

Сейсморазведка под декканскими базальтами: проблемы сейсмического картирования и решения

Prospect hunting below Deccan basalt: imaging challenges and solutions

Dhananjay Kumar,^{1,2} Ravi Bastia,² and Debajyoti Guha²

Аннотация

Мощные мезозойские отложения под базальтовым слоем декканских (Deccan) траппов вдоль северо-западного побережья Индии, вместе с отложениями бассейна р. Инд в Пакистане, рассматриваются как возможные целевые объекты разведки на нефть и газ. Поскольку декканские траппы состоят из многослойных лавовых потоков, сейсмическое построение этих отложений под базальтами выполнить сложно. Проблемы сейсмического построения, связанные с высокоскоростными базальтами, включают в себя:

1. Многократные волны, возникающие в слоистой толще базальтов и между кровлей базальтов и дном моря.
2. Рассеяние и поглощение энергии неоднородностями.
3. Образование обменных волн на кровле базальтов.

Исследования, основанные на фильтрации Радона, могут помочь решить некоторые проблемы, связанные с многократными волнами. Другие методы, предлагаемые для улучшения построений под базальтами – это использование низкочастотных источников и многокомпонентная технология. Отложения декканских базальтов очень неоднородны и не могли быть эффективно откартированы высокоразрешающей сейсморазведкой. В настоящее время есть данные об этих отложениях, полученные только стандартными сейсмоприемными косами. Сейсморазведка, основанная на моделировании, вместе с другими методами может улучшить результаты построений под базальтами и добавить доверия моделированию месторождений. В этой статье обсуждаются перечисленные выше трудности построений на примере бассейна Кутч (северо-западная окраина Индии), где первичное месторождение (бхуджские (Bhuj) отложения) перекрыто мощными базальтовыми отложениями.

Введение

Залив Кутч, в северной части западного побережья Индии, представляет собой уникальный бассейн, в котором базальтовый поток отделяет третичные отложения от мезозойских, залегающих ниже. Эти базальтовые породы мелового возраста известны как декканские траппы. Базальты образованы многослойными вулканическими потоками, которые предполагают, по меньшей мере, 40 периодических излияний лавы с формированием отложений внутри траппов (ref. Short and Blair, 1986, Chapter 3). В результате сформировались неоднородные слои базальтов, которые значительно затрудняют построения под собой. Построения ниже базальтового слоя стало важной темой обсуждения в геофизическом сообществе, так как объекты поиска затеняются особым поведением упругих волн в базальтах. Скорости сейсмических волн в базальтах (скорость продольных волн (P-волн) меняется от 4 до 6 км/с) выше, чем во вмещающих породах.

Это приводит к отклонению луча, образованию обменных волн и рассеянию энергии колебаний. Специальный номер журнала *Geophysical Prospecting* (май 2003г.), посвященный построениям под базальтами, касался различных проблем регистрации и обработки данных о базальтовых отложениях. Основные поставленные вопросы это:

1. Многократные волны, возникающие внутри базальтовых отложений и между кровлей базальтов и дном моря.
2. Рассеяние и поглощение энергии неоднородностями.
3. Возникновение обменных волн на кровле базальтов.

Разные авторы предложили различные методы улучшения изображения ниже базальтов в зависимости от района работ и связанных с ним проблем. Основным интересом представляет интерференция многократной волны и однократно отраженной волны, с которой обычно борются при помощи фильтрации Радона (ref. Yilmaz, 2001, Chapter 6; Spitzer et al., 2003). Еще одна проблема – это изменение частотного состава на границе раздела базальтов и осадочных пород, вызываемое различной степенью рассеяния на высоких частотах. Ziolkowski, et al. (2003) предложил использовать низкочастотный (менее 30 Гц) источник, что позволит сейсмическим волнам пройти через базальты. Также, из-за большой разницы в скоростях, на границе базальты – осадочные породы имеет место устойчивое образование обменных волн. На границе раздела энергия первичной продольной (P-) волны преобразуется в энергию поперечной (S-) волны. В такой геологической ситуации многокомпонентные данные могут лучше отразить строение толщ под базальтами (Wang and Singh, 2003), благодаря общей информативности P-волн и S-волн. Hanssen, et al. (2000, 2003) также сделал вывод о том, что частично преобразованные поперечные волны (со слабым сигналом) трудно использовать для построения под базальтами. Другая проблема – это затухание амплитуды (неупругий сейсмический эффект), вызываемое неоднородностями, которое должно быть компенсировано в процессе обработки сейсмических данных. Для компенсации неупругих эффектов может быть использована обратная Q-фильтрация (Yilmaz, 2001). В соответствии с упомянутыми выше работами, не существует единственного метода или технологического процесса, который бы подходил для построений под базальтами в любой геологической ситуации.

Несмотря на то, что мощные перспективные на нефть и газ мезозойские отложения залегают ниже декканских траппов, до сих пор было проведено мало геофизических исследований из-за получения неадекватных сейсмических данных и проблем построения ниже базальтов. Sain et al. (2002) постарался отобразить мезозойские отложения ниже базальтов используя данные, полученные с нефокусированным приемником, но показал только крупные

Почтовый адрес: Dhananjay Kumar, John A. and Katherine G. School of Geosciences, University of Texas Institute for Geophysics, 4412 Spicewood Springs Rd., Bldg. 600, Austin, TX 78759, USA, Email: ghananjay@mail.utexas.edu

Адрес: Oil & Gas Division, Dhirubhai Ambani Knowledge City (DAKC), Thane Belapur Road, Navi Mumbai-400709 India, Email: Ravi_Bastia@ril.com, Debajyoti_Guha@ril.com

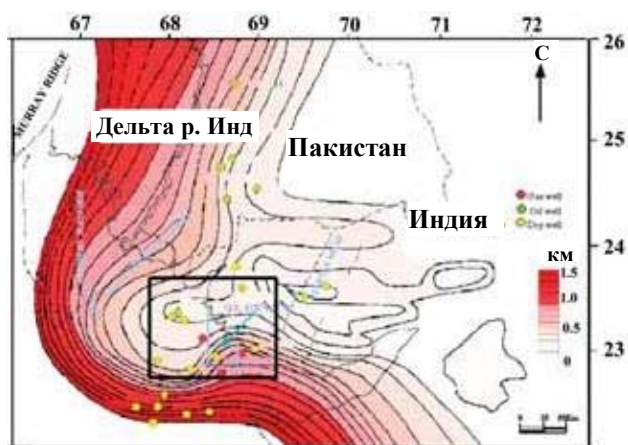


Рис.1. Карта изопакит декканских траппов бассейна Кутч. Перспективная область выделена. Дельта р. Инд также является областью современного исследовательского интереса.

структуры, тогда как при разведке на нефть и газ мы заинтересованы в детальных разрезах месторождения. Для достижения этой цели мы предлагаем три подхода:

- 1) Проблемы сейсморазведки, связанные с базальтами,
- 2) Решения для улучшения построений,
- 3) Определение траппов, перспективных на нефть и газ.

Эта статья посвящена бассейну Кутч, северо-западное побережье Индии (рис. 1.). Бхуджская формация, основные продуктивные пласты этого бассейна, перекрыты мощными базальтами, что затрудняет построения.

Геология и литология бассейна Кутч

Бассейн Кутч образует северную часть западной материковой окраины Индии, которая относится к пассивным окраинам. В морской части бассейна Кутч были обнаружены три смежных тектонических элемента СЗ – ЮВ направления (рис. 2.).

Это:

- 1) Впадина Кори Коморин (Kori Comorin depression).
- 2) Хребет Кори Коморин (Kori Comorin ridge).
- 3) Впадина Лаксми-Лаккадив (The Laxmi-Laccadive depression).

На рис. 2. также показаны четыре наземных хребта В – З простирания. Бассейн перикратонный и может быть подразделен на хребты и впадины от СВ – ЮЗ до В – З простирания, погружающиеся в западном направлении. Обширная литология отложений декканских траппов приводится ниже.

Верхние стратиграфические слои состоят из третичных отложений с преобладанием известняков, песков и аргиллитов, которые подстилаются мощными базальтами от верхнемелового до палеоценового возраста, перекрывающими мезозойские отложения. Мощность базальтового слоя меняется от 300 м на северо-западе до 2000 м на юго-западе (рис. 1.).

Проблемы сейсморазведочных построений и возможные решения

Многие геофизики занимались изучением специфических проблем построений, связанных с перекрытием месторождений базальтами. Здесь мы обсуждаем вопросы, относящиеся к построению под базальтами в морской зоне бассейна Кутч (декканские базальты). Базальты бассейна Кутч отличаются от большинства базальтов других районов, так как мощность базальтов, состоящих из лавовых потоков, меняется в широких пределах. Поэтому бассейн имеет сильно неоднородное строение. Скоростной закон сложный и помимо инверсии скорости происходит образование многократных волн, рассеяние, затухание и образование обменных волн.

Многократные сейсмические волны

В отложениях морской части бассейна Кутч есть три устойчивые отражающие сейсмические границы:

- 1) Дно моря.
- 2) Кровля базальтов.
- 3) Подошва базальтов.

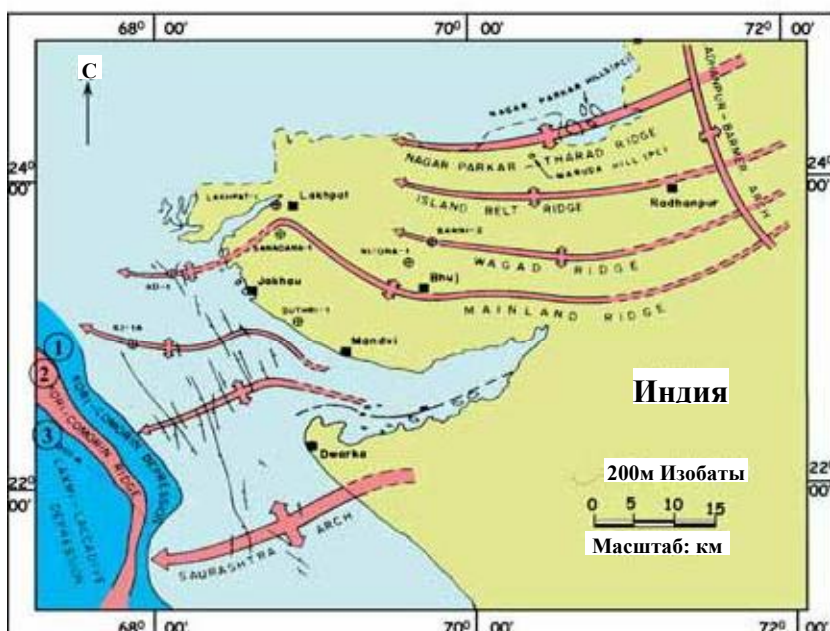


Рис. 2. Направления тектонических движений в бассейне Кутч. Показаны три сменных тектонических элемента СЗ – ЮВ простирания в морской части бассейна Кутч и четыре наземных хребта В – З простирания.

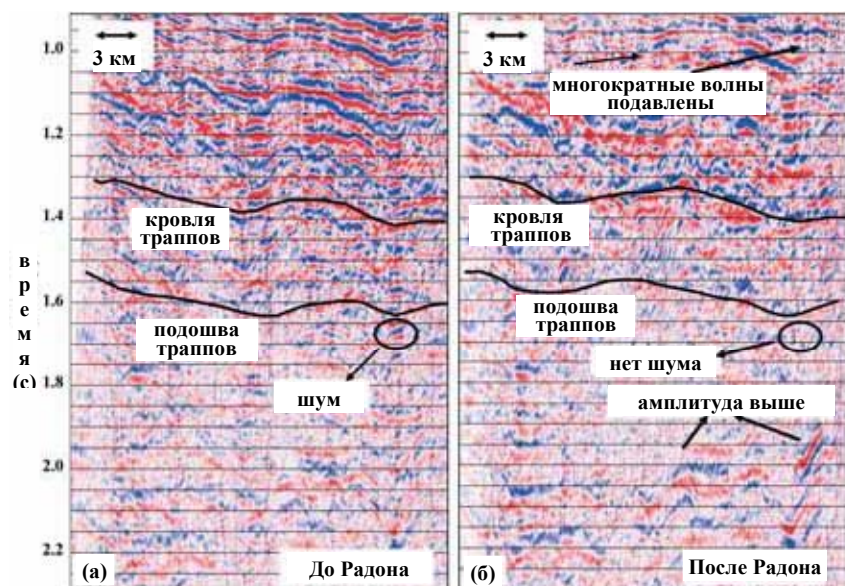


Рис. 3. Улучшение изображения ниже базальтов после трансформации Радона, а) до фильтрации Радона и б) после фильтрации Радона. В толще базальтов после фильтрации Радона разрешение в целом низкое, так как при параболической трансформации мы ограничились частотный диапазон.

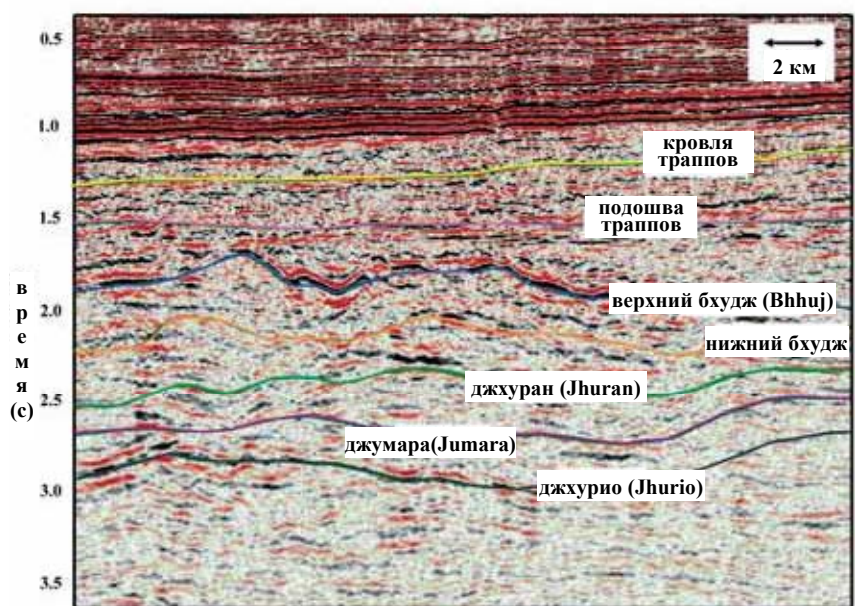


Рис. 4. Сейсмический разрез залива Кутч после стандартной обработки. Ниже кровли базальтов разрешение низкое. Выделены различные горизонты, включая бхуджскую формацию, которая является зоной первостепенного интереса.

Наиболее сильная отражающая граница – это кровля базальтов. Поэтому только очень небольшая часть энергии сейсмических колебаний проходит через базальты и это изменяет её частотный состав. Прежде чем их зарегистрируют, сейсмические волны, отраженные от кровли базальтов, многократно отражаются от границ между морским дном и базальтами. Однократно отраженная от кровли базальтов волна обладает большей энергией, чем многократно отраженные волны, а многократно отраженные волны, в свою очередь, большей энергией, чем волны, отраженные от границ под базальтами. Фильтрация Радона эффективна для подавления многократно отраженных волн. Рис. 3. показывает результат фильтрации Радона, примененной к данным сейсморазведки в бассейне Кутч. Многократные волны выше базальтов были значительно подавлены (рис. 3.).

Неоднородности базальтового слоя залива Кутч приводят к образованию многократных волн внутри этого слоя, и отношение сигнал/шум ухудшается. Как показано на рис. 3., внутри слоев базальта стандартно обработанные данные

имеют лучшее разрешение, чем данные после фильтрации Радона. Это происходит из-за ограничения частотного диапазона, которое используется в параболическом преобразовании Радона (Spitzer et al., 2003). По мере того, как энергия Р-волн проникает ниже базальтов, сигнал становится очень слабым. В общем случае, за многократными волнами сигнал не виден. После фильтрации Радона наблюдается очень незначительное улучшение в разрезе ниже базальтов. Шум (кратные волны) снижен и амплитуды полезного сигнала частично усилены (рис. 3.). Из-за сложной скоростной модели, миграция во временной области после суммирования (рис. 4.) не эффективна. Миграция в глубинной области до суммирования с поправками за анизотропию рекомендуется для сбора рассеянной энергии в правильном положении (Silva and Corcoran, 2002). Однако, миграция в глубинной области до суммирования чувствительна к скорости (и параметрам анизотропии) и также очень дорогостояща.

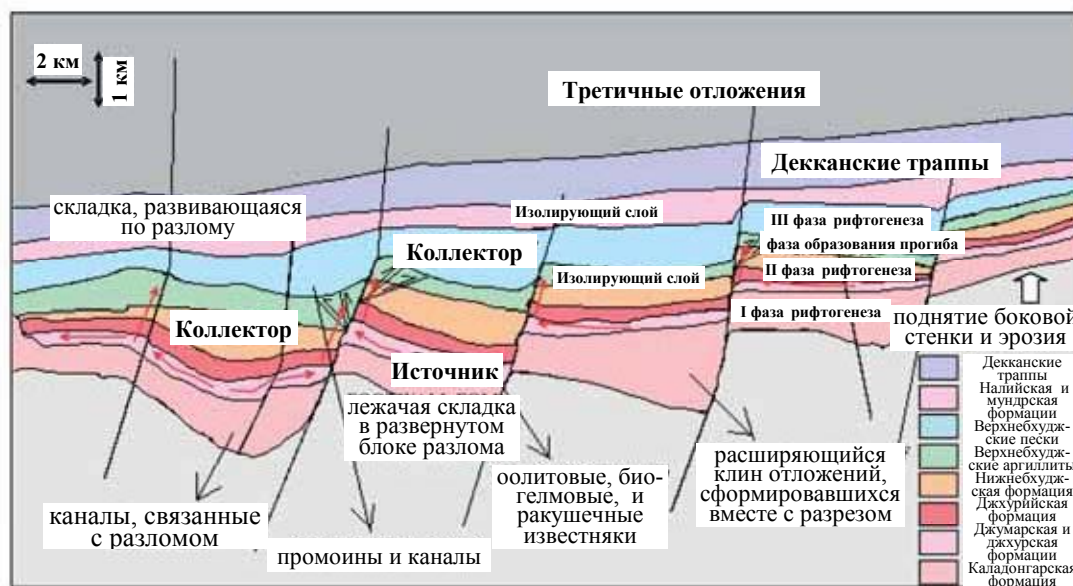


Рис. 5. 2D геологическая модель бассейна Кутч. Бхуджская формация песков – главный коллектор ниже базальтов. Эта модель основана на данных сейсморазведки с учетом тектоники бассейна Кутч.

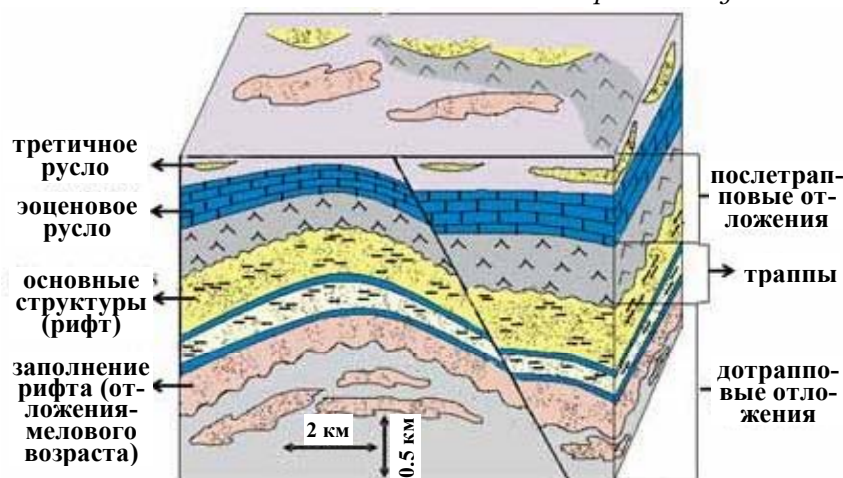


Рис. 6. 3D геологическая модель бассейна Кутч. Это общая геологическая модель залива Кутч (масштаб приближенный). Модель основана на общей геологии района без учета данных сейсморазведки.

Рассеяние, потеря частот и поглощение

На кровле базальтов и внутри базальтового слоя происходит сильное поглощение энергии, которое снижает и высокие частоты и интенсивность полезного сигнала (рис. 4.). Некоторые низкочастотные сейсмические колебания проникают через базальты, в результате теряя разрешающую способность. В современной сейсморазведке используются средние частоты (с центральной частотой около 40 Гц). Энергия сейсмических колебаний сильно затухает в сложных многослойных базальтовых отложениях бассейна Кутч, что снижает полезный сигнал, отраженный от границ ниже базальтового слоя. В модели Spitzer et al. (2003), неоднородный базальтовый слой имеет коэффициент затухания (Q) 30. Низкое значение Q говорит о сильном затухании, 30 – это низкое значение Q . Этот эффект обычно не учитывается при обработке сейсмических данных. Однако, эффекты затухания можно подавить, воспользовавшись обратной Q -фильтрацией.

Образование обменных волн

На сейсмических границах происходит преобразование типа падающей волны (P -волны на S -волну и наоборот). На кровле базальтов энергия наклонно падающей P -волны

частично преобразуется в энергию S -волны и это устойчивое преобразование, происходящее с P -волнами в базальтах. Так как скорость P -волны в покровных отложениях близка к скорости S -волн в базальтовом слое, геометрия обменных S -волн внутри базальтов относительно проста. Прежде, чем она будет зарегистрирована, эта обменная волна (PS -волна) может снова преобразоваться в P -волну на границе «дно моря». Обменные P -волны (PSP - или $PSSP$ -волны) могут использоваться для построений под базальтами (Barzaghi et al. 2002), но на практике эти сигналы очень слабые. Для улучшения разрешающей способности требуется регистрация многокомпонентных данных, что в море возможно при помощи донных сейсмоприемников. В настоящее время многокомпонентных данных по бассейну Кутч нет, однако, если они будут получены, мы считаем возможным улучшение сейсморазведочных построений. Перечисленные выше эффекты в базальтовом слое и на его кровле совместно затрудняют построения под базальтами. Никакой из предложенных методов подавления не является устойчивым. Эффекты влияния условий распространения сейсмических волн зависят от углов, поэтому обсуждаемый здесь эффект



будет зависеть от угла падения сейсмической волны. Для выбора лучшего разреза необходимо исследовать зависимость от угла.

Грань морской части бассейна Кутч, перспективные на нефть и газ

Сейсмические построения под базальтами бассейна Кутч являются сложной задачей для геофизиков. Для иллюстрации возможных концепций, были созданы двумерная (рис. 5.) и трехмерная (рис. 6.) геологические модели. Двумерные модели основаны на данных сейсморазведки с учетом геологической и тектонической информации. Эти модели не могут в точности совпадать с результатами сейсморазведки из-за недостаточной информативности сейсмических построений. Трехмерные модели основаны на геологической информации без учета данных сейсморазведки, они показывают общую модель бассейна Кутч. В бассейне Кутч было два периода рифтогенеза, ранний в песках нижнего каладонгара (Kaladongar) и поздний в отложениях (тоже песках) нижнего бхуджа (Bhudj). Между этими двумя периодами был период спокойного осадконакопления, в результате которого образовались карбонатные породы джхурийской (Jhurio) и джумарской (Jumara) формаций. Выше карбонатных осадков залегают джхуранская формация (Jhuran) (хорошие нефтематеринские породы) и пески нижнего бхуджа.

Одновременно с осадконакоплением верхнего бхуджа началась фаза прогибания (впрочем, это все еще тема дискуссий), затем сформировались отложения налийской (Naliya) и мундрской (Mundra) формаций (фаза формирования прогиба). Объектами исследований являются бхуджские пески, залегающие ниже базальтов.

Обсуждения и выводы

Для улучшения результатов сейсмической разведки предлагаются следующие способы сбора и обработки данных:

- 1) Фильтрация Радона для подавления многократных волн.
- 2) Миграция в глубинной области до суммирования (если возможно, с внесением поправок за анизотропию) для правильных построений.
- 3) Исследование зависимости от угла для снижения эффектов влияния условий распространения волн, зависящих от углов
- 4) Использование низкочастотных сейсмических источников для уменьшения рассеяния.
- 5) Обратная Q-фильтрация для компенсации эффектов затухания.
- 6) Многокомпонентные сейсмические данные.

Даже если доступны только данные по Р-волне от источника средних частот, миграция в глубинной области до суммирования может улучшить отображение, если в скоростную модель включается информация о разрезе. При больших выносах сейсмического источника, колебания могут проникать под базальты, но при этом разрешающая способность низкая и при обработке данных требуются более сильные поправки за вынос. Хотя геофизики часто имеют дело в основном с многократными волнами, также имеют место эффекты затухания и рассеяния из-за неоднородностей и наличия кратных волн, что затрудняет построения ниже базальтов.

Мезозойские отложения ниже декканских базальтов возможно являются углеводородными коллекторами, но их построение при существующих сейчас данных и

методах проблематично. Рассеяние на кровле базальтов перераспределяет энергию сейсмических колебаний, и только слабые низкочастотные сигналы проходят через базальты. Фильтрация Радона помогает улучшить построения выше кровли базальтов, так как существует высокий скоростной контраст между первичной отраженной волной и кратными волнами и хорошее отношение сигнал/шум. Но ниже базальтов фильтрация Радона дает незначительное улучшение. Многокомпонентные сейсмические данные, полученные при больших выносах, до суммирования могут помочь улучшить построение. Построения, основанные на моделировании, вместе с другими методами, которые обсуждались выше, помогут создать модель месторождения бассейна Кутч.

Благодарности

Мы благодарим компанию Reliance Industries, Mumbai за разрешение опубликовать эту работу и её геофизический отдел за его помощь и советы. Мы также благодарим Мрайнал К Сена (Mrinal K Sen), Геофизический факультет Техасского университета (University of Texas Institute for Geophysics), за его советы Авторы благодарят рецензентов за их конструктивные советы.

Литература

- Barzaghi, L., Calcagni, D., Passolunghi, M., and Sandroni, S. [2002] Faeroe sub-basalt seismic imaging: a new iterative time processing approach. *First Break*, **20**, 611-617.
- Hanssen, P., Li, X.-Y., and Ziolkowski, A. [2000] Converted waves for sub-basalt imaging? 70 th SEG meeting, Calgary, Canada, Expanded Abstract, MC 2.3.
- Hanssen, P., Ziolkowski, A., and Li, X.-Y. [2003] A quantitative study on the use of converted waves for sub-basalt imaging. *Geophysical Prospecting*, **51**, 183-193.
- Sain, K., Zelt, C. A., and Reddy, P. R. [2002] imaging of sub-volcanic Mesozoics in the Saurashtra peninsula of India using traveltimes inversion of wide-angle seismic data. *Geophysical Journal International*, **150**, 820-826.
- Short, N. M. Sr., and Blair, R. W. Jr. [1986] Geomorphology from space: A global overview of regional landforms. *NASA publication*.
- Silva, R., and Corcoran, D. [2002] Sub-basalt imaging via pre-stack depth migration-an example from the Slyne Basin, offshore Ireland. *First Break*, **20**, 295-299.
- Spitzer, R., White, R. S., and Christie, P. A. F. [2003] Enhancing subbasalt reflections using parabolic t-p transformation. *The Leading Edge*, **22**, 1184-1201.
- Wang, Y., and Satish, S. C. [2003] Separation of P- and S-wavefields from wide-angle multicomponent OBC data for a basalt model. *Geophysical Prospecting*, **51**, 233-245.
- Yilmaz, O.Z. [2001] *Seismic data analysis: processing, inversion, and interpretation of seismic data*, SEG publication.
- Ziolkowski, A., Hanssen, P., Gatliff, R., Jakubowicz, H., Dobson, A., Hampson, G., Li, X., and Liu, E. [2003] Use of low frequencies for sub-basalt imaging. *Geophysical Prospecting*, **51**, 169-182.