблюдаемыми значениями вторых производных. Различие в них связывается с неверно заданной стартовой моделью. С использованием разработанных ARKeX's программ решения обратной задачи для вторых производных, интегрированных с основным пакетом ARKFIELD, в модель вносятся изменения до тех пор, пока расхождение расчетных и наблюдаемых вторых производных не исчезнет.

Несейсмические и аэрометоды

Новая геометрия границ вводится в алгоритм миграции для следующей итерации. Результаты понравились заказчику, который написал: «В ходе проекта выяснилось, что, хотя основным инструментом в ходе исследования была миграция до суммирования по ОГТ, она имеет свои проблемы, а сочетание решения обратных задач сейсморазведки и вариометрии дало более полный результат».

Для ARKeX этот проект стал важным рубежом в развитии интерпретации данных вариометрии. Речь шла о глубоководных участках, поэтому согласованность результатов решения обратной задачи вариометрии и миграции означает, что вариометрию можно применять при исследовании глубинного строения. По мнению компании, в отрасли закрепилось неверное мнение, что вариометрия пригодна лишь при изучении верхней части разреза. На деле же оказалось, что вариометрия дает по солевым комплексам более точный результат, чем обычная гравиразведка.

Причина этого в том, что весь процесс решения основан на последовательном исключении из сигнала вкладов разных известных составляющих модели разреза, а обратная задача решается для остаточных аномалий. Аккуратное исключение известных составляющих – ключ к успеху при построении итоговой модели. Детальная информация о короткопериодической составляющей, которую дает вариометрия, дополняет детальную модель миграции, которая дает сведения, на основании которых проводится исключение. Эта связь используется для расчета остаточных аномалий, для которых проводится решение обратной задачи, по результатам которой устанавливается структура подошвы солевого комплекса

В отличие от раннего периода своей деятельности, сейчас ARKeX полагает, что ее персонал к концу года увеличится с 16 до 20 человек. Если применение FTGeX будет успешным, а EGG будет хорошо работать, это число еще увеличится.

Что применять в аэрогравиразведке: гравиметры или вариометры?

Мнение ARKeX

Это ключевой вопрос, а ответ на него гласит, что все зависит от типа прибора и частотного состава сигнала, который следует измерить с наивысшей точностью.

Считается, 2D преобразование Фурье, полезно при анализе данных гравиметрии и вариометрии, в частности – их частотного состава. Важным результатом Фурье-анализа оказывается, что «измерять» тяготение земли можно по любой компоненте силы тяжести или ее производных; что выбрать, зависит только от соотношения сигнал-шум для сигнала, который порождает целевой объект.

В других публикациях мы уже показали, что отношение амплитуды любой гармоники спектра сигнала в поле силы тяжести к амплитуде той же гармоники в спектре второй производной потенциала равно «длине волны» соответствующей этой гармонике, деленной на 2π (вопрос, что такое «длина волны» для 2D функции требует отдельного обсуждения, выходящего за рамки этой врезки, пока же можно считать, что речь идет об изменениях только в одном направлении).

Как следствие, получается, что при достаточно больших длинах волн аэрогравиметрия всегда лучше аэровариометрии, поскольку с ростом длины волны величина силы тяжести растет быстрее, чем ее производная. Наоборот, при достаточно малых длинах волн аэровариометрия всегда лучше аэрогравиметрии.

Эти факты не имеют отношения к геологии, они следуют просто из того, что вторая производная потенциала – это производная силы тяжести.

Но что значит длинная или короткая волна?

Ответ зависит от того, о сравнении каких приборов идет речь. По имеющимся сообщениям, уровень шумов современных аэрогравиметров составляет около $8 \text{ мГал} \cdot \text{с}^{1/2}$, а современных аэровариометров – $12 \text{ Этв} \cdot \text{с}^{1/2}$. Задавшись этой чувствительностью, можно ответить на вопрос, вынесенный в заголовок.

Для этого следует проанализировать зависимость чувствительности от частоты. Удобнее всего рассмотреть частное отношений сигнал-шум для данных вариометра и гравиметра как функцию пространственного периода. В упрощенной форме имеем:

$$\frac{G_{zz} \text{SNR}}{G_z \text{SNR}} = \frac{\Delta V_{zz} / \text{шум вариометра}}{\Delta V_z / \text{шум гравиметра}}$$

Используя ранее приведенные сведения об отношениях амплитуд гармоник спектра и значениях шумов, после преобразований получим зависимость этого частного от длины волны:

$$\frac{G_{zz} \text{SNR}}{G_z \text{SNR}} = \frac{2\pi \cdot 8 \cdot 10^{-5}}{\lambda \cdot 12 \cdot 10^{-9}}$$

График этого выражения приведен на рис. 1. Здесь g_z обозначает вертикальную компоненту ускорения силы тяжести, g_{zz} – вертикальную компоненту его градиента.

Из графика видно, что современные вариометры превосходят гравиметры на пространственных периодах менее 40 км. На периоде 40 км приборы обоих типов работают одинаково, на 10 км вариометр лучше в 4 раза, а на 1 км – даже в 40 раз.

Несейсмические и аэрометоды

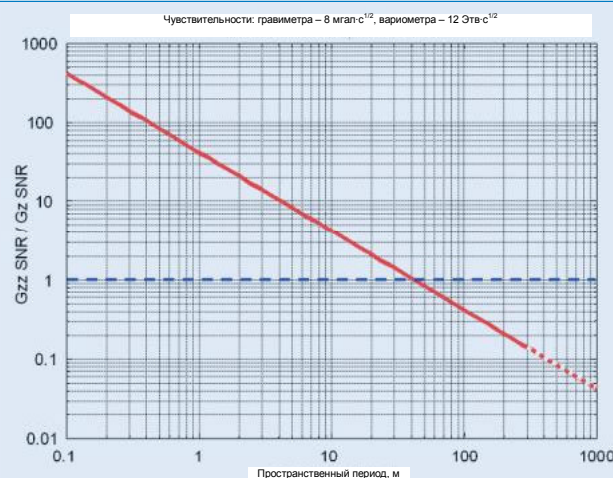


Рисунок 1 Сравнение характеристик современных аэроградиентометров и аэрогравиметров

Это значит, что аэрогравиметрия даст лучшие результаты аэровариометрии, лишь при очень большой площади съемки и лишь для некоторых гармоник. Но и для таких работ точное измерение высокочастотной компоненты также важно. Даже если целевыми являются низкочастотные компоненты, точные измерения на высоких частотах позволяют более аккуратно провести исключение эффектов известной части разреза.

Коротко говоря, вариометрия всегда нужна при проведении аэрогравиметрических работ.

Почему $1 \text{ Этв} \cdot \text{с}^{1/2}$ – конечная цель

Хотя результаты, приведенные в предыдущем разделе, впечатляют, для многих задач, очевидно, необходима более высокая чувствительность. Это справедливо и для рудной, и для нефтегазовой отраслей. Из анализа данных по многим районам мира видно, что сигналы обычно находятся в диапазоне от первых этвеш до первых десятков этвеш. Из результатов численного моделирования ясно, что такие сигналы трудно измерить приборами с чувствительностью $12 \text{ Этв} \cdot \text{с}^{1/2}$.

Это хорошо видно на рис. 2, который предоставил доктор Франк ван Канн (Dr Frank van Kann) во время недавней беседы. На рисунке представлены значения второй производной потенциала силы тяжести по нескольким месторождениям твердых ископаемых и нефти.

Многие из этих объектов могут быть лишь обнаружены с помощью вариометрии; детальный анализ показывает, что повышение чувствительности было бы весьма полезно для более четкого измерения сигналов. Даже на месторождении Blair Athol, где сигнал вчетверо сильнее среднего уровня, более высокое разрешение позволило бы лучше выделять аномалии.

При чувствительности $12 \text{ Этв} \cdot \text{с}^{1/2}$ точка равных возможностей аэрогравиметрии и аэровариометрии отодвинется в область периодов, больших 500 км, тогда не останется сомнений, какой тип аппаратуры лучше.

Из приведенных здесь месторождений лишь Humble Dome ясно видно в данных современных аэрогравиметров, а Blair Athol и Olympic Dam лишь заметны на уровне 3 стандартных отклонения шумов.

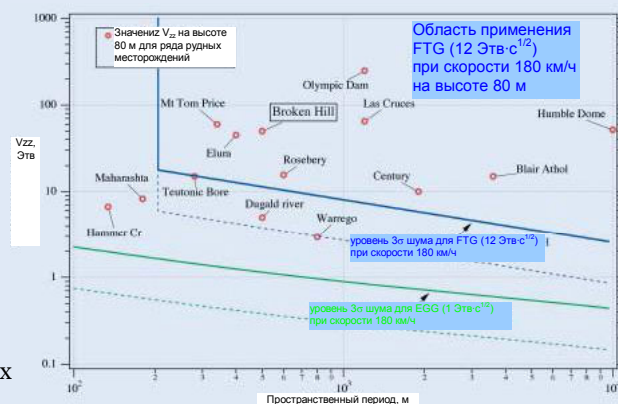


Рис. 2.