

Вероятностная оценка перспективных объектов на современном этапе разведки

Probabilistic prospect assessment in the modern exploration era

Darrel Norman, GeoKnowledge USA,* говорит о том, что развитие техники разведки и методов оценки порождает новые возможности и задачи. Современные методы вероятностной оценки перспективных объектов должны учитывать несколько продуктивных горизонтов, зависимости от риска и объемные корреляции, сценарии дискретных контактов и связанную неточность, интегрированную вдоль функций глубина-объем для учета неточностей, определенных в результате оценки.

Современная сфера разведки нефти представляет собой область принятия решений. Руководители разведочных проектов компаний, от больших до малых, постоянно выбирают между разными вариантами. Где следует разворачивать штат? Какие нефтегазоносные комплексы следует оценить? Следует ли покупать землю? Какие перспективные объекты следует разбуривать?

Решения часто принимаются на основе оценки перспективного объекта или группы объектов. Даже практически неизученные нефтегазоносные комплексы оцениваются на основе потенциала реальных или предполагаемых поисковых объектов. При оценке перспективного объекта делается попытка ответить на основной вопрос разведки нефти и газа: «Каковы шансы того, что данный перспективный объект приведет к коммерческому успеху?». Для ответа на этот вопрос нам следует оценить пределы возможных извлекаемых объемов и шансы обнаружения этих объемов.

Процесс оценки пределов потенциальных объемов и связанных с ними вероятностей называют вероятностной оценкой перспективного объекта. Она включает количественную оценку геологических рисков и неопределенностей. Риск и неопределенность в значительной степени связаны с восприятием. Они не могут быть непосредственно измерены или вычислены. Наше восприятие риска и неопределенности, которые связаны с перспективным объектом, зависит от геофизической оценки и имеющейся при оценке уверенности.

«Оценка» не должна основываться только на одной карте или модели. Геофизическая оценка перспективного объекта должна быть сделана для всей незамкнутой ловушки всех возможных выходов нефти и их относительного правдоподобия. Методическая количественная оценка риска и неопределенности — числовое выражение оценки.

За прошлые 15 лет наша способность количественной оценки геологических рисков и неопределенностей, связанных с типичным поисковым объектом, чрезвычайно улучшилась. Первичным источником усовершенствования стало применение трехмерных сейсмических и детальных оценок, которые теперь доступны до испытания перспективного объекта. В некоторых случаях, трехмерная сейсморазведка обеспечивает уровень детальности, который ранее мог быть получен только при плотной увязке со скважинными данными.

Наша способность делать детальные оценки неразбуренных перспективных объектов привела к необходимости усовершенствования имеющихся методов вероятностной оценки. Поскольку наши оценки риска и неопределенностей, связанных с неразбуренным перспективным объектом, становятся более детальными, наши методы для количественной оценки этих объектов также должны стать более детальными. Иначе, вероятностная оценка не будет соответствовать геологической оценке (и наоборот). Современные геологические оценки заслуживают современных оценок неопределенности и риска.

Обещание выполнено

Эра современных методов оценки перспективных объектов началась с издания статьи «3D сейсморазведка: выполнено ли обещание?» (Nestvold, 1992). E.O Nestvold, главный геофизик Shell, поддерживал технологию, которая в свое время была фактически неслыханна: 3D сейсмические съемки неразбуренных площадей. До 1992 г. трехмерная сейсморазведка редко использовалась в качестве разведочного инструмента. По общепринятой точке зрения трехмерная сейсмическая съемка непроверенных площадей не являлась рентабельной и значимая интерпретация данных не была возможна без увязки со скважиной. Президент Chevron в 1986 г. выразил типичное представление о 3D инструменте: «Большие нефтяные компании осознают ..., что трехмерная сейсморазведка не является чем-то, что нужно применять при изучении любого нефтегазового комплекса, но ее можно использовать при детальном исследовании открытого месторождения» (Sternbach и Roden, 2002). Nestvold продемонстрировал прибыль, которую Shell достигла с использованием трехмерной сейсморазведки для разведки, и заявил что Shell владеет 25 % всемирных 3D данных. Если это заявление было правдой, то ясно, что остальная часть промышленности располагалась ниже технологической кривой.

После издания статьи Nestvold в мире разведки на нефть произошла революция. В 1991 г. только 3 % перспективных объектов были покрыты трехмерной сейсмической съемкой до бурения. К 1996 г. уже 64 % перспективных объектов были покрыты трехмерной сейсмической съемкой до бурения. Затраты на поиски и разведку снижались с 8 \$ до 1 \$ за баррель (Barnes, 1998). В некоторых случаях все поисковые объекты покрываются 3D съемкой до бурения. Экономические коэффициенты успеха от 60 % до 80 % являются обычными на многих нефтегазовых комплексах.

*darrel@geoknowledge.com

Мир разведки на нефть изменился в 1992 г. и вероятностные методы оценки перспективных должны были измениться вместе с ним.

Мутный хрустальный шар

Чтобы разобраться в современной вероятностной оценке перспективных объектов, мы должны исследовать вероятностные методы, которые обычно использовались в эпоху двумерных съемок. К счастью, мы владеем точной картиной методов оценки примерно 1992 года. Номер журнала *Business of Petroleum Geology*, изданной Американской ассоциацией геологов-нефтяников в августе 1992 г., содержал рецептурный справочник оценки перспективных объектов — статью Ed Carpen «Исследование неопределенностей при разведке». Carpen (1992) утверждал, что все, кому было необходимо анализировать неопределенность, имели «свои карты и некую логарифмическую миллиметровку с вероятностным графиком». Он назвал моделирования Монте-Карло «чистым массовым убийством».

«Графический» метод Carpen для оценки перспективного объекта был прост:

- 1) Построение кривой логарифмически нормального распределения (которая является прямой линией на вероятностной логарифмической бумаге) для каждого из трех параметров: продуктивная площадь (рис. 1), эффективная мощность залежи (рис. 2) и «коэффициент нефтеотдачи» (рис. 3).
- 2) Перемножение значений P77 для вычисления объема запасов P90. Перемножение значений P50 для вычисления объема запасов P50. Перемножение значений P23 для вычисления объема запасов P10.
- 3) Нанесение рассчитанных точек P90, P50 и P10 на вероятностную логарифмическую бумагу и линии через эти точки (рис. 4). Для вычисления среднего значения используют «Правило Свансона»: $(P90 \times .30) + (P50 \times .40) + (P10 \times .30)$

Метод Carpen для определения трех входных распределений равнозначен выбору низких и высоких значений, нанесению этих значений на вероятностную логарифмическую бумагу как P90 и P10, и построению линии через них. Для определения распределения эффективной мощности залежи Carpen советовал «Выбрать 10%-ую и 90%-ую точки, соединить их, и таким образом, разобраться с эффективной мощностью залежи».

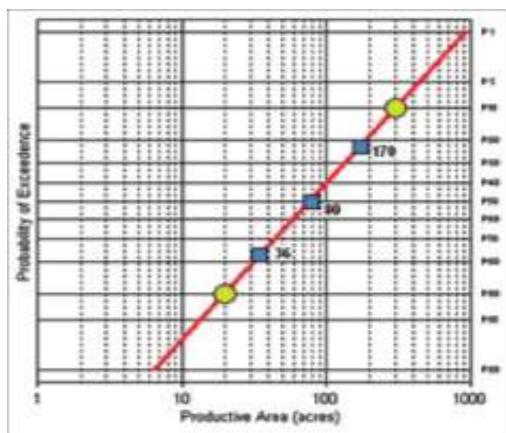


Рис. 1. Распределение продуктивной площади (по данным Carpen, 1992 г.)

Carpen настаивал на сильной зависимости от статистических данных при оценке диапазонов трех факторов, больше чем на сверхзависимости от карт геологов. Оценка должна «описывать то, что предоставляет природа, а не то, что мы хотим, чтобы она предоставляла». Другими словами, цель анализа неопределенностей состояла в том, чтобы уточнить известное распределение месторождения по размерам! Роль геолога просто заключалась в обнаружении неразбуренной выпуклой структуры. Его способность предсказывать объем запасов в пределах выпуклой структуры была отклонена с формулировками, типа, «карты часто не очень соответствуют действительности».

Не удивительно, что карты были ненадежны. Nestvold описывал двумерные данные как «в лучшем случае мутный хрустальный шар». Многие независимые геологи вообще не использовали никаких сейсмических данных, полагаясь полностью на привязку к скважинным данным. В начале 1980-ых все еще можно было найти перспективные объекты, основанные только на геологических данных! Очевидно, метод Carpen был лучше, чем вообще никакой метод, и его многие геологи использовали в 1992 г. И это был единственный метод, доступный геологам без доступа к компьютеру (в 1992 г., персональный компьютер еще не был в повсеместном доступе). И, что наиболее важно, простой подход был полностью адекватен для подбора неопределенностей, определенных типичной оценкой перспективного объекта текущего дня. Оценки, основанные на мутном хрустальном шаре, должны были быть мутными.

Большинство геофизиков просто искали неразбуренные выпуклые структуры. Большие нефтяные компании имели коридоры, полные такими представителями, храбро связывающими рулоны бумажных сейсмических профилей — часто те же самые профили, которые надо было связывать в прошлые годы — в надежде на обнаружение неразведанной структуры на не взятом в аренду блоке. Двумерные данные, которые они обрабатывали, были адекватны для того, чтобы строить недетальные структурные карты, однако это редко могло обеспечить точный прогноз того, что происходило в пределах структур. Параметры резервуара, такие как эффективная мощность залежи, высота колонны и коэффициент нефтеотдачи, базировались строго на скважинах в пределах простираения пласта. В результате прогнозный диапазон объемов в пределах перспективного объекта имел тенденцию отражать распределение месторождения по размерам.

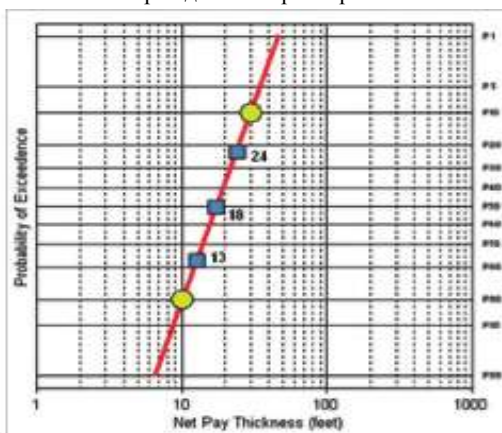


Рис. 2. Распределение эффективной мощности залежи (по данным Carpen, 1992 г.)

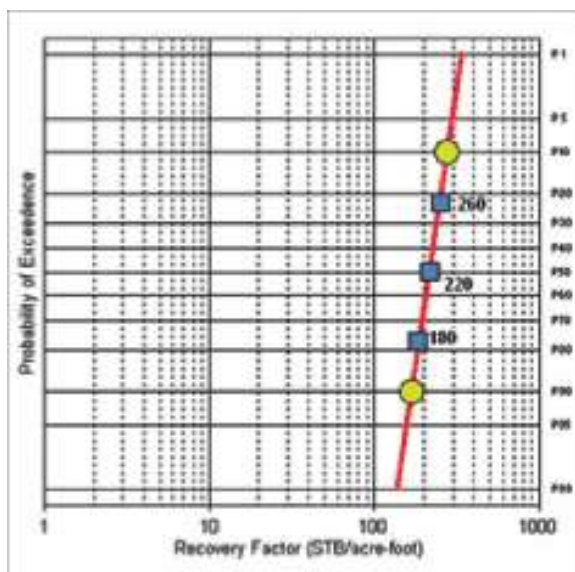


Рис. 3. Распределение коэффициента нефтеотдачи (по данным Sarap, 1992 г.)

Но несмотря на отсутствие деталей в геологических интерпретациях, они были адекватными оценками. По крайней мере, они согласовывались со статистическими данными.

В конечном счете, вероятностная логарифмическая миллиметровка Сареп была заменена электронными таблицами персонального компьютера. Эти так называемые «аналитические» программы — просто обновленные версии старых графических методов. Пользователь обычно задает логарифмически нормальное распределение каждого входного параметра, вводя P90 и P10, и программа вычисляет логарифмически нормальное распределение объемов.

Согласование с интерпретацией

Первоначальная мотивировка за простую, логарифмически нормальную оценку была справедливой: детальность геологической оценки просто не могла обеспечивать более комплексное описание риска и неопределенности. Однако качество и количество трехмерных данных лишили законной силы ту мотивировку. Трехмерная сейсморазведка обеспечивает высокую степень детальности.

Оценку современного перспективного объекта нельзя делать на основе трех логарифмически нормальных распределений, основанных на статистических данных. Цель вероятностной оценки перспективного объекта не заключается в обновлении известного распределения месторождения по размеру. Цель состоит в том, чтобы представить неопределенность геолога в зависимости от одной потенциальной точки на распределении месторождения по размеру. Обычное обоснование логарифмически нормального распределения (кое-что вроде «имеются месторождения меньше, чем большие») является несущественной, при обращении к удельным рискам и неопределенностям, связанным с перспективным объектом.

Рассмотрим перспективный объект, который мог бы характеризоваться соотношением эффективных и общих толщин от 10 % до 90 %, и он интерпретирован как

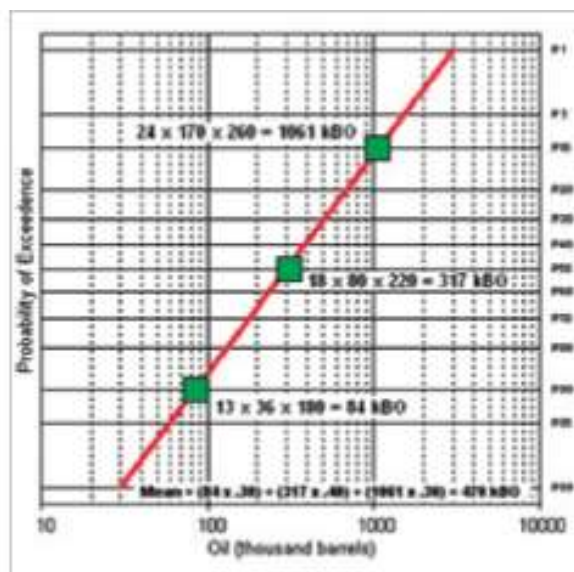


Рис. 4. Распределение промышленных запасов нефти (по данным Sarap, 1992 г.)

объект, располагающийся в пределах осадочной среды с высоким соотношением эффективных и общих толщин (рис. 5). Соответствующее отображение неопределенности стратиграфа показано на рис. 6. Соотношение эффективных и общих толщин могло быть столь же низким как 10 % или столь же высоким как 90 %, но оно вероятно составляет приблизительно 75 %.

Рис. 7, с другой стороны, показывает отображение неопределенности в соответствии с двухточечным логарифмически нормальным распределением с P99.5 = 10 % и P0.5 = 90 %. Амплитуда такая же, как и на рис. 6, однако «наиболее вероятное» соотношение эффективных и общих толщин равняется приблизительно 25 %. Другими словами, логарифмически нормальное распределение не согласуется с интерпретацией стратиграфа. Само логарифмически нормальное распределение, в действительности, оценило геологию и предсказало осадочную среду с низким значением соотношения эффективных и общих толщин (рис. 8).

Каждая оценка перспективных объектов должна согласовываться с имеющимися данными. Согласование с данными шло легко, когда все, что мы имели, это плохо-определенная структура и некоторые аналоговые скважинные данные.

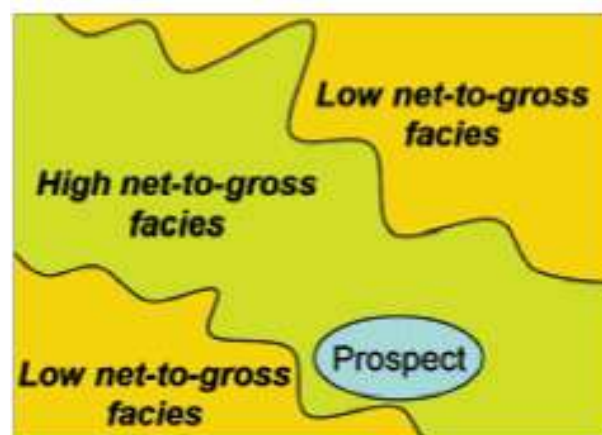


Рис. 5. Интерпретация сред осадконакопления, проведенная стратиграфом.

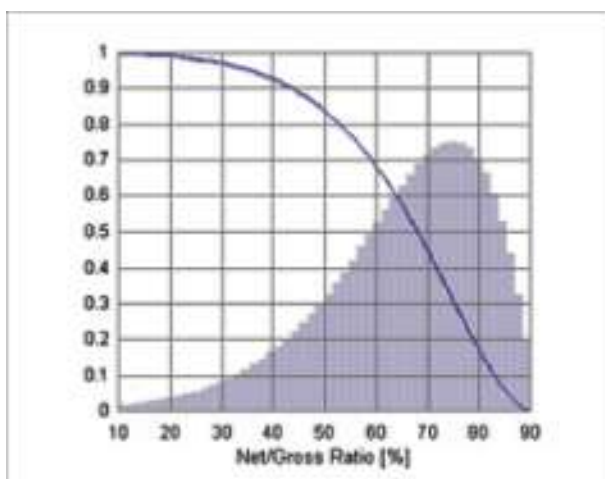


Рис. 6. Адекватное представление неопределенности стратиграфа.

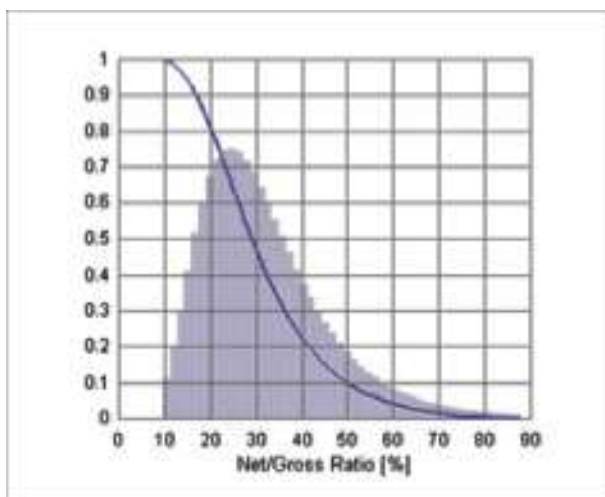


Рис. 7. Логарифмически нормальное представление неопределенности.

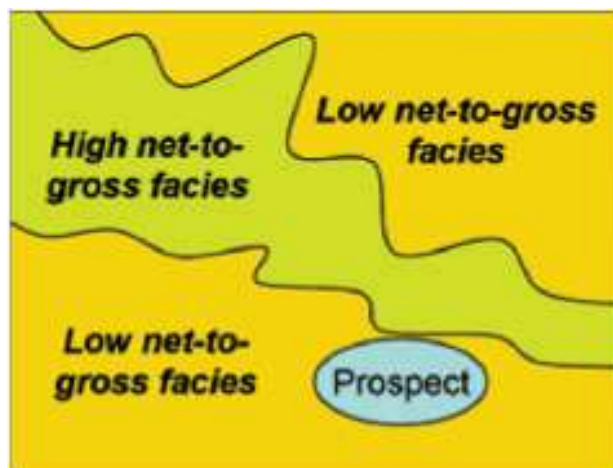


Рис. 8. Интерпретация на основе логарифмически нормального распределения.

Данные трехмерной сейсморазведки, также требующие интерпретации, обеспечивают геофизика не только достоверной структурной картой, но и богатством информации о резервуаре: мощность, стратиграфические границы, среды осадконакопления и относительное качество резервуара. В некоторых областях могут быть точно предсказаны углеводородные контактные глубины. Это — данные, реальные данные соответствующие непосредственно перспективному объекту, которые необходимо соблюдать. Больше не допустимо просто отклонять карты, как являющиеся ненадежными. Привязка к скважинам и результаты предыдущего бурения обязательно должны быть учтены в интерпретации. Но детальные интерпретации, возможные по трехмерным сейсмическим данным, требуют характерные для перспективного объекта описания риска и неопределенности, а не простое обновление имеющегося распределения месторождения по размеру.

Риск и неопределенность ни в коем случае не были устранены. Риски и неопределенности, связанные с современными перспективными объектами, завернуты в чрезвычайно запутанный лабиринт связанных геологических зависимостей. Во многих отношениях, новые оценки более трудны для оценки, чем их менее детальные предшественники.

Типичный современный перспективный объект

Рассмотрим запросы на оценку перспективного объекта Alpha (рис. 9). Риски и неопределенности, описанные для данного перспективного объекта, типичны для описаний перспективных объектов, которые теперь появляются в рабочих помещениях геофизических исследований во всем мире.

Групповые цели

Большая проблема при оценке современного перспективного объекта — просто понимание результатов и быть в состоянии сообщить их управлению. Традиционные методы оценки сосредотачиваются на том, чтобы оценить размеры и риски одиночных целевых объектов. Размер перспективного объекта — прямая функция объемных входных параметров, таких как эффективная мощность залежи, площадь и т.д. Шанс для открытия (часто называемый «геологический шанс на успех») — также прямой вход.

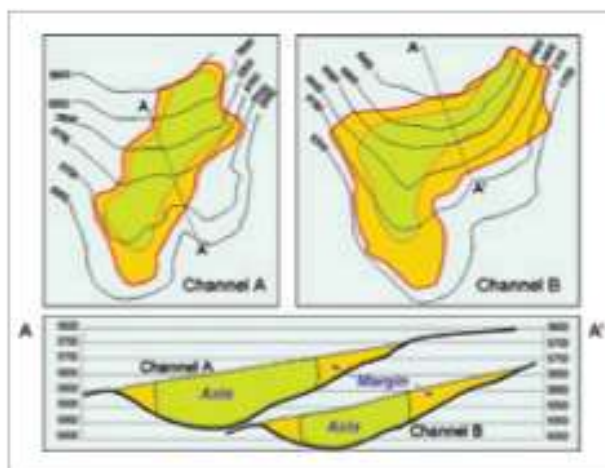


Рис. 9. Структурные карты и разрез по перспективному объекту Alpha.

Фактор риска			Зависимый?
Ловушка и крышка	1.00	1.00	—
Наличие резервуара	1.00	1.00	—
Качество резервуара	.60	.60	Нет
Источник и миграция	.50	.50	Да
Итого	.30	.30	

Когда оцениваются групповые цели, размер перспективного объекта может быть функцией шансов на успех отдельного объекта и зависимости между объектами поисков. Другими словами, размер перспективного объекта определен числом объектов поисков, которые имеют успех. Шанс перспективного объекта на успех — исход, а не вход. Если эксперты и менеджеры незнакомы с концепциями кроме оценок множественных целей, то результаты могут показаться запутывающими, если не просто бессмысленными.

Структура Alpha включает два канала. Канал А содержит 100 миллионов баррелей; канал В содержит 200 миллионов баррелей. Каждый имеет 30%-ый шанс на успех.

Если мы предполагаем, что каналы полностью независимы друг от друга, то перспективный объект имеет 51%-ый шанс на успех и среднее значение успеха 176 миллионов баррелей (рис. 10 и 11).

Эти результаты озадачат геолога, который просто сложил средние значения успеха и сделал вывод, что он картирует перспективный объект с запасами в 300 миллионов баррелей. Если геолог не может объяснить концепции и вычисления своему менеджеру, то все предприятие остановится для усердного разбирательства. И геолог, который предварительно заявил боссу, что он имел перспективный объект с 300 миллионами баррелей, будет без сомнения говорить, «оценка украла мою нефть!».

Зависимости от риска

В предыдущем примере полагалось, что каналы А и В полностью независимы друг от друга. Но два пояса в одном перспективном объекте редко бывают полностью независимы. Все же, при этом они, вероятно, не будут полностью зависеть друг от друга. Нужно рассмотреть шанс на успех для каждого канала как уменьшение геологического коэффициента риска.

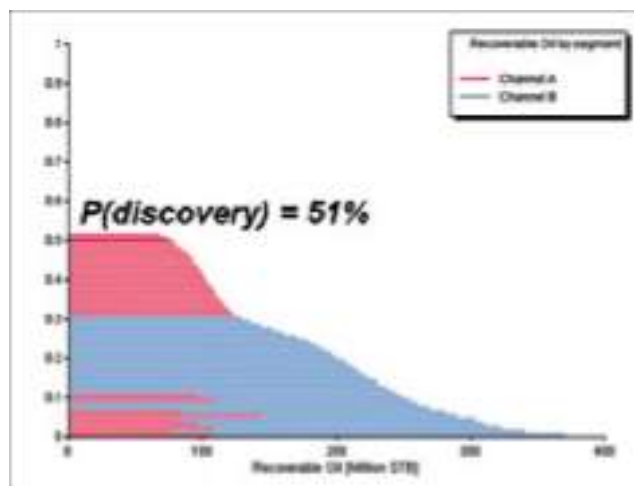


Рис. 10. Рисковый случай для структуры Alpha.

Канал	% (успех)	Средний успех
А	30	100 млн. баррелей
В	30	200 млн. баррелей
Итого	51	176 млн. баррелей

Каждый канал имеет два фактора риска: качество резервуара и исходная миграция. Если мы предполагаем, что каналы осадочно отделены, то риск качества резервуара, вероятно, будет независимым риском. Но если каналы разделяют общую систему исходной миграции, то риск исходной миграции, вероятно, будет зависимым риском. Как с большинством перспективных объектов, некоторые риски совместные, а другие нет.

Результаты совмещения риска исходной миграции показаны на рис. 12 и 13.

Добавление зависимости риска исходной миграции привело к уменьшению шанса на успех, так как неудача в одном поясе стала более вероятно сопровождаться неудачей в другом поясе. Но среднее число успешных случаев увеличилось, так как успех в одном поясе стал более вероятно сопровождаться успехом в другом поясе. Другими словами, добавление зависимости риска уменьшило шанс на открытие только в одном поясе. Мы, более вероятно, обнаружим или оба пояса, или ни один из них.

Условия осадконакопления

Детальное определение резервуара, доступное за счет трехмерной сейсморазведки, позволяет разделять объекты поисков по условиям осадконакопления или фациям. Соответствующие риски и диапазоны параметров резервуара могут быть применены к отдельным фациям.

В канале А структуры Alpha мы видим две фации: высококачественная осевая фация низкого риска, и граничная фация, которая имеет более низкое качество резервуара и более высокий риск (рис. 14). Так как коэффициент нефтеотдачи и риск связаны с типом фации,

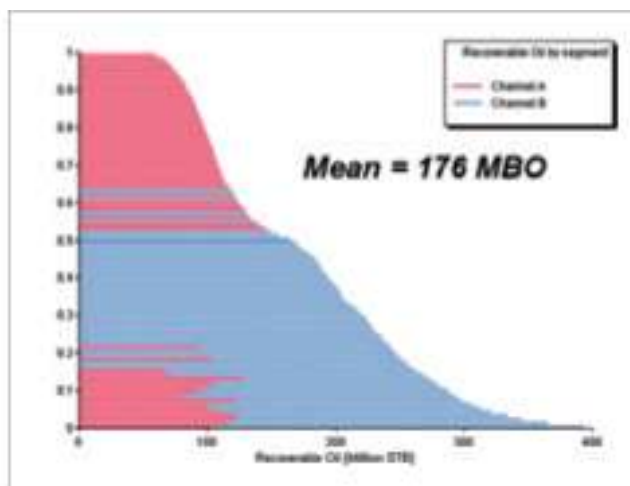


Рис. 11. Случай успеха для структуры Alpha.

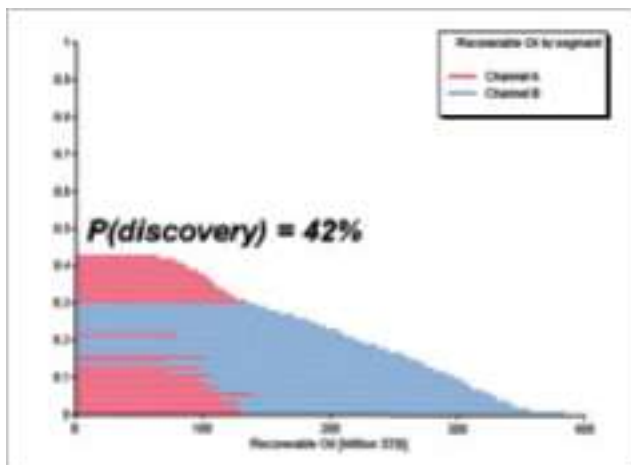


Рис. 12. Рисковый случай с зависимостью рисков для структуры Alpha.

то оценка отдельных фаций лучше представит концентрации ресурсов, что приведет к более полезному экономическому анализу и анализу разработки до бурения.

Для создания логического геологического отображения перспективного объекта, эксперт по оценке должен определить зависимости между фациями. В канале А структуры Alpha осевая и граничная фации имеют сильную зависимость по качеству резервуара. Если мы обнаруживаем в осевых фациях соотношение эффективных и общих толщин лучше, чем ожидалось, то граничные фации должны также иметь соотношение эффективных и общих толщин лучше, чем ожидалось. Если соотношение эффективных и общих толщин для осевой фации настолько низко, что оно может рассматриваться как «неудача», то граничная, вероятно, также характеризуется неудачей. Но, так как Р (качество резервуара) в осевой выше, чем в граничной, то возможно, что для осевой будет успех, в то время как граничная характеризуется неудачей.

Геологические зависимости между осевой и граничной фациями оценены с использованием комплекса корреляции зависимости риска и корреляции объема. При использовании зависимости риска мы в состоянии сделать оценку, в которой не может граничная фация с высоким риском не может характеризоваться успехом, если осевая фация более низкого риска не характеризуется успехом. И, коррелируя соотношения эффективных и общих толщин осевой и граничной фаций, мы получаем результаты, в которых высокое соотношение эффективных и общих толщин в граничной фации сопровождается высоким соотношением эффективных и общих толщин в осевой фации. Результаты комбинации корреляционных зависимостей показаны на рис. 15.

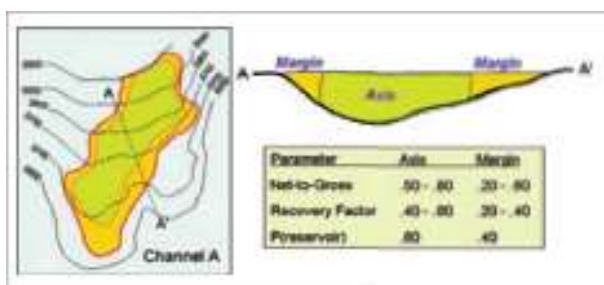


Рис. 14. Осадочные фации канала А.

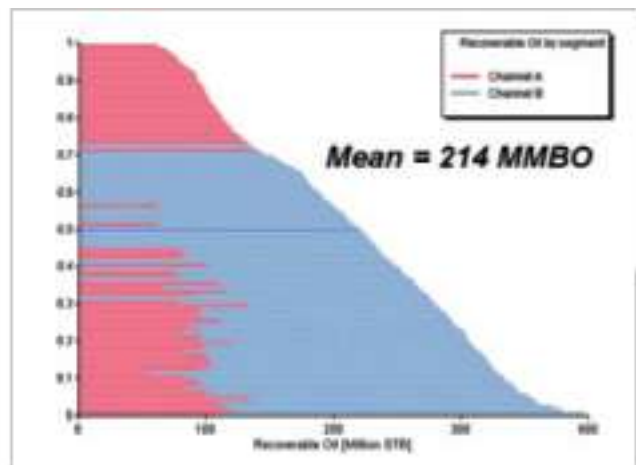


Рис. 13. Случай успеха с зависимостью рисков для структуры Alpha.

Сценарии, связанные с контактами

Во многих областях аномалии амплитуды сейсмических волн сейчас являются достоверными индикаторами жидких поверхностей раздела. Это привело к развитию метода на основе сценариев для определения неопределенностей, связанных с контактами.

В канале А структуры Alpha (рис. 16), мы видим сильную амплитудную аномалию на отметке -5850 м. Если аномалия — истинный Прямой Углеводородный индикатор, то поверхность раздела на уровне -5850 м. — вероятно или газо-водяной контакт, или водонефтяной контакт. Есть более слабая аномалия, которая простирается вниз на уровне -5900 м. Возможно, что поверхность раздела на уровне -5850 м. представляет газонефтяной контакт, в то время как поверхность раздела на уровне -5900 м. — водонефтяной контакт. Это порождает три вероятностно-весовых контактных сценария.

Традиционные методы оценки часто используют такие факторы, как площадь замыкания, наполнение ловушки и доля газа, чтобы моделировать углеводороды в пределах структур. При применении к каждому фактору логарифмически нормального распределения невозможно моделировать контакты в заданных глубинах или применять веса к контактным сценариям. Для уместного моделирования потенциальных результатов оценки должна включать только три комбинации контактов (рис. 17), каждый с соответствующим весом.

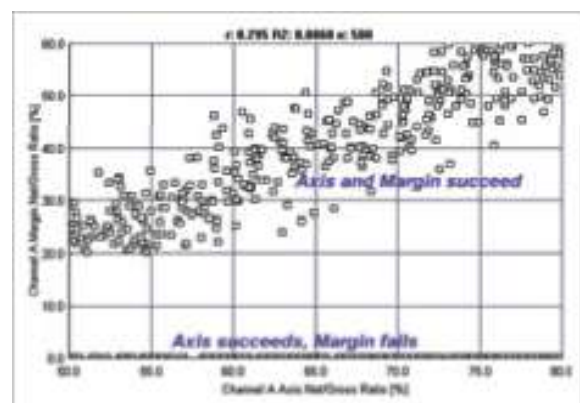


Рис. 15. Взаимосвязь эффективных и общих мощностей между осевыми и граничными фациями.

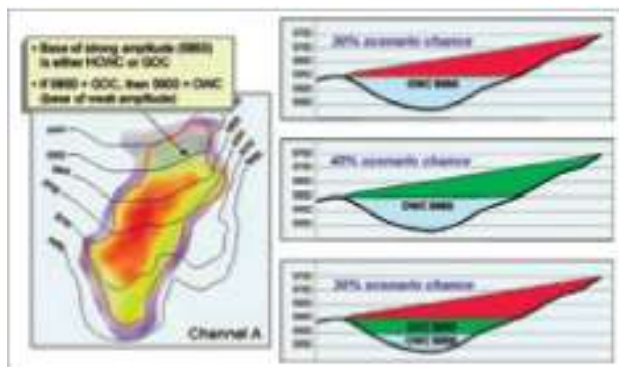


Рис. 16. Контактные сценарии для структуры Alpha.

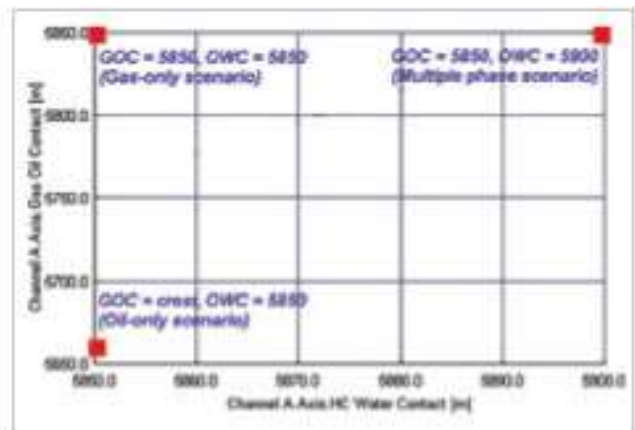


Рис. 17. Результаты вычислений контактов в структуре Alpha.

Сложные конфигурации резервуара

Перспективные объекты, определенные по двумерным данным обычно интерпретировались как простые антиклинали, сложенные латерально неизменчивым песком одного типа (рис. 18). Мощность залежи «Crestal» была преобразована в «среднюю» мощность с применением «Геометрического фактора». Неопределенность, связанная с контактной глубиной была смоделирована, изменяя продуктивную площадь и наполнение ловушки.

Перспективные объекты, картируемые с использованием трехмерных данных не могут быть смоделированы, используя традиционные объемные методы. Фактически, каналные пески, являющиеся основной целью разведки многих комплексов, являются прямой противоположностью антиклиналей. Вместо того, чтобы иметь округленную вершину и плоское основание, каналные пески часто имеют плоскую вершину и округленное основание (рис. 19)! При таких конфигурациях традиционные объемные методы просто не подходят.

Канальные пески нужно определять при помощи составления структурных карт по вершине и основанию канала, что позволит определять точную зависимость общего объема пород от глубины. Тогда неопределенность контактных глубин может быть проинтегрирована через зависимость объема от глубины. Неопределенность, связанная со структурной интерпретацией, может также быть включена в зависимость объема от глубины (рис. 20).

Предстоящая дорога

Нефтегазовая промышленность ежегодно тратит миллиарды долларов на получение новых данных и развитие новых технологий. Мы нанимаем лучших людей, обучаем их и даем им доступ к самой последней технологии. Результаты этих усилий примечательны: коэффициенты успеха растут, затраты на разведку снижаются. Очевидно, современные интерпретации более достоверны, чем те, что делались до появления трехмерных методов. Наши вероятностные оценки перспективных объектов должны основываться на результатах этих интерпретаций.

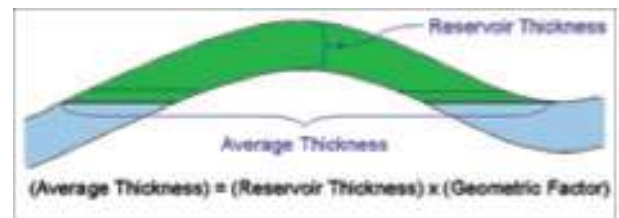


Рис. 18. Типичная конфигурация перспективного объекта, определенная по двумерным данным.

В дополнение к согласованию с данными и интерпретацией, оценка перспективного объекта должна также согласовываться со знаниями и опытом геофизика. Именно восприятие риска и неопределенности геофизиком и составляет основу оценки. Оцениваемые риски и неопределенности должны быть рисками и неопределенностями, которые определены, или восприняты, оценкой.

Определение и оценка современного перспективного объекта включает инструменты, методы и технологии, которые широко не использовались, когда в 1992 г. наступила современная эпоха разведки. Вероятностная оценка современных перспективных объектов должна также использовать инструменты, методы и концепции, которые не были доступны в 1992 г. Современная вероятностная оценка должна включать групповые цели, рискованную зависимость и объемные корреляции, сценарии дискретных контактов и неопределенность, связанную с контактами, интегрированную через зависимость объема от глубины.

Для полного включения современных методов оценки перспективных объектов в индустрию разведки мы должны:

- Развезать философию современной оценки среди наших менеджеров по разведке и геофизиков: цель оценки перспективного объекта заключается в количественном определении воспринятых рисков и неопределенностей, связанных с конкретным объектом, а не просто в обновлении существующего распределения месторождения по размерам.
- Обеспечить промышленность обучением современным методам оценки.

- Способствовать применению инструментов оценки, которые позволяют моделировать сложные риски и неопределенности, описанные в данной статье.

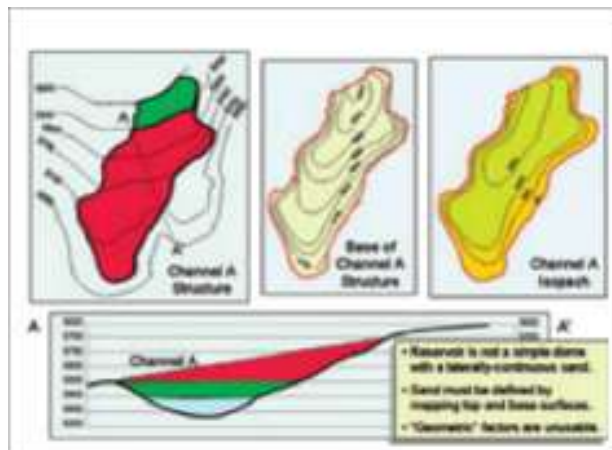


Рис. 19. Типичная конфигурация канала.

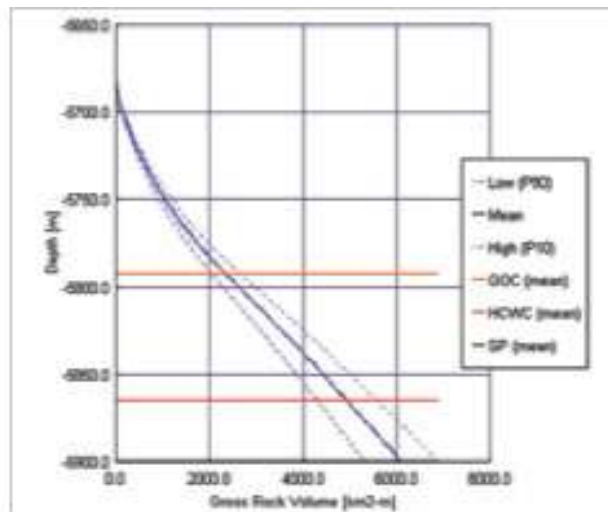


Рис. 20. Зависимость объема от глубины.

Ссылки на литературу

Barnes, B. [1998] Offshore Three-Dimensional Seismic Surveying and Future Trends in Technology. *Australian Academy of Technological Sciences and Engineering Academy Symposium*, <http://www.atse.org.au/index.php?sectionid=269>.
 Capen, E. [1992] Dealing With Exploration Uncertainties. In Steinmetz, R. (Ed) *The Business of Petroleum Geology*. American Association of Petroleum Geologists, 29-61.
 Nestvold, E.O. [1992] 3D Seismic: Is the Promise Fulfilled? *Geophysics*, June, 12-19.
 Sternbach, L. R. and Roden, R. [2002] If We Knew Then, What We Know Now: The 20-Year Transformation of the Oil Business as Recorded in TLE 1982-2002. *The Leading Edge*, Feb, 120-121.