

Аэрогеофизика

Using gravity gradiometry as a blueprint for exploration in thrust and fold belts.

Использование гравитационной градиентометрии для планирования поисково-разведочных работ в надвиговых и складчатых поясах

Phil Houghton, Duncan Bate, Mark Davies, и John Lumley of ARKeX* рассматривают обоснование для развития компанией аэро гравиметрического градиентометрического метода, проиллюстрированное исследованием чрезвычайно трудного района в Канаде.

Поисково-разведочные работы в регионах со сложной геологией являются перспективными для некоторых прикладных наук и традиционными в пограничных областях таких, как Utah Hinge Line (Петля Юта) и внутренние бассейны Северо-Восточной Британской Колумбии, где региональные исследования являются первой ступенью. Исследователи собирают информацию по геологическим картам поверхности земли, имеющимся в распоряжении сейсмическим и скважинным данным, чтобы дать оценку региональной перспективности. К тому же, часто используются методы потенциальных полей, поскольку съемки могут быть относительно легко выполнены, особенно с воздуха.

Использование потенциальных полей при масштабном изучении бассейна является очень важным для рассмотрения структур бассейна; однако, чтобы понять внутренние детали строения бассейна, требуются высоко разрешающие данные. Часто они представлены в виде наземных измерений, таких как наземные гравиметрические данные. До последнего времени не имелось в распоряжении аппаратуры, устанавливаемой на борту самолета, с широким диапазоном и высоко разрешающей способностью, которая могла бы обеспечить детальной информацией о горизонтах, находящихся под поверхностью. Аэро гравиметрическая градиентометрия является таким методом, который может обеспечить геологоразведчиков новой информацией, которая поможет выявить перспективные площади и планировать программы поисков и разведки с рациональными временными и денежными затратами.

Здесь мы рассматриваем методологию, ее экономическую эффективность, ограничения и как она может быть использована в надвиговых и складчатых поясах для того, чтобы принять решение о сдаче в аренду и выявить области для дальнейшего исследования. Дополнительно мы рассмотрим анализ экономической оценки использования гравиметрической градиентометрии в этой ситуации.

Гравиметрическая градиентометрия: методика

Гравиметрическая градиентометрия не является новым методом, однако ее не было до 1994 г, когда ранее классифицированный как 3D тензорный градиентометр, созданный Bell Aerospace (1973), был испытан в Мексиканском заливе для коммерческих целей. После этих морских испытаний было развито несколько систем. Новая система ARKeX, созданная Lockheed Martin, работает с двумя такими системами при аэросъемке, хотя они, если требуется, могут быть еще использованы в морской съемке. Так каковы преимущества этого когда-то засекреченного военного метода в традиционной гравиметрии?

Общепризнанно, что ускорение силы тяжести полностью представляется скалярной потенциальной функцией силы тяжести, $\Phi(r)$, заданной

$$\text{уравнением } \Phi(r) = \iiint G \frac{\rho(r')}{|r' - r|} d^3r'$$

(2-1)

где G – гравитационная постоянная, $\rho(r')$ – плотность вещества в точке $r' = (x', y', z')$ и $r = (x, y, z)$ – точка, в которой измеряется поле силы тяжести. Сила тяжести является первой производной от $\Phi(r)$, и она является вектором, представленным уравнением

$$g(r) = -\nabla\Phi = \left(-\frac{\partial\Phi}{\partial x}i - \frac{\partial\Phi}{\partial y}j - \frac{\partial\Phi}{\partial z}k \right) = (g_x, g_y, g_z) \quad (2-2)$$

Градиент силы тяжести является второй производной $\Phi(r)$ и показывает, как меняется каждая компонента силы тяжести по трем направлениям. Например,

$G_{xz}(r)$ показывает, как $g_z(r)$ изменяется в направлении x . Полный тензор градиента силы тяжести представлен

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_x}{\partial x} & \frac{\partial g_x}{\partial y} & \frac{\partial g_x}{\partial z} \\ \frac{\partial g_y}{\partial x} & \frac{\partial g_y}{\partial y} & \frac{\partial g_y}{\partial z} \\ \frac{\partial g_z}{\partial x} & \frac{\partial g_z}{\partial y} & \frac{\partial g_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Хотя он представлен девятью компонентами тензора градиента силы тяжести, существует только пять независимых компонент. Во-первых, тензор симметричен, так как порядок дифференцирования скалярной величины не имеет значения (предполагая, например, что $G_{xy}=G_{yx}$). Во-вторых, сумма значений по диагонали равна нулю (уравнение Лапласа, доказываемое прямым дифференцированием (2.1) или порядковым номером других направлений).

Возможность измерять пять пространственно независимых компонент силы тяжести имеет очевидные преимущества над традиционными измерениями силы

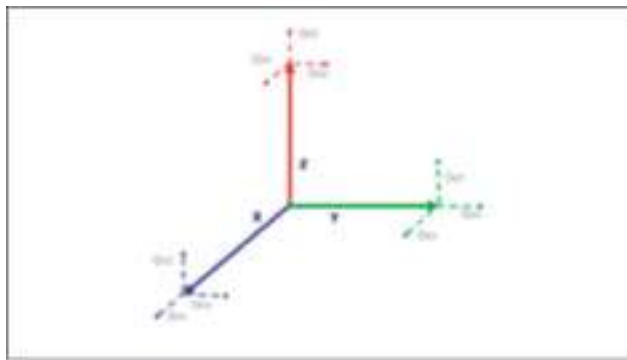


Рис. 1 Тензорные компоненты

*www.arkex.com.

Аэрогеофизика

тяжести, которые восстанавливают только вертикальную компоненту (Gz), и помогает ограничить неоднозначность традиционных потенциальных полей.

Ясно, что градиенты могут быть получены из силы тяжести простым дифференцированием, но такой процесс естественно страдает из-за пространственного дискретного представления первичных измерений и не является истинным независимым измерением градиентного поля. Полный тензор градиентометра измеряет скорость изменения силы тяжести по различным парам измерений акселерометра, чтобы обеспечить девять компонент тензора.

Сопоставление аэрогравиметрии с градиентометрией

В сложных регионах, где существуют проблемы доступа и разрешения на ведение разведки, применение аэрогеофизических методов имеет очевидные преимущества. Однако, почему градиентометрия является естественным выбором в высоко динамичной окружающей обстановке?

Вследствие принципа эквивалентности Эйнштейна гравиметр не может разделять центробежное и гравитационное (ускорение силы тяжести) ускорения. Это является принципиальным ограничением, и центробежные ускорения должны быть независимо измерены и удалены из общего сигнала. В настоящее время это достигнуто использованием двойной частотной несущей фазы GPS, чтобы измерить движение и отсюда ускорение самолета. Однако, это хорошо работает только в течение длительного временного интервала и строго ограничивает ширину пропускания приобретенных данных.

В самом простом виде градиентометр представляет два акселерометра, выстроенных в ряд по вертикали на некотором расстоянии друг от друга. Между двумя датчиками должны быть очень маленькие изменения силы тяжести, и они являются теми различиями, которые измеряются всеми гравитационными градиентометрами. Однако, центробежные ускорения, которые являются помехой для обычной силы тяжести, являются едиными для обоих датчиков и, следовательно, не ощутимы для надлежащим образом сбалансированных гравитационных градиентометров. Эта основная особенность означает, что гравитационный градиентометр является идеальным выбором для проведения измерений на движущемся основании и позволяет регистрировать измерения намного большего диапазона.

Чтобы улучшить рабочие характеристики традиционных общепринятых систем, существуют методы, которые,

в основном, сфокусированы на более медленной скорости полета или на аппаратных средствах с более низким шумом. В последнее время ввод в действие более медленно летающих систем, например вертолет (HeliGrav), усовершенствовал пространственное содержание традиционной силы тяготения. Подобным образом De Beers успешно разместил градиентометр полного тензора на Zeppelin дирижабле для улучшения полосы пропускания уже высокого сигнала и разрешающей способности при поисках кимберлитов (Hatch, 2006).

Анализируя отношения соответствующего сигнала к шуму трех систем (полный тензорный градиентометр (FTG), Sanders AirGrav система и HeliGrav система) в зависимости от длины возвратной волны, можно видеть, что градиентометрия имеет превосходные рабочие характеристики почти во всем диапазоне частот, обычно имеющих место при геофизической съемке, и особенно на высоких частотах (рис. 2). Гравитационная градиентометрия, размещенная на жестком крыле самолета, способствует улавливанию волн длиной до 300 м (Lumley et al., in prep).

Так как градиентометрия превосходна на высоких частотах, можно видеть, что на более низких частотах сила тяжести начинает превалировать над градиентометрией. Существует много предположений относительно того, где происходит пересечение между соответствующими методами, и это является функцией чувствительности каждого метода. Наш анализ (Lumley et al., in prep) показал, что это пересечение имеет место при 34 км (рис. 3) для системы AirGrav. Полет AirGrav со скоростью 30 м/с (мы называем это Heligrav) по сравнению с полетом FTG со скоростью 60 м/с улучшает данные силы тяжести и пересечение происходит на 23 км.

Сверх 34 км гравитационный градиентометр все еще получает длинноволновые сигналы, хотя и уменьшенной амплитуды по сравнению с обычным сигналом силы тяжести. На этих более длинных волнах трудно определить качество представления самых слабых сигналов градиентометрической съемки. Для множества съемок мы отметили, что при фильтрации до 30 км, амплитуда сигнала была порядка 1 Erms, т.е. в три или более раза выше FTG шума. Пожалуй, единственный неожиданный результат заключается в относительном показателе работы FTG по сравнению с морским гравиметром, где точка пересечения располагается выше, на 28 км. Это наблюдается только тогда, когда AirGrav

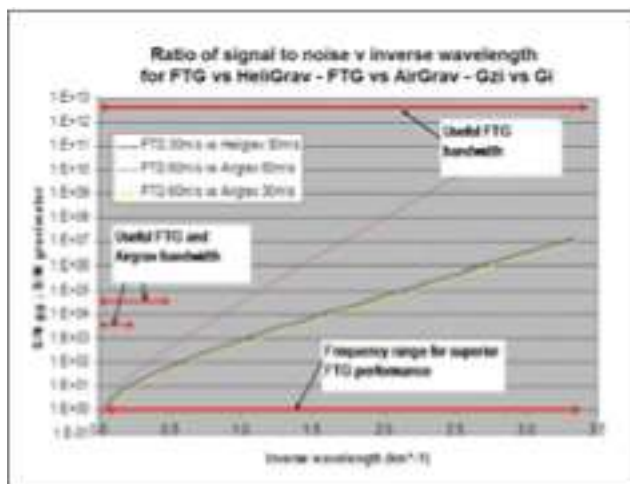


Рис. 2 Отношение сигнала к шуму для FTG, AirGrav, HeliGrav в зависимости от длины возвратной волны

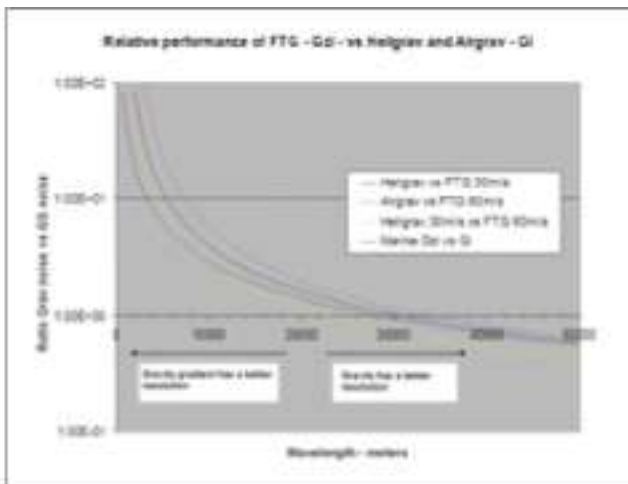


Рис. 3 Отношение сигнала к шуму для FTG, AirGrav, HeliGrav в зависимости от длины возвратной волны

Аэрогеофизика

система производит полеты медленнее, чем эквивалентная съемка с использованием FTG, при которой место пересечения длин волн существенно падает.

Muskwa-Kechika, Северо-Восточная Британская Колумбия

В пределах Западного Канадского осадочного бассейна (WCSB) самая мощная и, следовательно, самая стратиграфически полная часть карбонатного/обломочного комплекса имеет место на западе и, следовательно, в пределах восточной краевой зоны Кордильер. Эта область приравнивается к надвигу Rocky Mountain Foreland и Складчатому Поясу и восточной части Omineca Belt (Bally et al., 1966; Price, 1981; Price and Mountjoy, 1970; Thompson, 1979).

Заданная мощность осадочной толщи, потенциальной для обнаружения существенных проявлений нефти и газа в пределах надвига и покровных структур, огромна. Рис. 4 показывает геологическую карту совместно со скважинными данными, указывающими проявления нефти и газа. Существует резкая западная граница по нанесенным скважинным данным, к западу от которой пробурено только несколько скважин. Такое распространение скважин связано с восточной границей кордильерских деформаций и увеличением топографического рельефа. Незначительные исследования имели место к западу от этой границы, за исключением области, отмеченной, как имеющей высокие потенциальные углеводородные ресурсы.

Обоснованное двух и трехмерное моделирование подчеркнуло, что структуры могут быть обнаружены, используя гравитационную градиентометрию, нацеленную на распознавание различий масс карбонатных и обломочных пород.

Градиентометрия является особенно эффективной при идентификации центральной части и осевой плоскости пальцеобразных возвратных надвиговых разломов и складок, которые не представлены поверхностной геологией. Это делает метод не только идеальным на первом этапе поисковых задач, чтобы установить области, в которых следует провести сейсмические исследования, или для сдачи в аренду, но также для задачи высоко разрешающего картирования, чтобы проинтерполировать 2D сейсмические данные, собранные по редкой сети. К тому же данные могут быть также использованы для задачи специального заказного картирования для выявления областей, выходящих за пределы существующего нефтегазопроявления. Этот метод особенно успешен в холмистых областях в пределах нефтяной провинции Средне Восточной области сжатия (Davies, 2002).

Сбор данных градиентометрии

Сбор данных градиентометрии

ARKeX с съемка Muskwa Kechika была проведена с воздуха как часть программы с множеством заказчиков, объединенных в JEBSCO Seismic. Проведенные два этапа охватили в совокупности 5000 км². Район поисков и разведки характеризуется различными проблемами, включая проблемы территории, живой природы, предпочтительных наций и лесничества. С использованием аэрогеофизики большинство этих проблем может быть преодолено. Увеличенная ширина полосы пропускания и отношение сигнала к шуму гравитационной градиентометрии

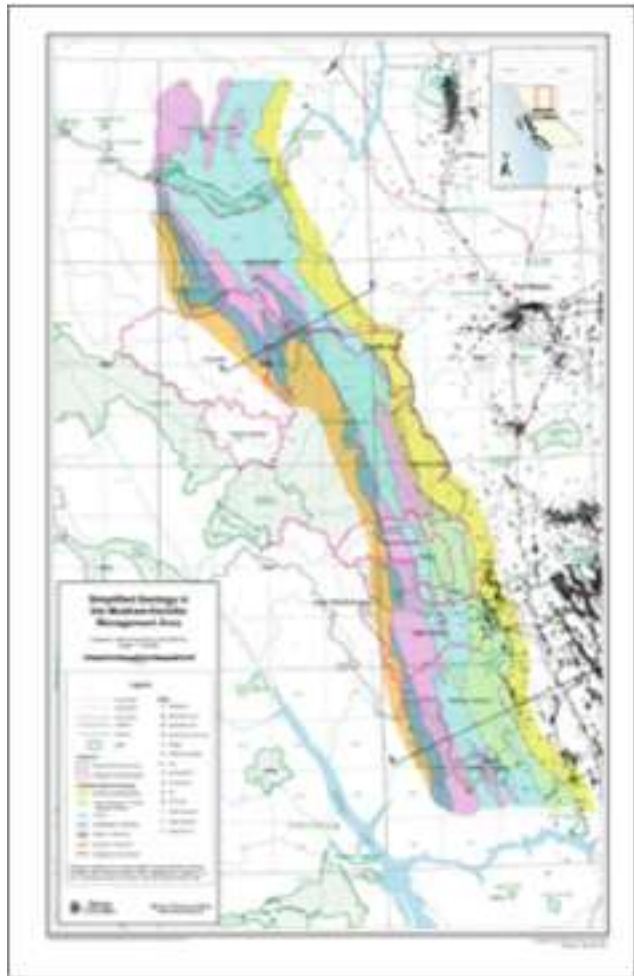


Рис. 4 Упрощенная геология вместе со скважинами, пробуренными в пределах Muskwa-Kechika. Интенсивные исследования восточной окраины являются доказательством плотности скважинных данных. К западу, где отмечены самые мощные осадочные комплексы, пробурено только девять скважин.



Рис. 5 Пример оконтуривания рельефа и выходящей на поверхность геологии. (Crt – меловые обломочные; UTrs – верхне-триасовые карбонаты; LTrs – нижне-триасовые обломочные).

Аэрогеофизика

ERA	PERIOD	British Columbia	Densities g/cc
CENOZOIC	TERTIARY		
MESOZOIC	CRETACEOUS	CLASTICS	25
	JURASSIC		UC
	TRIASSIC	CARBONATES	27
		CLASTICS	26
CARBONIFEROUS		CARBONATE/ CLASTICS	27

Рис. 6 Стратиграфические и плотностные комплексы Muskwa-Kechika.

означало, что необходимо было разрешить различные оперативные и интерпретационные проблемы, чтобы наметить главные объекты исследования.

Первая задача заключалась в разработке оперативных методов и обрабатывающих алгоритмов, которые могут воспользоваться преимуществом увеличенных сигналов, идущих от блока аппаратуры, размещенной на самолете, включающего магнитный градиентометр, LiDAR (лазерный локатор), цифровое видео и гравитационный градиентометр. Покрытие площади съемки полетами в трудных областях важно, ибо традиционные методы обработки не сохранили высокочастотный состав градиентометрических данных.

В результате разработан комплект задач, специально предназначенный для обработки и удаления нежелательных сигналов при работах в горных районах. Однако, имея такой по возможности сохраненный геологический сигнал, следующая задача состояла в том, как интерпретировать обилие информации, заключенной в этих данных (Davies et al., 2007; Davies and Barraud, in prep).

Первый сигнал, который получает аэро градиентометрическая система, является плотностной изменчивостью между воздухом и рельефом местности. Стало ясно, что традиционные методы поправок за топографию местности не могут быть соразмерны с высоко разрешающими данными. Имея разнообразные литологические обнажения на поверхности (включая высоко плотные карбонатные породы), три-модальное плотностное распределение не может быть достаточным корректным для всей области, и необходимо создать детальную малоглубинную модель земли (SEM), которая учтет всю изменчивость.

Главной целью поисково-разведочных работ в районе являлись миссисипские карбонаты горизонта Debolt на глубине 2 км под уровнем моря с 1.5 км топографическим рельефом. Чтобы отобразить каменноугольные структуры горизонта Debolt, SEM должна была точно удалить весь верхний слой в пределах пермо-триасовых обломочных пород до поверхности раздела.

Градиентометр измеряет скорость изменения плотности в подповерхностных слоях Земли, и были определены важные плотностные контакты, дающие возрастание градиентного сигнала в области, соответствующие меловому, верхне триасовому и нижне триасовому комплексам. Хотя могут быть незначительные вариации в пределах этих литологических комплексов, система эффективно измеряет совокупную плотность каждого слоя. Пример основных плотностных комплексов приведен на рис. 6.

Чтобы построить высокоразрешающую SEM, необходимо точное изображение топографии местности. Это было достигнуто использованием данных LiDAR для создания детальной цифровой топографической модели (DTM). Следующий этап заключался в получении карты поверхностной геологии для определения комплексов, выходящих на поверхность, и внесении их в DTM. В определенных областях карты поверхностной геологии

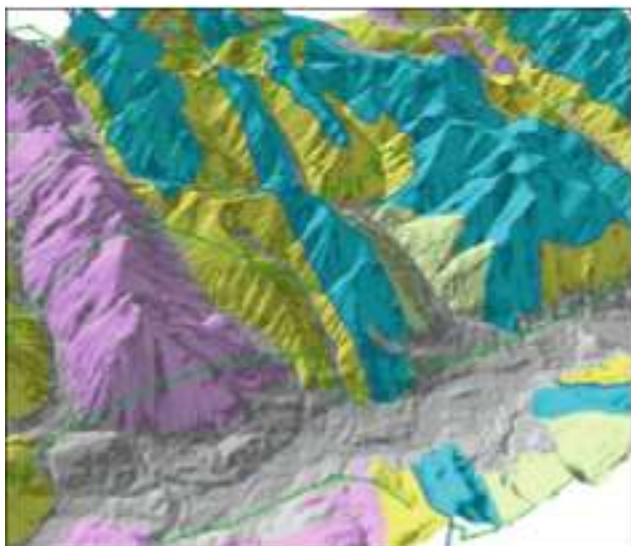


Рис. 7 Перекартированная поверхностная геология, объединенная с DTM.

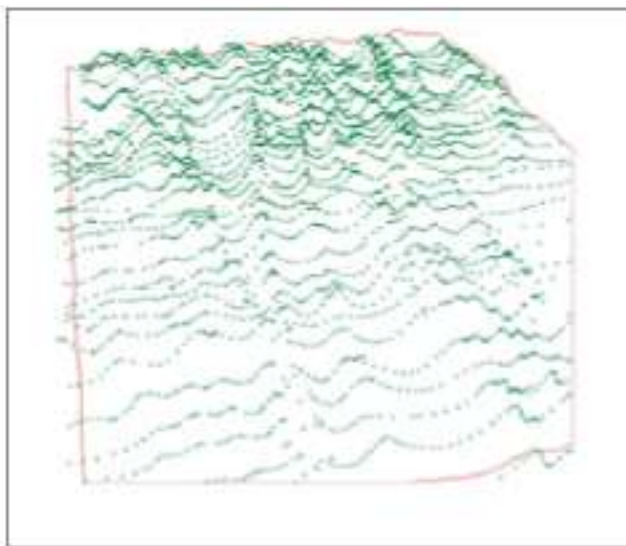


Рис. 8 Пример ограничений глубинной контактной поверхности, которая должна быть добавлена в SEM.

Аэрогеофизика

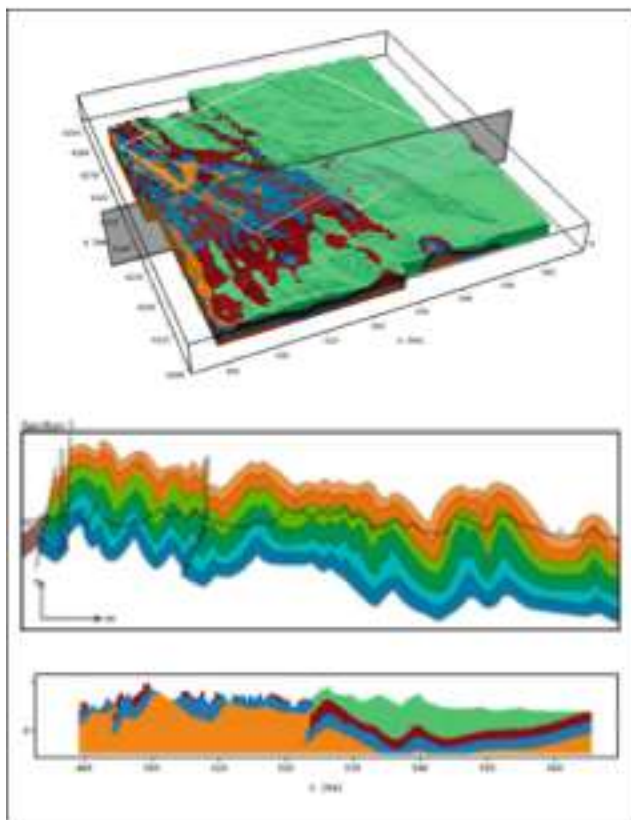


Рис. 9 Результаты SEM, сопоставленные с секущим разрезом (верхний правый) и разрезом через SEM (нижний правый).

были обнаружены неточности, и были использованы данные магнитной градиентометрии, чтобы заново откартировать карбонатные контакты, поскольку слабо железистые комплексы над и под карбонатами продуцируют слабый магнитный сигнал на поверхности обнаженных пород.

Результативная карта поверхности не учитывает глубинное распространение различных слоев, и было построено 30 геологических разрезов, пересекающих всю область съемки, для каждого выходящего на поверхность основного контакта. Результативные разрезы, давшие к тому же серии глубинных ограничений для каждого контакта, затем были включены во вновь созданную DTM, как изображено на рис. 7 и 8.

Следующий этап состоял в построении SEM по всей собранной информации для создания результативных поверхностей перед удалением их из полной модели земли. Примененная к поверхностям операция простого гридирования не точно учитывает топографическую изменчивость и, пользуясь методами анализа GIS (геоинформационная система), были привлечены данные LiDAR для формирования информации о наклоне и погружении поверхностей. Созданные результативные поверхности теперь могли быть заданы их относительной плотностной изменчивостью, дальше был вычислен градиентный отклик каждой основной контактной поверхности и удален из полной модели Земли.

Распределение остаточной плотности после вычитания должно теперь представлять плотностную изменчивость горизонта Debolt.

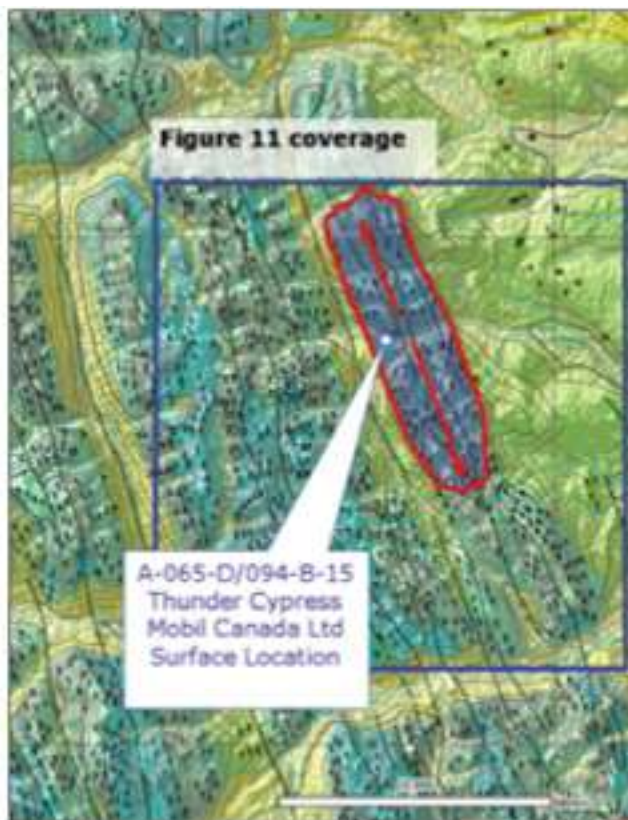


Рис. 10 Положение на поверхности земли и геология для скважины 94-B well. Также показано погружение и ось антиклинали.

Способность гравитационного градиентометра измерять существенно более высокую полосу частот с более высоким отношением сигнала к шуму привела к разработке новых методов обработки и интерпретации, завершающих построение точной SEM. Эта обработка впоследствии стала известной как методика BlueQube (Davies et al., 2007; Davies and Barraud, in prep).

Использование методики BlueQube для получения отклика верхних слоев и сигналов, возникающих от карбонатов горизонта Debolt, было ключевой задачей съемки. Методика, описанная выше, объединяет BlueQube данные и методику с открыто доступными данными. Пользуясь ретроспективным взглядом, мы теперь можем оценить предыдущие методики поисков и разведки, чтобы выяснить, может ли внести BlueQube метод дополнительное понимание объектов предыдущих исследований. Одним из таких районов является Thunder Cypress скважина, пробуренная и покинутая в 1993 г. Mobil Canada.

Скважина была пробурена, базируясь на поверхностной антиклинали и 2D сейсмических данных, которые дали изображение главной структуры. Несмотря на прослеживание данных погружающегося ствола скважины, скважина была слишком далеко от структуры, чтобы забурить новый ствол по направлению к осевой плоскости антиклинали, и поэтому была законсервирована. Результативная SEM, исправленная по гравитационным данным (рис. 11), весьма поучительна и показывает, что реальный структурный объект исследований располагается к востоку от поверхностной антиклинали. Причина этого в том, что антиклиналь горизонта Debolt располагается под поверхностью

Аэрогеофизика

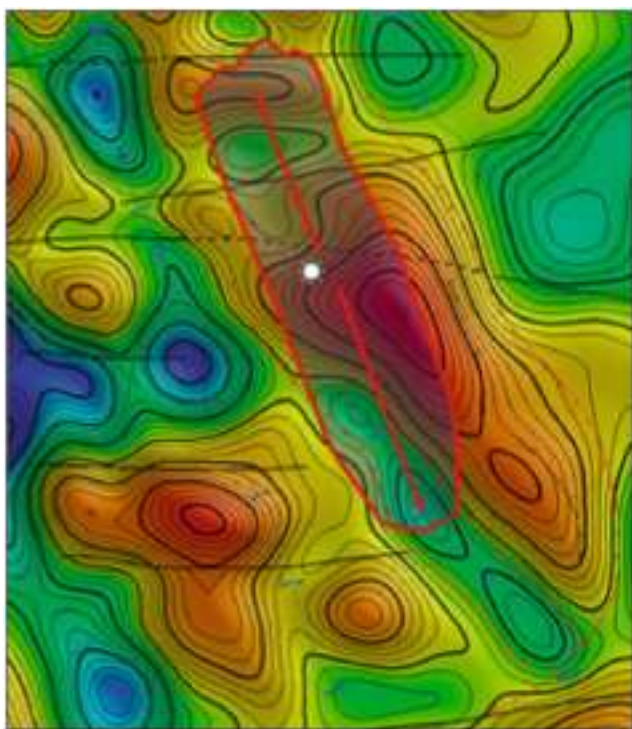


Рис. 11 G_{zz} подчеркивает сигнал, возникающий от структурной изменчивости горизонта Debolt. Теплые цвета показывают положительные структуры поднятия и холодные – структурные впадины.

раздела, расположенной внутри более молодого триасового слоя. Следовательно, сейсмическая линия бурения и установка для скважины Well 94-B фиксирована только северной границей сброса, ограничивающего антиклиналь (Davies et al., 2007; Davies and Barraud, in prep).

Если данные BlueQube были бы доступны на время идентификации объекта исследования, положение скважины, возможно, было бы изменено. В Muskwa-Kechika, обработка методом BlueQube выделила много представляющих интерес областей на структурной карте, полученной по локализованному сигналу от структур горизонта Debolt. Поэтому эти карты были использованы в качестве мотивации при принятии решений по сдаче в аренду и для выделения других участков, представляющих интерес. В пределах области съемки существует ограниченное 2D сейсмическое покрытие. Методика SEM может быть далее усовершенствована, используя эту дополнительную информацию, придающую большую достоверность результатам. Включенный в процесс обработки результат, подлежащий сдаче, представляет 3D куб, содержащий поверхность структуры в изолиниях по горизонту Debolt.

Экономический стоимостно-функциональный анализ

Определение стоимости информации (VOI) какой-либо сети данных и ее роли для поисков и разведки является сложной задачей, и много компаний имеют свой собственный метод расчета эффективности определенных данных в конечной наличной стоимости (NPV) исследований на разведываемом участке. Новая методология может часто страдать из-за не полностью учтенного в порядке принятия решений истинного эффекта или расчета VOI. Рассмотрен основанный на независимом изучении, проведенном Qittitut Consulting и введенном в действие ARKeX, экономический стоимостно-функциональный анализ (EVA), использующий

холмы подножия		шкала оценки		
	1		1	
Аэро покрытие	10%	Аэро покрытие	10%	Аэро покрытие
Допустимое время	>1 года	Допустимое время	>1 года	Допустимое время
Допустимая стоимость	Очень высокая	Допустимая стоимость	Очень высокая	Допустимая стоимость
Время съемки	>1 года	Время съемки	>1 года	Время съемки
Стоимость съемки/кв. миля	>\$100,000	Стоимость съемки/кв. миля	>\$100,000	Стоимость съемки/кв. миля
Изображение структуры	нет	Изображение структуры	нет	Изображение структуры
Вероятность геологического успеха	нет	Вероятность геологического успеха	нет	Вероятность геологического успеха
Стратиграфическая идентификация	нет	Стратиграфическая идентификация	нет	Стратиграфическая идентификация
Тип флюида	нет	Тип флюида	нет	Тип флюида
Тип идентификации	нет	Тип идентификации	нет	Тип идентификации
Оценка объекта исследования	нет	Оценка объекта исследования	нет	Оценка объекта исследования
Выбор положения скважины	нет	Выбор положения скважины	нет	Выбор положения скважины
Информация для геологического моделирования	нет	Информация для геологического моделирования	нет	Информация для геологического моделирования

Рис. 12 Пример количественной оценки показателей и шкала оценок.

Аэрогеофизика

холмы подножия		шкала оценки		холмы подножия		холмы подножия	
		1	1			1	
покрытие	10%	покрытие	10%	покрытие	10%	покрытие	
Допустимое время	>1 года	Допустимое время	>1 года	Допустимое время	>1 года	Допустимое время	
Допустимая стоимость	Очень высокая	Допустимая стоимость	Очень высокая	Допустимая стоимость	Очень высокая	Допустимая стоимость	
Время съемки	>1 года	Время съемки	>1 года	Время съемки	>1 года	Время съемки	
Стоимость съемки/кв.	>\$100,000	Стоимость съемки/кв.	>\$100,000	Стоимость съемки/кв.	>\$100,000	Стоимость съемки/кв.	
Изображение структуры	нет	Изображение структуры	нет	Изображение структуры	нет	Изображение структуры	
Вероятность геологического успеха	нет	Вероятность геологического успеха	нет	Вероятность геологического успеха	нет	Вероятность геологического успеха	
Стратиграфическая идентификация	нет	Стратиграфическая идентификация	нет	Стратиграфическая идентификация	нет	Стратиграфическая идентификация	
Тип флюида	нет	Тип флюида	нет	Тип флюида	нет	Тип флюида	
Идентификация объекта исследования	нет	Идентификация объекта исследования	нет	Идентификация объекта исследования	нет	Идентификация объекта исследования	
Оценка объекта исследования	нет	Оценка объекта исследования	нет	Оценка объекта исследования	нет	Оценка объекта исследования	
Выбор положения скважины	нет	Выбор положения скважины	нет	Выбор положения скважины	нет	Выбор положения скважины	
Информация для геологического холмы подножия	нет	Информация для геологического холмы подножия	нет	Информация для геологического моделирования	нет	Информация для геологического холмы подножия	
					шкала оценки		

Рис. 13 Количественные оценки показателей после проведения моделирования

BlueQube на множестве ситуаций. Создан ряд административных оценочных ведомостей, помогающих геологам-разведчикам в вычислении VOI по таким данным. Первый этап работы EVA заключается в определении ряда показателей, которые являются важными наряду со шкалой оценок для каждого из них. Примеры выбранных показателей приведены на рис. 12.

Определен ряд показателей, каждый из которых задан в шкале оценок. Следующий этап заключается в задании численной величины для каждого типа данных по каждому из показателей. Обычно сбор сейсмических данных сопоставляется с получением гравиметрических градиентометрических данных. Определение количественных показателей выполняется по до- и пост осуществленному моделированию. Построенная модель помогает определению, если методика способна измерить целевые объекты в присутствии приобретенного и инструментального шумов. Не все модели работают, и это является важной до отборочной стадией обработки. В случае съемки Muskwa-Kechika построенная модель показала, что ожидаемые сигналы обнаружены в рамках методологии.

Легко понять, что комбинированная с сейсмическими данными аэросъемка значительно выгоднее, чем полученные сейсмические данные.

Это подчеркивается количественными оценками первоначальных показателей. Поскольку рассмотрены другие показатели, сейсмические данные труднее количественно оценить, например градиентометрия недостаточна для стратиграфической идентификации. Выбранные количественные оценки мало зависят от типа геологии, которая может быть встречена, и ожидаемых специфических логистических и экономических факторов. В случае съемки Muskwa-Kechika, где доступ к получению информации является доминирующим фактором, ясно, что данные BlueQube имеют преимущество перед сейсмическими данными.

Представленная количественная оценка не является конечным этапом EVA, и каждому показателю необходимо присвоить весовые коэффициенты в порядке их значимости. В некоторых районах, где аренда имеет длительный срок, допустимое время и покрытие аэросъемкой не могут быть в той же степени важны, как изображение структур и т.д.

С увеличением набора количественных оценок с выбранным весовым коэффициентом, связанных с каждым показателем, исследователи могут преобразовать результат окончательной количественной оценки, основываясь не только на применимости методологии, но также и на значимости этих показателей для объектов исследования. Конечный этап анализа состоит в

Аэрогеофизика

Весовые коэффициенты				
0.25	0.5	0.75	1	2
Маленькая значимость, либо отсутствие ее	Низкая значимость	Средняя значимость	Высокая значимость	Очень высокая значимость

Рис. 14 Весовые коэффициенты, которые должны быть приложены к количественно оцененным показателям

холмы подножия	Эффективное отношение BlueQube к
Аэро покрытие	10
Допустимое время	10
Допустимая стоимость	10
Время съемки	2.5
Стоимость съемки/кв. миля	10
Изображение структуры	1.43
Вероятность геологического	1.43
Стратиграфическая идентификация	Не добавляет эффективности
Тип флюида	Не добавляет эффективности
Идентификация объекта исследования	1.43
Оценка объекта исследования	Не добавляет эффективности
Выбор положения скважины	Не добавляет эффективности
Информация геологического холмы подножия	Не добавляет эффективности
	Эффективное отношение BlueQube к сейсморазведке

Рис. 15 Эффективное отношение BlueQube к сейсморазведке в М.-К.

просмотр отношения эффективности двух методов исследования, чтобы проследить, как они влияют на каждый показатель. Там, где сравнительные отношения больше 1, может быть дополнительный эффект при использовании этих данных, и наоборот, если отношение равно 1 или меньше, считается, что не может быть дополнительной эффективности. В случае съемки Muskwa-Kechika конечное весовое эффективное отношение можно видеть на рис. 15.

Рассмотрение конечного эффективного отношения ясно показывает, где BlueQube имеет самое большое влияние. Последующая съемка и результаты изучения выделили эти эффекты и показали, что они могут иметь существенное влияние при исследовании надвиговых и складчатых поясов.

Выводы

Гравиметрическая градиентометрия измеряет более широкий диапазон с увеличенным отношением сигнала к шуму по отношению к традиционным методам, давая в результате больше геологических признаков. Чтобы использовать возросшую информацию, были разработаны и применены новые методы обработки и интерпретации. В случае надвиговых и складчатых поясов доказано, что методика способна выявлять структуры на глубине и помогать управлять процессами получения решений по аренде и планированием дальнейших геофизических исследований.

Экономический стоимостно-функциональный анализ показал отношения эффективности, ожидаемые при

использовании методологии, и показал, что она может быть применена в аналогичных условиях для планирования поисково-разведочных работ.

Благодарности

Благодарим Gary Barns, Joseph Barraud, и JEBCO за разрешение пользоваться их данными в этой работе.

Литература

- Bally, A.W., Gordy, P.L., and Stewart, G.A. [1966] Structure, seismic data and orogenic evolution of the southern Canadian Rockies. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 14, 337-381.
- Davies, M.A. [2002] Interpretation of the Zagros fold and thrust belt, Iran. In *Zagros GIS database Phase 2: Gravity and magnetic data, palaeofacies and isopach maps. Report Zagros 02. CASP* (Independent geological research organisation, affiliated to the Department of Earth Sciences at Cambridge University, UK).
- Davies, M.A. and Barraud, J. [In prep, 2007] Expanding foothills exploration in Rocky Mountains: Muskwa - Kechika, British Columbia using Gravity Gradiometry and an integrated workflow. *Geophysical Prospecting*, E.G.M. Special Issue, Blackwell Publishing.
- Davies, M.A., Barraud, J., and Wheeler W. [2007] Expanding foothills exploration in Rocky Mountains: Muskwa-Kechika, British Columbia. *EGM 2007 - Capri*, Extended Abstracts.
- Hatch, D., Kuna, S., and Fecher, J. [2006] Evaluation of an Airship Platform for Airborne Gravity Gradiometry. *AESC2006, Melbourne, Australia*.
- Lumley, J., Barnes, G., and Davies, M. (In prep) Noise in Airborne Potential Field Surveys Airgrav vs. Heligrav vs. airborne FTG, ARKeX. *To be submitted to Journal of Geophysics*.
- Lumley, J., Barnes, G., Huang, D., and Houghton, P. [2004] Fundamental Considerations of Gravity and Gravity Gradient Measurements. *ARKeX Technical note 01*.
- Monger, J.W.H. and Price, R.A. [1979] Geodynamic evolution of the Canadian Cordillera- progress and problems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16, 770-791.
- Price, R.A. and Mountjoy, E.W. [1970] Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca Rivers: A progress report. In: Wheeler, J.O. (Ed.) *Structure of the Southern Canadian Cordillera. Geological Association of Canada, Special Publication 6*, 7-25.
- Thompson, R.I. [1979] A structural interpretation across part of the northern Rocky Mountains, British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16, 1228-1241.