

Структурные модели: анализ оптимизации риска при исследовании концептуальной неопределенности. Structural models: optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty

Clare E. Bond^{1,2}, Zoe. K. Shipton¹, Alan D. Gibbs² и Serena Jones²

Абстракт

Наука о земле может рассматриваться как недостоверная наука, так как она часто базируется на интерпретации данных, допускающих двоякое толкование. Анализ разных вариантов интерпретации одного и того же массива данных показал, что концептуальная неопределенность может привести к широкому диапазону результатов интерпретации. Различными исследователями для одного и того же массива данных разработано много геологических моделей, основанных на большом разнообразии концепций. В этой статье мы предлагаем методы повышения эффективности интерпретации, основываясь на рассмотрении того, как исследователи применяют концепции к массивам нечетких данных, на обработке, которую они используют, влияния их прежнего опыта и использовании ими более обширной сопутствующей информации. Мы доказываем, что исследование влияния концептуальной неопределенности данных, допускающих двоякое толкование, и усовершенствование на практике текущей последовательности действий может улучшить учёт факторов риска.

Введение

Неопределенность в настоящее время является навязчивой темой в нашей отрасли. Повышенное внимание к этой проблеме вызвано дорогостоящими неудачами и проведением поисково-разведочных работ главным образом в геологически и технически интересных районах. Прогресс в технологии и высокий уровень цен на нефть приводят к поискам новых ресурсов в таких регионах, как сверх глубинные водные бассейны, некогда бывшие вне технического и финансового диапазона деятельности нашей отрасли. В этих обстоятельствах «ошибки» разведки являются дорогостоящими, и приводят к желанию уменьшить неопределенности в наших геологических моделях. Даже в хорошо изученных областях, таких как Северо-Атлантическая окраина Великобритании, только одна из пяти скважин имеет успех (Loizou, 2002), где успех означает то, что скважина фонтанирует со значительной интенсивностью более 1000 б/д нефти или 15 миллионов футов кубических в день. Материальный стимул является ведущим в любой отрасли, и с ростом цен на поиск и добычу лучшее понимание неопределенностей в геологических моделях обеспечивает возможность высокой экономической отдачи.

Геология: знания, базирующиеся на интерпретации

Frodeaman (1995) дает определение геологии как науке, основанной на интерпретации. Он доказывает, что геология разработала свою собственную аргументацию, которая отличается от применяемой в физике логической мотивации. Мы полагаем, что естествоиспытатели более традиционных направлений науки на основании лабораторных исследований, таких как физика, численный эксперимент, проверяют гипотезы при контролируемых условиях. Качество полученных данных и выводы зависят от разрешающей способности методов измерения, но ограничение числа переменных параметров и контролируемых условий обеспечивает взаимосвязь между выбранными переменными, которые исследуются; фактически научное знание может быть получено аналитически. Наоборот, геология базируется на наблюдении и интерпретации ограниченных массивов данных, результатов «естественных» экспериментов, происходивших при неизвестных условиях и переменных.

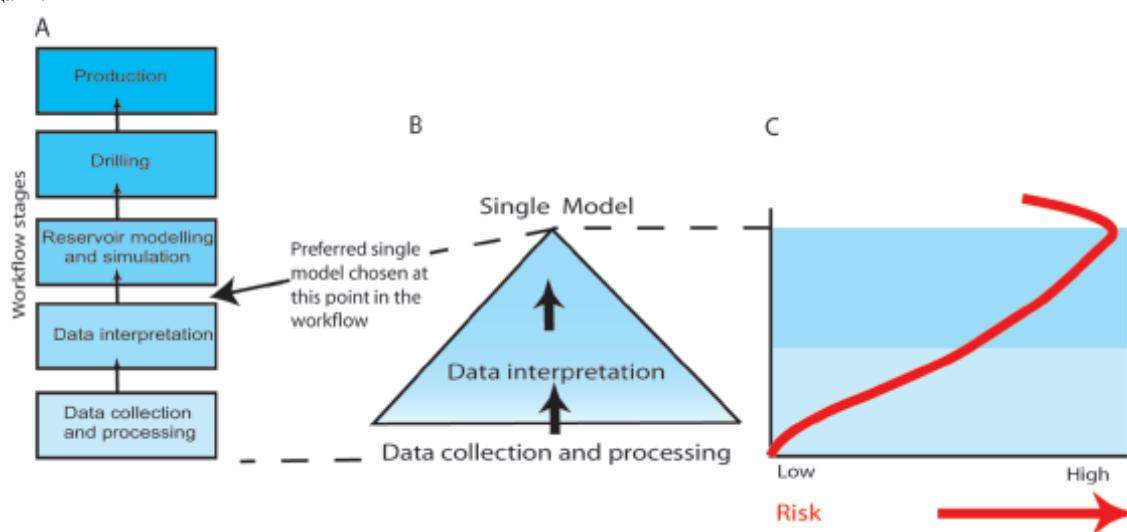


Рис. 1 (a) Упрощенная последовательность операций в нефтяной индустрии, в которой одна-концептуальная модель выбрана по отдельному массиву данных. (b) В начале интерпретации данных много возможных концепций могло потенциально соответствовать массиву данных. Интерпретация данных является обычно процессом удаления альтернативных концепций до тех пор, пока останется одна концептуальная модель, которая передается на дальнейший анализ, здесь представлена вершиной треугольника. (c) Блок-схема показывает теоретический риск фокусирования на одно-концептуальной модели.

¹ Department of Geographical and Earth Science, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, UK.

Corresponding author, E-mail: clare@mve.com. ¹ Midland Valley Exploration, 144 West George Street, Glasgow G2 2HG, UK.

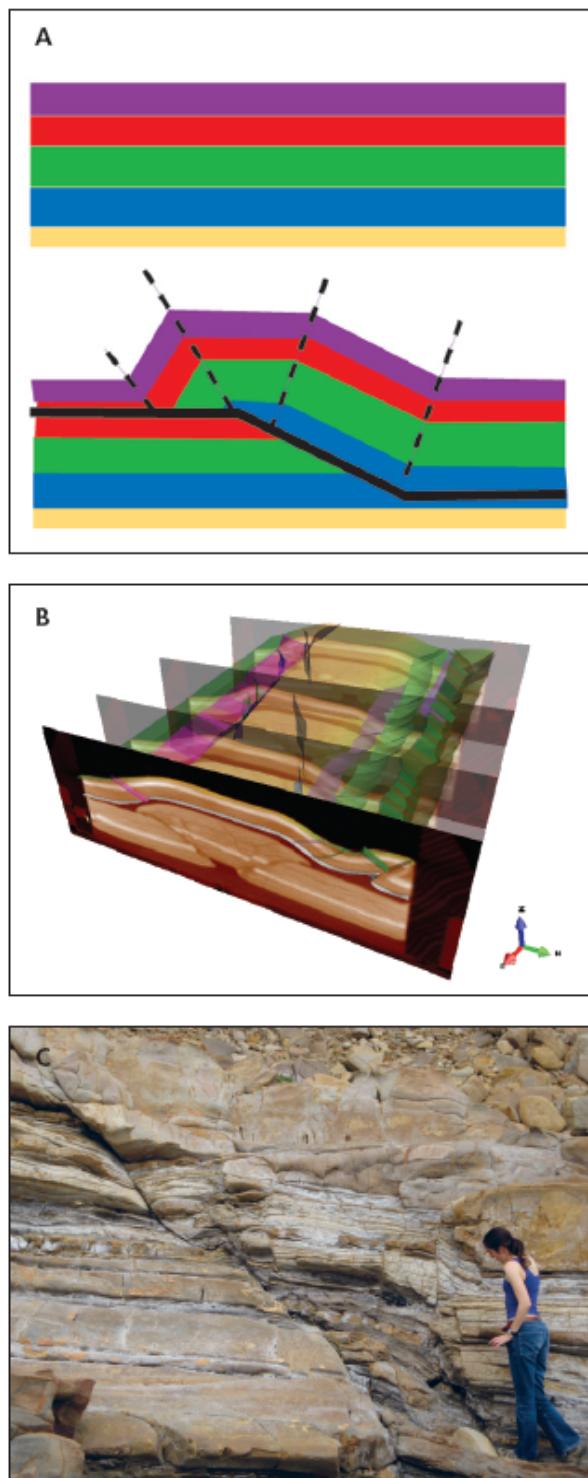


Рис. 2 (a) Диаграмма изогнутой разломами модели Suppe (1983). Suppe создал геометрическую модель складки над взбросом, чтобы определить геометрию и параметры изгиба, созданного таким способом. (b) Цифровая модель ящика с песком из работы, представленной Sassi *et al.* (2008), показывающая экспериментальную модель обратной структуры грабена. (c) Один из авторов, производящий непосредственные наблюдения изогнутых турбидитов в полевой обстановке.

66

Например, геологическая карта, основанная на полевых наблюдениях, создается по ограниченным выходам пород на поверхность и является моделью воспроизведенной в двумерном варианте геометрии существующей литологии. Модель должна работать не только в ее настоящем представлении, но быть сопоставимой с эволюцией этого представления в течение геологического времени. Геологическая карта, построенная таким способом, является маловероятной, чтобы быть окончательным решением: тем не менее, использование ограниченной информации, чтобы дать достоверную интерпретацию, основанную на данных, и обоснование является большим искусством в науке о Земле.

Frodeman (1995) утверждает, что геологическое обоснование является таким типом обоснования, которое требуется для того, чтобы способствовать прогнозированию, и влияет на решение многих проблем 21-го века, таких как прогноз изменения климата, стихийные бедствия и оценка ресурсов. Как он утверждает, геологическое обоснование является важным практическим опытом для оценки ресурсов в нефтяной геологии, так как оно позволяет интерпретировать данные, допускающие двоякое толкование, и делать прогноз имеющихся ресурсов. Эти прогнозы сфокусированы в направлении принятия эффективного решения на практике – где бурить, как глубоко бурить и балансовые запасы нефти.

Борьба с неопределенностью

Данные, использованные для того, чтобы обеспечить информацию для принятия решения по проведению нефтепоисковых исследований, часто ограничены в объеме и разрешающей способности и объединяются геологами в группы по типу данных и источников (например, сейсмические данные, буровой керн, скважинный каротаж, информация о давлении). Различные типы данных объединяются в массивы данных, которые имеют области с низкими связями и низкой достоверностью. Геологическое обоснование, базирующееся на анализе существующих данных и научных концепциях, используется для того, чтобы провести интерпретацию, создать трехмерную модель геологической среды.

Эта статья выясняет, как отдельные исследователи применяют концепции к геологическим массивам данных, допускающих двоякое толкование, для того, чтобы создать модели на основании интерпретации. В частности, статья фокусируется на процессе создания первичной геологической модели, определяющей основные структурные элементы. Мы решили сфокусироваться на структурной неопределенности, так как геологические модели являются важной частью работ отрасли, связанных с высокой степенью риска.

Рис. 1а суммирует сильно упрощенную последовательность операций в нефтяной отрасли. Фокусируясь на первичной «геологической» стадии работ (сбор данных, обработка и интерпретация), качество собранной и обработанной информации представлено шириной треугольника (рис. 1б). По мере того, как интерпретируются данные, информация в виде концепций, которые могут быть применены к массиву данных, фактически исчезает и удаляется. Эта потеря информации представлена сужением треугольника (рис. 1б), вершина которого определяет единственную геологическую модель, определенную для массива данных. Такая фокусировка на единственной геологической модели имеет высокую степень неопределенности, содержит «точку зажима» информации и требует анализа неопределенности (рис. 1с). Традиционный анализ неопределенности сфокусирован на стадии разработки месторождений. Однако, моделирование неопределенности на стадии разработки месторождения может быть основано на ошибочной концептуальной модели, и вложение времени и ресурсов на этой стадии имеет высокую степень экономического риска, если не оценены неопределенность выбранной модели и возможные варианты.

Мы сконцентрировались на трех моментах процесса интерпретации и рассмотрели их возможное воздействие на начальные стадии рабочего процесса. Это:

- Применение концепций к данным, допускающим двоякое толкование (нечетким данным)
- Фиксация ряда возможных концепций, пригодных для массива данных
- Методы оценивания концепций, улучшения и снижения степени неопределенности моделей.

В конечном счете, мы в общих чертах обрисовываем риск создания единственной одноконцептуальной модели и обсуждаем изменения в рабочем процессе, которые могли бы минимизировать экономический риск, обусловленный созданием единственной геологической модели по массиву данных. Использование в статье термина «геологический» включает интерпретаторов сейсмиков и геофизиков, которые интерпретируют нечеткие данные в этой обстановке.

Применение концепций для нечетких данных

Геологическое обоснование принимает во внимание концепции, которые были созданы и затем используются для интерпретации данных. Концепции часто базируются на теориях и/или аналогиях, а также на наблюдениях. Они включают численные и экспериментальные модели и основанные на полевых материалах аналоги. В структурной геологии часто разрабатываются концепции, основанные на математической модели или теории, для исследования того, как могли образоваться структуры – из-за изменения механических свойств пород, или их геометрической расстановки (например, модель впадины Suppe, изогнутой разломом 1983) рис. 2а). В лаборатории выполняются эксперименты по

аналоговому моделированию для того, чтобы воссоздать геологические процессы, такие как седиментация и структурная эволюция (рис. 2б). Однако, полевые наблюдения, использующиеся для создания концепций, являются, по всей вероятности, самыми обычными; и именно их геологи впоследствии используют для интерпретации данных. Иногда эти концепции базируются на знании непосредственных наблюдений исследователя и его опыта (рис. 2с), а иногда на наблюдениях и интерпретации других специалистов, фотографиях и диаграммах, опубликованных в руководствах и статьях, или моделях, представленных авторами и базирующихся на их собственных наблюдениях (например, набор данных часто не представлен в руководстве или статье, а только модель, полученная по этим данным). Эти модели часто становятся общепринятым концептуальным представлением для определенных регионов и тектонических ситуаций.

Умение распознать ряд возможных концепций, которые могли бы быть применены к массиву данных, является частью задачи интерпретации. Но как геологи интерпретаторы знают, когда, где и какую концепцию применить? Геологи, интерпретирующие данные, используют сочетание подготовки (обучения) и опыта (прежнее знание), включая региональную информацию, степень квалификации и другие факторы, которые влияют на результаты окончательной интерпретации. Они используют свое мастерство при создании геологического обоснования, задавая сознательно или непреднамеренно вопросы: какие концепции могут быть применены в региональном и тектоническом контексте, что является важными диагностическими признаками массива данных. Задавая эти вопросы, большинство исследователей пытается провести единственную интерпретацию, основанную на единственной концепции для массива данных. Учитывая важность интерпретации в геологии, вероятно, удивительно, что несколько работ рассмотрели, как и почему преимущественно единственная концепция применяется в процессе интерпретации. Два основных практических исследования, которые фокусируются на интерпретации данных нефтяной геологии, представлены работами Rankey и Mitchell (2003) и Bond et al. (2007a).

Обе работы проанализировали интерпретацию сейсмических данных, проведенную квалифицированными геологами. Для своего эксперимента Rankey и Mitchell (2003) выполнили детальное исследование с шестью интерпретаторами сейсмиками, предоставляя в течение исследования дополнительные скважинные данные и геологическую информацию о резервуаре. Они сделали вывод, что на результат сейсмической интерпретации оказывает влияние ранее приобретенный опыт и заранее сложившиеся представления, а также качество данных и геологическое понимание. Bond et al. (2007a) выполнили более обширное исследование, собрав 412 вариантов интерпретации синтетического сейсмического массива данных. Набор вариантов интерпретации одного и того же массива данных

Human Bias	Description
Availability bias	The decision, model, or interpretation that is most readily to mind or dominant.
Confirmation bias	To seek out opinions and facts that support ones own beliefs or hypotheses.
Anchoring bias	Failure to adjust from experts' beliefs, dominant approaches or initial ideas.
Optimistic bias	It won't happen to me mentality, (or there is definitely oil in this prospect!)
Positive outcome bias	Wanting things to turn out for the best and putting the most positive spin on data interpretation.
Hypothesis testing bias	Starting with an initial hypothesis and trying to fit the data to it (similar to confirmation bias).

Таблица 1. Обобщение частых заблуждений, описываемых в познавательной научной литературе, которые могут повлиять на интерпретацию геологических данных. Описания базируются на работе Krueger и Funder (2004).

являет собой пример продольной (26%), пространственной (6%) и инверсионной (21%) тектоники, местоположений карбонатных рифов (<5%), солевой и грязевой тектоники (8%), и следствия стратиграфии (<5%). Bond et al. (2007a) предполагают, что ряд факторов, таких как метод интерпретации, может влиять на результат интерпретации до априорных данных. Кроме различных выводов, приведенных в этих работах, разнообразие концепций, примененных к массиву данных в работе Bond et al. (2007a), подчеркивает необходимость оптимизировать результаты интерпретации в рабочем процессе. Первый метод для уменьшения неоднозначности интерпретации состоит в том, чтобы воздействовать на ряд концепций, применяемых к массиву данных.

Выбор ряда возможных концепций

Результаты Rankey и Mitchell (2003) и Bond и др. (2007a), а также теоретические эксперименты по априорным сведениям в геологии (Curtis и Wood, 2004, и ссылки в этой работе) и когнитивная систематическая ошибка исследований (например, Tversky и Kahneman, 1974; Burns, 2004) предполагают, что выбор концепции, применяемой к массиву данных, может быть частично сознательным решением, а частично подвержен влиянию подсознания исследователя, приводя к когнитивной или свойственной человеку погрешности. Ценным замечанием здесь является то, что когнитивная погрешность не обязательно отражает отрицательный эффект, так как погрешности могут иметь и положительный и отрицательный результаты. В таблице 1, основанной на описании погрешностей по Krueger и Funder (2004), мы суммировали некоторые из самых общих типов погрешностей, свойственных человеку, которые могут воздействовать на геологов во время интерпретации.

Принимая неутешительный объем успешного бурения (e.g., Loizou, 2002) и ряд концепций, применяемых к массиву данных в работе Bond et al. (2007a), идеальная последовательность действий будет состоять, в первую очередь, в выборе ряда возможных концептуальных моделей, которые могут быть применены к массиву данных, до сужения выбора на основании более широких критерий. Выбор полного ряда концептуальных моделей, пригодных для массива данных, может быть минимизирован отрицательным влиянием когнитивной погрешности. Возможные методы для

поддержания применения многочисленных концепций к массиву данных описаны ниже.

Использование специалистов с разнообразным предшествующим опытом

В эксперименте Bond et al. (2007a) было использовано большое число специалистов для сбора вариантов интерпретации по синтетическому сейсмическому массиву данных. Аналогичный метод, хотя только с несколькими специалистами, может быть использован на производстве, чтобы попытаться собрать ряд вариантов интерпретации. Этот подход был также предложен Wood и Curtis (2004), которые предложили использование разнообразных геологических экспертов для согласования противоречивых точек зрения. В частности, выбор специалистов с априорными знаниями для создания набора вариантов интерпретации уменьшит возможное отрицательное влияние когнитивной погрешности, такой как систематическая погрешность пригодности.

Демонстрация специалистами ряда концепций, полученных до интерпретации

Влияние систематической погрешности пригодности может быть также уменьшено демонстрацией специалистами ряда концепций, полученных до или в течение интерпретации данных. В этом способе фиксация (склонность к) единственной идеи или концепции, созданной, например, при работе в той же самой структурной обстановке в течение длительного времени, может быть уменьшена.

Удаление регионального и тектонического фона.

Так как концептуальные модели часто связаны с общепринятыми представлениями о региональной и тектонической обстановке, удаление регионального и тектонического фона эффективно расширит ряд возможных концепций, пригодных специалистам, для интерпретации массива данных. В результате будет удалена некоторая скрепляющая погрешность по господствующим представлениям или идеям, основанным на региональной и тектонической обстановке. Bond et al. (2007a) обнаружил во время своего интерпретационного эксперимента, что многие участники спрашивали «где в мире?» были получены сейсмические данные. Bond et al. (2007a) предположил, что эти участники задавали такой вопрос для подтверждения их интерпретации, обеспеченной такой обстановкой; или искали исходную концепцию для обоснования их интерпретации массива данных.

Использование специалистов различных направлений может позволить удалить региональную обстановку, обеспечивая допуск к информации специалистам с априорными знаниями и высоко квалифицированным.

Разнообразные варианты интерпретации

Работы, рассмотренные здесь, показали, что выбор единственной модели или концепции приводит к подтверждению или фиксации систематической погрешности. В своем эксперименте Rankey и Mitchell (2003) предоставили интерпретаторам дополнительные данные после начального интерпретационного периода, и отметили, что только четыре из шести участников улучшили свою интерпретацию, получив данные высшего качества. Мы предполагаем, что этот результат представляет фиксированную систематическую погрешность исходных идей интерпретации. По наблюдениям наших интерпретаторов и по нашим вариантам интерпретации мы предполагаем, что суммирование данных в начальный момент является важным для результата интерпретации. Это так же важно, как и использование авторитетных интерпретаторов, принимающих решения по своей концепции, а затем использующих его для массива данных, который они

интерпретируют (или просто снабжают комментариями концепцию на основании интерпретации данных). Кажется, что должно быть трудно интерпретатору, принявшему единственное решение, самое лучшее решение, основанное на своих априорных знаниях и опыте, создать альтернативные интерпретации на базе других концепций. Однако, поощрение интерпретатора создавать множество вариантов интерпретации массива данных, как заявляет Chamberlin (1965), подобно эффекту демонстрации геологами ряда концепций до проведения интерпретации. В каждом случае интерпретатор скорее вынужден подвергать сомнению свои обширные знания и опыт, чем просто применять господствующую или легко доступную концепцию.

Методы оценки и улучшения концепций и степени риска моделей.

Если могут быть введены в действие методы, чтобы расширить ряд концепций, пригодных исследователям, по мере интерпретации ими данных, то аналогичные методы могут быть использованы, чтобы улучшить ряд концепций и интерпретационные модели, которые уже созданы. В общих чертах метод заключается в том, что неконкурентные концепции устраняются, а конкурентоспособные содержат степень неопределенности. Здесь приводятся методы для оценивания и выбора концептуальных моделей.

Структурная эволюция и реконструкция

Анализ экспериментального массива данных Bond et al. (2007a) показывает, что многие концепции и связанные с ними геологические модели могут быть удалены после пересмотра их структурной эволюции. Многие из концепций, которые располагают сейсмическими данными, не являются достоверными в структурном отношении. Использование методов профильного выравнивания, выдвинутых Dahlstrom (1969), Hossack (1979), Elliot и Johnson (1980), Beach (1981), Gibbs (1983) и другими, все еще имеет большое значение и в настоящее время влияет на оценивание модели и ее устойчивости (например, Tozer et al., 2006; Yin and Groshong, 2006; Butler et al., 2007). Профильное выравнивание, может показаться, поддерживает структурных специалистов (Dee et al., 2005), но даже простое прогнозирование кинематической эволюции может ввести поправку в базисную оценку устойчивости модели. Действительно, для более утонченного структурного анализа большинство компаний приглашает «экспертов». Однако, польза установленных на ранней стадии устойчивых структурных моделей может намного превосходить рост затрат на проведение моделирования, анализ погрешностей и зависящие от обстоятельств бурение и разведку, основанные на неустойчивых структурных моделях (например, Burnett, 1996). Оценка структурной эволюции позволила отбросить некоторые концепции, оставив структурно устойчивые модели, которые могут быть приняты на доверительном уровне, оцененные и имеющие определенную степень риска.

Региональная и тектоническая обстановка

На этой стадии интерпретаторы могут стремиться рассмотреть региональную и тектоническую обстановку массива данных, в которой они работают. Варианты интерпретаций, основанные на различных концепциях, например карбонатный шельф, интрузивный изверженный комплекс пород или геометрия нормальных сбросов, могут быть сопоставлены с информацией по региональной обстановке. Эта региональная информация поможет определить достоверные значения и «риски» для оставшихся устойчивых моделей. Сопоставление различных концепций может также влиять на то, какие новые данные должны быть собраны или оценены, чтобы определить относительное правдоподобие каждой концепции.

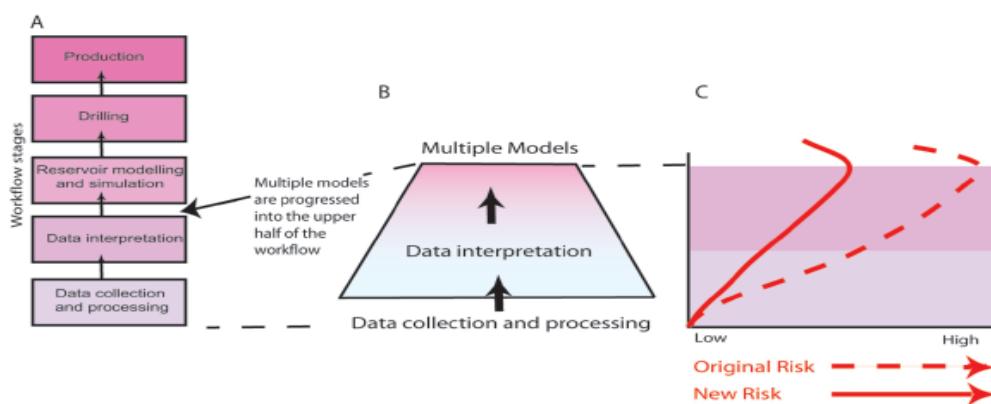
Сравнительные исследования и специальная гарантия специалистов

В конечном счете, мы предполагаем, что должно быть проведено сравнительное исследование концептуальных моделей и их оценки доверительности, используя априорную информацию всей группы. Сочетание сравнительных исследований, проведенных в открытой и непринужденной форме, с гарантией специалистов, включая мировую техническую экспертизу, может обеспечить строгую оценку различных моделей, их устойчивости и пригодности в более широком смысле. В противоположность обычно используемому рабочему процессу в этом случае было бы больше одной модели для того, чтобы продвинуться вперед в области разработки нефтяных и газовых месторождений и провести оценку рабочего процесса (рис. 3).

Оценка эффекта воздействия

Если моделируется возможное влияние выбранных концепций, может быть определено влияние и отсюда погрешность различных моделей. На этой стадии работ внимание фокусируется на анализе погрешностей и моделировании параметров, таких как резервуарная связность, параметры потока и проницаемость (e.g., Egertmann and Lenormand, 2005). Параметры представлены группами значений для того, чтобы оценить влияние и определить степень риска, связанного с добычей (e.g., Worthington, 2007; Fredman et al., 2007).

Важное направление современного процесса интерпретации заключается в том, чтобы дать первичную оценку влияния различных концепций без большого расходования времени и ресурсов на детальный анализ погрешностей. Мы предлагаем удалить из существующего рабочего процесса анализ погрешности структуры, и программное обеспечение, которое фокусируется на моделировании с высокой точностью погрешностей от единственной концепции до моделирования множества концепций.



операций (красная пунктирная линия – исходный риск) с уменьшением экономического риска при рассматривании группы концепций (сплошная красная линия – новый риск).

Уменьшение риска отдельной одно-концептуальной модели в рабочем процессе

На рис. 4 мы показываем, как, изменяя рабочий процесс можно минимизировать риск отдельной одно-концептуальной модели сглаживанием точек зажима в области неопределенности, результаты которого приведены в этой работе.

Применение стратегии последовательности операций к широкой группе концепций, необходимых геологам в ходе интерпретации данных, наряду с последующими методами уточнения созданной интерпретационной модели, может напрасно растратить ресурсы на создание геологических моделей, которые в конечном итоге «удаляются». Цель такой стратегии состоит в том, чтобы гарантировать систематический подход к разработке концепций, применению и усовершенствованию ее. Планируется скорее максимизировать, чем минимизировать, креативность и создать контрольный след возможных концепций, обработки идей и последовательности действий. Относительно численных методов (Bond et al., 2007b), сохранение контрольного следа является, возможно, более легким, чем в предыдущем случае. Это также означает, что если после перечисленных действий результат бурения является все еще неожиданным, то более ранние интерпретации и концепции могут быть легко вновь оценены без повтора полного интерпретационного процесса. Окончательная цель предлагаемой последовательности действий заключается в том, чтобы сохранить время и деньги.

Наш опыт предполагает, что не требуется сильного увеличения времени и усилий, чтобы расширить и собрать ряд концепций, применяемый к массиву данных. Использование простых технических средств, таких как бумага и цветной карандаш, или простой блок для рисования, позволяет быстро проводить интерпретацию, которая обобщается, обсуждается и сопоставляется. Эффективность совместной работы группы, рассматривающей более обширную картину, намного превосходит время, необходимое отдельному интерпретатору, чтобы оцифровать горизонты в сейсмическом интерпретационном блоке для создания единственной концептуальной модели. Целью такой обработки может быть создание блока программного обеспечения, который может легко работать с множеством моделей, проводя визуализацию и анализ. Для новаторской отрасли, сфокусированной на разведке в технически более сложных и запутанных районах, эти простые изменения в рабочем процессе являются чрезвычайно полезными.

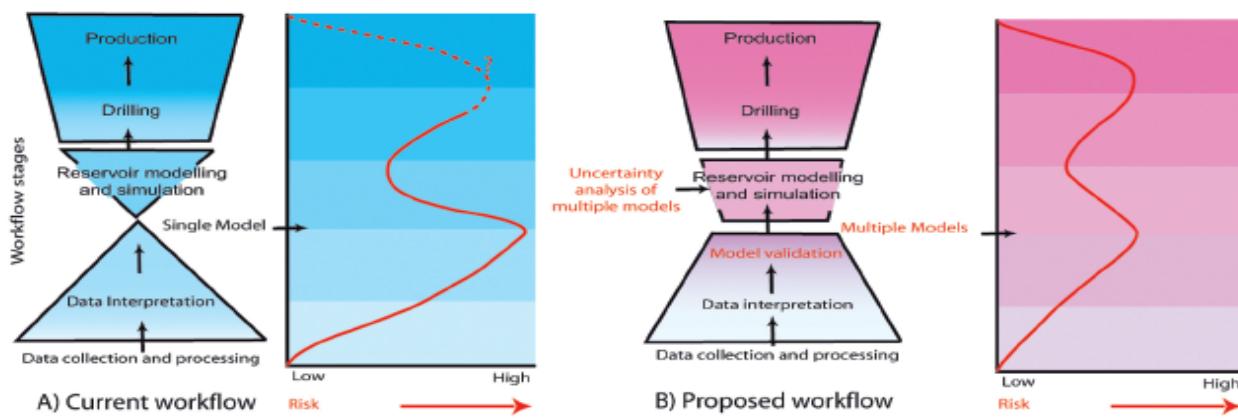


Рис. 4 Сопоставление существующей и предлагаемой последовательности операций и связанных с ними экономических рисков. (a) Современная или обычно используемая последовательность операций в отрасли, которая создает одно-концептуальную модель по интерпретационному массиву данных. (b) Предлагаемая последовательность операций для создания и оценки множества концептуальных моделей по массиву данных. В этом случае экономический риск уменьшается по мере того, как все больше моделей принимает участие в интерпретации. Количество информации, удаленной на стадии концептуальной модели, намного меньше, и создается более широкая полоса информации на стадии моделирования резервуара. Создание и сохранение информации является большим и, следовательно, полным эффектом, уменьшающим погрешность и экономический риск. Уменьшается случайная погрешность данных бурения.

Выводы

Здесь мы выделяем методы, которые уменьшают концептуальную неопределенность при интерпретации геологических данных посредством выбора группы концепций, которая может быть применена к массиву данных. Для этого мы предположили:

- Использование одного или более специалистов, владеющих априорной информацией
- Выделение специалистами группы концепций до интерпретации
- Удаление фона региональной и тектонической обстановки
- Поощрение множества вариантов интерпретации

Группа концепций, однажды определенная для массива данных, методы оценивания концепций, уточнения и оценки степени риска моделей охватывают:

- Использование структурной эволюции и методик восстановления (реконструкции) для определения устойчивости модели
- Рассмотрение региональной и тектонической обстановки
- Использование сравнительного исследования и технической гарантии специалистов
- Оценка эффекта воздействия

Изменение фокусировки в последовательности операций от отдельной одно-концептуальной модели на множество концептуальных моделей в сочетании с анализом структурной реконструкции и более обширной информацией создает возможность для лучшего анализа погрешностей. Мы утверждаем, что простой структурный анализ группы концептуальных моделей создает условия, при которых легко распознается и оценивается неопределенность на геологическом завершающем этапе рабочего процесса. Вычисление погрешности, связанной с этой неопределенностью, будет полезно для анализа суммарной погрешности всех возможных операций. Если группа обоснованных концепций, применяемая к массиву данных, может быть определена, задача заключается в том, как эффективно установить уровень достоверности и неопределенности для различных концептуальных моделей.

Благодарности

Эта работа поддержана проектом Scottish Executive SCORE. Мы благодарим коллег Midland Valley за полезные обсуждения представленных в работе тем. Внимательный пересмотр Tom Armstrong улучшил ясность этой статьи.

Литература

- Beach, A. [1981] Thrust tectonics and crustal shortening in the external French Alps based on a seismic cross-section. *Tectonophysics*, 79, T1-T6.
- Bond, C.E., Gibbs, A.D., Shipton, Z.K. and Jones S. [2007a] What do you think this is? 'Conceptual uncertainty' in geoscience interpretation. *GSA Today*, 17, 4-10. doi:10.1130/GSAT01710A.1
- Bond, C.E., Shipton, Z.K., Butler, R.W.H., Jones, R.R. and Gibbs, A.D. [2007b] Knowledge transfer in a digital world: field data acquisition, uncertainty, visualisation, and data management. *Geosphere*, 3, 568-576. doi:10.1130/GES00094.1
- Burnett, T. [1996] Petroleum exploration risk reduction using new geoscience technology. *Energy Exploration and Exploitation*, 14, 507-534.
- Burns, B.D. [2004] Heuristics as beliefs and as behaviours: the adaptiveness of the "hot hand". *Cognitive Psychology*, 48, 295-331.
- Butler, R.W.H., Matthews, S.J. and Morgan, R.K. [2007] Structural evolution of the Achtnashellach Culmination, southern Moine Thrust Belt: testing the duplex model. In: Ries, A.C., Butler, R.W.H. and Graham, R.H. (Eds.) *Deformation of the Continental Crust: the Legacy of Mike Coward*. Geological Society of London, Special Publications, 272, 103-120.
- Chamberlin, T.C. [1965] The method of multiple working hypotheses. *Science*, 148, 754-759.
- Curtis, A. and Wood, R. (Eds.) [2004] *Geological Prior Information: Informing Science and Engineering*. Geological Society, London, Special Publications, 239.
- Dahlstrom, C.D. [1969] Balanced cross-sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 6, 743-757.
- Dee, S., Freeman, B., Yielding, G., Roberts, A. and Bretan, P. [2005] Best practice in structural geological analysis. *First Break*, 23(4), 49-54.
- Egermann, P. and Lenormand, R. [2005] A new methodology to evaluate the impact of localized heterogeneity on petrophysical parameters ($k(r)$, P_c) applied to carbonate rocks. *Petrophysics*, 46, 335-345.
- Elliot, D. and Johnson, M.R.W [1980] Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt, NW Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 71, 69-96.
- Fredman, N., Tveranger, J., Semshaug, S., Braathen, A. and Sverdrup, E. [2007] Sensitivity of fluid flow to fault core architecture and petrophysical properties of fault rocks in siliciclastic reservoirs: a synthetic fault model study. *Petroleum Geoscience*, 13, 305-320.
- Frodeman, R. [1995] Geological reasoning: geology as an interpretive and historical science. *Geological Society of America Bulletin*, 107, 960-968.
- Gibbs, A.D. [1983] Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 5, 153-160.
- Hossack, J.R. [1979] The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction: a review. *Journal of the Geological Society of London*, 136, 705-711.
- Krueger, J.I. and Funder, D.C. [2004] Towards a balanced social psychology: causes, consequences and cures for the problem-seeking behaviour and cognition. *Behavioural and Brain Sciences*, 27, 313-327.
- Loizou, N. [2002] A post-well analysis of recent years exploration drilling in the Atlantic Margin. DTI Oil and Gas Directorate (UK), *Sharp I OR enewsletter*, 3.
- Rankey, E.C. and Mitchell, J.C. [2003] That's why it's called interpretation: impact of horizon uncertainty on seismic attribute analysis. *The Leading Edge*, 22, 820-828.
- Suppe, J. [1983] Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Science*, 283, 684-721.
- Sassi, W., Seed G., Shackleton R., Schelder Z. and Saeed, A.M. [2008] Quantitative analysis of the structural evolution in a 4D-analogue sandbox experiment to constrain models of palinspastic restoration. *AAPG Annual Meeting*, Abstract.
- Tozer, R.S.J., Butler, R.W.H., Chiappini, M., Corrado, S., Mazzoli, S. and Speranza, F. [2006] Testing thrust tectonic models at mountain fronts: where has the displacement gone? *Journal of the Geological Society*, 163, 1-14.
- Tversky, A. and Kahneman, D. [1974] Judgement under uncertainty: heuristics and biases. *Science*, 185, 1124-1131.
- Wood, R. and Curtis, A. [2004] Geological prior information, and its application to geoscientific problems. In: Curtis, A. and Wood, R. (Eds.) *Geological Prior Information: Informing Science and Engineering*. Geological Society, London, Special Publications, 239, 1-15.
- Worthington, P.F. [2007] A road map for improving the technical basis for the estimation of petroleum reserves. *Petroleum Geoscience*, 13, 291-303.
- Yin, H.W. and Groshong, R.H. [2006] Balancing and restoration of piercement structures: geologic insights from 3D kinematic models. *Journal of Structural Geology*, 28, 99-114.

Получено 23 января 2008; принято 26 марта 2008.