

DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/5_2020

УДК 553.98.048:519.2

Емельянова Н.М., Пороскун В.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт» (ФГБУ «ВНИГНИ»), Москва, Россия, emel@vnigni.ru, poroskun@list.ru

МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ НЕФТИ И ГАЗА УЧАСТКОВ НЕДР НА ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНОМ ЭТАПЕ

Предложен аналитический метод получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа для участка недр, представленного иерархией геологических объектов разного масштаба (участок недр, пласт, ловушка). Условия структурирования для них определяют наличие как независимых, так и зависимых геологических рисков. Предполагается, что зависимость геологических рисков в иерархической схеме соподчиненности свойственна объектам меньшего масштаба (ловушки одного пласта) за счет наличия для них общих региональных геологических признаков.

Метод основан на последовательной процедуре суммирования вероятностных оценок ресурсов для геологических объектов от меньшего масштаба (ловушка) к большему масштабу (пласт и участок) при коррекции зависимости геологических рисков ловушек каждого пласта. Такой способ позволяет свести общую задачу суммирования к последовательности задач суммирования вероятностных оценок ресурсов с независимыми геологическими рисками.

Ключевые слова: *вероятностные оценки ресурсов нефти и газа; разномасштабные объекты; независимые и зависимые геологические риски; суммирование вероятностных оценок ресурсов, учет геологических рисков.*

Оценка ресурсов нефти и газа участков недр (лицензионных, перспективных на нефть и газ, административных и другого целевого назначения) на поисково-оценочном этапе геологоразведочных работ широко используется при принятии управленческих решений как на государственном, так и на корпоративном уровнях. Для государства необходимость решения задачи геолого-экономической оценки участков недр возникает при рационализации процесса выдачи лицензий на право пользования недрами; для недропользователей, намеревающихся вкладывать средства в разведку полезных ископаемых, такая задача появляется при необходимости оценивать возможные доходы и затраты.

Для геологоразведки, как специфической области принятия решений, свойственны особенности, связанные с дефицитом информации при построении геологической модели с необходимой точностью [Габриэлянц, 2000]. Это приводит к неопределенности прогнозных оценок показателей, составляющих основу критериев принятия решений. Особенно высоким уровнем неопределенности отличается поисково-оценочный этап, по результатам работ на котором дается геолого-экономическое заключение относительно целесообразности

проведения дальнейших работ на поисковых объектах разного масштаба. Сложность работ на этом этапе определяется еще необходимостью принятия решений, связанных с крупными капиталовложениями.

Возможность повышения качества и объективности принятия решений в условиях неопределенности состоит в переходе от детерминированных оценок всех используемых параметров и целевых показателей к их вероятностным оценкам, позволяющим осуществить необходимую количественную формализацию указанной неопределенности. Целесообразность внедрения вероятностных методов в современную методологию геологоразведки является общепризнанной как за рубежом, так и в России [Фокин, 2011].

Задача получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа для участка недр сводится к процедуре суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек, выявленных или подготовленных к бурению на этом участке. Для характеристики вероятностных оценок ресурсов ловушек, которые рассматриваются как базовые при подсчете оценок ресурсов более крупных по масштабам геологических объектов, используются два понятия [Роуз Питер, 2011; Емельянова, Пороскун, 2010]:

– понятие вероятностной оценки запасов промышленной залежи при условии ее наличия в ловушке; такая оценка представляет собой непрерывную функцию распределения вероятностей для возможных значений запасов $F(Q_{\text{лов}})$;

– понятие геологического риска для ловушки, заданного дискретной функцией распределения вероятностей двух возможных состояний ловушки: а) состояние успеха ловушки, соответствующего условию наличия в ней промышленной залежи, – $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$; б) состояние неудачи ловушки, соответствующего условию отсутствия в ней промышленной залежи, – $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$.

Условия решения указанной задачи определяются видом иерархического структурирования геологических объектов разного масштаба, расположенных на территории оцениваемого участка, которые на ранней стадии изученности характеризуются различными комбинациями зависимых и независимых геологических рисков ловушек (объяснение принятого в статье понятия зависимости геологических рисков ловушек будет дано ниже).

Ранее предложены аналитические методы суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек, разработанные для случаев, когда все агрегируемые ловушки характеризовались:

а) одинаковыми вероятностными оценками ресурсов ловушек, представленными функциями распределения вероятностей $F(Q_{\text{лов},i})$, и одинаковым геологическим риском, представленным вероятностями $P_{\text{усп}}^{\text{лов},i}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов},i}$; (например, при получении вероятностной

оценки ресурсов нефти и/или газа плей) [Lee, Wang, 1983].

б) разными вероятностными оценками ресурсов ловушек, представленными функциями распределения вероятностей $F(Q_{\text{лов},i})$, и разным геологическим риском, представленным вероятностями $P_{\text{усп}}^{\text{лов},i}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов},i}$, (например, при проектировании программы по бурению ловушек) [Емельянова, Порожун, 2019].

В обеих приведенных методиках предполагалась статистическая независимость геологических рисков ловушек.

В данной статье приведены основные положения аналитического метода для получения суммарной вероятностной оценки ресурсов нефти и газа участков недр, представленных различными упорядоченными комбинациями геологических объектов разного масштаба (ловушка, пласт, зона, плей и пр.). Особенность решения задачи суммирования вероятностных оценок ресурсов агрегируемых ловушек в данном случае заключалась в необходимости учета статистической зависимости их геологических рисков.

Постановка задачи

Задача решается при следующих условиях.

1. Оцениваемый участок допускает структурирование расположенных на нем геологических объектов разного масштаба в виде схемы, приведенной на рис. 1.

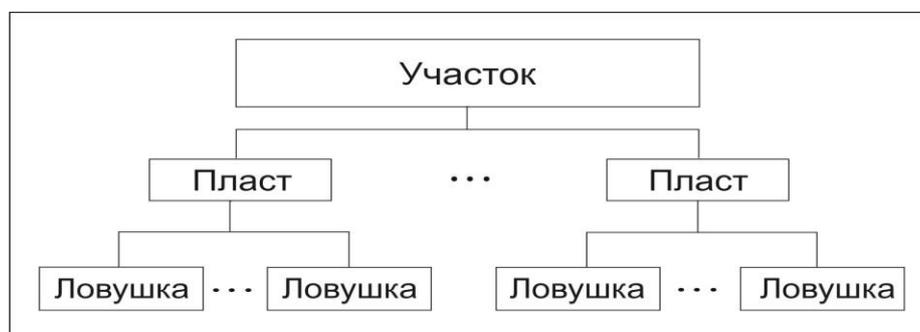


Рис. 1. Структурированная схема соподчиненности объектов оценки

На рис. 1 «пласт» - любой латерально протяженный геологический объект, характеризующийся наличием геологических признаков, благоприятных для образования в нем скоплений углеводородов (региональных признаков). Ловушки (выявленные или подготовленные к бурению) – локальные объекты, характеризующиеся локальными геологическими признаками, которые в совокупности с региональными геологическими признаками создают условия для возможности формирования в ловушке промышленной залежи.

В качестве геологических признаков, контролирующих процесс образования и сохранности нефтегазовых залежей на площади пласта, обычно рассматривают пять признаков: наличие материнских пород углеводородов, миграции, коллектора, структурного замыкания, заполнения и сохранности [Роуз Питер, 2011]. Принято разделять эти признаки на региональные (regional) и локальные (local) [Роуз Питер, 2011].

Региональные признаки – это признаки, присутствующие на всей площади пласта. Они являются общими (common) для всех ловушек пласта. В английской литературе по геологоразведке региональные признаки часто называют зависимыми (*dependent*).

Локальные признаки – это признаки, действующие на площади отдельных ловушек. Эти признаки могут изменяться от ловушки к ловушке. От наличия или отсутствия какого-либо из признаков в отдельных ловушках пласта не зависит его наличие или отсутствие в других ловушках этого же пласта, поэтому локальные признаки еще называют независимыми (*independent*).

В качестве региональных геологических признаков часто рассматриваются нефтематеринские породы, миграция углеводородов и заполнение ловушек (фактор времени). Локальные геологические признаки обычно включают наличие коллектора, замкнутой структуры и условие для сохранности скопления углеводородов.

Разделение геологических признаков на региональные и локальные целесообразно потому, что это позволяет корректно произвести оценку вероятностей геологического успеха как для ловушек в пределах пласта, так и для пласта в целом.

1. Исходные данные для решения задачи:

- вероятностные оценки ресурсов ловушек в предположении их наличия в $F(Q_{\text{лов}ij})$, где индекс i обозначает номер пласта ($i = 1, \dots, N$; N – число пластов), индекс j – номер ловушки в i -ом пласте ($j = 1, \dots, M_i$; M_i – число ловушек в i -ом пласте);

- вероятность наличия локальных признаков в ловушке – $P_{\text{лок}}^{\text{лов}ij}$, где индексы i и j имеют тот же смысл, что и в предыдущем пункте;

- вероятность наличия региональных признаков в i -ом пласте (вероятность существования i -ого пласта) $P_{\text{рег}}^{\text{пл}i}$, $i = 1, \dots, N$.

Вероятностные оценки ресурсов ловушек $F(Q_{\text{лов}ij})$ вычисляют методом стохастического моделирования Монте-Карло объемной формулы подсчета ресурсов.

Способ получения оценок геологического риска ловушек в каждом i -ом пласте (оценок вероятностей успеха и неудачи ловушек пласта $P_{\text{усп}}^{\text{лов}ij}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}ij}$, j – номер ловушки в i -ом пласте) представлен в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Получение оценки геологического риска ловушки

Геологические признаки	Вероятность наличия признака	
	Региональный	Локальный
УВ МАТЕРИНСКИЕ ПОРОДЫ	$P_{\text{рег}}^1$	
МИГРАЦИЯ УВ	$P_{\text{рег}}^2$	
КОЛЛЕКТОРЫ	$P_{\text{рег}}^3$	
ЗАМКНУТЫЕ СТРУКТУРЫ		$P_{\text{лок}}^1$
ЗАПОЛНЕНИЕ И СОХРАННОСТЬ		$P_{\text{лок}}^2$
Региональная вероятность	$P_{\text{рег}}^{\text{пли}} = P_{\text{рег}}^1 \times P_{\text{рег}}^2 \times P_{\text{рег}}^3$	
Локальная вероятность		$P_{\text{лок}}^{\text{лови}} = P_{\text{лок}}^1 \times P_{\text{лок}}^2$
Геологический риск ловушки	$P_{\text{усп}}^{\text{лови}} = P_{\text{рег}}^{\text{пли}} \times P_{\text{лок}}^{\text{лови}}$ $P_{\text{неуд}}^{\text{лови}} = 1 - P_{\text{усп}}^{\text{лови}}$	

Приведенная в табл. 1 схема соотношения региональных и локальных признаков, обуславливающих вероятность открытия в ловушке залежи («успешность» ловушек пласта $P_{\text{усп}}^{\text{лови}}$), позволяет проинтерпретировать понятия статистической независимости и зависимости геологических рисков ловушек.

Геологические риски ловушек статистически независимы, если они определяются только независимыми (independent) для отдельных ловушек геологическими признаками; для ловушек одного пласта такими независимыми признаками являются локальные признаки при условии наличия всех необходимых региональных признаков ($P_{\text{рег}}^{\text{пли}} = 1$). Для ловушек i -ого пласта в этом случае справедливо равенство:

$$P_{\text{усп}}^{\text{лови}} = P_{\text{лок}}^{\text{лови}}.$$

Геологические риски ловушек статистически зависимы, если они определяются как общими для всех ловушек (common) признаками, так и независимыми (independent) для отдельных ловушек признаками; для ловушек одного (i -ого) пласта зависимыми признаками являются региональные признаки, независимыми – локальные признаки. Для ловушек пласта в этом случае справедливо равенство:

$$P_{\text{усп}}^{\text{лови}} = P_{\text{рег}}^{\text{пли}} \times P_{\text{лок}}^{\text{лови}} \quad (1).$$

Исходные данные для решения задачи вероятностной оценки ресурсов целевого участка, характеризуемого иерархической схемой (см. рис. 1), удобно задать в табличном виде – табл. 2 и 3; таблицы структурированы по пластам (столбцы) и ловушкам (строки). В табл. 2 приведены вероятностные оценки ресурсов ловушек $F(Q_{\text{лови}})$, в табл. 3 – значения вероятностей наличия региональных признаков в пластах $P_{\text{рег}}^{\text{пли}}$ и локальных признаков в

ловушках $P_{лок}^{ловij}$, где i – номер пласта, j – номер ловушки в i -ом пласте.

Таблица 2

Вероятностные оценки ресурсов ловушек

			ПЛАСТЫ			
			Номер пласта ($i = 1, \dots, N$)			
			1	2	.....	N
ЛОВУШКИ	Номер ловушки ($j = 1, \dots, M_i$)	1	$F(Q_{лов11})$	$F(Q_{лов21})$	.....	$F(Q_{ловN1})$
		2	$F(Q_{лов12})$	$F(Q_{лов22})$	.....	$F(Q_{ловN2})$
		...	.....	.....	$F(Q_{ловij})$	.....
		M_i	$F(Q_{лов1M1})$	$F(Q_{лов2M2})$	.....	$F(Q_{ловNMi})$

Таблица 3

Вероятности наличия региональных и локальных признаков

			ПЛАСТЫ			
			Номер пласта ($i = 1, \dots, N$)			
			1	2	.....	N
			$P_{рег}^{пл1}$	$P_{рег}^{пл2}$	.....	$P_{рег}^{плN}$
ЛОВУШКИ	Номер ловушки ($j = 1, \dots, M_i$)	1	$P_{лок}^{лов11}$	$P_{лок}^{лов21}$	.....	$P_{лок}^{ловN1}$
		2	$P_{лок}^{лов12}$	$P_{лок}^{лов22}$	.....	$P_{лок}^{ловN2}$
		...	.....	.....	$P_{лок}^{ловij}$	.....
		M_i	$P_{лок}^{лов1M1}$	$P_{лок}^{лов2M2}$	.....	$P_{лок}^{ловNMi}$

В общей постановке задача состоит в разработке аналитического метода получения вероятностной оценки ресурсов нефти или газа для участка $F(Q_{уч})$ путем суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек $F(Q_{ловij})$, характеризующихся геологическими рисками (вероятностями $P_{усп}^{ловij}$ и $P_{неуд}^{ловij}$), ($i = 1, \dots, N$; N – число пластов, $j = 1, \dots, M_i$; M_i – число ловушек в i -ом пласте). Особенность решения этой задачи заключается в необходимости учета зависимости оценок геологических рисков для некоторых совокупностей агрегируемых ловушек (для ловушек одного пласта).

Дополнительные условия:

- геологические модели пластов на участке независимы, что обуславливает статистическую независимость вероятностей существования пластов $P_{рег}^{плi}$; ($i = 1, \dots, N$);

- вероятностные оценки ресурсов ловушек $F(Q_{ловij})$ ($i = 1, \dots, N$; $j = 1, \dots, M_i$) не коррелированы.

Методика решения задачи

Методика получения вероятностной оценки ресурсов нефти или газа для участка недр, который можно структурировать в виде иерархической схемы соподчиненности разномасштабных геологических объектов (см. рис. 1), состоит из двух последовательных операций:

- суммирование вероятностных оценок ресурсов ловушек в каждом пласте участка с целью получения вероятностной оценки ресурсов пласта;
- суммирование вероятностных оценок ресурсов пластов с целью получения вероятностной оценки ресурсов участка.

Проблема с учетом зависимости геологических рисков ловушек возникает при суммировании вероятностных оценок ресурсов ловушек в каждом пласте (см. формулу (1)). Для преодоления этой проблемы предлагается следующая последовательность математических процедур:

- а) моделирование условий, обуславливающих возможность устранения зависимости геологических рисков для ловушек одного пласта;
- б) суммирование вероятностных оценок ресурсов ловушек каждого пласта в предположении независимости их геологических рисков по известной методике [Емельянова, Пороскун, 2019]; получение вероятностных оценок суммарных ресурсов ловушек для пластов участка при принятом предположении (п.а);
- в) корректировка полученных в п.б результатов с учетом условий, принятых в п.а; получение откорректированных вероятностных оценок ресурсов пластов;
- г) суммирование откорректированных вероятностных оценок ресурсов пластов по методике суммирования вероятностных оценок с независимыми геологическими рисками; получение вероятностной оценки ресурсов участка.

Вычислительная схема методики приведена на рис. 2. В схему входят следующие математические процедуры.

Вычислительная процедура 1

Для каждого пласта постулируется условие, что пласт существует, то есть в нем присутствуют и достоверно определены все необходимые для образования скоплений углеводородов региональные признаки. Этому положению соответствуют математические равенства:

$$P_{\text{рег}}^{\text{пл}i} = 1 \quad (2),$$
$$P_{\text{усп}}^{\text{лов}ij} = P_{\text{лок}ij}, \quad P_{\text{неуд}}^{\text{лов}ij} = 1 - P_{\text{усп}}^{\text{лов}ij}, \quad i = 1, \dots, N; \quad j = 1, \dots, M_i,$$

где i – номер пласта, j – номер ловушки в i -ом пласте.

Условие, при котором вероятности успеха агрегируемых ловушек обуславливаются только локальными (независимыми) геологическими признаками, определяет для них независимость геологических рисков. Последнее обстоятельство делает возможным использовать известный аппарат суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек с учетом независимых геологических рисков [Емельянова, Пороскун, 2019].

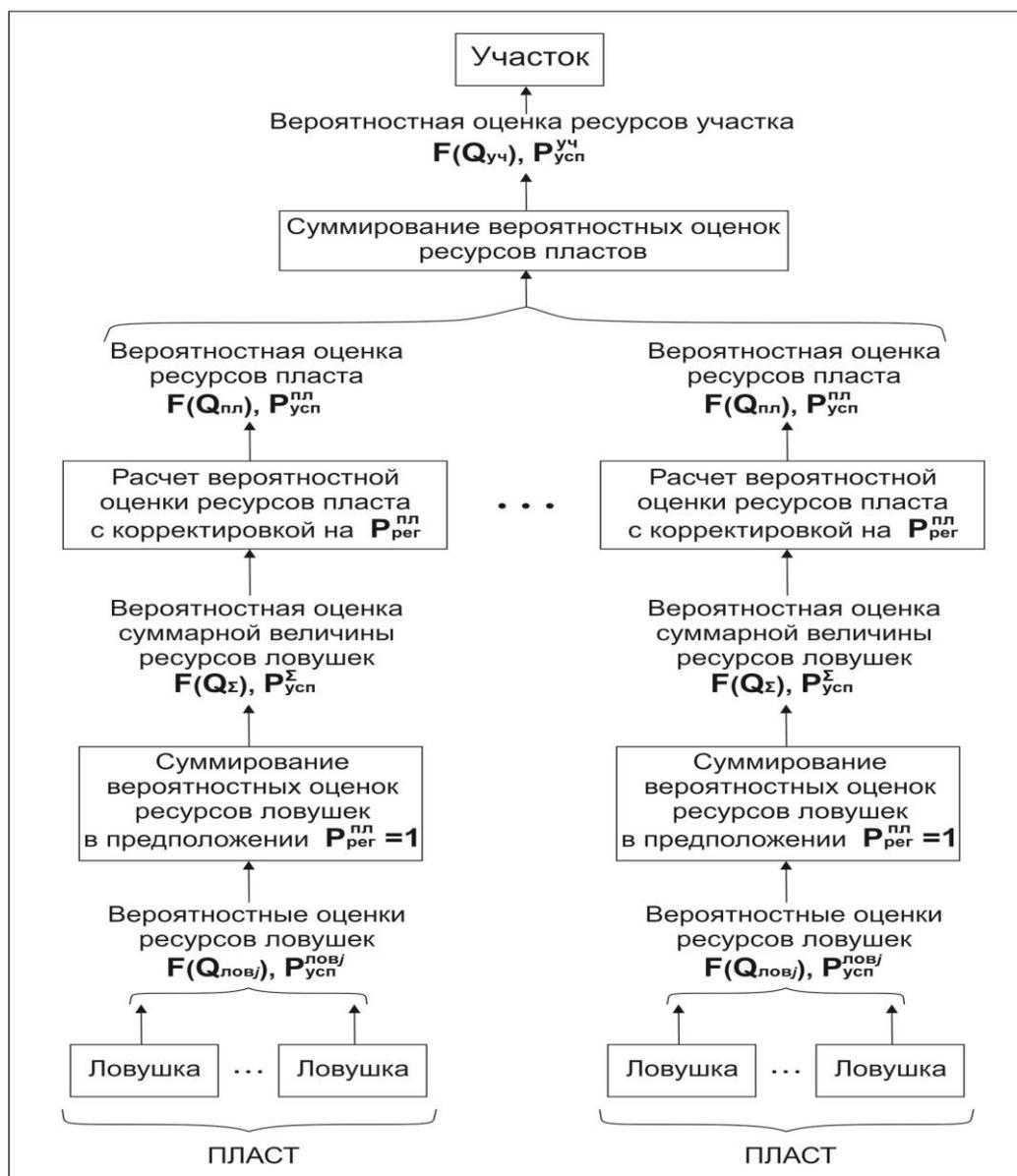


Рис. 2. Вычислительная схема методики

Вычислительная процедура 2

На этой операции для каждого i -ого пласта ($i = 1, \dots, N$) определяется вероятностная оценка суммарных ресурсов ловушек $F(Q_\Sigma)$ с учетом их независимых геологических рисков (2).

Математическая формализация метода суммирования сводится к вычислению функции

$F(Q_\Sigma)$ следующего вида [Емельянова, Пороскун, 2019]:

$$F(Q_\Sigma) = \begin{cases} P_{\text{неуд}}^\Sigma + P_{\text{усп}}^\Sigma = 1 & \text{для } Q_\Sigma = 0; \\ \sum_m \sum_n P_{nm} F(Q_{nm}) & \text{для } Q_\Sigma > 0, \end{cases} \quad (3),$$

m – характеристика ситуации, обозначающая число успешных ловушек в ней, $m = 1, \dots, N_{\text{лови}}$ ($N_{\text{лови}}$ – число агрегируемых ловушек в i -ом пласте);

n – номер комбинации, состоящей из оценок ресурсов успешных ловушек разных индексов; число таких комбинаций при $m = \text{const}$ равно числу сочетаний из $N_{\text{лови}}$ элементов по m элементам $C_{N_{\text{лови}}}^m$;

P_{nm} – вероятность n -ой комбинации в m -ой ситуации; вычисление вероятностей P_{nm} производится путем перемножения вероятностей успеха и неудачи ловушек пласта $P_{\text{усп}}^{\text{лови}j}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лови}j}$, соответствующих комбинации « nm »;

$F(Q_{nm})$ – вероятностная оценка суммарных ресурсов успешных ловушек, входящих в n -ую комбинацию для m -ой ситуации; вероятностные оценки ресурсов ловушек допустимо аппроксимировать логнормальными функциями распределения вероятностей с параметрами – математическим ожиданием $m_Q^{\text{ЛОВ}}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_Q^{\text{ЛОВ}}$;

$P_{\text{неуд}}^\Sigma$ – вероятность, соответствующая условию, когда все агрегируемые ловушки могут оказаться сухими и $Q_\Sigma = 0$; вероятность $P_{\text{неуд}}^\Sigma$ вычисляется по формуле:

$$P_{\text{неуд}}^\Sigma = \prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лови}j}, \quad j = 1, \dots, N_{\text{лови}} \quad (4),$$

где \prod - знак умножения;

$P_{\text{усп}}^\Sigma$ – вероятность успеха для суммарной величины ресурсов; вероятность $P_{\text{усп}}^\Sigma$ вычисляется по формуле:

$$P_{\text{усп}}^\Sigma = 1 - P_{\text{неуд}}^\Sigma \quad (5).$$

Как видно из записи формулы (3), вероятностная оценка суммарной величины ресурсов $F(Q_\Sigma)$ является функцией смешанного (дискретно – непрерывного) типа с разрывом в точке $Q_\Sigma = 0$. Непрерывная часть функции ($F'(Q_\Sigma)$) представляет собой результат двойного суммирования (по индексам m и n) функций распределения $F(Q_{nm})$ вероятностных оценок суммарных ресурсов успешных ловушек в n -ой комбинации для m -ой ситуации:

$$F'(Q_\Sigma) = \sum_m \sum_n P_{nm} F(Q_{nm}) \text{ при } Q_\Sigma > 0 \quad (6).$$

Дискретная часть представлена скачком вероятности ($P_{\text{неуд}}^\Sigma$) в точке $Q_\Sigma = 0$.

На рис. 3 приведен график функции $F(Q_\Sigma)$.

Непрерывная составляющая $F'(Q_\Sigma)$ пересекает ось ординат при значении, равном

вероятности успеха для суммарной величины ресурсов $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$, которая интерпретируется как вероятность наличия в наборе агрегируемых ловушек хотя бы одной промышленной залежи.

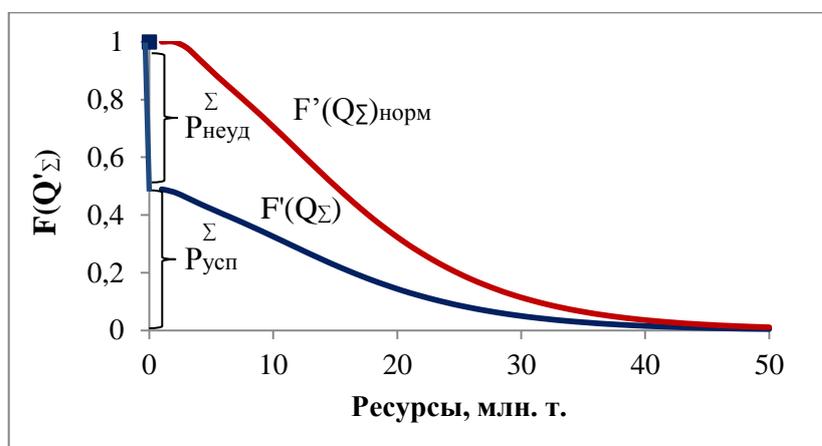


Рис. 3. График вероятностной оценки суммарных ресурсов ловушек

Дискретная составляющая $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$ отражает вероятность ситуации, когда все агрегируемые ловушки не содержат залежей (условие $Q_{\Sigma} = 0$).

В данном случае величину суммарных ресурсов Q_{Σ} можно рассматривать как характеристику условного объекта оценки, к которому применимы понятия «успех» и «неудача» и связанное с ним понятие геологического риска, представленного вероятностями $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$ и $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$. По аналогии с описанием вероятностной оценки отдельной ловушки с учетом ее геологического риска, представленного вероятностями $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$, вероятностную оценку $F(Q_{\Sigma})$ можно рассматривать как вероятностную оценку суммарных ресурсов ловушек с учетом геологического риска, представленного вероятностями $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$ и $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$.

Для дальнейших вычислений вероятностную оценку суммарных ресурсов с учетом геологического риска $F(Q_{\Sigma})$ следует перевести в вероятностную оценку суммарных ресурсов без учета геологического риска. Эта операция осуществляется путем нормирования функции $F(Q_{\Sigma})$ вероятностью успеха $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$ по формуле:

$$F(Q_{\Sigma})_{\text{норм}} = F'(Q_{\Sigma}) / P_{\text{усп}}^{\Sigma} \quad (7).$$

Функция $F(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$ показана на рис. 3.

Переход к вероятностной оценке суммарных ресурсов без учета геологического риска, представленного вероятностями $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$ и $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$, позволяет разделить и рассматривать отдельно две ее компоненты:

- вероятностную оценку суммарных ресурсов ловушек пласта в случае успеха, то есть при условии, что в наборе агрегируемых ловушек присутствует хотя бы одна ловушка,

содержащая промышленную залежь, $F(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$;

- геологический риск для суммарных ресурсов, представленный вероятностями $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$, $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$.

Результатом суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек (при условии существования пласта) является получение для i -ого пласта вероятностной оценки $F(Q_{\Sigma i})$, характеризующейся показателями:

$$P_{\text{неуд}}^{\Sigma i} \text{ (4)}, \quad P_{\text{усп}}^{\Sigma i} \text{ (5)}, \quad F'(Q_{\Sigma i}) \text{ (6)}, \quad F(Q_{\Sigma i})_{\text{норм}} \text{ (7)}, \quad i = 1, \dots, N \quad (8).$$

Вычислительная операция 3

На этой операции для каждого i – ого пласта ($i = 1, \dots, N$) определяется вероятностная оценка ресурсов пласта $F(Q_{\text{пл}i})$ и составляющие геологического риска для пласта – вероятность успеха $P_{\text{усп}}^{\text{пл}i}$ и вероятность неудачи $P_{\text{неуд}}^{\text{пл}i}$.

В качестве вероятностной оценки ресурсов пласта $F(Q_{\text{пл}i})$ принимается нормированная функция распределения суммарной величины ресурсов ловушек $F(Q_{\Sigma i})_{\text{норм}}$ (7):

$$F(Q_{\text{пл}i}) = F(Q_{\Sigma i})_{\text{норм}} \quad (9).$$

Оценка геологического риска пласта определяются путем корректировки геологического риска для суммарных ресурсов ($P_{\text{усп}}^{\Sigma i}$, $P_{\text{неуд}}^{\Sigma i}$) с учетом вероятности существования пласта $P_{\text{рег}}^{\text{пл}i}$ по следующим формулам:

$$P_{\text{усп}}^{\text{пл}i} = P_{\text{рег}}^{\text{пл}i} P_{\text{усп}}^{\Sigma i}; \quad P_{\text{неуд}}^{\text{пл}i} = 1 - P_{\text{усп}}^{\text{пл}i} \quad (10).$$

Вычислительная операция 4

На этой операции производится вычисление вероятностной оценки ресурсов участка $F(Q_{\text{уч}})$ путем суммирования вероятностных оценок ресурсов пластов $F(Q_{\text{пл}i})$, $i = 1, \dots, N$ (9). Геологические риски пластов, определяемые вероятностями $P_{\text{усп}}^{\text{пл}i}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{пл}i}$ ($i = 1, \dots, N$) (10), независимы в силу принятой независимости существования пластов, поэтому суммирование вероятностных оценок $F(Q_{\text{пл}i})$ можно проводить по правилам суммирования вероятностных оценок ресурсов, характеризующихся независимыми геологическими рисками (формула (3)). В результате суммирования получена вероятностная оценка ресурсов участка $F(Q_{\text{уч}})$, характеризующаяся показателями:

$$P_{\text{неуд}}^{\text{уч}} = \prod_i P_{\text{неуд}}^{\text{пл}i}, \quad P_{\text{усп}}^{\text{уч}} = 1 - P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}, \quad F'(Q_{\text{уч}}), \quad F(Q_{\text{уч}})_{\text{норм}} = F'(Q_{\text{уч}}) / P_{\text{усп}}^{\text{уч}} \quad (11).$$

$$F(Q_{\text{уч}}) = F(Q_{\text{уч}})_{\text{норм}}$$

Показатели вероятностной оценки ресурсов участка интерпретируются следующим образом (формулы (11)). Показатель $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$ - это вероятность наличия на участке хотя бы одной промышленной залежи; показатель $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$ - это вероятность отсутствия на участке

промышленных залежей; функция $F'(Q_{уч})$ – это непрерывная составляющая вероятностной оценки ресурсов участка при учете геологического риска для участка, представленного вероятностями $P_{усп}^{уч}$ и $P_{неуд}^{уч}$; $F(Q_{уч})_{норм}$ – это вероятностная оценка ресурсов участка в случае успеха, то есть в случае наличия на участке хотя бы одной промышленной залежи.

Ниже приведены аналитические формулы для вычисления показателей вероятностной оценки ресурсов участка, которые могут быть вычислены априорно.

Геологический риск для участка:

$$P_{усп}^{уч} = 1 - \prod_i [1 - P_{рег}^{плі} (1 - \prod_j P_{неуд}^{ловіj})], \quad P_{неуд}^{уч} = 1 - P_{усп}^{уч} \quad (12),$$

$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M_i.$

Среднее значение (математическое ожидание) вероятностной оценки ресурсов участка при учете геологического риска для участка:

$$m_Q^{уч} = \sum_i P_{рег}^{плі} \sum_j m_Q^{ловіj} P_{лок}^{ловіj} \quad (13),$$

$i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M_i.$

Среднее значение (математическое ожидание) вероятностной оценки ресурсов участка в случае успеха:

$$m_Q^{уч,успех} = (m_Q^{уч} / P_{усп}^{уч}) \quad (14).$$

Проверка корректности методики

Проверка корректности методики проводилась путем сопоставления результата ее применения с результатом, полученным методом Монте-Карло, на конкретном примере. Исходные данные для примера приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Параметры вероятностных оценок ресурсов ловушек

		ПЛАСТЫ		
		Номер пласта		
		1	2	
ЛОВУШКИ	Номер ловушки	1	$m_Q = 4052, \sigma_Q = 2291$	$m_Q = 1531, \sigma_Q = 813$
		2	$m_Q = 232, \sigma_Q = 73$	$m_Q = 287, \sigma_Q = 130$
		3	$m_Q = 4114, \sigma_Q = 1534$	$m_Q = 408, \sigma_Q = 187$
		4		$m_Q = 380, \sigma_Q = 200$
		5		$m_Q = 43, \sigma_Q = 24$
		6		$m_Q = 145, \sigma_Q = 73$
		7		$m_Q = 197, \sigma_Q = 94$

Таблица 5

Региональные и локальные вероятности

		ПЛАСТЫ		
		Номер пласта		
		1 $P_{\text{рег}}^{\text{пл1}} = 0,54$	2 $P_{\text{рег}}^{\text{пл2}} = 0,9$	
ЛОВУШКИ	Номер ловушки	1	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,729$	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,3528$
		2	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,567$	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,4032$
		3	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,504$	$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,4032$
		4		$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,4032$
		5		$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,4032$
		6		$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,3528$
		7		$P_{\text{ЛОК}}^{\text{ЛОВ}} = 0,4032$

Получение вероятностной оценки ресурсов участка методом Монте-Карло осуществлялось следующим образом.

На каждой итерации для всех пластов с использованием значений вероятностей $P_{\text{рег}}^{\text{плi}}$ моделировалось условие наличия или отсутствия в них региональных геологических признаков.

При отсутствии в пластах необходимых региональных геологических признаков все ловушки предполагались «сухими» и для них принимались значения ресурсов, равными 0 ($Q_{\text{ЛОВ}} = 0$).

При присутствии в пластах необходимых региональных геологических признаков ловушки проверялись на наличие или отсутствие в них промышленной залежи путем моделирования условий успеха или неудачи с использованием вероятностей $P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}}$. Для ловушек, отмеченных как успешные, моделировались значения ресурсов $Q_{\text{ЛОВ}}$ в соответствии с функцией распределения их вероятностных оценок $F(Q_{\text{ЛОВ}})$. Для ловушек, отмеченных как неудачные, принимались значения ресурсов, равные 0 ($Q_{\text{ЛОВ}} = 0$).

Все смоделированные значения ресурсов ловушек суммировались, и полученное значение ресурсов рассматривалось как одна реализация ресурсов участка. После проведения заданного числа итераций совокупность реализаций значений ресурсов участка обрабатывалась статистически до получения вероятностной оценки ресурсов участка (функции $F(Q_{\text{уч}})$) и ее параметров – геологического риска для участка, заданного вероятностями успеха $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$ и неудачи $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$, и математического ожидания $m_Q^{\text{уч}}$.

Результаты методов – аналитического и Монте-Карло – показаны в виде графиков функции $F(Q_{\text{уч}})$ на рис. 4 и значений ее параметров, приведенных в табл. 6. Визуальное сопоставление графиков и значений параметров в табл. 6 позволяет сделать вывод об

идентичности результатов применения этих двух методов.

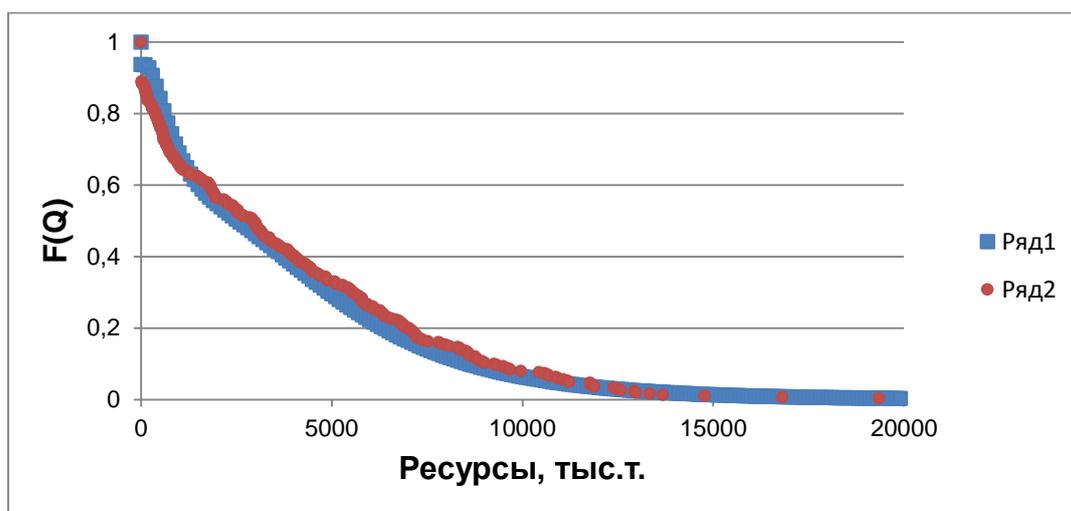


Рис. 4. Графики функций вероятностной оценки ресурсов участка $F(Q_{уч})$, полученные аналитическим методом (ряд 1) и методом Монте-Карло (ряд 2)

Таблица 6

Параметры вероятностной оценки ресурсов участка

Параметры	Метод Монте-Карло	Расчет по формулам
$P_{усп}^{уч}$	0,925	0,9368
$m_Q^{уч}$	3818 тыс. т	3795 тыс. т
$m_Q^{уч,успех}$	4052 тыс. т	4051 тыс. т

Достоинство аналитического метода

Аналитический метод, примененный в методике вероятностной оценки ресурсов нефти и газа участков недр, по сравнению с методом Монте-Карло обладает рядом преимуществ:

а) Аналитический метод, опираясь на логику мышления, позволяет провести анализ взаимоотношений процессов, обуславливающих возможность образования скоплений углеводородов на оцениваемом участке, и установить связь параметров, их определяющих. Последнее обстоятельство послужило основой для декомпозиции исходной составной задачи суммирования вероятностных оценок ресурсов с учетом *зависимых* геологических рисков на две, решаемые последовательно, более простые задачи суммирования вероятностных оценок ресурсов с учетом *независимых* геологических рисков.

б) Аналитический метод в отличие от численного метода (Монте-Карло) представляет процесс решения в общем (буквенном) виде, удобном для выполнения анализа решения и

интерпретации полученных результатов. Подтверждением этому являются формулы (3)÷(11), позволяющие понять:

- условия формирования вероятностных оценок ресурсов оцениваемого участка $F(Q_{уч})$ из вероятностных оценок ресурсов составляющих его пластов $F(Q_{плі})$ и ловушек $F(Q_{ловіj})$, ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M_i$);

- принципы формирования интервала вариации для значений оценок ресурсов пластов и участка;

- способ получения вероятностных оценок геологического риска для пластов ($P_{усп}^{плі}$, $P_{неуд}^{плі}$) и участка ($P_{усп}^{уч}$, $P_{неуд}^{уч}$).

в) Полученные аналитические формулы для вычисления показателей вероятностной оценки ресурсов участка без расчета ее функции распределения могут быть использованы для выполнения оценочных операций и геолого-экономического ранжирования перспективных участков на этапе предварительного анализа и проектирования геологоразведочных работ. Такими показателями являются:

- геологический риск для участка, представленный вероятностями $P_{усп}^{уч}$, $P_{неуд}^{уч}$ (12), где $P_{усп}^{уч}$ - вероятность наличия на участке хотя бы одной промышленной залежи нефти или газа;

- $P_{неуд}^{уч}$ - вероятность отсутствия на участке промышленных залежей;

- среднее значение (математическое ожидание $m_Q^{уч}$) вероятностной оценки ресурсов участка при учете геологического риска для участка (13);

- среднее значение (математическое ожидание $m_Q^{уч,успех}$) вероятностной оценки ресурсов участка в случае успеха (14).

Заключение

В статье предложен аналитический метод получения вероятностной оценки ресурсов нефти или газа для участка недр, представленного иерархией геологических объектов разного масштаба. Условия структурирования объектов разного масштаба определяют для этих объектов наличие как независимых, так и зависимых геологических рисков. Предполагается, что зависимость геологических рисков в иерархической схеме соподчиненности объектов свойственна объектам меньшего масштаба (ловушки одного пласта) за счет наличия общих для них региональных геологических признаков.

Метод основан на процедуре последовательного суммирования вероятностных оценок ресурсов для геологических объектов от меньшего масштаба (ловушка) к большему (пласт и участок) при коррекции геологических рисков ловушек каждого пласта. Такой способ позволяет свести общую задачу суммирования вероятностных оценок ресурсов с учетом

геологических рисков (независимых и зависимых) к последовательности задач суммирования вероятностных оценок ресурсов с независимыми геологическими рисками, решение которой приведено в опубликованной работе [Емельянова, Пороскун, 2019].

Проведена проверка корректности аналитического метода путем сопоставления результатов его применения с результатами, полученными методом Монте–Карло, на иллюстративном примере. Проверка подтвердила идентичность полученных результатов.

Литература

Габриэлянц Г.А. Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 2000. – 587 с.

Емельянова Н.М., Пороскун В.И. Вероятностные оценки ресурсов нефти и газа локальных объектов с учетом геологического риска // Недропользование XXI век. – 2010. – №2. – С. 24–29.

Емельянова Н.М., Пороскун В.И. Суммирование вероятностных оценок ресурсов нефти и газа локальных объектов с учетом геологического риска // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. – №2. – С.30–38.

Роуз Питер Р. Анализ рисков и управление нефтегазопроисковыми проектами. – Библиотека нефтяного инжиниринга. – Ижевск, 2011. – 301 с.

Фокин А. Риски и неопределенность в геологоразведочном процессе // Новатор. – 2011. – №43. – С. 8–12.

Lee P.J., Wang P.C.C. Probabilistic Formulation of a Method for the Evaluation of Petroleum Resources // Math. Geology. – 1983. – Vol. 15. – No.1. – P. 163–181.

Emelyanova N.M., Poroskun V.I.

Federal State Budgetary Institution "All-Russian Research Geological Oil Institute" (VNIGNI), Moscow, Russia, emel@list.ru, poroskun@list.ru

METHOD OF PROBABILISTIC OIL AND GAS RESOURCE ASSESSMENT FOR THE SUBSURFACE AREAS AT THE EXPLORATION APPRAISAL PHASE

The article offers an analytic method for obtaining a probabilistic of oil and gas resource estimation for subsurface area presented by a hierarchy of geological objects of different scales (subsurface area, layer, trap). The conditions for structuring objects of different scales define for this objects availability of both independent and dependent geological risks. It is assumed that dependency of geological risks in the hierarchical scheme is inherent in objects of a smaller scale (single layer traps) due to the presence of regional geological features common to larger scale objects (layer).

The method is based on the sequential procedure of analytical summation probabilistic resource estimates of objects from a smaller scale (trap) to larger scales (layer and subsurface area) when correcting a dependency of geological risks of traps in each layer. This method allows us to reduce the overall problem of summing to the problem of summing probabilistic resource estimates with independent geological risks.

Keywords: *probabilistic oil and gas resource estimate; multi-scale objects; independent and dependent geological risks; summation of the probabilistic resource estimates; accounting of the geological risks.*

References

Emel'yanova N.M., Poroskun V.I. *Summirovaniye veroyatnostnykh otsenok resursov nefi i gaza lokal'nykh ob"ektov s uchetom geologicheskogo riska* [Summing up probabilistic estimates of oil and gas resources of local objects taking into account geological risk]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2019, no. 2, pp. 30-38.

Emel'yanova N.M., Poroskun V.I. *Veroyatnostnye otsenki resursov nefi i gaza lokal'nykh ob"ektov s uchetom geologicheskogo riska* [Probabilistic estimates of oil and gas resources of local objects taking into account geological risk]. *Nedropol'zovanie XXI vek*, 2010, no. 2, pp. 24–29.

Fokin A. *Riski i neopredelennost' v geologorazvedochnom protsesse* [Risks and uncertainty in the geological exploration process]. *Novator*, 2011, no. 43, pp. 8–12.

Gabrielyants G.A. *Geologiya, poiski i razvedka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy* [Geology, prospecting and exploration of oil and gas fields]. Moscow: Nedra, 2000, 587 p.

Lee P.J., Wang P.C.C. Probabilistic Formulation of a Method for the Evaluation of Petroleum Resources. *Math. Geology*, 1983, vol. 15, no.1, pp. 163–181.

Rouz Piter R. *Analiz riskov i upravlenie neftegazoposkovymi proektami* [Risk analysis and management of oil and gas exploration projects]. *Biblioteka neftyanogo inzhiniringa*, Izhevsk, 2011, 301 p.

© Емельянова Н.М., Пороскун В.И., 2020