

DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2015

УДК 550.8.072:553.98

Шатров С.В.ОАО АНК «Башнефтъ», Уфа, Россия, shatrovsv@bashneft.ru

РАСЧЁТ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УЧЁТОМ ВЗАИМНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ В ПРЕДЕЛАХ ОЦЕНИВАЕМЫХ ПЛАСТОВ И СТРУКТУР

Дается обоснование и вывод аналитической формулы, позволяющей вычислять вероятность открытия нефтяного или газового месторождения. Используется традиционный подход, связанный с анализом геологических факторов. Новизна заключается в том, что формула выведена для неограниченного количества поисковых пластов и структур, при этом учитывается взаимная зависимость проявления геологических факторов в различных поисковых объектах (потенциальных залежах нефти или газа). Рассматривается только базовая математическая модель геологических факторов, однако аналогичные результаты получены также для ряда более сложных моделей.

Ключевые слова: геологические факторы, вероятность открытия залежей, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений.

Введение

Работа по технико-экономической оценке привлекательности геологоразведочных активов характеризуется значительными неопределённостями. В общем случае неизвестными являются: 1) вероятность обнаружения промышленных запасов углеводородов; 2) возможная величина этих запасов, а точнее – вероятностное распределение этой величины; 3) возможность рентабельной разработки этих запасов. Объектом нашего исследования является первая из перечисленных неопределённостей, вероятность открытия месторождения – вне зависимости от возможности его рентабельной разработки. Эту величину принято называть вероятностью геологического успеха и обозначать P_g .

1. Геологические факторы. Постановка задачи

Наиболее логичным и удобным способом определения вероятности геологического успеха является разделение этой вероятности на составные элементы, которые можно анализировать по отдельности. Очевидно, что для формирования нефтяной залежи необходимо одновременное существование ряда геологических предпосылок, которые ниже мы будем называть геологическими факторами: 1) наличие в регионе нефтегазоматеринской толщи, способной обеспечить генерацию нефти или газа; 2) наличие в целевом интервале глубин пласта с коллекторскими свойствами, к которому могла бы быть приурочена потенциальная залежь; 3) наличие экранирующей крыши у соответствующего пласта-коллектора; 4) наличие структурного или литологического замыкания, делающего возможным

формирование залежи в пласте коллекторе; 5) осуществление миграции нефти или газа в эту потенциальную ловушку; 6) сохранность залежи после её формирования. В литературе используются различные подходы к формированию набора этих составных элементов вероятности открытия [Otis, Schneidermann, 1997; Petroleum Geosciences Handbook, 1990; Salleh, Rosales, Flores de la Mota, 2007; The CCOP Guidelines..., 2011; Поуз, 2011], однако в целом расхождения носят формальный характер и сводятся к объединению некоторых из перечисленных шести факторов в один составной.

Если хотя бы один из перечисленных геологических факторов «не работает» для оцениваемой потенциальной залежи, то независимо от того, как обстоит дело с остальными факторами, существование залежи является невозможным. Таким образом, для отдельно взятой потенциальной залежи вероятность открытия¹ равна произведению вероятностей «реализации» всех геологических факторов.

Ситуация усложняется, когда на оцениваемом участке имеется не один, а несколько перспективных объектов: например, несколько структурных поднятий, в каждом из которых ресурсы могут быть приурочены к одному или нескольким потенциально продуктивным пластам. Тогда максимально возможное количество потенциальных залежей является произведением количества структур – как выявленных, так и предполагаемых – на количество потенциально продуктивных пластов. В этом случае искомая вероятность обычно определяется с помощью метода Монте-Карло (МК), в рамках которого каждый вероятностный параметр моделируется набором случайных значений. Применение метода МК для вероятностной оценки ресурсов описано в ряде публикаций [Harbaugh, Davis, Wendenbourg, 1995; Murtha, 1997; Шатров, 2013] (в последней подробно рассматривается моделирование геологических факторов).

При генерации случайных значений учитываются все геологические взаимозависимости между параметрами в разных структурах и разных пластах. Искомое значение P_g определяется как отношение количества «успешных» реализаций МК (тех, в которых хотя бы для одного из потенциальных объектов-залежей все геологические факторы оказались «работающими», – таким образом, в каждой из «успешных» реализаций «сформировалось» хотя бы по одной залежи нефти или газа) к общему количеству случайных реализаций.

Данный результат является приблизительным по своей природе, и хотя он в каждом случае стремится к некоему постоянному значению по мере увеличения общего количества реализаций МК, но величина остаточной погрешности всегда остаётся неизвестной. В связи с этим, вполне логично попытаться вывести аналитические формулы, которые позволили бы

¹ Здесь и далее будем для простоты считать, что если залежь существует, то она будет обнаружена, оставляя, таким образом, за пределами рассмотрения проблему эффективности геологоразведочных работ.

вычислять P_g напрямую. Для простых моделей вывод таких формул не составляет труда, однако по мере увеличения количества целевых объектов – пластов и структур – сложность формул очень быстро возрастает. Это обусловлено необходимостью учитывать взаимные зависимости между параметрами, коротко упомянутые выше и более подробно рассмотренные в следующем разделе.

При этом ни в одной из известных автору публикаций по вероятностной оценке ресурсов не рассматривается вопрос вывода аналитических формул вероятности P_g для произвольного количества пластов и структур. Настоящей работой восполняется этот пробел.

2. Область действия геологических факторов

Важнейшим свойством геологических факторов является их независимость друг от друга. К примеру, фактор миграции рассматривается независимо от фактора материнских пород, то есть в рамках используемой математической модели вполне возможны в том числе и такие комбинации, в которых миграция имеет место, а материнские породы – отсутствуют. Разумеется, это некоторая условность, но она не приводит к логическим противоречиям, поскольку залежь в этих случаях всё равно принимается нереализовавшейся. Аналогично, под наличием структуры подразумевается исключительно геометрия залегания пластов, границ замещения, экранирующих разломов и т.д., наличие же или отсутствие покрывки (и, соответственно, ловушки) рассматривается как полностью независимый фактор.

С другой стороны, если рассматривать действие каждого отдельного геологического фактора применительно к разным подсчётным объектам, то очевидно, что имеет место полная или частичная зависимость между подтверждением или неподтверждением того или иного объекта. Так, материнские породы не могут одновременно существовать для одной залежи пласта и не существовать для другой. Аналогично, если бурением установлено наличие в пласте коллектора в одной структуре, то это повышает ожидание, что в соседней структуре в этом пласте также будет обнаружен коллектор (и наоборот), а наличие антиклинальной ловушки для одного пласта согласно залегающей пачки должно означать как минимум высокую вероятность наличия данной структуры и в соседних по разрезу пластах.

Для корректного учёта этих и всех других внутренних зависимостей целесообразно приписать каждому геологическому фактору определённую область его действия. Факторы наличия коллектора и покрывки разделяются на региональные и локальные составляющие. Первые характеризуют пласт на всей оцениваемой площади, вторые – только для отдельной залежи. Произведение региональной и локальной составляющих даёт вероятность «наличия», действия соответствующего геологического фактора (вероятность обнаружения коллектора или покрывки) в конкретной потенциальной залежи.

Фактор наличия структуры (замкнутого контура) очевидным образом может наследоваться по структуре. Фактор материнской породы является комплексным не только по отношению к каждому отдельному пласту, но и к группам пластов. Если же в разрезе выделяется только одна потенциальная материнская толща, то действие этого фактора становится универсальным: либо для всех подсчётных объектов материнская порода есть, либо для всех объектов она отсутствует. Фактор миграции пока что будем рассматривать как локальный фактор, реализующийся или не реализующийся в каждой потенциальной залежи независимо от остальных залежей (более корректный учёт закономерностей миграции будет рассмотрен в следующей статье).

Целесообразность разделения геологических факторов на региональные и локальные составляющие для более корректного учёта рисков подробно обосновывается в публикациях [The CCOP Guidelines..., 2011; Роуз, 2011; Поляков, Мурзин, 2012]. При этом пространственная протяжённость региональной составляющей ограничивается зоной развития или распространения отдельного продуктивного или потенциально продуктивного комплекса отложений. В первых двух из указанных публикаций приведены табличные рекомендации по присваиванию геологическим факторам конкретных значений вероятности, в зависимости от известного или предполагаемого геологического строения и генезиса залежи, а также от степени изученности и достоверности имеющейся информации.

3. Матрица подсчетных объектов. Подготовка к выводу формул

Пусть на оцениваемой площади имеется n структур и m пластов, что формирует матрицу из $n \cdot m$ потенциальных подсчётных объектов-залежей (рис. 1). Обозначим вероятность наличия материнских пород для данной площади – через M , вероятность проявления региональной составляющей комбинированной вероятности коллектора, покрышки и сохранности залежи в j -том пласте – через R_j , вероятность того, что в произвольной структуре j -того пласта реализуется локальная составляющая этой комбинированной вероятности, а также фактор миграции, – через L_{ji} (первый индекс обозначает пласт, второй – структуру), вероятность подтверждения i -той структуры – через S_i . Тогда вероятность подтверждения продуктивности j -того пласта в i -той структуре равна произведению этих четырёх переменных: $M \cdot S_i \cdot R_j \cdot L_{ji}$.

Итак, выводим аналитическую формулу для вероятности открытия хотя бы одной залежи на оцениваемой площади. В рамках описанной выше модели, искомая вероятность – это вероятность того, что найдётся 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 (M).

		Структуры, вероятности S_i					
		S_1	S_2	...	S_i	...	S_n
Пласты, региональные вероятности R_j	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

Для того, чтобы разобраться, как «работают» введенные выше вероятностные параметры, рассмотрим несколько вспомогательных вопросов. Какова вероятность того, что в j -том пласте подтвердятся все потенциальные залежи? Для этого необходимо одновременное осуществление следующего: 1) наличие материнских пород – M ; 2) подтверждение этого пласта в региональном смысле – R_j ; 3) подтверждение всех n структур – $S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n$; 4) локальное подтверждение данного пласта в каждой из структур – $L_{j1} \cdot L_{j2} \cdot \dots \cdot L_{jn}$. Таким образом, данная вероятность равна произведению $M \cdot R_j \cdot \prod_{i=1}^n (S_i) \cdot \prod_{i=1}^n (L_{ji})$, где функция $\prod_{i=1}^n ()$ означает произведение всех соответствующих элементов с индексом i , изменяющимся от 1 до n .

Далее, вероятность того, что не подтвердится ни одна структура, равна произведению вероятностей неподтверждения каждой из структур: $(1-S_1) \cdot (1-S_2) \cdot \dots \cdot (1-S_n)$, то есть $\prod_{i=1}^n (1 - S_i)$. Соответственно, вероятность подтверждения *хотя бы одной* структуры должна дополнять эту величину до единицы. Таким образом, эта вероятность составляет $1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i)$.

И ещё один вопрос: сколько существует различных комбинаций подтвердившихся структур? Во-первых, необходимо учесть, что может подтвердиться любое количество структур, от 1 до n (пока что исключаем из рассмотрения вариант подтверждения *нуля* структур). Далее, для каждого количества k подтвердившихся структур существует определённое количество их возможных наборов, которое в математике принято называть «число сочетаний из n по k » и обозначать C_n^k . Тогда общее количество вариантов получаем

суммированием по всем возможным k , которое может принимать значения от 1 до n : $N = \sum_{k=1}^n C_n^k$. Число сочетаний вычисляется по формуле $C_n^k = \frac{n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot (n-k+1)}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k} = \frac{n!}{k! (n-k)!}$.

4. Формула вероятности открытия для случая одного пласта и n структур

Рассмотрим сначала упрощённую модель: один пласт, n структур. Какова вероятность того, что в этом пласте не обнаружится ни одной залежи? Это может произойти в силу следующих причин: 1) отсутствует материнская порода; 2) материнская порода есть, но не подтвердились все n структур; 3) материнская порода есть, хотя бы одна структура подтвердилась, но пласт не подтвердился регионально; 4) материнская порода есть, хотя бы одна структура подтвердилась, пласт регионально подтвердился, но локально он не подтвердился ни в одной из подтвердившихся структур.

Обозначим вероятности каждого из четырёх перечисленных случаев через P_1 , P_2 , P_3 и P_4 соответственно, тогда искомая вероятность равна сумме $P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Отметим, что каждая из приведённых выше формулировок в явном виде исключает действие всех предыдущих причин. В противном случае простое суммирование привело бы к завышению искомой вероятности, так как варианты совместного негативного действия двух и более факторов оказались бы учтёнными несколько раз (например, складывая вероятность отсутствия структур с вероятностью отсутствия материнских пород, мы дважды учитываем вариант, в котором отсутствует и те, и другие). Согласно данным выше определениям: $P_1 = 1 - M$; $P_2 = M \cdot \prod_{i=1}^n (1 - S_i)$; $P_3 = M \cdot [1 - \prod_{i=1}^n (1 - S_i)] \cdot (1 - R)$.

Четвёртый случай более сложен, так как предполагает произвольное количество подтвердившихся структур с условием, что в каждой из них оцениваемый пласт занулён в силу действия локальных факторов (при том, что регионально он является подтверждённым). Таким образом, имеем совокупность вариантов, каждый из которых характеризуется следующим: 1) пласт регионально подтверждён, материнские породы имеются; 2) некоторое количество k из общего количества n структур – подтвердились; 3) все остальные $(n-k)$ структур – не подтвердились; 4) оцениваемый пласт локально занулён во всех k подтвердившихся структурах. Общее количество этих вариантов было определено в предыдущем разделе: $N = \sum_{k=1}^n C_n^k$. Вероятность же каждого варианта имеет следующий вид:

$$P_4^{k,x} = M \cdot R \cdot \prod_{i=1}^k (S_i \cdot [1 - L_i]) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1 - S_i). \quad (1)$$

В левой части этого уравнения индекс k означает, что рассматривается один из тех вариантов, в которых подтвердилось k из n структур; индекс x обозначает номер подварианта (см. раздел 3, для каждого варианта k насчитывается C_n^k этих подвариантов). В правой части уравнения первое произведение $\Pi()$ даёт вероятность того, что все k структур подтвердились, при этом в каждой из них пласт локально занулён. Второе произведение $\Pi()$ даёт вероятность

того, что все остальные $n-k$ структур – не подтвердились: как и ранее, рассматриваются только взаимоисключающие случаи, чтобы иметь возможность суммировать их вероятности. Набор из k подтвердившихся структур может быть любым, соответственно, в первом произведении $P()$ участвуют параметры подтвердившихся структур, во втором – параметры остальных $(n-k)$ структур.

Таким образом, для каждого возможного количества k подтвердившихся структур вероятность того, что в каждой из этих структур пласт локально занулён, представляет собой сумму по C_n^k подвариантам: $P_4^k = M \cdot R \cdot \sum_{x=1}^{C_n^k} [\prod_{i=1}^k (S_i \cdot [1-L_i]) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1-S_i)]$. Теперь для того, чтобы найти суммарную вероятность P_4 , необходимо просуммировать P_4^k для всех k :

$$P_4 = \sum_{k=1}^n P_4^k = M \cdot R \cdot \sum_{k=1}^n \left(\sum_{x=1}^{C_n^k} [\prod_{i=1}^k (S_i \cdot [1-L_i]) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1-S_i)] \right). \quad (2)$$

Итак, найдена вероятность каждой из четырёх возможных причин полного отсутствия залежей в оцениваемом пласте: P_1, P_2, P_3 и P_4 . Тогда вероятность обнаружения в этом пласте хотя бы одной залежи определяется следующим образом: $P_g = 1 - \sum_{i=1}^4 P_i$. После несложных преобразований получаем:

$$P_g = M \cdot R \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^n (1-S_i) - \sum_{k=1}^n \sum_{x=1}^{C_n^k} \prod_{i=1}^k (S_i \cdot (1-L_i)) \prod_{i=k+1}^n (1-S_i) \right]. \quad (3)$$

Теперь небольшая тонкость. Во-первых, по определению $C_n^0 = 1$ (можно лишь *одним* способом выбрать *ноль* элементов из множества n , а именно – не выбрать ни одного элемента). Во-вторых, произведение *нулевого* количества сомножителей по определению равно единице. Поэтому при $k=0$ имеем: $\prod_{i=1}^k (S_i \cdot (1-L_i)) = 1$; $\prod_{i=k+1}^n (1-S_i) = \prod_{i=1}^n (1-S_i)$; $\sum_{k=0}^0 \sum_{x=1}^{C_n^{k=0}} \prod_{i=1}^{k=0} (S_i \cdot (1-L_i)) \prod_{i=k+1=1}^n (1-S_i) = \prod_{i=1}^n (1-S_i)$. Следовательно, в формуле (3) можно включить группу $\prod_{i=1}^n (1-S_i)$ в двойное суммирование $\sum_{k=1}^n \sum_{x=1}^{C_n^k}$, всего лишь изменив диапазон для индекса k : теперь он будет изменяться от 0 до n . В результате формула приобретает следующий вид:

$$P_g = M \cdot R \cdot \left[1 - \sum_{k=0}^n \sum_{x=1}^{C_n^k} \prod_{i=1}^k (S_i \cdot (1-L_i)) \prod_{i=k+1}^n (1-S_i) \right]. \quad (4)$$

Поскольку в модели индекс k соответствует количеству подтвердившихся структур, то фактически включение нуля в интервал суммирования по этому индексу означает отнесение варианта неподтверждения всех структур – к общему случаю. Ранее этот вариант рассматривался отдельно, на самом же деле, как видим, он органично входит в общую формулу.

5. Формула вероятности открытия для общего случая: m пластов, n структур

В предыдущем разделе выведена формула вероятности открытия для частного случая, когда потенциально продуктивный пласт является единственным. Возможность наличия произвольного количества пластов делает необходимым повторить те же рассуждения, которые в предыдущем разделе были проведены для произвольного количества структур. Для упрощения предположено, что материнские породы гарантированно имеются, и исключен параметр M .

Количество пластов, подтверждённых «в региональном смысле», может составить произвольное количество от 0 до m (на этот раз вариант нуля объектов сразу рассматривается как частный случай общей формулы). Далее, для каждого из этих $m+1$ вариантов количества регионально подтверждённых пластов имеется C_m^p подвариантов, каждый из которых соответствует определённому набору из p пластов. Вероятность реализации каждого из этих наборов представляет собой

$$P^p = \prod_{j=1}^p (R_j) \prod_{j=p+1}^m (1 - R_j), \quad (5)$$

где индекс p обозначает количество регионально подтвердившихся пластов, первое произведение обеспечивает региональное подтверждение всех пластов этой группы, второе произведение – региональное неподтверждение всех остальных $m-p$ пластов.

Продолжим рассмотрение одного из подвариантов, характеризующихся определённым набором регионально подтвердившихся пластов. Поскольку интерес представляет случай неподтверждения всех потенциальных объектов, то в каждом из регионально подтвердившихся пластов все залежи должны оказаться занулёнными – либо из-за неподтверждения структуры, либо из-за локального неподтверждения каждого из этих пластов в каждой из подтвердившихся структур. Вероятность этого определяется следующим выражением:

$$P_0^p = \prod_{j=1}^p (R_j) \prod_{j=p+1}^m (1 - R_j) \cdot \left(\sum_{k=0}^n \sum_{x=1}^{C_n^k} \prod_{i=1}^k (S_i \cdot \prod_{jj=1}^p (1 - L_{jj})) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1 - S_i) \quad (6)$$

Первая часть данной формулы воспроизводит формулу (5) – вероятность реализации данного набора регионально подтвердившихся пластов. Вторая же часть обеспечивает неподтверждение всех потенциальных залежей регионально подтвердившихся пластов и представляет собой модификацию формулы (2). Отличие заключается в том, что теперь локальное зануление залежей, находящихся на пересечении подтвердившихся пластов и подтвердившихся структур, должно произойти в рамках каждой структуры не для одного-единственного пласта, а для всех регионально подтвердившихся пластов. Поэтому в последнем произведении вместо члена $(1 - L_i)$ появляется группа $\prod_{jj=1}^p (1 - L_{jj})$, причём индекс jj пробегает по тому же конкретному набору из p пластов, что индекс j в произведении

$\prod_{j=1}^p (R_j)$, – набору регионально подтвердившихся пластов, которым характеризуется данный подвариант.

Теперь остаётся просуммировать вероятности по всем вариантам и подвариантам регионально подтвердившихся пластов. Как и при рассмотрении вариантов и подвариантов структур в предыдущем разделе, это достигается двойным суммированием:

$$P_0 = \sum_{p=0}^m \sum_{y=1}^{c_m^p} [P_0^p] =$$

$$= \sum_{p=0}^m \sum_{y=1}^{c_m^p} \left[\prod_{j=1}^p (R_j) \prod_{j=p+1}^m (1 - R_j) \cdot \left(\sum_{k=0}^n \sum_{x=1}^{c_n^k} \prod_{i=1}^k \left(S_i \cdot \prod_{jj=1}^p (1 - L_{jj}^i) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1 - S_i) \right) \right] \quad (7)$$

Индексы j и jj пробегает только по тем p регионально подтвердившимся пластам, которые входят в набор с индексом y ; индекс i пробегает только по тем k подтвердившимся структурам, которые входят в набор с индексом x . Соответственно, $\prod_{jj=1}^p (1 - L_{jj}^i)$ – это вероятность локального неподтверждения всех p пластов, входящих в набор с индексом y , во всех k структурах, входящих в набор с индексом x . Таким образом, полученная формула имеет следующий логический смысл: если в матрице потенциальных залежей имеется некоторое количество подтвердившихся структур и некоторое количество регионально подтвердившихся пластов, то все потенциальные залежи, находящиеся на пересечении подтвердившихся структур и подтвердившихся пластов, занулены действием локальных факторов L_{jj}^i . Вероятности каждого отдельного зануления складываются, так как являются взаимоисключающими.

Соответственно, вероятность наличия хотя бы одной залежи в рамках модели составляет $1 - P_0$. Теперь вспомним, что временно не учитывался фактор наличия материнских пород. С учётом этого параметра, вероятность открытия $P_g = M \cdot (1 - P_0)$. В результате получен окончательный вид искомой формулы:

$$P_g = M \cdot \left[1 - \sum_{p=0}^m \sum_{y=1}^{c_m^p} \left(\prod_{j=1}^p (R_j) \cdot \prod_{j=p+1}^m (1 - R_j) \cdot \sum_{k=0}^n \sum_{x=1}^{c_n^k} \left(\prod_{i=1}^k \left(S_i \cdot \prod_{jj=1}^p (1 - L_{jj}^i) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1 - S_i) \right) \right) \right] \quad (8)$$

6. Проверка корректности полученного аналитического решения

Проведен ряд численных экспериментов по вычислению P_g двумя способами: по формуле (8) и методом МК. Расчёты выполнялись для различных комбинаций подсчётных объектов и для различных наборов значений геологических факторов. Отличная сходимость результатов подтверждает корректность формулы (8). Кроме того, благодаря этим расчётам получена возможность визуализировать погрешность метода МК и её постепенное (кстати,

относительно медленное) уменьшение по мере увеличения количества случайных реализаций МК.

В качестве иллюстрации приведены результаты для модели двух пластов и двух структур. Вероятность подтверждения каждой из структур $S_1 = S_2 = 0,5$, региональная вероятность подтверждения каждого из пластов (произведение региональных компонент геологических факторов) $R_1 = R_2 = 0,5625$, локальная вариативность пластов в пределах каждой из структур $L_{11} = L_{12} = L_{21} = L_{22} = 0,4$. Данный набор значений обобщённых параметров соответствует, например, значениям геологических факторов, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Значения геологических факторов, использованные для расчётов

Фактор	Коллектор	Покрышка	Миграция	Мат. порода	Сохранность	Произведение	
Региональная	0,750	0,750	1,000	1,000	1,000	Rj	0,5625
Локальная	0,667	1,000	0,600	1,000	1,000	Lj	0,400
Итоговая	0,500	0,750	0,600	1,000	1,000	Pj	0,225

Результаты расчётов представлены на рис. 2. Дополнительно на правой шкале для каждого отдельного расчёта МК выведена абсолютная величина погрешности, а также сглаженный график этой величины. Расчёты с количеством реализаций от 500 до 50 тысяч выполнены с шагом 500, далее от 52 до 100 тысяч реализаций – с шагом 2000.

На примере данного численного эксперимента видно, что по мере увеличения количества реализаций метода МК его результат стремится к истинному значению 0,457034, полученному по формуле (8). Так, среднее арифметическое по 25-ти последним результатам (от 52 до 100 тыс. реализаций) составляет 0,457066, что практически совпадает с истинным значением. В то же время, у отдельных результатов погрешность может превышать 0,0025 и даже 0,005 – даже при столь значительном количестве случайных реализаций МК.

Данная величина погрешности может показаться несущественной на фоне уровня неопределённости входных параметров, назначаемых экспертно. Однако наличие точного аналитического решения открывает возможности для прикладного использования разработанного математического аппарата. Два из возможных применений будут названы ниже, в заключении. Существенно, что оба они требуют повышенной точности вычислений.

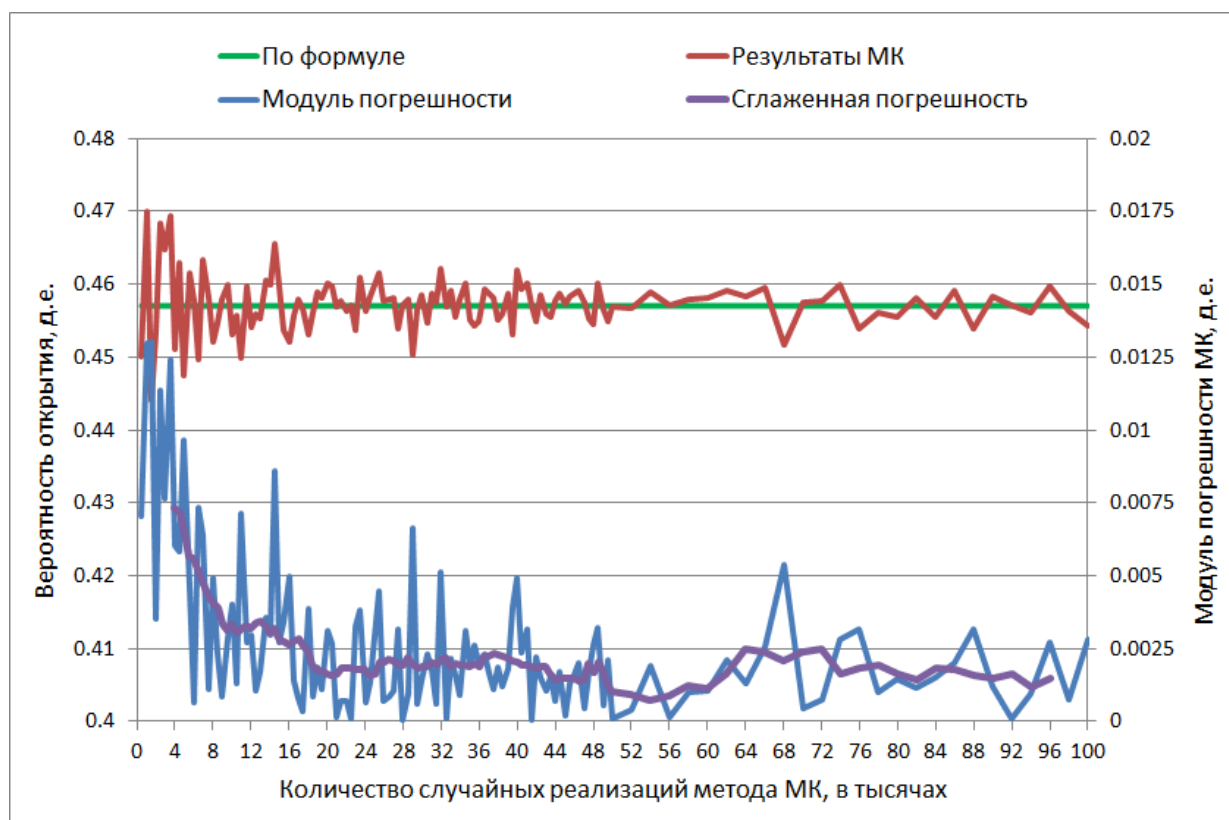


Рис. 2. Сопоставление результатов численного (метод Монте-Карло) и аналитического расчётов

7. Формулы для более сложных моделей

Формула (8) получена для базовой модели, которая отвечает наиболее очевидным требованиям: преемственность (наследуемость) подтверждения наличия замкнутого контура в разных пластах в пределах одной структуры, а также связь между вероятностью подтверждения коллектора, покрышки, миграции и сохранности залежи в различных структурах для каждого пласта. Вместе с тем, данная модель характеризуется рядом ограничений.

Во-первых, фактор миграции здесь лишён каких-либо пространственных закономерностей, как если бы миграция происходила хаотично в произвольную часть любого пласта. Между тем, очевидно, что в пределах отдельно взятой структуры в общем случае существует некоторая корреляция между осуществлением (либо неосуществлением) миграции в потенциальные залежи различных пластов. Это проявляется в пространственной кластеризации залежей в реальных месторождениях: в одних выявленных структурах все пласты оказываются водоносными, в других же залежи углеводородов обнаруживаются сразу в нескольких пластах. Разумеется, это лишь тенденция, а не жёсткое правило, но она должна быть как-то отражена в математической модели.

Во-вторых, в рамках данной модели каждая структура рассматривается как подтверждённая, либо неподтверждённая одновременно для всех пластов. Между тем, в реальности вероятность подтверждения замкнутого контура может быть различной для разных пластов в пределах единой структуры: амплитуда структуры может уменьшаться вверх или вниз по разрезу.

В-третьих, рассматривается единая толща нефтегазоматеринских пород для всех пластов. В более сложном случае в разрезе могут выделяться несколько потенциально материнских толщ, и, соответственно, вероятность соблюдения данного геологического фактора может быть различной для разных потенциально продуктивных пластов (или групп пластов).

Для учёта этих более сложных моделей потребовалось провести более углублённый комбинаторный анализ по сравнению с представленным в настоящей работе. В результате автору удалось получить необходимые модификации формулы (8). Внешне эти формулы почти не отличаются от базовой, но вместо произведения $\prod_{jj=1}^p (1-L_{jj}^i)$ используется та или иная функция, в которой и реализована логика соответствующей математической модели.

Заключение

Полученная формула (8), а также её модификации имеют не только теоретическую, но и вполне конкретную практическую ценность. Во-первых, вероятность открытия месторождения (см. раздел б), определённая с помощью моделирования МК – через отношение количества «успешных» случайных реализаций к их общему количеству, – всегда характеризуется некоторой погрешностью, даже при значительном количестве реализаций. Причём в каждом новом расчёте получается результат, отличающийся от предыдущего, что также не вполне удобно. Наличие же аналитических формул позволяет получать точное решение.

Помимо этого, аналитическое решение может использоваться при разработке и внедрении программных продуктов по вероятностной оценке ресурсов – для проверки корректности реализованного алгоритма МК. Эта вторая область применения является узко специализированной, однако она также очень важна, поскольку иного способа проверить корректность расчёта МК не существует (за исключением простейших моделей с малым количеством пластов и структур). Между тем, реализация сложных моделей зависимости для геологических факторов значительно усложняет алгоритм метода МК, поэтому независимая проверка корректности необходима.

Ещё одно перспективное применение аналитических формул связано с разработкой алгоритмов для формирования оптимальной последовательности опоскования группы

структур. В работе J.E. Bickel с соавторами [Bickel, Smith, Meyer, 2008] предложено решение данной задачи, основанное на использовании условных вероятностей для геологических факторов, при этом авторы напрямую вычисляют попарные коэффициенты корреляции для значительного количества параметров. В одной из следующих работ мы покажем, как можно адаптировать для решения данной задачи разработанный нами математический аппарат. Это позволит автоматизировать расчёты и проводить их для более сложных моделей.

Но прежде необходимо рассмотреть усложнённые модели зависимости, кратко перечисленные в разделе 7. В результате будет получен универсальный набор формул для определения вероятности открытия месторождения на оцениваемой площади. Эти результаты уже получены автором, они будут изложены в одной из следующих работ.

Литература

Поляков А.А., Мурзин Ш.М. Международный опыт анализа геологических рисков // *Нефтегазовая геология. Теория и практика.* – 2012. – Т.7. – №4. – http://www.ngtp.ru/rub/3/60_2012.pdf

Роуз П.Р. Анализ рисков и управление нефтегазопроисковыми проектами. - Издательство «ИКИ», 2011.

Шампов С.В. Вероятностная оценка ресурсов нефти блока 12 в Ираке // *Нефтяное хозяйство.* - 2013. - №4.

Bickel J.E., Smith, J.E., Meyer J.L. Modeling dependence among geologic risks in sequential exploration decisions // *SPE, Reservoir Evaluation & Engineering*, April 2008. <https://doi.org/10.2118/102369-PA>

Harbaugh J.W., Davis J.C., Wendenbourg J. Computing Risk for Oil Prospects: Principles and Programs. Tarrytown, NW: Pergaman Press, 1995.

Murtha J.A. Monte Carlo Simulation: Its Status and Future. *Journal of Petroleum Technology*, April 1997. <https://doi.org/10.2118/37932-JPT>

Otis R.M., Schneidermann N. A process for evaluating exploration prospects // *AAPG Bulletin*, July 1997, V. 81, No. 7, p. 1087–1109.

Petroleum Geosciences Handbook // BP Exploration Company Limited, 1990.

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.

The CCOP Guidelines for Risk Assessment of Petroleum Prospects // CCOP, 2011.

Shatrov S.V.

OA O ANK Bashneft, Ufa, Russia, shatrovsv@bashneft.ru

CALCULATION OF OIL OR GAS FIELD DISCOVERY PROBABILITY, ACCOUNTING THE INNER DEPENDENCE OF PROBABILITY PARAMETERS

A formula that can be used to calculate the find probability of an oil or gas field discovery has been derived. The traditional approach of geologic factors is used, the novelty being that the formula is valid for an unlimited number of leads and target objects, while the interdependences of geologic factors across different targets (potential oil or gas accumulations). Presented are just the basic mathematical model of geological dependences and correspondingly the basic resulting formula, while in fact similar results have been obtained by the author for more complicated cases as well.

Keywords: *geologic factors, oil and gas discovery probability, oil and gas prospection and exploration.*

References

Bickel J.E., Smith J.E., Meyer J.L. Modeling dependence among geologic risks in sequential exploration decisions. SPE, Reservoir Evaluation & Engineering, April 2008. <https://doi.org/10.2118/102369-PA>

Harbaugh J.W., Davis J.C., Wendenbourg J. Computing Risk for Oil Prospects: Principles and Programs. Tarrytown, NW: Pergaman Press, 1995.

Murtha J.A. Monte Carlo Simulation: Its Status and Future. Journal of Petroleum Technology, April 1997. <https://doi.org/10.2118/37932-JPT>

Otis R.M., Schneidermann N. A process for evaluating exploration prospects. AAPG Bulletin, vol. 81, no. 7 (July 1997), p. 1087–1109.

Petroleum Geosciences Handbook. BP Exploration Company Limited, 1990.

Polyakov A.A., Murzin Sh.M. *Mezhdunarodnyy opyt analiza geologicheskikh riskov* [International experience in geological risk analysis]. Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika, 2012, vol. 7, no. 4, available at: http://www.ngtp.ru/rub/3/60_2012.pdf

Rouz P.R. *Analiz riskov i upravlenie neftegazoposkovymi proektami* [Risk analysis and management of petroleum exploration ventures]. AAPG, 2003.

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, vol. 24, num. 3, 2007, p. 306-317.

Shatrov S.V. *Veroyatnostnaya otsenka resursov nefti bloka 12 v Irake* [Probabilistic evaluation of oil resources on block 12, Iraq]. Neftyanoe khozyaystvo, 2013, no. 4.

The CCOP Guidelines for Risk Assessment of Petroleum Prospects. CCOP, 2011.

© Шатров С.В., 2015