

Несейсмические и аэрометоды

Отбор зон, перспективных на углеводороды, на глубоководных границах материков по данным несейсмических методов

Hydrocarbon screening of the deep continental margins using non-seismic methods

Дж. Дерек Фэйрхед (J. Derek Fairhead), Крис. М. Грин (Chris M. Green) и Кирстен М. У. Флетчер (Kirsten M.U. Fletcher) из британской компании GETECH сообщают об увеличении ценности данных спутниковой альтиметрии в работах на углеводороды в связи улучшением разрешения этих данных.

Морские поисковые работы на нефть проводятся обычно в глубоководных акваториях у границ материков, где роль различных несейсмических методов возрастает, поскольку они используются для выделения перспективных участков для сейсморазведки и бурения. В настоящее время

используются гравимагнитные методы, а также многочастотная радиолокация со спутников (Synthetic Aperture Radar, SAR) или авиационные аналоги последней, обнаруживающие на поверхности моря пятна просочившейся с глубины нефти. После проведения сейсмических работ для повышения эффективности дальнейшего бурения в последнее время все чаще применяется электроразведка с контролируемым источником (морские дипольные зондирования), которые позволяют установить наличие непроводящего слоя в целевом горизонте (коллекторе). Применение этого метода отчасти объясняет поразительную серию успехов ExxonMobil у побережья Анголы.

В этой работе рассмотрены вопросы использования данных спутниковой альтиметрии при отборе перспективных зон на границах материков, часто – в комплексе с анализом пятен и других геофизических данных, в частности морской и аэромагниторазведки. Авторы уже писали в *First Break* (Fairhead *et al.* 2001a) о возможности устанавливать по данным спутниковой альтиметрии аномалий с пространственным периодом 10 км и более и приводили примеры по прибрежным зонам Западной Африки, Таиланда Africa, Gulf of Thailand, Мексиканского залива, и полуострова Юкатан в Мексике.

За прошедшее время (2002-2004) GETECH предпринял крупное совместное исследование для дальнейшего развития обработки спутниковых данных и создания карты поля силы тяжести на все свободные от льда районы границ материков (Рис. 1). Данные покрывают акваторию от линии 2-5 км от берега до 500 км в сторону океана. Данные можно применять для обнаружения и картирования тонких деталей строения разломных зон океанических плит, которые воздействуют на границы материков и разбивают их. Разница между этими данными и общедоступными данными спутниковой альтиметрии состоит в том, что в спутниковых сигналах ERS1 (около половины данных, использованных в проекте) сигналы не очень хорошо записаны и на длинах волн менее 100 км сильно зашумлены, а на длинах волн

30-40 км – ненадежны. Фильтрация и повторная обработка исходных данных с использованием трансформаций высот геоида в значения поля силы тяжести лишь немного улучшали разрешение данных (after Fairhead *et al.* 2001b). Лишь путем повторного отбора отсчетов удалось получить данные по высотам с «окончательным» разрешением и тем самым целиком привести разрешение данных в требуемый для исследования диапазон.

Переход от изменений отметок уровня моря к значениям силы тяжести в редукции Фая (в свободном воздухе) сам по себе не нов. Новизна состоит в возможности использовать имеющиеся спутниковые данные для выделения аномалий размером с периодом менее 10 км по всей Земле на расстоянии менее 5 км от берега. В этой статье обсуждается методика и приведены примеры того, как можно работать со сложными данными (по устьям крупных рек, по местам мощных океанских течений и в прибрежной зоне (Рис. 1).

В середине 1980-х Уильям Хэксби (William Haxby, (1987) построил первую глобальную карту поля силы тяжести по данным альтиметрии спутника SeaSat с расстоянием между витками орбиты по экватору 150 км. Эта карта, оказала значительное влияние на развитие тектоники плит, поскольку данные по аномалиям силы тяжести в свободном воздухе впервые дали единообразную картину тектоники океанической коры Земли. Тем не менее, из-за расстояния между витками разрешение карты было ограничено.

С тех пор для улучшения разрешения поля силы тяжести по данным спутниковой альтиметрии прилагались значительные усилия. Крупный успех последовал в 1995 г. после публикации данных альтиметрии со спутников Geosat и ERS1 (Geodetic Missions, GM). Комбинируя их орбиты, удалось достичь



Рис. 1. Покрываемость наблюдениями в рамках Глобального исследования поля силы тяжести на границах материков. Показаны места, упомянутые в этой работе в качестве примеров.

Несейсмические и аэрометоды

Рис. 2. Расчет поля силы тяжести по спутниковым

расстояния между витками 3 км по экватору со сгущением к полюсам. В результате появилась яркая глобальная модель поля силы тяжести Сэндвелла и Смита (Sandwell and Smith, 1997), основанная на данных об уровне моря, предоставленных НАСА (Geosat) и Eurimage (ERS1). Несмотря на высокую плотность витков (около 3 км), среднее разрешение этих новых данных не превысило, как ни странно, 30-40 км.

В 1993 г. GETECH, начав сотрудничать с Международным бюро силы тяжести (International Gravity Bureau), расположенным в Тулузе, Франция, показала, что, улучшая и уточняя процедуры обработки для тех же общедоступных данных, разрешение можно поднять до 20 км (Olgiati *et al*, 1995).

Визуальное сравнение данных ERS1 по повторным пролетам выявило, что значительный уровень шума должен быть связан с общей проблемой записи отраженного радарного сигнала. Поэтому GETECH начала исследование этой проблемы, проводя повторный отбор отсчетов высот геоида (и витков спутника) по «сырым» радарным записям (Maus *et al*, 1998). Ранее повторная обработка наборов данных GM по спутникам Geosat и ERS1 не проводилась. Отчасти это связано с большими объемами данных. Так, на запись всего набора данных GM по спутникам Geosat и ERS1 (130 млн. Гбайт) на диск в 1997 г. требовалось полгода, а на загрузку его в память ЭВМ – 3 месяца. GETECH получил средства сперва от правительства Великобритании, а затем и от группы нефтяных компаний, на разработку технологии обработки и опробование ее на данных по Мексиканскому заливу. Исследование прошло так успешно, что в 2002 г. группа нефтяных компаний выделила средства на глобальное картирование границ континентов в областях, свободных от льда. (рис. 1).

данным: граф обработки

Метод обработки спутниковых данных

Проще всего понять, что такое расчет силы тяжести по спутниковым данным и чем он определяется, если представить себе сейсмические работы по картированию поверхности моря с высоты 800 км над Землей. Поверхность моря, без учета возмущающих факторов – ветров, течений, приливов, колебаний температуры и др. – это эквипотенциальная поверхность поля силы тяжести Земли. «Вертикальная производная» этой эквипотенциальной поверхности (уровня моря) дает аномалии поля силы тяжести в свободном воздухе на уровне этой поверхности, а не на высоте 800 км, где находится спутник. Источником в таких работах является установленный на спутнике радар, который 1020 раз в секунду излучает импульсы с центральной частотой 13.5 ГГц. После накопления на борту (50-кратного для ERS1 и 100-кратного для Geosat) данные на Землю передаются отрезки записей по 0.05 с (ERS1) или 0.1 с (Geosat). Накопленные записи относятся к точкам, расположенным в 350 м (ERS1) или 700 м (Geosat) одна от другой по проекции орбиты на поверхность Земли. Шаг записи составляет 3 нс, что на уровне моря соответствует 45 см. На Geosat шаг записи в области фронта сигнала учащался до 1.5 нс.

Можно считать, что обработка данных состоит из трех отдельных этапов (рис. 2): отбор отсчетов; передача высот, ввод поправок за приливы и редактирование; и, наконец, слияние обоих наборов данных с пересчетом высот геоида в аномалии силы тяжести с точным расчетом значений с малым шагом по высоте (Fairhead *et al*, 2001b).

На рис. 2 показан граф обработки. На всех шагах обработки используется единая база данных, в которой для каждой точки хранятся изменения, внесенные при редактировании и вводе поправок за сухую или влажную тропосферу, за приливы и др. Хранение изменений в базе данных позволяет при необходимости отменить или изменить их на следующих этапах обработки.

При обработке данных применяются такие операции:

1. **Формирование сигнала (отбор отсчетов):** Работа над отбором отсчетов из данных ERS1 шла семь лет и привела к созданию метода, позволяющего решать проблемы с шумом и искажениями отсчетов на фронте сигнала (с данными Geosat таких проблем не было, потому что в области фронта сигнала шаг записи был вдвое чаще) а также с различиями в форме последовательных сигналов. Для отслеживания приходов сигнала формировался синтетический импульс (рис. 3) с такой же амплитудой и крутизной, как у фронта сигнала, по которому можно определить положение середины импульса. (50% среднего уровня моря, рис. 4). Далее по синтетическому и измеренному сигналам вычисляется их взаимно-корреляционная функция, которая дает их времена прихода. Таким образом, было обработано до 40 сигналов и определены 42 неизвестных величины: средняя амплитуда, средняя крутизна и 40 времен прихода. Этот метод позволяет выделить сигналы, не отвечающие заданным требованиям и исключить их из дальнейшего анализа и/или изучить визуально. Такой анализ позволяет уверенно выделять сигналы на расстоянии 2-5 км от береговой линии.

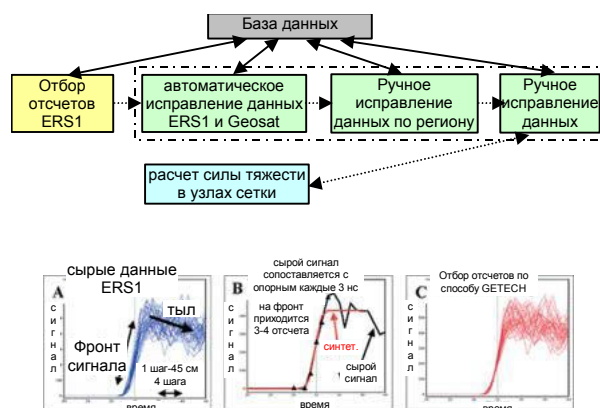


Рис. 3. Результат накопления 40 последовательных сигналов (2 с или 14 км по орбите). Если бы фронт сигнала не был искажен, накопление прошло бы идеально. (А) результат накопления плохо отобранных данных с сильным шумом; (В) синтетический сигнал (показан красным), сопоставляемый с данными по форме фронта и значениям.; (С) результат накопления после отбора отсчетов по способу GETECH: разброс сократился в 5 раз

Несейсмические и аэрометоды

2 Ввод поправок и редактирование: В данные обнаружения орбиты с зашумленными данными, альтиметрии следует ввести несколько поправок для отскоки устраняются с помощью программы компенсации влияния внешних факторов, действующих на визуализации орбит. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет удален весь значительный шум и все отскоки.

3. Пересчет высот геоида в значения силы тяжести.: Преобразование высотных отметок уровня моря в эквивалентные значения силы тяжести – процесс сложный. Отметки уровня моря можно рассматривать как высоты геоида. В отличие от Сэндвелла и Смита (1997), применявших «производную по направлению», авторы использовали «пересчет высот геоида в поле силы тяжести». Причиной тому послужили необходимость получить надежную модель геоида и то, что при наличии шумов в данных и нерегулярной сети наблюдений процесс интерполяции геоида более устойчив к помехам, чем дифференцирование данных, заданных на сетке. Кроме того, результат, полученный таким образом, более изотропен в экваториальной области. Для подавления помех, связанных с направлением орбиты, приходится применять методы, связанные с расчетом изолиний. Кроме того, такой подход снижает помехи, связанные с океанскими течениями, которые нельзя устранить из-за их изменчивости в пространстве и во времени.

Перед началом редактирования из отметок уровнем моря вычитается долгопериодическая составляющая, рассчитанная по разложению на сферические гармоники (определение геоида EGM96), и получается остаточные отметки уровня моря (ООУМ). Польза ООУМ состоит в том, что их можно непосредственно визуализировать в ходе редактирования; кроме того, для них более трансформация высот геоида в поле силы тяжести проходит более устойчиво.

Автоматическое исправление самых больших отскоков в данных проводится по нескольким алгоритмам, учитывающим градиент между точками и по алгоритму, использующему метод наименьших квадратов для статистического анализа в некотором окне. Так выделяются наихудшие точки, выходящие за установленные пользователем пределы. На этом этапе удаляется около 6% точек, расположенных главным образом в высоких широтах, где данные искажены влиянием льда.

Ручное редактирование в несколько проходов – очень длительный, но необходимый этап, который проводится до и после построения геоида и перехода к силе тяжести для устранения ураганных отскоков. Сначала данные по всем положениям орбит редактируются с использованием компьютерной визуализации, что позволяет отслеживать до 15 последовательных положений орбиты и удалять любые данные, несоответствующие соседним положениям. После первичного редактирования по данным строятся изолинии, производится пересчет на сетку и строится их карта, по которой оценивается остаточный шум. При

На рис. 5 показан «пересчет высот геоида в поле силы тяжести» по Черному морю после вычитания высот геоида EGM96 на полуградусной сетке. Метод основан на удалении ошибок определения орбит без фальсификации данных. Это достигается применением перекрестного исправления ошибок, а затем – способа расчета изолиний собственной разработки GETECH.

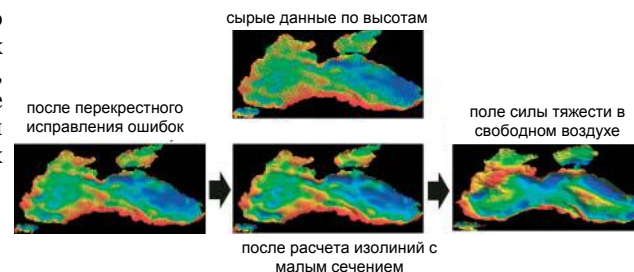


Рис. 5. Пересчет высот геоида в поле силы тяжести для области Черного моря с расчетом изолиний с малым сечением для уменьшения ошибок в уровне моря. Красный – максимумы (+), синий – минимумы (–).

Затем высоты геоида в виде изолиний с малым сечением преобразуются в значения силы тяжести с применением метода оболочек и БПФ по сферическим гармоникам в нескольких перекрывающихся диапазонах. По сути, речь идет о применении оператора вертикальной производной потенциального поля к поверхности геоида. Затем для получения аномалий силы тяжести в свободном воздухе значения силы тяжести восстанавливаются по опорной модели геоида EGM96.

Примеры с высоким разрешением

Чтобы почувствовать преимущества повышенного разрешения, рассмотрим несколько примеров со сложными данными.



Рис.4. Схема изменения формы отраженного сигнала при изменении состояния поверхности моря. Средний уровень моря (ср. УМ) определяется по 50% уровню падающего (AB для спокойного моря) и возникающего (CD для бурного моря) сигнала. Спокойная поверхность моря показана черным, бурная – красным.

Несейсмические и аэрометоды

Окрестности устья Амазонки: Поскольку соседние положения орбит проходятся спутником не последовательно (промежутки между проходами может достигать года), в таких местах, как устья крупных рек, при определении отметок уровня моря могут возникать большие сложности из-за сезонных и более длительных изменений солёности, температуры и водосброса. В общедоступных данных ошибки из-за направления орбиты в таких местах могут быть столь велики, что сами данные теряют ценность.

GETECH решает эти проблемы, применяя способ расчета изолиний с малым сечением, которым в этих проблемных областях рассчитать изолинии без потери информации на высоких пространственных частотах. На рис. 6 показаны результаты применения графа обработки, после каждого из следующих этапов: А) после перекрестного устранения ошибок; виден высокий уровень остаточных ошибок в положениях орбит, В) после расчета изолиний с малым сечением; виден лишь высокочастотный (пространственный период около 5 км) шум; С) после перехода к значениям силы тяжести и D) расчета полного градиента поля, чувствительного к любым ошибкам из-за отклонения орбит (в этом примере таких ошибок нет).

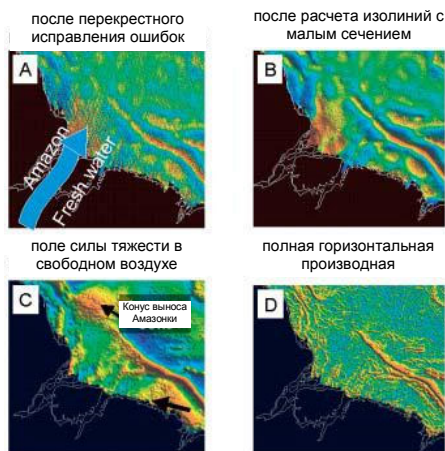


Рис. 6. Этапы обработки при расчете аномалий силы тяжести в свободном воздухе (С) и ее полной горизонтальной производной (D).

Океанские течения у берегов Южной Африки: Океанские течения проявляются в отметках уровня моря в виде долгопериодических компонент, переменных во времени и пространстве. Пример приведен на рис 7А, где океанское течение пересекает серию соседних положений орбиты. Влияние смещения течения видно в левой части графиков, где положения орбит заметно отличаются на средних и низких частотах. Напротив, в правой части влияние течения меньше, и здесь орбиты примерно параллельны. При формальном сведении данных с этих орбит на сетку возникает сильный высокочастотный шум, связанный со сравнительно малым расстоянием между соседними положениями орбит.

На рис. 7В показаны ООУМ по участку близ Африканского мыса (Гвинейский залив?) после перекрестного удаления ошибок и расчета изолиний. В середине рисунка видна полоса с сильным шумом, связанная с океанским течением, идущим примерно с

востока на запад. Если не учесть эти искажения, то при переходе к силе тяжести этот высокочастотный шум при дифференцировании по вертикали задавит полезный сигнал в поле силы тяжести. Однако, аккуратно применив свой метод расчета изолиний с малым сечением, GETECH смогла устранить шум, связанный с течением, без потери полезного сигнала (рис. 7С).

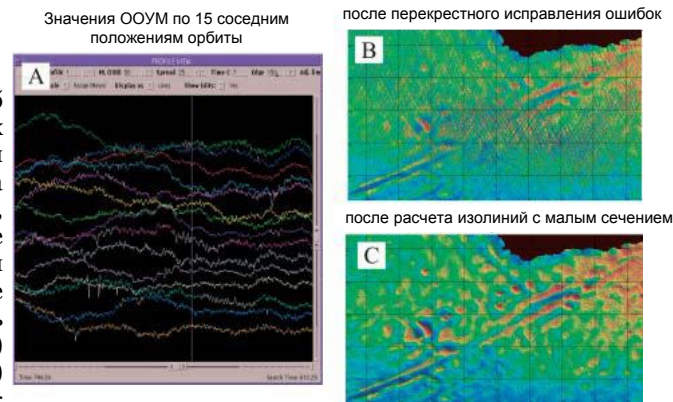


Рис. 7. Эффективное подавление сигнала от океанского течения без потерь полезного сигнала на высоких частотах (квадрат сетки $2^\circ \times 2^\circ$).

Определение силы тяжести на прилегающей суше: В ходе отбора отсчетов из записей спутника ERS1, следующих с интервалом 0.05 с., было установлено изменение формы сигнала в прибрежной зоне, что позволило удалить негодные записи еще до расчета параметров сигнала. После сведения этих данных с тщательно исправленными данными Geosat, следующими через 0.1 с, удалось получить значения силы тяжести на расстоянии 2-5 км от берега (в общедоступных данных – 50 км). Хороший пример (северная часть острова Сулавеси) приведен на рис. 8. Здесь по нашим спутниковым данным получены ясные значения как аномалий силы тяжести в свободном воздухе, так и ее полная горизонтальная производная. Это позволяет легче сопрягать данные спутниковых наблюдений над акваториями и наземной гравиметрии.

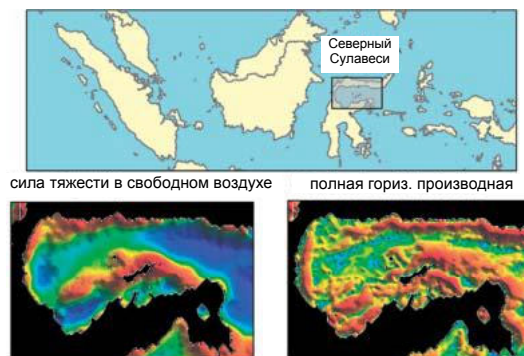


Рис. 8. Улучшения расчета силы тяжести у берега (2-5 км). Глобальные данные по магнитному полю на границах материков

Ценным (но редко используемым) источником данных является общедоступное собрание магнитных данных, составленное NGDC (www.ngdc.noaa.gov) по широкой совокупности научных, промышленных и правительственных ресурсов. Дополняя их своими съемками, можно получить впечатляющую плотность

Несейсмические и аэрометоды

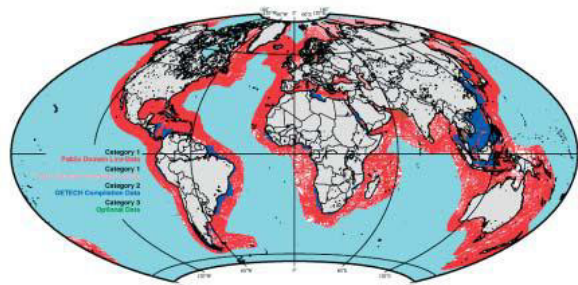


Рис. 9. Покрытие наблюдениями в рамках Глобального исследования магнитного поля на границах материков (общедоступные данные и наб.

Данные магниторазведки после повторной обработки

Поле силы тяжести в свободном воздухе

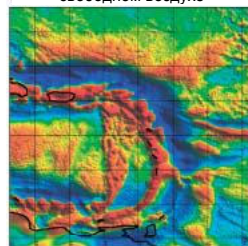
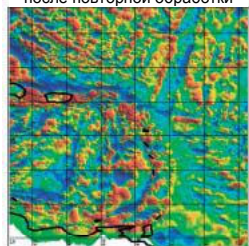


Рис. 10. Сопоставление магнитных данных (после переобработки общедоступных) и спутниковой гравиметрии по Карибскому бассейну. (квадрат $2^\circ \times 2^\circ$)

наблюдений. В настоящее время GETECH ведет повторную обработку этих общедоступных данных для нужд нефтяной отрасли на территории обследованной в ходе глобального картирования границ материков в поле силы тяжести (рис. 1). На рис. 9. показана область, по которой имеются данные, а на рис. 10 – пример того, как улучшаются эти данные при повторной обработке с использованием разработанного GETECH метода расчета изолиний с малым сечением по сравнению со многими другими попытками (DNAG, NAMAG-2003 и др.; не показаны).

Эти данные регистрировались как абсолютные значения магнитного поля и содержат различные ошибки и шумы, в том числе связанные с отскоками, магнитными бурями, суточными вариациями и короткопериодическими вариациями. Для устранения некоторых шумов требуется тщательный просмотр и редактирование данных, некоторые могут быть подавлены детерминистскими методами, а остальные можно рассматривать как аналог сигнала с большим пространственным периодом, связанного с течениями в океане (рис. 7). К этим данным можно применить метод расчета изолиний с малым сечением (рис. 10), что даст высокое разрешение всех сигналов с малым пространственным периодом. Наличие или отсутствие корреляции поля силы тяжести и магнитного поля дает важную дополнительную информацию о строении разреза.

В экваториальных областях осадочные бассейны часто проявляются как гладкие положительные магнитные аномалии простой формы, и в простейшем случае, чтобы дать прогноз положения бассейна, достаточно выделить такие аномалии. На рис. 11 приведен пример (Малайский бассейн у берегов Малайзии) того, как геометрия бассейна проявляется в магнитном поле.

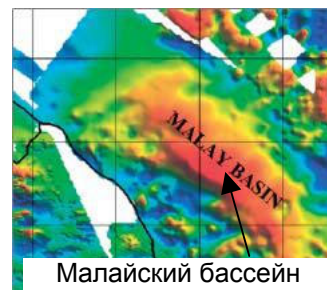


Рис. 11. Крупная гладкая положительная аномалия полного магнитного поля над Малайским осадочным бассейном у побережья Малайзии (квадрат $1^\circ \times 1^\circ$)

Хотя в бассейне накоплены осадки мощностью 14 км, эти отложения пониженной плотности почти никак не проявлены в поле силы тяжести! Это связано с изостатической компенсацией за счет поднятия границы Мохо под бассейном. Очевидно, данные гравиразведки и магниторазведки следует использовать совместно, а не по отдельности. Не везде есть столь хорошее покрытие территории магнитной съемкой, как в приведенных примерах (рис. 10 и 11). В таком случае важную информацию можно получить и по отдельным магнитным профилям.

Заключение

Ценность данных спутниковой гравиметрии с высоким разрешением (менее 10 км и 2-3 мГал) при изысканиях признана многими нефтяными компаниями. Их используют при региональном изучении геологического строения местности в масштабах концессии и мельче для выделения структур, перспективных для дальнейшего исследования. Данные несейсмических методов, в том числе данные магниторазведки, будь то по профилям или по плотной площадной сети, и анализа нефтяных пятен, являются информативными при изысканиях и позволяют снизить затраты. Снижение затрат происходит в данном случае из-за того, что эти несейсмические данные используются для установления участков где окупится стоимость дорогих и сложных (в оригинале – speculative; прим. перев.) сейсморазведочных работ. Это, наверное, не те слова, которые хотят слышать сейсморазведочные компании!

Литература

- Fairhead, J. D., Green, C. M. and Dickson, W.G. [2001a] Oil exploration from space: fewer places to hide. *First Break*, **19.9**, 514-519.
- Fairhead, J. D., Green, C. M. and Odegard, M. E. [2001b] Satellite derived gravity having an impact on marine exploration. *The Leading Edge* (August), 873-876.
- Haxby, W. F., [1987] *Gravity field of the world oceans*. National Geophysical Data Center, NOAA, Boulder, CO.
- Maus, S., Green, C. M. and Fairhead, J. D. [1998] Improved ocean-geoid resolution from retracked ERS1 satellite altimeter waveforms. *Geophysical Journal International*, **134**, 243-253.
- Olgiati, A., Balmino, G., Sarraillh, M., and Green, C. M. [1995] Gravity anomalies from satellite altimetry: comparison between computation via geoid heights and via deflections of the vertical: *Bulletin Geodesique* **69**, 252-260.
- Sandwell, D. T. and Smith, W.H. F. [1997] Marine gravity anomaly from Geosat and ERS1 satellite altimetry. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 10,039-10,054.