DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/39_2015

УДК 553.98.001.57:519.2

Шатров С.В.
ПАО АНК «Башнефть», Уфа, Россия, shatrovsv@bashneft.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ УСЛОЖНЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАВИСИМОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

В публикацию вошла вторая часть исследования, посвященного выводу семейства аналитических формул, позволяющих вычислять вероятность открытия нефтяного или газового месторождения. Формулы выведены для неограниченного количества поисковых пластов и структур, с учетом пространственной корреляции проявления геологических факторов (наличие коллектора, покрышки, ловушки, материнской породы, осуществление миграции, сохранность залежи) в различных поисковых объектах. В предыдущей публикации рассматривалась только базовая математическая модель зависимости геологических факторов, в настоящей работе аналитические формулы выведены для более сложных математических моделей.

Ключевые слова: *поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений, вероятность открытия, геологические факторы, аналитические формулы.*

Введение

В настоящее время для оценки вероятности открытия месторождения при наличии нескольких целевых структур и пластов используется, как правило, метод Монте-Карло (МК). Аналитические вычисления условных вероятностей с рассмотрением дерева вариантов применялись в отдельных публикациях, но неизменно ограничивались малым количеством целевых объектов. Рассматривались либо несколько пластов в пределах единой структуры ([Murtha, 1995], [Delfiner, 2003], [Salleh, 2007]), либо несколько структур, но каждая из них как единый поисковый объект – как если бы перспективный пласт был единственным ([Kokolis и др., 1999], [Bickel, Smith, Meyer, 2008], [Delfiner, 2012]). Это связано с тем, что учет даже самой простой модели пространственной зависимости геологических факторов, определяющих вероятность открытия, делает крайне сложными прямые вычисления вероятностей по дереву вариантов. Это обнаруживается уже для случая двух пластов и двух структур, а по мере увеличения количества целевых объектов сложность прямых вычислений резко возрастает.

В публикации [Шатров, 2015] автор представил вывод компактной аналитической формулы, позволяющей вычислять вероятность наличия на оцениваемой площади хотя бы одной залежи нефти или газа – и, следовательно, месторождения – при произвольном количестве перспективных структур и пластов. В качестве входных параметров для расчета используются вероятности соблюдения ряда условий – так называемых геологических факторов, к которым относятся наличие замкнутого структурного контура, наличие коллектора, покрышки, зрелой материнской породы, осуществление миграции и сохранность залежи. Формула учитывает существование зависимостей между наличием либо отсутствием проявления каждого из геологических факторов в пределах соответствующих групп целевых объектов – пластов и структур.

Формула, полученная в [Шатров, 2015], была выведена для базовой модели зависимости геологических факторов. В настоящей работе представлены результаты дальнейшего исследования автора, в рамках которого аналогичные формулы построены для ряда более сложных моделей. Используемый подход и базовые понятия подробно описаны в первой части настоящего исследования [Шатров, 2015], поэтому в следующем разделе этот материал будет представлен в сокращенном виде.

Базовая модель зависимости и базовая формула

Во введении были перечислены шесть геологических факторов, от которых зависит возможность либо невозможность существования и, соответственно, обнаружения залежей нефти и газа. Важнейшим свойством этих факторов является их независимость друг от друга. С другой стороны, имеется пространственная корреляция между наличием либо отсутствием проявления того или иного фактора для различных потенциальных залежей оцениваемой площади. Так, материнская порода либо наличествует, либо отсутствует для всех пластов (или по крайней мере для определенной пачки), антиклинальные структуры, как правило, наследуются по разрезу, наличие либо отсутствие в соседних структурах коллектора или тем более покрышки в одном и том же пласте также характеризуется той или иной корреляцией.

Для корректного учета этих зависимостей автором была сформирована математическая модель, представляющая собой матрицу из $n \cdot m$ потенциальных подсчетных объектов-залежей (рис. 1), где n – количество перспективных структур на оцениваемой площади, m – количество потенциально продуктивных пластов. Каждый элемент (ячейка) этой матрицы представляет собой потенциальную залежь, для существования которой необходима одновременная реализация в соответствующем элементе всех шести геологических факторов.

При этом геологические факторы коллектора, покрышки, миграции и сохранности залежи были разложены на региональные (R_j) и локальные (L_{ji}) компоненты[1]: первые действуют в пределах целого пласта, вторые – только в пределах каждой отдельной потенциальной залежи. Фактор наличия структуры (S_i) действует целиком на соответствующий столбец матрицы – это означает, что в пределах каждой структуры

[1] *У переменных R_j, S_i и L_{ji} индекс j обозначает пласт, индекс i – структуру.*

замкнутый структурный контур либо существует во всех приуроченных к ней пластах, либо во всех пластах отсутствует. Фактор материнской породы (М) либо реализуется для всех пластов и всех структур, либо для всех них отсутствует.

Структуры, вероятности S_i

Пласты, региональные вероятности R_j	S_1	S_2	…	S_i	…	S_n
R_1	L_{11}	L_{12}	…	L_{1i}	…	L_{1n}
R_2	L_{21}	L_{22}	…	L_{2i}	…	L_{2n}
…	…	…	…	…	…	…
R_j	L_{j1}	L_{j2}	…	L_{ji}	…	L_{jn}
…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…
…	…	…	…	…	…	…
R_m	L_{m1}	L_{m2}	…	L_{mi}	…	L_{mn}

Рис. 1. Матрица подсчетных объектов и области действия вероятностных параметров

Согласно данной модели, вероятность подтверждения продуктивности *j*-того пласта в *i*-той структуре равна произведению четырех переменных: $M \cdot S_i \cdot R_j \cdot L_{ji}$. Вероятность же открытия месторождения (будем обозначать ее как Pg[2]) – это вероятность того, что найдется хотя бы одна подтвердившаяся структура (S_i), а также хотя бы один такой пласт, у которого, во-первых, подтвердится региональная составляющая геологических факторов (R_j) и, во-вторых, подтвердится локальная составляющая – для данного пласта в данной структуре (L_{ji}); и при этом имеется в наличии толща материнских пород (М). В первой части проведенного исследования для данной базовой модели была выведена следующая формула:

$$P_g = M \cdot \left[1 - \sum_{p=0}^{m} \sum_{y=1}^{C_m^p} \left(\prod_{j=1}^{p} (R_j) \cdot \prod_{j=p+1}^{m} (1 - R_j) \cdot \sum_{k=0}^{n} \sum_{x=1}^{C_n^k} \left(\prod_{i=1}^{k} \left(S_i \prod_{jj=1}^{p} (1 - L_{jj}^{i}) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^{n} (1 - S_i) \right) \right) \right] \quad (1)$$

Проблема учета восходящего характера миграции

В базовой математической модели, для которой получена формула (1), фактор миграции рассматривался как «внутренняя» характеристика каждого пласта. Между тем, путь миграции от материнских пород к формирующейся залежи пролегает через пласты, залегающие ниже по разрезу. При вертикальной миграции углеводороды последовательно пересекают разрез снизу вверх – либо вдоль проводящего разлома, либо преодолевая каждый очередной пласт-покрышку, когда по мере заполнения соответствующей ловушки в очередном пласте-коллекторе достигается высота залежи, которая обеспечивает гидродинамический напор, достаточный для преодоления данной покрышки. При

[2] *От слов geological probability – геологическая вероятность. Этим подчёркивается, что месторождение может быть любым по запасам и по продуктивности, критерии его рентабельности не учитываются.*

латеральном характере миграции заполнение ловушки происходит за счет движения углеводородов вдоль пласта, при этом вертикальная миграция происходит на удалении от ловушки. Однако и в этом случае логично ожидать, что латеральная миграция, реализовавшаяся для некоторого пласта, имеет все шансы реализоваться по аналогичному маршруту также для нижележащих пластов, залегающих с ним согласно.

Таким образом, существует корреляция между «наличием» или «отсутствием» фактора миграции для согласно залегающих пластов, в том числе в пределах отдельно взятой структуры. Эту корреляцию можно сформулировать следующим образом: если в пределах отдельно взятой структуры миграция осуществилась в некотором пласте, то с большой вероятностью она осуществилась – в пределах данной структуры – также для потенциальных залежей остальных пластов ниже по разрезу; и наоборот, если в пределах отдельно взятой структуры миграция НЕ осуществилась в некотором пласте, то с большой вероятностью она также НЕ осуществилась – в пределах данной структуры – для потенциальных залежей остальных пластов выше по разрезу. Следует подчеркнуть: речь идет не о наличии или отсутствии залежи, а исключительно о миграции как об одном из необходимого набора геологических факторов.

Сформулированная зависимость не является абсолютно строгой: если насыщение ловушки произошло в результате латеральной миграции, то потенциальная залежь нижележащего пласта (пластов) может быть не охвачена миграцией из-за отсутствия путей для миграции в этом пласте. Это может быть связано, например, с литологическим замещением коллектора. Другой возможный вариант: разлом, разделяющий два тектонических блока, имеет такую амплитуду вертикального смещения, что для некоторых пластов гидродинамическая связь через разлом сохраняется, в то время как другие (более тонкие) пласты эту связь утратили. Кроме того, известны случаи, когда миграция происходит в коллекторы, залегающие ниже по разрезу, чем материнская толща. Так, для юрских пластов Западной Сибири нефтегазоматеринской породой является баженовская свита, залегающая выше по разрезу. Кроме того, возможно переслаивание материнских пластов с пластами-коллекторами.

В перечисленных случаях сформулированная зависимость либо вообще не имеет места, либо проявляется лишь частично. Однако в наиболее распространенном, «классическом» случае целевые пласты, к которым приурочены коллекторы, залегают выше материнских пород, а миграция носит преимущественно восходящий характер, вверх по разрезу. Это связано, в частности, с тем, что генерация нефти и газа возможна только в определенном диапазоне термобарических условий, которые обеспечиваются на значительных глубинах (в общем случае от 2,5–3 км), в то время как пласты с хорошими коллекторскими свойствами, как правило, залегают на меньших глубинах.

На рис. 2 приведен пример сочетания латеральной и вертикальной миграции. Здесь плюсами отмечены залежи, удовлетворяющие сформулированной закономерности, а минусами – отклоняющиеся от нее. В целом можно считать, что на бо́льшем количестве потенциальных объектов данная закономерность оказывается в силе. Это подтверждается данными по огромному количеству многопластовых месторождений различных нефтегазоносных провинций и бассейнов: открытые залежи не разбросаны хаотично по всем выявленным поднятиям, а приурочены к нескольким структурам, в то время как в соседних структурах все пласты оказываются водоносными.

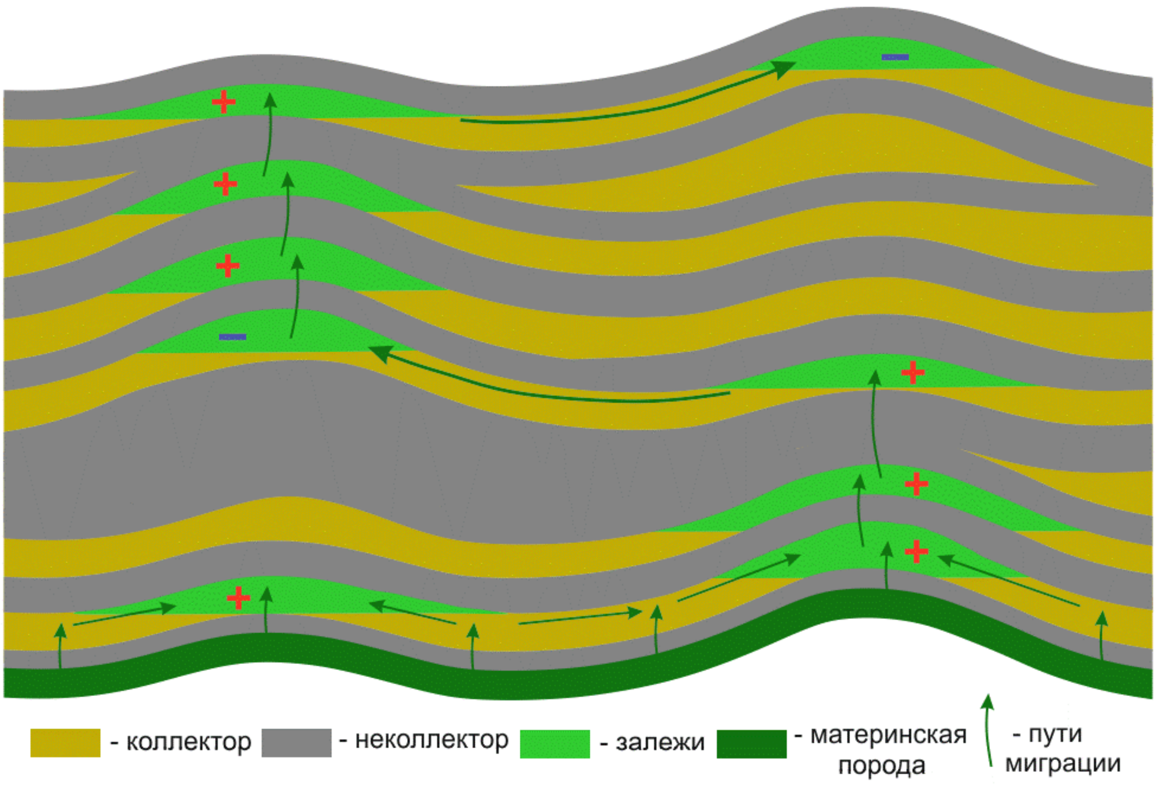

Рис. 2. Иллюстрация путей миграции, демонстрирующая действие «вертикальной зависимости», а также исключения из нее
(выполнен по мотивам учебного курса С.В. Фролова (МГУ) «Формирование залежей нефти и газа»)

Разумеется, такая тенденция к кластеризации залежей должна учитываться в алгоритме вероятностной оценки. С другой стороны, жесткое задание этой зависимости игнорирует возможные исключения, примеры которых также приведены на рис. 2. Метод МК, лежащий в основе вероятностной оценки ресурсов, позволяет без труда обойти эту проблему: для каждого пласта задается дополнительный регулирующий параметр со значением от 0 до 1, который определяет степень (а точнее, вероятность) проявления вертикальной зависимости для фактора миграции в каждой потенциальной залежи данного пласта. В результате для каждой вероятностной реализации метода МК датчик случайных чисел определяет, должна ли учитываться эта зависимость, при этом вероятность выбора между учетом и неучетом определяется значением этого регулирующего параметра. Значение 0 соответствует полному отсутствию зависимости, в этом случае результат моделирования методом МК будет полностью соответствовать значению, рассчитанному по формуле (1).

Аналитические формулы лишены подобной гибкости: формула, описывающая случай *частичного* проявления зависимости, была бы чрезмерно громоздкой. Поэтому в настоящей публикации ограничимся выводом формулы, описывающей *полное* проявление вертикальной зависимости фактора миграции для всех объектов. Более гибкий подход существует, но будет рассмотрен в следующей статье.

Модификация формулы для учета восходящего характера миграции

Формула (1) содержит произведение $\prod_{jj=1}^{p}\left(1-L_{jj}^{i}\right)$. Это произведение представляет собой вероятность того, что в пределах данной структуры (индекс i) в данном наборе регионально подтвердившихся пластов каждая потенциальная залежь (индекс jj) является невозможной в силу локальных факторов L_{jj}^{i}. Обозначим эту группу как функцию $F_i(p, y)$. Напомним, что, в соответствии с обозначениями формулы (1), переменная p обозначает количество регионально подтвердившихся пластов, переменная y обозначает конкретный набор этих пластов, а индекс i – определенную структуру, в пределах которой проводится перемножение величин $\left(1-L_{jj}^{i}\right)$[3].

При выводе формулы (1) к локальным факторам были отнесены локальное наличие коллектора, покрышки, осуществление миграции, сохранность залежи. Для того, чтобы учесть вертикальную зависимость фактора миграции, в формуле (1) необходимо модифицировать функцию $F_i(p, y)$ – заменить группу $\prod_{jj=1}^{p}\left(1-L_{jj}^{i}\right)$ более сложным выражением, в котором фактор миграции будет выделен в отдельный параметр и учтена «вертикальная зависимость» этого параметра в пределах данной структуры.

Важно отметить, что теперь, в модели вертикальной зависимости, для каждой потенциальной залежи вероятность миграции может быть только меньше или равна значению вероятности миграции для залежи в предыдущем, нижележащем пласте данной структуры. То есть значение вероятности может либо оставаться постоянным, либо уменьшаться снизу вверх по разрезу. Для дальнейших рассуждений будет удобно в пределах каждой структуры обозначить значения вероятности миграции особым образом: для первого пласта обозначить через M_1 ее реальное значение, а для всех последующих обозначить через M_{jj} отношение реального значения вероятности к реальному же значению вероятности

[3] *Значение всех индексов и переменных, а также суммирований и произведений пояснено в [Шатров, 2015].*

осуществления миграции в предыдущий (нижележащий) пласт: $M_1^{реальная} = M_1$, $M_2^{реальная} = M_1 \cdot M_2$, $M_3^{реальная} = M_1 \cdot M_2 \cdot M_3$, $M_m^{реальная} = M_1 \cdot M_2 \cdot \ldots \cdot M_m$, где в левой части равенств стоят реальные значения, а в правой – новые, нормированные переменные.

Через L_{jj} будем теперь обозначать вероятность одновременного наличия коллектора и покрышки, а также локальную сохранность залежи – без фактора миграции. Здесь и далее в этом разделе для удобства опускаем верхний индекс i, обозначающий принадлежность залежей к i-той структуре, но продолжаем рассматривать именно отдельно взятую структуру, в соответствии с исходным смыслом функции $F_i(p, y)$.

Рассмотрим случай трех пластов, будем считать их «регионально подтвердившимися». Кроме того, предположим наличие материнской породы и подтвержденность данной структуры. На рис. 3 приведено дерево вариантов, которое следует анализировать слева направо. Красным цветом обозначены варианты отсутствия залежей во всех пластах данной структуры, темно-зеленым – вариант наличия залежи в том пласте, к которому относится соответствующая ветвь дерева вариантов.

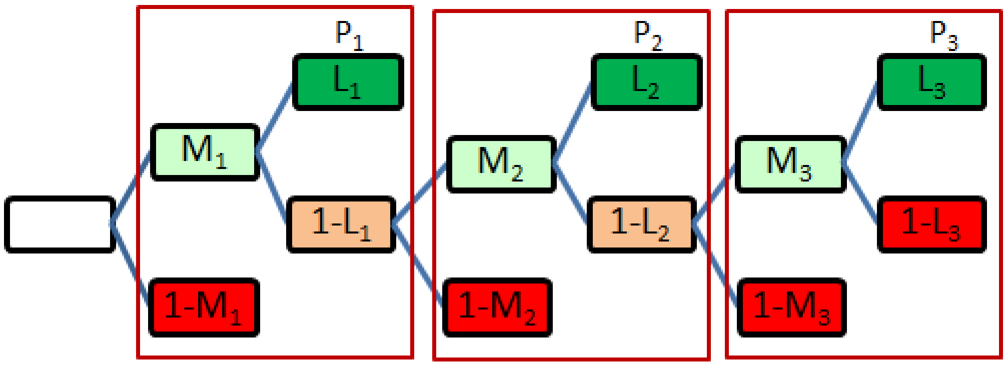

Рис. 3. Дерево вариантов с учетом вертикальной зависимости миграции для трех пластов

В рамках рассматриваемой модели отсутствие миграции в первый (нижний) пласт означает, что миграция в последующие пласты невозможна, поэтому данный вариант означает отсутствие залежей во всех пластах данной структуры. Вероятность данного исхода составляет $1 - M_1$. Если миграция в первый пласт имеет место, то анализируем локальный фактор L_1. Если и коллектор, и покрышка имеется[4], то соблюдены все условия для формирования залежи, вероятность данного исхода $P_1 = M_1 \cdot L_1$. Если локальный фактор в первом пласте не работает, то начинаем по аналогичной схеме анализировать второй пласт, и так далее. В итоге вероятность наличия залежи в данной структуре соответствует сумме

[4] *В локальную неопределённость входит также фактор сохранности залежи, однако для простоты изложения здесь и далее упоминаются только основные два фактора: наличие коллектора и покрышки.*

вероятностей «зеленых» ветвей дерева вариантов: $P_1+P_2+P_3$. При этом, как следует из схемы, $P_1 = M_1 \cdot L_1$; $P_2 = M_1 \cdot (1-L_1) \cdot M_2 \cdot L_2$; $P_3 = M_1 \cdot (1-L_1) \cdot M_2 \cdot (1-L_2) \cdot M_3 \cdot L_3$. В исходной формуле суммируем вероятность *отсутствия* залежей, так что для случая трех пластов функция $F_i(p,y)$ принимает следующий вид: $1-(P_1+P_2+P_3) = 1 - M_1 \cdot [L_1 + (1-L_1) \cdot M_2 \cdot [L_2 + (1-L_2) \cdot M_3 \cdot L_3]]$. Очевидно, что для случая четырех пластов в этом выражении вместо L_3 появится дополнительный член $[L_3 + (1-L_3) \cdot M_4 \cdot L_4]$, и так далее, для произвольного количества пластов.

Был рассмотрен упрощенный случай, когда все пласты являются регионально подтвердившимися и возможность формирования залежей контролируется только фактором миграции и локальным наличием коллектора и покрышки. Рассмотрим теперь более общий случай: пусть имеется шесть пластов, из них регионально подтвердившимися являются только три: первый, третий и шестой. В этом случае дерево вариантов будет выглядеть следующим образом: элементы регионально подтвердившихся пластов будут иметь такой же вид, как в предыдущем примере, не подтвердившиеся же регионально пласты выступают исключительно в роли «проводников» миграции от предыдущего пласта в следующий. Соответствующая схема представлена на рис. 4. Формирование залежи во втором, четвертом и пятом пластах в любом случае невозможно в силу региональных факторов, поэтому значение локального фактора в них не имеет значения и на схему не вынесено. Каждый из этих пластов либо обеспечивает «передачу» миграции вышележащим пластам (и в этом случае следует рассматривать варианты наличия или отсутствия залежей в вышележащих пластах), либо оказывается для миграции тупиком.

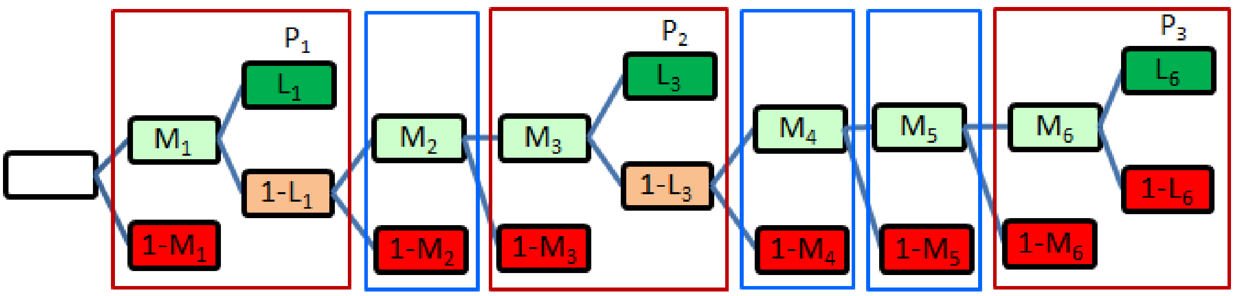

Рис. 4. Дерево вариантов с учетом вертикальной зависимости миграции для шести пластов, из которых только 1-й, 3-й и 6-й являются регионально подтвердившимися

Повторяя рассуждения, приведенные выше для случая трех пластов, имеем: $P_1 = M_1 \cdot L_1$; $P_2 = M_1 \cdot (1-L_1) \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot L_3$; $P_3 = M_1 \cdot (1-L_1) \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot (1-L_3) \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot L_6$. Соответственно, приходим к следующему частному виду выражения для функции $F_i(p,y)$: $1-(P_1+P_2+P_3) = 1 - M_1 \cdot [L_1 + (1-L_1) \cdot M_2 \cdot M_3 \cdot [L_3 + (1-L_3) \cdot M_4 \cdot M_5 \cdot M_6 \cdot L_6]]$.

Следует подчеркнуть: данное выражение соответствует частному случаю функции $F_i(p, y)$, в котором регионально подтвердившимися являются три из шести пластов, а именно 1-й, 3-й и 6-й. Записать в этих же переменных общий вид функции $F_i(p, y)$ для произвольного суммарного количества пластов m, произвольного количества регионально подтвердившихся пластов p и их произвольной конфигурации – проблематично.

Чтобы все же записать общий вид функции $F_i(p, y)$, необходимо переименовать переменные. Речь по-прежнему идет не о пласте в целом, а об отдельной структуре, просто для удобства опускаем индекс i, обозначающий принадлежность к i-той структуре, сохраняя его только в имени функции $F_i(p, y)$. Итак, пусть из общего количества пластов m регионально подтвержденным является некоторый набор из p пластов (номер данного набора соответствует индексу y). Обозначим вероятность L_{jj} в *самом нижнем* из этих пластов через L^1, L_{jj} в следующем регионально подтвердившемся пласте – через L^2 , и так далее, до L^{p}.

Параметры миграции переименуем более сложно. Если пласт, залегающий непосредственно ниже данного, также является в данном наборе регионально подтвержденным, то M^{k} будет обозначать вероятность миграции M_{jj} в k-том подтвердившемся пласте – то есть в этом случае переименование происходит так же, как для параметров L_{jj}. Если же один или несколько пластов, находящихся непосредственно перед данным, являются не подтвердившимися регионально, то обозначим через M^{k} произведение M_{jj} в k-том подтвердившемся пласте и всех M_{jj-1}, M_{jj-2} и т.д. в регионально не подтвердившихся пластах, непосредственно предшествующих данному.

Таким образом, для рассмотренного выше случая шести пластов, из которых регионально подтвердившимися являются 1-й, 3-й и 6-й, производится следующее переименование переменных (новые переменные имеют верхние индексы): $\mathrm{L}^1 = \mathrm{L}_1$; $\mathrm{L}^2 = \mathrm{L}_3$; $\mathrm{L}^3 = \mathrm{L}_6$; $\mathrm{M}^1 = \mathrm{M}_1$; $\mathrm{M}^2 = \mathrm{M}_2 \cdot \mathrm{M}_3$; $\mathrm{M}^3 = \mathrm{M}_4 \cdot \mathrm{M}_5 \cdot \mathrm{M}_6$. Производя соответствующие подстановки, получаем:

$$F_i(p, y) = 1 - (\mathrm{P}^1 + \mathrm{P}^2 + \mathrm{P}^3) = 1 - \mathrm{M}^1 \cdot \left[\mathrm{L}^1 + (1 - \mathrm{L}^1) \cdot \mathrm{M}^2 \cdot [\mathrm{L}^2 + (1 - \mathrm{L}^2) \cdot \mathrm{M}^3 \cdot \mathrm{L}^3]\right]$$

Таким образом, запись функции $F_i(p, y)$ в новых переменных имеет универсальный вид, что и требовалось. По своей структуре она идентична формуле, полученной выше для случая, когда все три пласта являются регионально подтвержденными. Вот общий вид этой функции для произвольного общего количества пластов, из которых регионально подтвердившимися является некоторое число p, с произвольным расположением этих p пластов относительно остальных:

$$F_i(p, y) = 1 - \mathrm{M}^1 \cdot \left[\mathrm{L}^1 + (1 - \mathrm{L}^1) \cdot \mathrm{M}^2 \cdot [\mathrm{L}^2 + (1 - \mathrm{L}^2) \cdot \ldots \cdot \mathrm{M}^{\mathrm{p}} \cdot \mathrm{L}^{\mathrm{p}}]\right] \quad (2)$$

Итак, в модели строгой вертикальной зависимости для фактора миграции вероятность открытия месторождения выражается следующей модифицированной формулой:

$$\mathrm{P_g}=\mathrm{M}\cdot\left[1-\sum_{p=0}^{m}\sum_{y=1}^{C_m^p}\left(\prod_{j=1}^{p}(R_j)\cdot\prod_{j=\mathrm{p}+1}^{m}(1-R_j)\cdot\sum_{k=0}^{n}\sum_{x=1}^{C_n^k}\left(\prod_{i=1}^{k}(S_i\cdot F_i(p,y))\cdot\prod_{i=k+1}^{n}(1-S_i)\right)\right)\right] \quad (3)$$

где $F_i(p, y)$ имеет только что установленный вид (2).

Вариант уменьшения достоверности структуры вверх или вниз по разрезу

Как в формуле (1), так и в формуле (3) вероятность подтверждения каждой структуры рассматривалась как единый параметр: предполагалось, что если наличие той или иной структуры подтверждается для одного пласта, то и для всех остальных перспективных пластов данная структура также существует. Между тем, в реальности достоверность существования замкнутого структурного контура в потенциальных залежах, приуроченных к различным пластам одной и той же структуры, может уменьшаться вверх или вниз по разрезу. На рис. 5 схематически изображен наиболее очевидный пример этого: постепенное изменение амплитуды антиклинали. Другой причиной, обуславливающей необходимость дифференцированного задания вероятности подтверждения структуры, может быть неопределенность, связанная с затуханием замыкающего разлома вверх или вниз по разрезу. Могут быть и какие-то более сложные случаи.

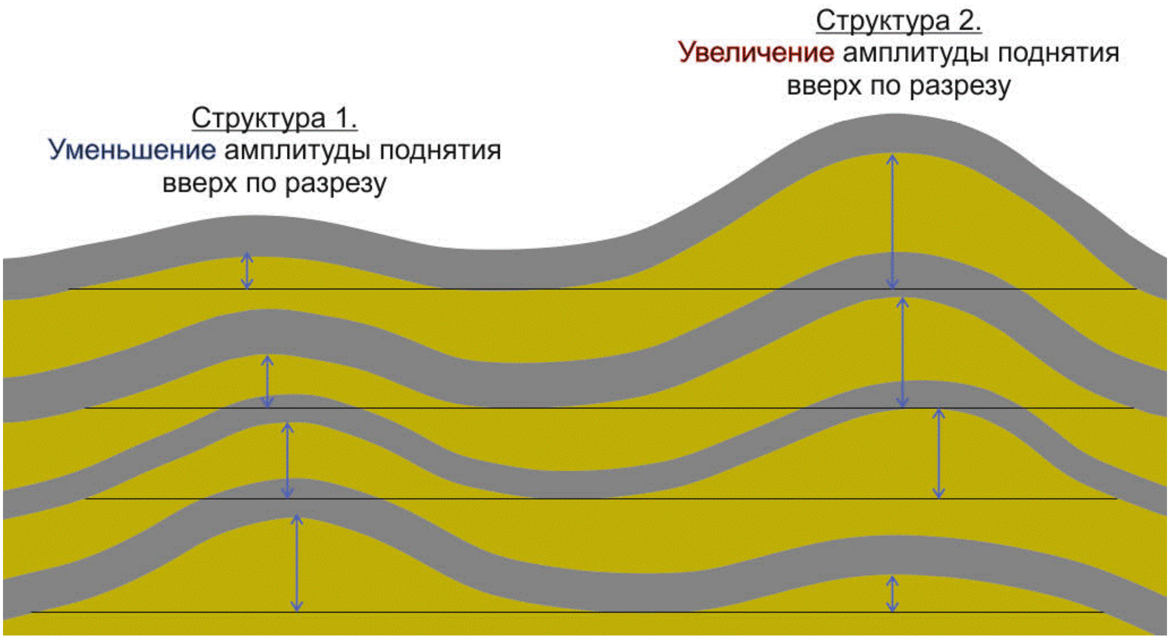

Рис. 5. Выполаживание структур вверх или вниз по разрезу

Таким образом, в математическую модель необходимо внести дополнительное усовершенствование: возможность дифференцировано задавать вероятность подтверждения структуры. В предыдущих разделах структура рассматривалась как-либо подтверждающаяся для всех пластов, либо как отсутствующая – также для всех пластов. Теперь допускаем, что структура может обеспечивать существование замкнутого контура (а значит, «существовать») в одних пластах – и не обеспечивать в других. При этом сохраним своеобразную иерархию подтверждения, а именно будем считать: если структура подтверждается в одном из пластов, то она существует также во всех тех остальных пластах, в которых вероятность ее подтверждения задана не меньшей, чем в данном (для структуры номер 1 на рис. 5 – во всех нижележащих, для структуры номер 2 – во всех вышележащих пластах). И наоборот, если в одном из пластов структура не подтверждается, то во всех тех пластах, в которых вероятность ее подтверждения – выше, чем в данном, она также отсутствует.

Рассмотрим два базовых случая: монотонное уменьшение вероятности от нижнего пласта к верхнему: ${S_i}^1 \geq {S_i}^2 \geq \cdots \geq {S_i}^m$ – или ее монотонное возрастание: ${S_i}^1 \leq {S_i}^2 \leq \cdots \leq {S_i}^m$ (нижний индекс обозначает произвольную структуру, верхний – пласт; использование знаков $\geq$ и $\leq$ означает, что соседние пласты могут иметь одинаковую вероятность подтверждения структуры. Более сложные случаи, требующие задания немонотонного изменения вероятности, являются значительно более редкими. В тех же случаях, когда это все-таки необходимо, можно корректировать отдельные значения вероятности посредством изменения локальных вероятностей L_i^j по соответствующим залежам.

Важно понимать, почему было бы ошибкой воспользоваться этим приемом шире, а именно – продолжать использовать вероятность подтверждения структуры как единую константу, присваивая ей наибольшее из требуемого диапазона значений (вероятность подтверждения структуры в самом нижнем или самом верхнем пласте), а необходимые уменьшения вероятности в остальных пластах регулировать с помощью параметра L_i^j – локальной вероятности (которая в представляет собой произведение локальных вероятностей наличия коллектора, покрышки и сохранности залежи). Дело в том, что в этом случае оказалась бы утраченной взаимная зависимость между подтверждением структуры в относящихся к ней потенциальных залежах различных пластов – «вертикальная организация» объектов. Иначе говоря, удалось бы обеспечить нужное значение вероятности подтверждения структуры для каждой потенциальной залежи, но не удалось бы воспроизвести указанную выше закономерность: если структура подтверждается в одном пласте, то также и во всех тех, в которых вероятность подтверждения задана такой же или большей; и наоборот – неподтверждение структуры в одном пласте означает неподтверждение ее и там, где оно было задано как менее вероятное. Соответственно, неучет этой зависимости привел бы к завышению вероятности открытия месторождения и одновременно к занижению ожидаемой величины открытия.

Модификация основной формулы для сценария $S_i^1 \geq S_i^2 \geq \cdots \geq S_i^m$

Итак, рассмотрим сначала сценарий, в котором достоверность выделения структуры убывает вверх по разрезу: $S_i^1 \geq S_i^2 \geq \cdots \geq S_i^m$. В этом случае подтверждение структуры в каждом последующем пласте оказывается невозможным, если структура не подтвердилась в предыдущем (нижележащем) пласте. Таким образом, фактор наличия структуры ведет себя в рамках данного сценария точно так же, как фактор осуществления миграции, что было рассмотрено в предыдущем разделе. Поэтому удобно ввести для вероятностей подтверждения структуры такую же нормировку, какая была введена для фактора миграции: для первого (нижнего) пласта обозначить через S_1 ее реальное значение, а для всех последующих обозначить через S_j отношение реального значения вероятности к реальному же значению вероятности подтверждения структуры в предыдущем пласте. Тогда $S_1^{реальная} = S_1$, $S_2^{реальная} = S_1 \cdot S_2$, $S_3^{реальная} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$, $S_m^{реальная} = S_1 \cdot S_2 \cdot \ldots \cdot S_m$, где в левой части равенств стоят реальные значения, а в правой – новые, нормированные переменные.

На рис. 6 представлено дерево вариантов для случая шести пластов, из которых 1-й, 3-й и 6-й являются регионально подтвержденными. Как видно, в этом случае структура вариантов очень похожа на структуру рис. 5, только в каждом пласте появляется дополнительный этап – проверка наличия замкнутого контура в данном пласте. Если в каком-то пласте структура не подтверждается или миграция не происходит, анализ прекращается (соответствующие ячейки окрашены в красный цвет).

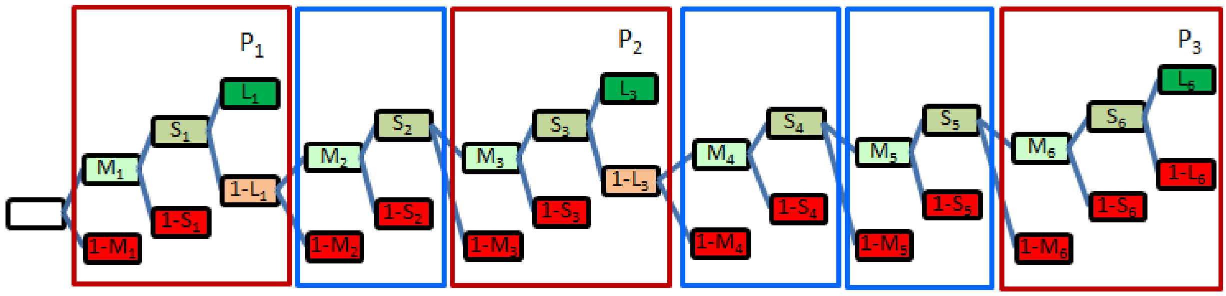

Рис. 6. Дерево вариантов для модели, аналогичной представленной на рис. 4, но с учетом уменьшения вероятности подтверждения структуры снизу вверх (от 1-го пласта к 6-му)

Как и ранее, необходимо записать модифицированное выражение для функции $F_i(p,y)$, которая определяет вероятность полного отсутствия залежей в данной структуре, для данного набора регионально подтвердившихся пластов. Добавим в название этой функции верхний индекс 1: $F_i^1(p,y)$, – который будет обозначать рассматриваемый сценарий: $S_i^1 \geq S_i^2 \geq \cdots \geq S_i^m$. Из приведенного на рис. 6 дерева вариантов следует, что $\mathrm{P_1 = M_1S_1L_1}$; $\mathrm{P_2 = M_1S_1(1-L_1)\,M_2S_2M_3S_3L_3}$; $\mathrm{P_3 = M_1S_1(1-L_1)\,M_2S_2M_3S_3(1-L_3)\,M_4S_4M_5S_5M_6S_6L_6}$.

Соответственно, приходим к следующему частному виду выражения для функции ${F_i}^1(p,y)$:
$1-(\mathrm{P}_1+\mathrm{P}_2+\mathrm{P}_3)=1-\mathrm{M}_1\mathrm{S}_1\left[\mathrm{L}_1+(1-\mathrm{L}_1)\,\mathrm{M}_2\mathrm{S}_2\mathrm{M}_3\mathrm{S}_3[\mathrm{L}_3+(1-\mathrm{L}_3)\,\mathrm{M}_4\mathrm{S}_4\mathrm{M}_5\mathrm{S}_5\mathrm{M}_6\mathrm{S}_6\mathrm{L}_6]\right]$.

Чтобы записать общий вид функции ${F_i}^1(p,y)$, для произвольного количества пластов и набора регионально подтвердившихся пластов, необходимо переименовать переменные аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе. Для рассматриваемого примера это реализуется по следующей схеме: $\mathrm{L}^1=\mathrm{L}_1$; $\mathrm{L}^2=\mathrm{L}_3$; $\mathrm{L}^3=\mathrm{L}_6$; $\mathrm{M}^1=\mathrm{M}_1$; $\mathrm{M}^2=\mathrm{M}_2\mathrm{M}_3$; $\mathrm{M}^3=\mathrm{M}_4\mathrm{M}_5\mathrm{M}_6$; $S^1=S_1$; $S^2=S_2S_3$; $S^3=S_4S_5S_6$. Функция ${F_i}^1(p,y)$ приобретет при этом следующий вид: $1-\mathrm{M}^1S^1\left[\mathrm{L}^1+(1-\mathrm{L}^1)\,\mathrm{M}^2S^2[\mathrm{L}^2+(1-\mathrm{L}^2)\,\mathrm{M}^3S^3\mathrm{L}^3]\right]$. Общий же вид функции ${F_i}^1(p,y)$ получается таким:

$$1-(\mathrm{P}^1+\mathrm{P}^2+\cdots+\mathrm{P}^\mathrm{p})=1-\mathrm{M}^1S^1\left[\mathrm{L}^1+(1-\mathrm{L}^1)\,\mathrm{M}^2S^2[\mathrm{L}^2+(1-\mathrm{L}^2)\cdot\ldots\cdot\mathrm{M}^\mathrm{p}\cdot S^\mathrm{p}\cdot\mathrm{L}^\mathrm{p}]\right].$$

Полученные выражения полностью соответствуют дереву вариантов, изображенному на рис. 6. Однако сам реализованный подход содержит небольшой логический изъян. Дело в том, что в уравнении (3) функция $F_i(p,y)$ находится внутри двойного суммирования по всем возможным комбинациям подтвердившихся структур. При этом вероятность реализации каждой комбинации структур учитывается посредством перемножения вероятностей подтверждения структур, входящих в набор, и вероятностей неподтверждения всех остальных структур: $\prod_{i=1}^{k}\left(S_i\cdot F_i(p,y)\right)\cdot\prod_{i=k+1}^{n}(1-S_i)$. Для единообразия желательно сохранить именно такой логический смысл также и для модифицированной функции ${F_i}^1(p,y)$. Поэтому представляется целесообразным ввести следующее уточняющее понятие: подтверждение структуры в первом (нижнем) пласте рассматривать как подтверждение данной структуры «в целом», ее существование «по крайней мере для одного пласта». Вероятность этого события для произвольной i-той структуры составляет $S_{1,i}$.

Таким образом, величина $S_{1,i}$ будет рассматриваться как базовая вероятность наличия i-той структуры как таковой («хотя бы в одном пласте») и использоваться в общей формуле для определения вероятности того или иного набора подтвердившихся структур. А чтобы избежать дублирующего умножения на эту величину, необходимо пересмотреть определение переменной S_1 – фактически приравнять ее к единице: $S_1 = {S_1}^{\text{реальная}}/S^{\text{структуры\_в\_целом}} = {S_1}^{\text{реальная}}/{S_1}^{\text{реальная}} = 1$. Теперь функция ${F_i}^1(p,y)$ имеет именно тот смысл, что был заложен в исходной функции $F_i(p,y)$.

$${F_i}^1(p,y)=1-\mathrm{M}^1\cdot S^1\cdot\left[\mathrm{L}^1+(1-\mathrm{L}^1)\cdot\mathrm{M}^2\cdot S^2\cdot[\mathrm{L}^2+(1-\mathrm{L}^2)\cdot\ldots\cdot\mathrm{M}^\mathrm{p}\cdot S^\mathrm{p}\cdot\mathrm{L}^\mathrm{p}]\right] \quad (4),$$

Итак, в сценарии убывания достоверности выделения структуры вверх по разрезу вероятность открытия месторождения описывается следующим уравнением:

$$P_g = M \cdot \left[1 - \sum_{p=0}^{m} \sum_{y=1}^{C_m^p} \left(\prod_{j=1}^{p} (R_j) \cdot \prod_{j=p+1}^{m} (1 - R_j) \cdot \sum_{k=0}^{n} \sum_{x=1}^{C_n^k} \left(\prod_{i=1}^{k} \left(S_{1,i} \cdot F_i^{\,1}(p,y) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^{n} (1 - S_{1,i}) \right) \right) \right] \quad (5)$$

где $S_{1,i}$ – вероятность подтверждения i-той структуры в 1-м (нижнем) пласте – или, что то же самое, вероятность подтверждения данной структуры «хотя бы в одном пласте».

Модификация основной формулы для сценария $S_i^1 \leq S_i^2 \leq \cdots \leq S_i^m$

Теперь рассмотрим другой сценарий вариации достоверности выделения структуры, а именно – когда вероятность подтверждения структуры в каждом последующем (вышележащем) пласте *больше или равна* таковой в предыдущем. Этот вариант несколько более сложен, поскольку уменьшение вероятности подтверждения структуры и уменьшение вероятности осуществления миграции происходят теперь в противоположных направлениях.

Как и в предыдущем сценарии, введем понятие подтверждения структуры «в целом», то есть «хотя бы для одного пласта». Теперь в этой роли выступит вероятность подтверждения самого верхнего пласта – S_i^m. Соответственно, нормирование вероятностей проведем в иной последовательности, от верхнего пласта к нижнему: $S_m = 1$ (с учетом замечания в конце предыдущего раздела), $S_{m-1} = S_{m-1}^{реальная}/S_m^{реальная}$, …, $S_1 = S_1^{реальная}/S_2^{реальная}$.

Рассмотрим сначала случай трех пластов, каждый из которых является регионально подтвердившимся. Необходимо выяснить, какова вероятность отсутствия залежей во всех регионально подтвердившихся пластах (в данном случае – во всех трех имеющихся пластах) некоторой структуры – иначе говоря, определить вид функции $F_i^{\,2}(p,y)$. Индекс 2 в названии функции означает рассматриваемый в настоящем разделе сценарий – уменьшение вероятности подтверждения структуры вниз по разрезу.

Начнем анализ, как обычно, с нижнего пласта (рис. 7). Как и прежде, отсутствие миграции в нижний пласт означает невозможность образования залежей – как в первом, так и во всех вышележащих пластах. Если же миграция в первый пласт имеет место, то проверяем реализацию структуры. В предыдущем сценарии неподтверждение структуры на этом этапе означало невозможность формирования залежи как в этом, так и во всех вышележащих пластах, соответствующая ветвь дерева вариантов на рис. 6 была выделена красным цветом. Теперь же неподтверждение структуры в нижнем пласте вовсе не означает, что она не может подтвердиться в одном из остальных пластов. Поэтому в дереве вариантов на рис. 7 вариант неподтверждения структуры и вариант неподтверждения локальных факторов объединены в один блок, который является единым базисом для анализа следующего пласта.

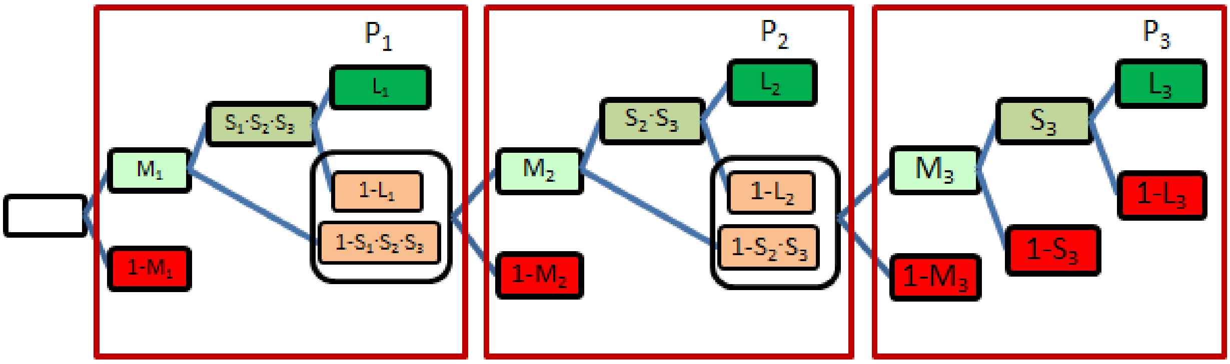

Рис. 7. Дерево вариантов для трех регионально подтвержденных пластов, при уменьшении вероятности подтверждения структуры сверху вниз

Из приведенного дерева вариантов следует, что $P_1 = M_1S_1S_2S_3L_1$(в соответствии с описанной выше перенормировкой, группа $S_1S_2S_3$ обозначает вероятность наличия ловушки в первом пласте данной структуры[5]); $P_2 = M_1(1 - S_1L_1)\,M_2S_2S_3L_2$; $P_3 = M_1M_2M_3S_3L_3\big(1 - S_2(L_2 + (1 - L_2)\,S_1L_1)\big)$. Дадим небольшое пояснение: в формуле для P_3 произведение $M_1M_2M_3$ дает вероятность «дохождения» миграции до третьего пласта, произведение S_3L_3 – вероятность реализации там ловушки и необходимых локальных геологических факторов. При этом член $\big(1 - S_2(L_2 + (1 - L_2)\,S_1L_1)\big)$ означает вероятность одновременного отсутствия залежи в 1-м и 2-м пластах: ведь для реализации залежи во втором пласте в дополнение к факторам $M_1M_2S_3$ (которые уже присутствуют в группе $M_1M_2M_3S_3L_3$), необходимо «выполнение» S_2L_2, для реализации залежи в первом пласте – «выполнение» $S_2(1 - L_2)\,S_1L_1$.

Для четырех пластов получается дерево вариантов, изображенное на рис. 8. В этом случае $P_1 = M_1S_1S_2S_3S_4L_1$; $P_2 = M_1(1 - S_1L_1)\,M_2S_2S_3S_4L_2$; $P_3 = M_1M_2M_3S_3S_4L_3\big(1 - S_2(L_2 + (1 - L_2)\,S_1L_1)\big)$; $P_4 = M_1M_2M_3M_4S_4L_4\Big(1 - S_3\big(L_3 + (1 - L_3)\,S_2(L_2 + (1 - L_2)\,S_1L_1)\big)\Big)$. Следует отметить, что добавление в модель четвертого пласта приводит не только к появлению нового члена P_4 (как это было в предыдущих двух моделях), но и к замене произведения $S_1S_2S_3$ на $S_1S_2S_3S_4$ в формуле для P_1, S_2S_3 на $S_2S_3S_4$ в формуле для P_2 и т.д.

Аналогично, для произвольного количества пластов p, каждый из которых является регионально подтвержденным, вероятность формирования залежи в самом верхнем пласте – при одновременном отсутствии залежей во всех остальных пластах – имеет следующий вид:

[5] *Строго говоря, это справедливо только в случае, если структура подтверждается «хотя бы для одного пласта» (см. проведённую перенормировку). Однако функция $F_i^2(p, y)$ имеет смысл и рассматривается только для подтвердившихся структур, поэтому здесь всё верно.*

$$P_p = M_1M_2\cdot\ldots\cdot M_pS_4L_4\left(1 - S_{p-1}\left(L_{p-1} + (1 - L_{p-1})\,S_{p-2}\left(L_{p-2} + (1 - L_{p-2})\cdot\ldots\cdot S_1L_1\right)\right)\ldots\right).$$

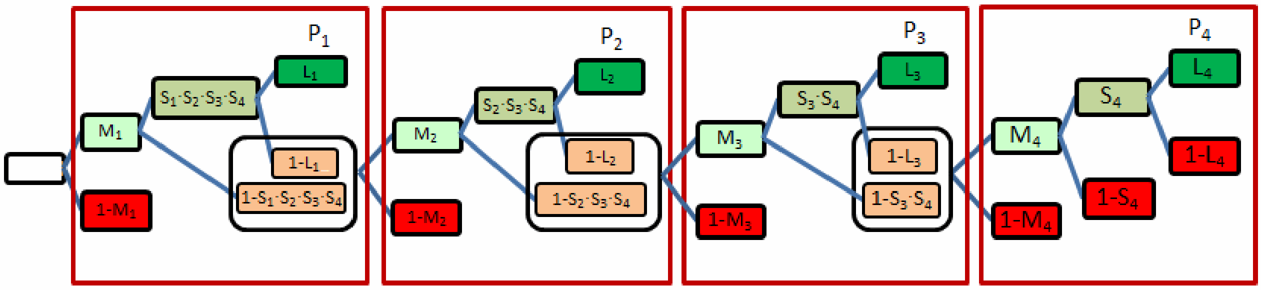

Рис. 8. Дерево вариантов для четырех пластов

Остальное аналогично рис. 7.

В последних двух примерах все пласты были регионально подтвержденными. Рассмотрим теперь более общий случай: шесть пластов, из которых регионально подтверждены 1-й, 3-й и 6-й. Соответствующее дерево вариантов представлено на рис. 9. Как и в модели, рассмотренной в 4-м разделе (см. рис. 4), регионально не подтвержденные пласты не могут содержать залежей и выступают исключительно в роли проводников миграции в вышележащие пласты. А также, условно говоря, «проводников подтверждения структуры» в нижележащие пласты (хотя это не отмечено в явном виде на схеме и выражается лишь в увеличении количества сомножителей в произведениях S_j).

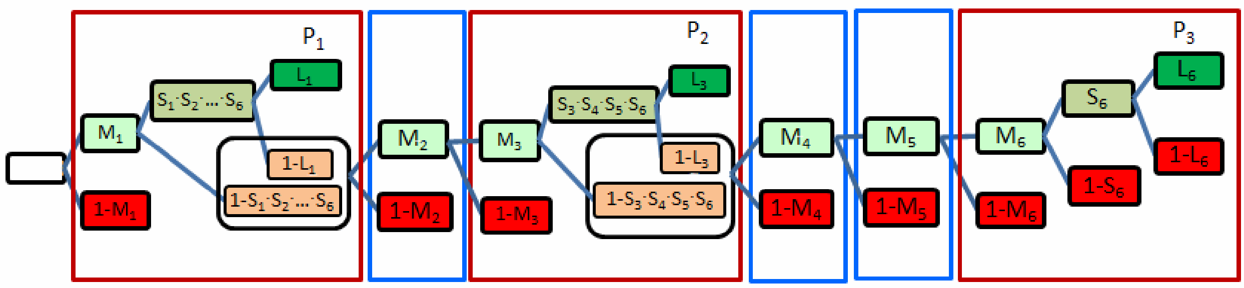

Рис. 9. Дерево вариантов для шести пластов, из которых 1-й, 3-й и 6-й являются регионально подтвердившимися, в модели уменьшения вероятности подтверждения структуры сверху вниз

Для этой модели получаются следующие вероятности формирования залежей: $P_1 = M_1S_1S_2S_3S_4S_5S_6L_1$; $P_2 = M_1M_2M_3S_3S_4S_5S_6L_3(1 - S_1S_2L_1)$; $P_3 = M_1M_2M_3M_4M_5M_6S_6L_6\left(1 - S_3S_4S_5S_6(L_3 + (1 - L_3)\,S_1S_2L_1)\right)$. Структура этих формул полностью аналогична рассмотренному выше варианту трех пластов, схема которого изображена на рис. 7. Различие лишь в том, что в новом варианте для подтверждения ловушки, скажем, в третьем пласте необходимо ее подтверждение во всех вышележащих пластах, включая регионально неподтвержденные, что приводит к увеличению количества множителей S_j. (Аналогично, вместо произведения S_1L_1 закономерно появляется произведение $S_1S_2L_1$, так как при наличии структуры в третьем пласте вероятность ее подтверждения в первом пласте равна произведению S_1S_2).

Чтобы записать общий вид функции $F_i{}^2(p,y)$ для произвольного общего количества пластов m и произвольного количества регионально подтвердившихся пластов p, необходимо снова прибегнуть к вспомогательным переменным. Новые переменные для локальных вероятностей L^j и вероятностей миграции M^j введем таким же образом, как это было сделано в конце 4-го раздела: $L^1 = L_1$; $L^2 = L_3$; $L^3 = L_6$; $M^1 = M_1$; $M^2 = M_2M_3$; $M^3 = M_4M_5M_6$. В результате получаем: $P_1 = M^1S^1L^1$; $P_2 = M^1M^2S^2L^2(1-(S^1/S^2)L^1) = M^1M^2L^2(S^2 - S^1L^1)$; $P_3 = M^1M^2M^3S^3L^3\big(1 - S^2/S^3(L^2 + (1-L^2)S^1/S^2L^1)\big) = M^1M^2M^3L^3\big(S^3 - (S^2L^2 + (1-L^2)S^1L^1)\big)$.

Что касается вероятностей подтверждения структур, то на данном этапе целесообразно вернуться к «реальным» (т.е. не нормированным) значениями вероятности подтверждения структуры в том или ином пласте. В рассматриваемом примере (см. рис. 9) обозначим $S^1 = S_1{}^{\text{реальная}}/S_m{}^{\text{реальная}}$; $S^2 = S_3{}^{\text{реальная}}/S_m{}^{\text{реальная}}$; $S^3 = S_6{}^{\text{реальная}}/S_m{}^{\text{реальная}} = 1$. Группа S^1/S^2 соответствует произведению нормированной вероятности подтверждения структуры в самом нижнем из регионально подтвердившихся пластов на нормированные вероятности подтверждения структур всех пластов, разделяющих этот пласт со вторым регионально подтвердившимся пластов. В рассматриваемом примере это произведение S_1S_2.

Аналогично, в примере с четырьмя регионально подтвердившимися пластами (при произвольном общем количестве пластов) вероятность обнаружения единственной залежи в самом верхнем из этих четырех пластов будет иметь в новых переменных следующий вид: $P_4 = M^1M^2M^3M^4L^4\Big(S^4 - \big(S^3L^3 + (1-L^3)(S^2L^2 + (1-L^2)\,S^1L^1)\big)\Big)$. Общий вид функции $F_i{}^2(p,y)$ для произвольного количества p регионально подтвердившихся пластов:

$$F_i{}^2(p,y) = 1 - (P_1+P_2+\ldots+P_m) = 1 - M^1S^1L^1 - M^1M^2L^2(S^2 - S^1L^1) - \ldots$$
$$- M^1M^2\cdot\ldots\cdot M^pL^p\Big(S^p - \Big(S^{p-1}L^{p-1} + (1-L^{p-1})\big(S^{p-2}L^{p-2} + (1-L^{p-2})(\ldots S^1L^1\ldots)\big)\Big)\Big) \quad (6)$$

Теперь можно записать и наиболее общий вид формулы для вероятности открытия месторождения – формулы, предусматривающей наличие на оцениваемой площади как структур типа $S_i{}^1 \le S_i{}^2 \le \cdots \le S_i{}^m$, так и структур типа $S_i{}^1 \ge S_i{}^2 \ge \cdots \ge S_i{}^m$:

$$P_g = M\cdot\left[1 - \sum_{p=0}^{m}\sum_{y=1}^{C_m^p}\left(\prod_{j=1}^{p}(R_j)\cdot\prod_{j=p+1}^{m}(1-R_j)\cdot\sum_{k=0}^{n}\sum_{x=1}^{C_n^k}\left(\prod_{i=1}^{k}\big(S_i{}^*\cdot F_i{}^*(p,y)\big)\cdot\prod_{i=k+1}^{n}(1-S_i{}^*)\right)\right)\right] \quad (7)$$

При этом для структур с убыванием вероятности от нижнего пласта к верхнему $F_i^*(p,y) = F_i^1(p,y)$, $S_i^* = S_{1,i}$; для структур с убыванием вероятности от верхнего пласта к нижнему $F_i^*(p,y) = F_i^2(p,y)$, $S_i^* = S_{m,i}$. Таким образом, в обоих случаях S_i^* – это вероятность подтверждения данной (i-той) структуры хотя бы для одного пласта.

Заключение

Существенно расширена возможная область применения аналитического расчета вероятности открытия месторождения по сравнению с базовым случаем, рассмотренным в предыдущей публикации [Шатров, 2015].

Следует отметить, что рассмотренные подходы можно комбинировать. Например, нетрудно получить формулу, учитывающую уменьшение достоверности структуры вверх или вниз по разрезу, но при этом не использовать модель жесткой вертикальной детерминированности миграции. Для этого необходимо исключить из формул (4) и (6) переменные M^j, относящиеся к миграции (просто приравняв их к единице), а также вернуться к исходному определению переменных R_j и L_{ji}, в которые наряду с наличием коллектора и покрышки снова будет входить региональное и локальное осуществление миграции, как это было в базовой формуле (1).

Как в предыдущей публикации, так и в настоящей работе рассматривался случай единственной материнской толщи, потенциально способной обеспечить формирование залежей в любом из рассматриваемых пластов. В следующей, заключительной части исследования, выведенный ранее набор формул будет адаптирован для случая нескольких нефтегазоматеринских толщ.

Кроме того, будет предложен способ преодоления ограничений, связанных с жестко детерминированной моделью вертикальной миграции, не отказываясь при этом от учета тенденции к кластеризации залежей, описанной в разделе 3. В результате набор аналитических формул приобретет завершенность, а также достаточную гибкость для решения самых различных вычислительных задач.

Литература

Шатров С.В. Расчет вероятности открытия месторождения с учетом взаимной зависимости параметров в пределах оцениваемых пластов и структур. // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. - Т.10. - №2. - http://www.ngtp.ru/rub/11/13_2015.pdf. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2015

Bickel, E.B., Smith, J.E., Meyer, J.L. 2008. Modeling dependence among geologic risks in sequential exploration decisions. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 11. Issue 2. P. 352-361. SPE-102369-PA. https://doi.org/10.2118/102369-PA

Delfiner, P. 2003. Modeling Dependencies Between Geologic Risks in Multiple Targets. SPE Reservoir Evaluation & Engineering. Vol. 6. Issue 1. P. 57-64. SPE-82659-PA. https://doi.org/10.2118/82659-PA

Delfiner, P. 2012. Intelligent exploration and appraisal program for a multiprospect development. SPE Economics & Management. Vol. 4. Issue 2. P. 106 - 114 SPE-146547-PA. https://doi.org/10.2118/146547-PA

Kokolis, G.P., Litvak, B.L., Rapp, W.J., Wang, B. 1999. Scenario selection for valuation of multiple prospect opportunities: a Monte Carlo play simulation approach. SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 21-23 March, Dallas, Texas. SPE-52977-MS. https://doi.org/10.2118/52977-MS

Murtha, J.A. 1995. Estimating reserves and success for a prospect with geologically dependent layers. SPE Reservoir Engineering. Vol. 11. Issue 1. P. 37–42. SPE-30040-PA. https://doi.org/10.2118/30040-PA

Salleh S.H., Rosales E., Flores de la Mota I. Influence of different probability based models on oil prospect exploration decision making: a case from southern Mexico // Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, v. 24, num. 3, 2007, p. 306-317.

Shatrov S.V.
JSOC Bashneft, Ufa, Russia, shatrovsv@bashneft.ru

ANALYTICAL CALCULATION OF THE CHANCE TO DISCOVER OIL OR GAS FIELD FOR SOME COMPLICATED DEPENDENCE MODELS OF GEOLOGIC FACTORS

The paper constitutes the second part of the research in which a set of analytical formulas was derived for probability calculations of an oil or gas field discovery. The formulas were derived by the author for an unlimited number of leads and target horizons with respect to the spatial interdependences of geologic factors across different targets (potential hydrocarbon accumulations). In the previously published first part of this research the basic mathematical model of dependence was considered whereas in the present paper analytical formulas are derived for advanced sophisticated mathematical models to account for a more realistic description of geological concepts.

Keywords*: exploration, chance of success, geologic factors, probabilistic dependence.*

References

Bickel, E.B., Smith, J.E., Meyer, J.L. 2008. Modeling dependence among geologic risks in sequential exploration decisions. SPE Reservoir Evaluation & Engineering. Vol. 11. Issue 2. P. 352-361. SPE-102369-PA. https://doi.org/10.2118/102369-PA

Delfiner, P. 2003. Modeling Dependencies Between Geologic Risks in Multiple Targets. SPE Reservoir Evaluation & Engineering. Vol. 6. Issue 1. P. 57-64. SPE-82659-PA. https://doi.org/10.2118/82659-PA

Delfiner, P. 2012. Intelligent exploration and appraisal program for a multiprospect development. SPE Economics & Management. Vol. 4. Issue 2. P. 106-114. SPE-146547-PA. https://doi.org/10.2118/146547-PA

Kokolis, G.P., Litvak, B.L., Rapp, W.J., Wang, B. 1999. Scenario selection for valuation of multiple prospect opportunities: a Monte Carlo play simulation approach. SPE Hydrocarbon Economics and Evaluation Symposium, 21-23 March, Dallas, Texas. SPE-52977-MS. https://doi.org/10.2118/52977-MS

Murtha, J.A. 1995. Estimating reserves and success for a prospect with geologically dependent layers. SPE Reservoir Engineering. Vol. 11. Issue 1. P. 37–42. SPE-30040-PA. https://doi.org/10.2118/30040-PA

Salleh S.H., Rosales E., Flores de la Mota I. Influence of different probability based models on oil prospect exploration decision making: a case from southern Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geologicas, v. 24, num. 3, 2007, p. 306-317.

Shatrov S.V. *Raschet veroyatnosti otkrytiya mestorozhdeniya s uchetom vzaimnoy zavisimosti parametrov v predelakh otsenivaemykh plastov i struktur* [Calculation of oil or gas field discovery probability, accounting the inner dependence of probability parameters]. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika, 2015, vol. 10, no. 2, available at: http://www.ngtp.ru/rub/11/13_2015.pdf. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2015