

DOI: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/28\\_2021](https://doi.org/10.17353/2070-5379/28_2021)

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, poroskun@list.ru

## **МЕТОДИКА ВЕРОЯТНОСТНОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ НЕФТИ И ГАЗА УЧАСТКОВ НЕДР С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ АГРЕГИРУЕМЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ПЛОЩАДИ И РАЗРЕЗУ**

*Рассмотрены методы получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа участков недр, базирующиеся на суммировании вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (ловушек) с учетом зависимости их геологических рисков. Формализация зависимости геологических рисков ловушек производилась путем разделения и вероятностного описания геологических факторов, приводящих к формированию залежей нефти и газа, на общие для ловушек участка и локальные, действующие в пределах отдельных локальных объектов.*

*Предложены и проанализированы два метода: аналитический и Монте-Карло. Тожественность результатов обоих методов подтверждена на приведенном условном примере. Дана статистическая интерпретация вероятностной оценки ресурсов участка, которая позволила ввести для нее понятие «геологического риска» и тем самым определить два вида оценки ресурсов - с учетом и без учета геологического риска.*

*Определены геологические условия практического применения разработанных методов.*

**Ключевые слова:** *вероятностные оценки ресурсов нефти и газа, зависимость геологических рисков локальных объектов, суммирование вероятностных оценок ресурсов локальных объектов с учетом их геологических рисков.*

### **Введение**

Решение широкого круга оперативных и стратегических задач управления геологоразведочными работами (ГРР) на нефть и газ базируется на оценке ресурсной базы по нефти и газу участков недр различного ранга (лицензионных, нефтегазовых областей (НГО), нефтегазоносных районов (НГР), административных и ряда других). Адекватным аппаратом, позволяющим количественно формализовать неопределенности, свойственные оценкам ресурсов, полученным в условиях недостатка геологической информации, являются методы теории вероятностей.

В методическом плане получение вероятностной оценки ресурсов участка представляет собой процесс суммирования вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (прогнозируемых или подготовленных к бурению ловушек), расположенных на исследуемом участке.

Для характеристики вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (ловушек),

которые рассматриваются как базовые при подсчете ресурсов участка, используются два показателя [Роуз, 2011]:

– вероятностная оценка ресурсов ловушки  $Q_{\text{лов}}$  (прогнозируемых запасов промышленной залежи при условии ее наличия в ловушке), представленная функцией распределения вероятностей  $F(Q_{\text{лов}})$ ;

– геологический риск для ловушки, количественно формализующий (в виде вероятностей) неопределенный результат ГРП: а) успех ГРП – открытие в ловушке промышленной залежи углеводородов, который будем характеризовать вероятностью успеха ловушки  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$ ; б) неудачу ГРП - отсутствие в ловушке промышленной залежи, которую будем характеризовать вероятностью неудачи ловушки  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ . Вероятности  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$  связаны соотношением  $(P_{\text{усп}}^{\text{лов}} + P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}) = 1$ . В английской литературе вероятностям  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$  соответствуют аналогичные по смыслу показатели: для  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$  - показатель gCoS (geological Chance of Success), для  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$  - показатель Risk = 1 – gCoS.

Суммирование вероятностных оценок ресурсов нефти и газа ловушек представляет собой процедуру суммирования случайных величин  $Q_{\text{лов},i}$ , заданных функциями распределения  $F(Q_{\text{лов},i})$ , участие которых в процессе суммирования регулируется вероятностями  $P_{\text{усп}}^{\text{лов},i}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов},i}$  для каждой  $i$ -ой ловушки.

Результатом суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек является вероятностная оценка суммарных ресурсов  $Q_{\Sigma}$  в виде функции распределения вероятностей  $F(Q_{\Sigma})$ , которая принимается в качестве вероятностной оценки ресурсов участка ( $F(Q_{\text{уч}}) = F(Q_{\Sigma})$ ).

Вероятностные оценки ресурсов ловушек  $F(Q_{\text{лов},i})$  обычно получают по объемной формуле подсчета запасов путем моделирования методом Монте-Карло входящих в нее подсчетных параметров [Пороскун, Стернин, Шепелев, 1999].

При определении геологического риска для ловушки (вероятностей  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ ) исходят из того, что для образования в ловушке залежи нефти или газа должны быть реализованы геологические условия, обеспечивающие формирование и сохранность промышленных скоплений углеводородов в ловушке. В качестве основных условий принимается наличие: материнской породы углеводородов и путей миграции флюида, коллектора, покрышки, ловушки, условий для сохранности залежи [Роуз, 2011].

Вероятность успеха ловушки  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$ , как вероятность одновременного наличия в ловушке всех необходимых геологических признаков, определяется по правилам теории вероятностей для независимых случайных событий путем перемножения вероятностей наличия этих признаков  $P_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ):

$$P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}} = P_1 * P_2 * P_3 * P_4 * P_5 .$$

В современной практике оценки геологического риска для ловушек положен принцип разделения указанных геологических признаков на региональные, являющиеся общими (shared, common) для всех ловушек оцениваемого участка, и локальные, действующие в пределах отдельной ловушки и изменяющиеся от ловушки к ловушке [Роуз, 2011; The CCOP guidelines..., 2000]. В качестве региональных геологических признаков часто рассматриваются [Роуз, 2011]: наличие зрелых материнских пород по нефти и газу и возможности миграции углеводородов в ловушку, наличие коллектора; к локальным геологическим признакам обычно относят наличие ловушки (замкнутой структуры), эффективность изоляции, наличие покрывки и сохранность скопления углеводородов в ловушке. Такой ситуации соответствует геологическая модель участка, состоящая или из отдельного пласта или набора независимых пластов с расположенными на них ловушками. В этом случае предполагается, что структурные элементы, определяющие условие наличия ловушек, имеют локальное распространение и идентифицируются как локальные признаки для каждой ловушки пласта (пластов).

При более сложном геологическом строении территории выделенный для оценивания участок может содержать несколько структур, для которых фактор наличия замкнутого контура ловушек может наследоваться по разрезу. Для структурного фактора наследование имеет вертикальный, а не латеральный (как для регионального фактора) характер. В этом случае признак наличия структуры может рассматриваться как общий для ловушек одной многопластовой структуры. Такой ситуации можно поставить в соответствие геологическую модель участка, состоящую из заданного набора пластов (в количестве N) и структур (в количестве M) [Шатров, 2015].

При разделении геологических признаков, контролирующих процесс образования и сохранности нефтегазовых залежей, на региональную (для пластов), вертикальную (для структур) и локальную, действующую в пределах отдельной ловушки, можно записать выражение для вероятности успеха ловушки  $P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}}$  в виде:

$$P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}} = P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}},$$

где  $P_{\text{пл}}$  - вероятность наличия пласта, равная произведению вероятностей наличия региональных геологических признаков, свойственных для конкретного пласта;

$P_{\text{с}}$  - вероятность наличия структуры, определяемая как вероятность преобладания структурного фактора в пределах одной структуры;

$P_{\text{л}}$  - вероятность наличия локального признака, равная произведению вероятностей наличия локальных геологических признаков, свойственных ловушке, сформированной в

конкретном пласте и конкретной структуре.

В статье не исследуются вопросы разделения геологических признаков, контролирующих процесс образования и сохранности скоплений углеводородов, на составляющие и способы их вероятностной оценки. Вероятности  $P_{пл}$ ,  $P_c$ ,  $P_l$  рассматриваются как базовые при математической формализации геологической модели оцениваемого участка и предполагаются заданными.

Из приведенной формулы видно, что математическое выражение вероятности успеха для ловушек  $P_{усп}^{лов}$ , расположенных либо в одном пласте, либо в одной структуре, содержит по одной общей компоненте:  $P_{пл}$  – для ловушек, расположенных в одном пласте;  $P_c$  – для ловушек, расположенных в одной структуре. Наличие общих компонент ( $P_{пл}$  или  $P_c$ ) в выражении вероятности успеха  $P_{усп}^{лов}$  для ловушек одного пласта или одной структуры обуславливает для совокупностей таких ловушек связность их геологических рисков. Эту связность геологических рисков для ловушек следует учитывать при суммировании вероятностных оценок ресурсов ловушек участка  $F(Q_{лов,i})$  с целью получения вероятностной оценки суммарных ресурсов оцениваемого участка  $F(Q_{\Sigma})$ .

Настоящая статья посвящена разработке методов суммирования вероятностных оценок ресурсов нефти и газа локальных объектов (ловушек) с учетом зависимости их геологических рисков. Рассмотрены два метода суммирования - аналитический метод и метод Монте-Карло.

### Постановка задачи

В статье задача решается для участка недр, геологическую модель которого можно представить состоящей из  $N$  потенциально продуктивных пластов и  $M$  перспективных структур, охарактеризованных геологическими признаками, благоприятными для образования в этих пластах и структурах промышленных залежей в количестве  $N \cdot M$ .

Каждый выделенный пласт охарактеризуем обобщенной вероятностью наличия в нем необходимых региональных геологических признаков  $P_{пл}$ . Каждую выделенную структуру охарактеризуем вероятностью преобладания в ее пределах структурного фактора  $P_c$ . Таким образом, вероятности  $P_{пл}$  и  $P_c$  можно интерпретировать как вероятности существования соответствующих геологических объектов – пласта и структуры – на площади оцениваемого участка.

Исходными данными для решения задачи являются:

- совокупность агрегируемых ловушек на оцениваемом участке;
- значения вероятностей:
- наличия пластов  $P_{пл}^i$ ,  $i = 1, \dots, N$ ;

- наличия структур  $P_c^j, j = 1, \dots, M$ ;
- наличия локальных признаков в ловушках  $P_l^{ij}, i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ ;
- вероятностные оценки ресурсов нефти и газа ловушек, заданные функциями распределения вероятностей  $F(Q_{\text{лов}}^{ij}) = F(m_{Q_{\text{лов}}^{ij}}, \sigma_{Q_{\text{лов}}^{ij}})$ , ( $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ ) с известными параметрами – математическим ожиданием  $m_{Q_{\text{лов}}^{ij}}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_{Q_{\text{лов}}^{ij}}$ .

Исходная информация представлена в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Таблица исходных данных

Пласты	Структуры			
	$j$	$P_c^1$	.....	$P_c^M$
$i$				
$P_{\text{пл}}^1$		$F(Q_{\text{лов}}^{11}), P_l^{11}$ $P_{\text{усп}}^{\text{лов},11} = P_{\text{пл}}^1 * P_c^1 * P_l^{11}$	.....	$F(Q_{\text{лов}}^{1M}), P_l^{1M}$ $P_{\text{усп}}^{\text{лов},1M} = P_{\text{пл}}^1 * P_c^M * P_l^{1M}$
.		.	$F(Q_{\text{лов}}^{ij}), P_l^{ij}$ $P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij} = P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij}$	.
$P_{\text{пл}}^N$		$F(Q_{\text{лов}}^{N1}), P_l^{N1}$ $P_{\text{усп}}^{\text{лов},N1} = P_{\text{пл}}^N * P_c^1 * P_l^{N1}$	.....	$F(Q_{\text{лов}}^{NM}), P_l^{NM}$ $P_{\text{усп}}^{\text{лов},NM} = P_{\text{пл}}^N * P_c^M * P_l^{NM}$

В табл. 1 строки, проиндексированные индексом  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), соответствуют пластам; столбцы, проиндексированные индексом  $j$  ( $j = 1, \dots, M$ ), соответствуют структурам; ячейки, проиндексированные двойным индексом  $ij$ , соответствуют ловушкам, расположенным в  $i$ -ом пласте и  $j$ -ой структуре. Таблица содержит перечень вероятностных показателей, характеризующих геологические объекты участка: вероятности наличия пластов  $P_{\text{пл}}^i$  ( $i = 1, \dots, N$ ); вероятности наличия структур  $P_c^j$  ( $j = 1, \dots, M$ ); вероятности наличия локальных геологических признаков в ловушках  $P_l^{ij}$ ; вероятности успеха ловушек  $P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij} = P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij}$ ; вероятностные оценки ресурсов ловушек  $F(Q_{\text{лов}}^{ij})$ .

Задача получения вероятностной оценки суммарных ресурсов участка сводится к суммированию вероятностных оценок ресурсов ловушек  $F(Q_{\text{лов}}^{ij})$  ( $i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M$ ) с учетом геологического риска ловушек, представленного вероятностями  $P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij} = P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов},ij} = (1 - P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij})$ . Связность геологических рисков ловушек обусловлена их зависимостью от общих компонент  $P_{\text{пл}}^i$  для ловушек одного ( $i$ -ого) пласта и  $P_c^j$  для ловушек одной ( $j$ -ой) структуры (см. табл. 1).

## Методы суммирования

### Аналитический метод

#### Методическая основа метода

Методическую основу метода составляет способ суммирования вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (ловушек) с учетом *независимых* геологических рисков ловушек [Емельянова, Пороскун, 2019]. Математическая формализация метода сводится к вычислению следующей дискретно-непрерывной функции:

$$F(Q_{\Sigma}) = \begin{cases} F'(0) + P_0 & \text{для } Q_{\Sigma} = 0; \\ F'(Q_{\Sigma}) & \text{для } Q_{\Sigma} > 0, \end{cases} \quad (1),$$

$F(Q_{\Sigma})$  – вероятностная оценка суммарных ресурсов  $Q_{\Sigma}$ ;

$F'(Q_{\Sigma})$  – непрерывная составляющая вероятностной оценки суммарных ресурсов  $F(Q_{\Sigma})$ ;

$P_0$  – вероятность отсутствия залежей во всех агрегируемых ловушках, т.е. вероятность равенства нулю суммарных ресурсов  $Q_{\Sigma}$ .

Функция  $F'(Q_{\Sigma})$  вычисляется по формуле:

$$F'(Q_{\Sigma}) = \sum_m \sum_n P_{nm} * F(Q_{nm}) \quad (2),$$

где  $m$  – характеристика ситуации, обозначающая число успешных ловушек в ней,  $m = 1, \dots, N_{\text{лов}}$  ( $N_{\text{лов}}$  – число агрегируемых ловушек);

$n$  – номер комбинации, представленный индексами успешных ловушек в  $m$ -ой ситуации; число таких комбинаций при  $m = \text{const}$  равно числу сочетаний из  $N_{\text{лов}}$  элементов по  $m$  элементам  $C_{N_{\text{лов}}}^m$ ,  $n = 1, \dots, C_{N_{\text{лов}}}^m$ ;

$P_{nm}$  – вероятность  $n$ -ой комбинации успешных ловушек в  $m$ -ой ситуации; вычисляется как произведение вероятностей  $P_{\text{усп}}^{\text{лов},j}$  по индексам  $j$ , включенным в  $n$ -ую комбинацию успешных ловушек;

$F(Q_{nm})$  – вероятностная оценка суммарных ресурсов успешных ловушек, входящих в  $n$ -ую комбинацию  $m$ -ой ситуации.

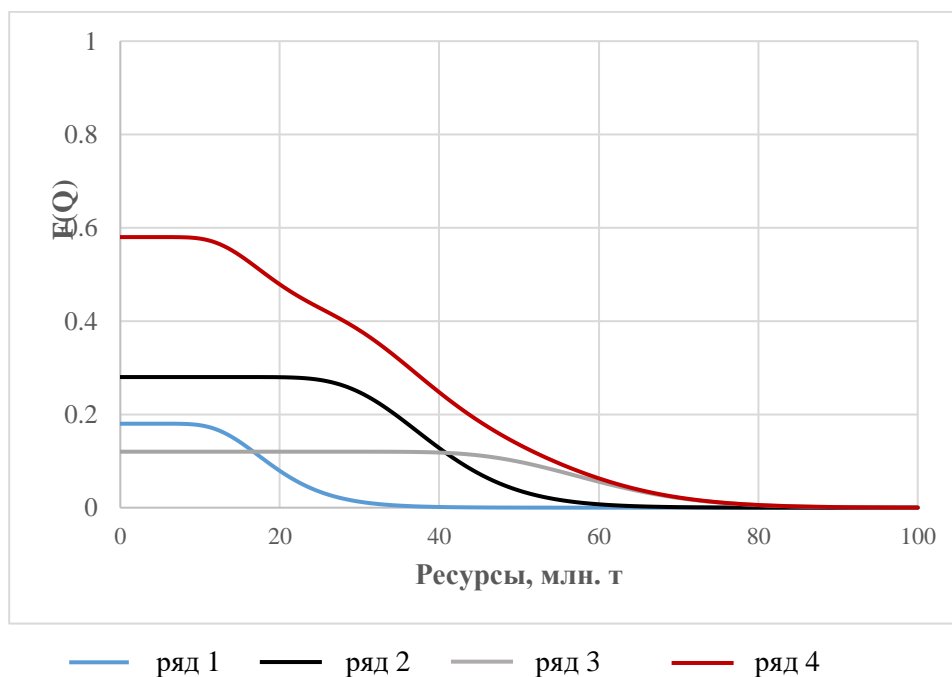
Аналитическое выражение  $\sum_m \sum_n P_{nm} * F(Q_{nm})$  в формуле (2) представляет собой арифметическое суммирование ординат функций  $F(Q_{nm})$ , откорректированных вероятностями  $P_{nm}$ . Графический пример, демонстрирующий эту математическую процедуру для случая двух ловушек, приведен на рис. 1.

Значение функции  $F'(0)$  соответствует точке пересечения функции  $F'(Q_{\Sigma})$  с осью ординат.

Вероятность  $P_0$  вычисляется по формуле:

$$P_0 = \prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лов},j}, j = 1, \dots, N_{\text{лов}} \quad (3),$$

где  $\prod_j$  – знак перемножения элементов с индексом  $j$  ( $P_{\text{неуд}}^{\text{лов},j}$ ).



**Рис. 1. Графический пример суммирования функций  $P_{nm} * F(Q_{nm})$  в формуле (2)**

*Ряд 1 -  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}1} * P_{\text{неуд}}^{\text{лов}2} * F(Q_{\text{лов}}^1)$ ; ряд 2 -  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}2} * P_{\text{неуд}}^{\text{лов}1} * F(Q_{\text{лов}}^2)$ ; ряд 3 -  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}1} * P_{\text{усп}}^{\text{лов}2} * F(Q_{\text{лов}}^1 + Q_{\text{лов}}^2)$ ; ряд 4 -  $F'(Q_{\Sigma})$ .*

По аналогии с вероятностью неудачи для ловушки ( $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ ), соответствующей условию отсутствия в ловушке залежи, вероятность  $P_0$  в [Емельянова, Пороскун, 2019] названа вероятностью неудачи для суммарной величины ресурсов ( $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$ ) и определяется соотношением  $P_{\text{неуд}}^{\Sigma} = P_0$ . Вероятность события, противоположного событию неудачи для суммарной величины ресурсов, названа вероятностью успеха суммарной величины ресурсов  $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$  и определяется соотношением  $P_{\text{усп}}^{\Sigma} = 1 - P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$ . Таким образом, совокупность вероятностей  $P_{\text{усп}}^{\Sigma}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\Sigma}$  можно интерпретировать как вероятностную характеристику геологического риска для суммарной величины ресурсов  $Q_{\Sigma}$ .

#### ***Метод суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек с учетом зависимости их геологических рисков***

Метод суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек с учетом зависимости их геологических рисков базируется на методе суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек с учетом независимых геологических рисков, представленном уравнениями (1) ÷ (3), после проведения соответствующих корректировок вероятностных показателей геологических рисков ловушек – вероятности  $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ . Способ корректировки сводился к замене вероятностных показателей независимого геологического риска ловушек, заданных в



виде  $P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}} = \text{const}$ , вероятностными показателями зависимого геологического риска ловушек, представленного его компонентами:

$$P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}} = P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}}, P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}} = (1 - P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}}) \quad (4).$$

При компонентном представлении геологического риска для ловушек факторы риска - наличие пласта, наличие структуры, наличие локального признака в ловушке - рассматриваются как независимые случайные события, поведение которых описывается соответствующими вероятностями:

$\{P_{\text{пл}}, (1 - P_{\text{пл}})\}$ ;  $P_{\text{пл}}$  – пласт присутствует,  $(1 - P_{\text{пл}})$  – пласт отсутствует;

$\{P_{\text{с}}, (1 - P_{\text{с}})\}$ ;  $P_{\text{с}}$  – структура присутствует,  $(1 - P_{\text{с}})$  – структура отсутствует;

$\{P_{\text{л}}, (1 - P_{\text{л}})\}$ ;  $P_{\text{л}}$  – локальный признак в ловушке присутствует,  $(1 - P_{\text{л}})$  – локальный признак в ловушке отсутствует.

Результат совместного действия этих событий определяет условия успеха или неудачи ловушки, т. е. ее геологический риск. Чтобы появилась возможность учесть взаимодействие указанных случайных факторов, изменим способ вероятностной формализации геологического риска для ловушки – вероятностей  $P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}}$  - следующим образом.

$$P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}} = P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}}, P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}} = [(1 - P_{\text{пл}}) + P_{\text{пл}} * (1 - P_{\text{с}}) + P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * (1 - P_{\text{л}})] \quad (5).$$

В формулах (5) выражение для  $P_{\text{усп}}^{\text{ЛОВ}}$  по-прежнему представлено произведением вероятностей наличия в ловушке всех необходимых факторов – пласта, структуры и локальных геологических признаков; выражение для  $P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}}$  представлено суммой вероятностей событий, которые могут привести к отсутствию в ловушке залежи: либо отсутствие пласта (вероятность  $(1 - P_{\text{пл}})$ ); либо наличие пласта, но отсутствие в нем структуры (вероятность  $P_{\text{пл}} * (1 - P_{\text{с}})$ ); либо наличие пласта и структуры, но отсутствие в соответствующей ловушке локальных признаков (вероятность  $P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * (1 - P_{\text{л}})$ ).

Выражения  $(1 - P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}})$  из формулы (4) и  $[(1 - P_{\text{пл}}) + P_{\text{пл}} * (1 - P_{\text{с}}) + P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * (1 - P_{\text{л}})]$  из формулы (5) для представления вероятности  $P_{\text{неуд}}^{\text{ЛОВ}}$  тождественны, т.е. допускают аналитическое преобразование из одного вида в другой:

$$(1 - P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * P_{\text{л}}) \equiv [(1 - P_{\text{пл}}) + P_{\text{пл}} * (1 - P_{\text{с}}) + P_{\text{пл}} * P_{\text{с}} * (1 - P_{\text{л}})],$$

где знак « $\equiv$ » - знак тождества.

Далее проводился комплекс аналитических преобразований уравнений (1)÷(3) для простейшей геологической модели участка, содержащей два пласта ( $N=2$ ) и две структуры ( $M=2$ ), с соблюдением условий учета связности геологических рисков ловушек в виде (5). Результат, полученный для простейшей геологической модели, затем индуцирован на общий случай геологической модели, содержащей любое число пластов ( $N$ ) и структур ( $M$ ).

По типу функции вероятностная оценка суммарных ресурсов  $F(Q_{\Sigma})$  при учете



зависимости геологических рисков ловушек совпадает с вероятностной оценкой суммарных ресурсов  $F(Q_\Sigma)$  для независимых рисков, представленной уравнением (1):

$$F(Q_\Sigma) = \begin{cases} F'(0) + P_0 & \text{для } Q_\Sigma = 0; \\ F'(Q_\Sigma) & \text{для } Q_\Sigma > 0 \end{cases} \quad (6).$$

Учет зависимости геологических рисков ловушек приводит к изменению математических формул для компонент  $F'(Q_\Sigma)$  и  $P_0$  в уравнения (6) по сравнению с математическими формулами для компонент  $F'(Q_\Sigma)$  и  $P_0$  в уравнении (1).

Математическая формула для компоненты  $F'(Q_\Sigma)$ :

$$F'(Q_\Sigma) = \underbrace{\left\{ \left[ \sum_{n=1}^N \sum_{V_n}^{C_n^n} \prod_{i \in S_{V_n}} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z) \right] * \left[ \sum_{k=1}^M \sum_{V_k}^{C_k^k} \prod_{j \in S_{V_k}} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t) \right] \right\}}_A * F(Q_\Sigma^{ij}) \quad (7).$$

В формуле (7) выражение в фигурных скобках представляет собой результат перемножения двух многочленов, отмеченных горизонтальными скобками А и В. Каждый элемент результирующего многочлена умножается на функцию  $F(Q_\Sigma^{ij})$ .

Членами многочлена А являются вероятности наличия пластов в любом их количестве  $n$  ( $n = 1, \dots, N$ ) и в любом сочетании (число сочетаний равно  $C_n^n$ ). Эти вероятности рассчитываются путем перемножения вероятностей наличия пластов, составляющих конкретное сочетание, и вероятностей отсутствия пластов, не включенных в это сочетание (см. элемент А2 в многочлене А). Двойная сумма, выделенная скобкой А1, формирует структуру многочлена А и позволяет провести надлежащую индексацию его элементов. Первая сумма ( $\sum_{n=1}^N$ ) индексом « $n$ » регулирует число наличных пластов ( $n = 1, \dots, N$ ); вторая сумма ( $\sum_{V_n}^{C_n^n}$ ) индексом  $V_n$  регулирует число вариантов различных сочетаний наличных пластов при заданном их количестве  $n$  ( $V_n = 1, \dots, C_n^n$ ). Смысл индексов в выражении  $\prod_{i \in S_{V_n}} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z)$  состоит в следующем. Индекс  $i$  в первом сомножителе ( $\prod_{i \in S_{V_n}} P_{пл}^i$ ) не является одним числом, а представляет собой перечень номеров пластов, принятых в качестве наличных в каждом сочетании; этот перечень выбирается из набора  $S$  номеров наличных пластов, соответствующих номеру варианта  $V_n$  возможных сочетаний, т.е. из набора  $S_{V_n}$ . Индекс  $z$  во втором сомножителе ( $\prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z)$ ) представляет собой перечень номеров оставшихся пластов, что помечено символом  $z \neq i$ . Таким образом, результат перемножения вероятностей в выражении  $\prod_{i \in S_{V_n}} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z)$  составляет вероятность наличия только данного сочетания пластов.

Членами многочлена В являются вероятности наличия структур в любом их количестве

$k$  ( $k = 1, \dots, M$ ) и в любом сочетании (число сочетаний равно  $C_M^k$ ). Эти вероятности рассчитываются путем перемножения вероятностей наличия структур, составляющих конкретное сочетание, и вероятностей отсутствия структур, не включенных в это сочетание (см. элемент  $B_2$  в многочлене  $B$ ). Двойная сумма, выделенная скобкой  $B_1$ , формирует структуру многочлена  $B$  и позволяет провести надлежащую индексацию его элементов. Первая сумма ( $\sum_{k=1}^M$ ) индексом  $k$  регулирует число наличных структур ( $k = 1, \dots, M$ ); вторая сумма ( $\sum_{V_k}^{C_M^k}$ ) индексом  $V_k$  регулирует число вариантов различных сочетаний наличных структур при заданном их количестве  $k$  ( $V_k = 1, \dots, C_M^k$ ). Смысл индексов в выражении  $\prod_{j \in S_{V_k}} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t)$  состоит в следующем. Индекс  $j$  в первом сомножителе ( $\prod_{j \in S_{V_k}} P_c^j$ ) не является одним числом, а представляет собой перечень номеров структур, принятых в качестве наличных в каждом сочетании; этот перечень выбирается из набора  $S$  номеров наличных структур, соответствующих варианту  $V_k$  возможных сочетаний, т.е. из набора  $S_{V_k}$ . Индекс  $t$  во втором сомножителе ( $\prod_{t \neq j} (1 - P_c^t)$ ) также не является одним числом, а представляет собой перечень номеров оставшихся структур, что помечено символом  $t \neq j$ . Таким образом, результат перемножения вероятностей в выражении  $\prod_{j \in S_{V_k}} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t)$  составляет вероятность наличия только данного сочетания наличных структур.

Перемножение двух многочленов, выделенных в формуле (7) прямоугольными скобками  $A$  и  $B$ , приводит к многочлену, элементами которого являются вероятности вида  $\prod_{i \in S_n} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z) * \prod_{j \in S_k} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t)$ , определяющие вероятность наличия конкретного набора пластов, индексированного индексом  $i$ , и конкретного набора структур, индексированного индексом  $j$ .

Функция  $F(Q_\Sigma^{ij})$  в формуле (7) является вероятностной оценкой суммарных ресурсов ловушек, проиндексированных индексом  $i$  по номерам наличных пластов и индексом  $j$  по номерам наличных структур (см. табл. 1), рассчитанной с учетом *независимых* геологических рисков для ловушек, определяемых локальными вероятностями  $P_l^{ij}$ . Для вариантов сочетаний номеров наличных пластов (по индексу  $i$ ) и номеров наличных структур (по индексу  $j$ ), содержащих только по одной ловушке, функция  $F(Q_\Sigma^{ij})$  принимается равной вероятностной оценке ресурсов ловушки  $F(Q_{лов}^{ij})$ , откорректированной соответствующей локальной вероятностью  $P_l^{ij}$ :  $F(Q_\Sigma^{ij}) = F(Q_{лов}^{ij}) * P_l^{ij}$ .

При условии, принятом относительно индексов  $i$  и  $j$ , которое состоит в том, что эти индексы представляют собой не отдельные числа, а наборы номеров пластов и структур, формулу (7) можно переписать в следующем виде:

$$F'(Q_{\Sigma}) = \sum_i \sum_j \prod_{i \in S_n} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z) * \prod_{j \in S_k} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t) * F(Q_{\Sigma}^{ij}) \quad (8).$$

Из формулы (8) следует, что функция  $F'(Q_{\Sigma})$  получается путем арифметического суммирования по оси ординат функций  $F(Q_{\Sigma}^{ij})$ , откорректированных обобщенными вероятностями наличия соответствующих сочетаний пластов и структур.

Формулы (7) и (8) идентичны. Структура формулы (7) позволяет осуществить алгоритмический расчет функции  $F'(Q_{\Sigma})$ . Структура формулы (8) облегчает интерпретацию учета зависимости геологических рисков локальных объектов (ловушек) при суммировании вероятностных оценок их ресурсов.

Математическое выражение для компоненты  $P_0$ :

$$P_0 = \prod_{r=1}^N (1 - P_{пл}^r) + \underbrace{[\sum_{n=1}^N \sum_{V_n}^{C_n^N} \prod_{i \in S_n} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z)]}_{A} * \prod_{b=1}^M (1 - P_c^b) +$$

$$+ \underbrace{[\sum_{n=1}^N \sum_{V_n}^{C_n^N} \prod_{i \in S_n} P_{пл}^i * \prod_{z \neq i} (1 - P_{пл}^z)]}_{A} * \underbrace{[\sum_{k=1}^M \sum_{V_k}^{C_k^M} \prod_{j \in S_k} P_c^j * \prod_{t \neq j} (1 - P_c^t)]}_{B} * \prod_{ij} (1 - P_{л}^{ij}) \quad (9).$$

Формула (9) состоит из трех слагаемых. Первое слагаемое ( $\prod_{r=1}^N (1 - P_{пл}^r)$ ) представляет собой вероятность отсутствия всех пластов на оцениваемом участке. Второе слагаемое состоит из двух сомножителей. Смысл сомножителя, выделенного скобкой А, объяснен выше: это многочлен, элементами которого являются вероятности наличия на участке определенного сочетания пластов. Сумма элементов этого многочлена представляет собой вероятность наличия на участке одного или большего числа пластов. Второй сомножитель второго слагаемого ( $\prod_{b=1}^M (1 - P_c^b)$ ) – это вероятность отсутствия на участке всех структур. Третье слагаемое состоит из трех сомножителей. Смысл сомножителей, выделенных скобками А и В, объяснен выше. Произведение многочленов А и В образует многочлен, элементами которого являются вероятности наличия на участке определенного сочетания пластов и структур. Третий сомножитель третьего слагаемого ( $\prod_{ij} (1 - P_{л}^{ij})$ ) представляет собой вероятность отсутствия локальных признаков в ловушках  $ij$ , для которых наличными являются пласты (по индексу  $i$ ) и структуры (по индексу  $j$ ). Таким образом, формула (9) в интерпретационном смысле отражает вероятностную характеристику ситуаций, которые определяют отсутствие залежей на участке. Такими ситуациями являются: либо отсутствие всех пластов (первое слагаемое), либо при наличии любого сочетания пластов отсутствие всех структур (второе слагаемое), либо при наличии любого сочетания пластов и структур отсутствие локальных признаков в соответствующих им ловушках (третье слагаемое).

Формула (9) для вероятности отсутствия залежей на участке совпадает с аналогичной формулой в статье [Шатров, 2015]. В данной работе эта формула представлена в виде,

облегчающем ее смысловую интерпретацию.

### Математическое ожидание вероятностной оценки суммарных ресурсов $F(Q_\Sigma)$

Вероятностная оценка суммарных ресурсов  $F(Q_\Sigma)$  (формула 6) характеризуется математическим ожиданием  $m_{Q_\Sigma}$ .

Для математического ожидания  $m_{Q_\Sigma}$  получена формула:

$$m_{Q_\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij}) * m_{Q_{\text{лов}}}^{ij} \quad (10),$$

где индекс  $i$  соответствует номеру пласта ( $i = 1, \dots, N$ ), индекс  $j$  соответствует номеру структуры ( $j = 1, \dots, M$ ); двойной индекс  $ij$  соответствует номеру ловушки, расположенной в  $i$ -ом пласте и  $j$ -ой структуре; произведение вероятностей  $(P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij})$  представляет вероятность успеха  $ij$  ловушки  $P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij} = (P_{\text{пл}}^i * P_c^j * P_l^{ij}) = \text{const}$ ;  $m_{Q_{\text{лов}}}^{ij}$  – математическое ожидание вероятностной оценки ресурсов  $ij$ -ой ловушки.

Формулу (10) можно переписать в следующем виде:

$$m_{Q_\Sigma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{\text{усп}}^{\text{лов},ij} * m_{Q_{\text{лов}}}^{ij} \quad (11).$$

Формула (11) совпадает с выражением для математического ожидания вероятностной оценки суммарных ресурсов, полученной путем суммирования вероятностных оценок ресурсов ловушек с учетом *независимых* геологических рисков [Емельянова, Порожун, 2019]. Отсюда следует, что учет зависимости геологических рисков ловушек при суммировании вероятностных оценок их ресурсов *не влияет* на величину математического ожидания вероятностной оценки суммарных ресурсов.

### ***Интерпретация вероятностной оценки суммарных ресурсов нефти и газа участка***

Из записи формулы (6) следует, что вероятностная оценка суммарных ресурсов нефти и газа для участка  $F(Q_\Sigma)$  является функцией дискретно – непрерывного типа с разрывом непрерывности при значении  $Q_\Sigma = 0$ .

Дискретная составляющая функции  $F(Q_\Sigma)$  представлена вероятностью  $P_0$  (9). Вероятность  $P_0$  можно интерпретировать как вероятность неудачи для участка  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$  (отсутствие на участке промышленных залежей), что позволяет принять  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}} = P_0$ . Вероятность события, противоположного событию неудачи для участка и определяемого как наличие на участке хотя бы одной промышленной залежи, назовем вероятностью успеха для участка  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$ . Вероятность  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  определяется соотношением  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}} = 1 - P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$ . Таким образом, совокупность вероятностей  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$  можно интерпретировать как вероятностную характеристику *геологического риска для участка*. Вероятности  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$  удовлетворяют условию  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}} + P_{\text{неуд}}^{\text{уч}} = 1$ .

Непрерывная составляющая, представленная функцией  $F'(Q_\Sigma)$  (7), интерпретируется как

вероятностная оценка ресурсов участка в случае его успеха при рассмотрении всех возможных результатов ГРП, включая ситуацию неудачи для участка. В англоязычной литературе такая вероятностная оценка ресурсов называется оценкой с учетом риска (risked estimate). Функция  $F'(Q_{\Sigma})$  пересекает ось ординат при значении интегральной вероятности, которая соответствует вероятности успеха для участка  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$ .

При оценке экономической ценности участка бывает целесообразно рассматривать раздельно два характеризующих участок показателя:

- вероятностную оценку ресурсов участка в предположении его продуктивности;
- геологический риск для участка, определяющий с вероятностью  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$  возможность отсутствия на участке промышленных залежей.

Для получения вероятностной оценки ресурсов участка в предположении его продуктивности (т.е. без учета геологического риска для участка) необходимо перевести вероятностную оценку ресурсов участка с учетом геологического риска  $F'(Q_{\Sigma})$  в вероятностную оценку ресурсов участка без учета геологического риска (обозначим ее  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$ ). Эта операция осуществляется путем нормирования функции  $F'(Q_{\Sigma})$  вероятностью успеха  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  по формуле:

$$F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}} = F'(Q_{\Sigma}) / P_{\text{усп}}^{\text{уч}} \quad (12).$$

Математическое ожидание функции  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$   $m_{Q_{\Sigma}\text{норм}}$  вычисляется по формуле:

$$m_{Q_{\Sigma}\text{норм}} = (m_{Q_{\Sigma}} / P_{\text{усп}}^{\text{уч}}).$$

Соотношение функций  $F'(Q_{\Sigma})$  и  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$  продемонстрируем на условном примере. Возможность выбора условного (а не реального, что не разрешено в открытой печати) примера объясняется тем, что целью анализа функций  $F'(Q_{\Sigma})$  и  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$  являлась оценка корректности решения поставленной задачи математическими методами, а не практическое их использование при управлении ГРП на исследуемой территории.

В качестве примера принята геологическая модель участка, состоящая из двух пластов ( $N = 2$ ) и трех структур ( $M=3$ ); вероятностные характеристики геологической модели:

$$P_{\text{пл}}^1 = 0,9; P_{\text{пл}}^2 = 0,8; P_{\text{с}}^1 = 0,6; P_{\text{с}}^2 = 0,7; P_{\text{с}}^3 = 0,6; P_{\text{л}}^{11} = 0,5; P_{\text{л}}^{12} = 0,5; P_{\text{л}}^{13} = 0,5; P_{\text{л}}^{21} = 0,4; P_{\text{л}}^{22} = 0,4; P_{\text{л}}^{23} = 0,4.$$

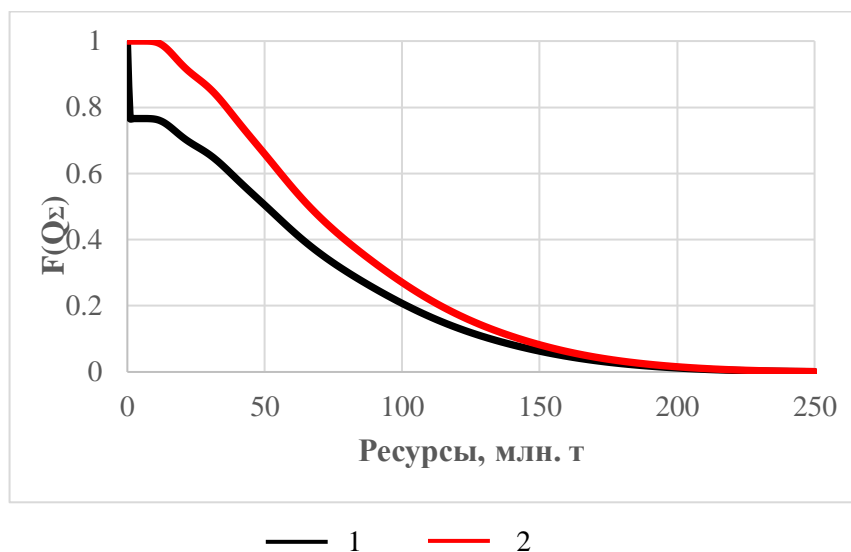
Функции  $F(Q_{\text{лов}}^{ij})$  приняты логнормальными с параметрами: математическим ожиданием  $m_{Q_{\text{лов}}}^{ij}$  и дисперсией  $\sigma_{Q_{\text{лов}}}^{2,ij}$ .

$$F(Q_{\text{лов}}^{11}) = F(Q_{\text{лов}}^{21}) = F(20,40); F(Q_{\text{лов}}^{12}) = F(Q_{\text{лов}}^{22}) = F(40,80); F(Q_{\text{лов}}^{13}) = F(Q_{\text{лов}}^{23}) = F(60,120).$$

Графики расчетных функций  $F(Q_{\Sigma})$  и  $F(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$  приведены на рис. 2.

Характерные особенности двух типов вероятностных оценок ресурсов участка (с учетом и без учета геологического риска для участка) определяют специфику их практического применения.

Вероятностная оценка ресурсов участка *с учетом геологического риска для участка*, представленная функцией  $F(Q_{\Sigma})$  (6), (см. рис. 2), позволяет воспроизвести полную вероятностную картину объемов углеводородов на участке (включая значения  $Q_{\Sigma} = 0$ ) при проведении на нем ГРП.



**Рис. 2. Графики вероятностной оценки ресурсов участка**

1 – с учетом геологического риска для участка ( $F(Q_{\Sigma})$ ), 2 – без учета геологического риска для участка ( $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$ ).

Вероятностная оценка ресурсов участка *без учета геологического риска для участка*, представленная функцией  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$  (12), позволяет проводить оценивание геолого-экономической перспективности участка по двум критериям:

- а) величине прогнозных ресурсов участка в случае его продуктивности, представленной вероятностной оценкой ресурсов  $F'(Q_{\Sigma})_{\text{норм}}$  (12);
- б) величине геологического риска для участка, представленного вероятностями успеха и неудачи  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$ .

### Метод Монте-Карло

Использование метода Монте-Карло для получения вероятностной оценки суммарных ресурсов нефти и газа участка с учетом зависимости геологических рисков агрегируемых ловушек предлагается проводить путем стохастического моделирования следующей аналитической функции:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N A_{\text{пл}}^i * [\sum_{j=1}^M B_c^j * C_{\text{л}}^{ij} * Q_{\text{лов}}^{ij}] \quad (13),$$

где  $A_{пл}^i$ ,  $B_c^j$ ,  $C_l^{ij}$  – индикаторные случайные величины, характеризующие соответственно пласты, структуры и ловушки участка; функции распределения вероятностей для индикаторных случайных величин запишем в виде:

$$A_{пл}^i = \begin{cases} 1 \text{ с вероятностью } P_{пл}^i \\ 0 \text{ с вероятностью } (1 - P_{пл}^i) \end{cases} \quad B_c^j = \begin{cases} 1 \text{ с вероятностью } P_c^j \\ 0 \text{ с вероятностью } (1 - P_c^j) \end{cases}$$
$$B_l^{ij} = \begin{cases} 1 \text{ с вероятностью } P_l^{ij} \\ 0 \text{ с вероятностью } (1 - P_l^{ij}). \end{cases}$$

Смысл вероятностей  $\{P_{пл}^i, (1 - P_{пл}^i)\}$ ,  $\{P_c^j, (1 - P_c^j)\}$ ,  $\{P_l^{ij}, (1 - P_l^{ij})\}$  совпадает с принятым в аналитическом методе.

$Q_{лов}^{ij}$  – случайная величина, функция распределения которой соответствует вероятностной оценке ресурсов  $ij$ -ой ловушки  $F(Q_{лов}^{ij})$ .

Работа метода Монте-Карло осуществляется итерационно. На каждой итерации моделируется по одному значению для всех случайных величин, входящих в формулу (13), в соответствии с их функциями распределения. Производится вычисление одного значения ресурсов  $Q_{\Sigma}$ . Результатом проведения большого числа итераций является получение совокупности значений ресурсов  $Q_{\Sigma}$ , статистическая обработка которой направлена на получение функции распределения  $F(Q_{\Sigma})$  и определение ее параметров.

При стохастическом моделировании формулы (13) является *обязательным фиксирование на каждой итерации смоделированных значений индикаторных случайных величин*  $A_{пл}^i$  и  $B_c^j$  (0 или 1). Это условие должно быть обеспечено соответствующим способом программирования метода Монте-Карло. Если программирование осуществляется в Microsoft Excel с использованием функции СЛЧИС для генерации равномерно распределенных случайных чисел на интервале  $[0,1]$ , следует принять меры предосторожности, так как особенностью функции СЛЧИС является тот факт, что при каждом ее применении производится пересчет уже полученных случайных чисел. Проверка возможности использования программы Crystal Ball для реализации варианта метода Монте-Карло в виде функции (13) не дала положительных результатов.

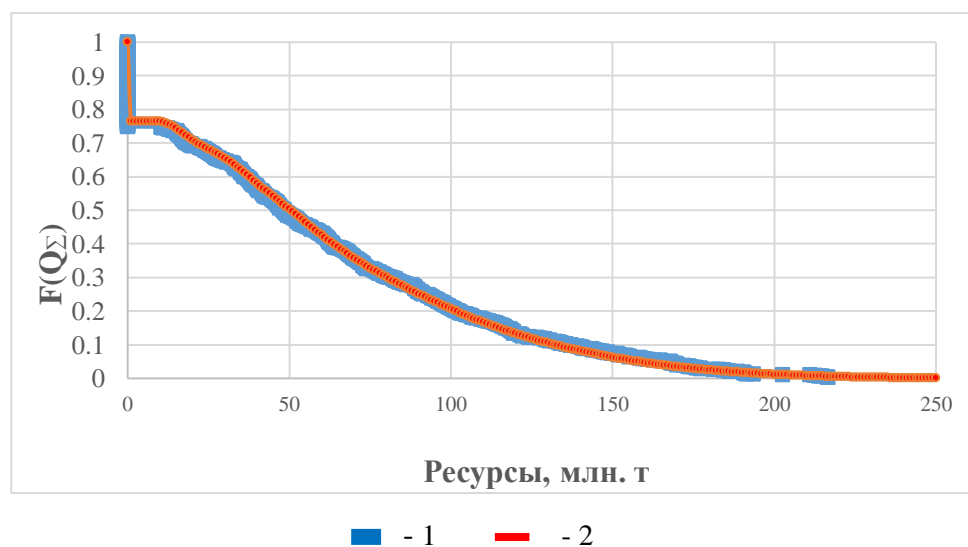
### Сопоставление методов

Проверку математической корректности методов – аналитического, представленного уравнениями (6) ÷ (9), и Монте Карло, представленного уравнением (13), – проведем, сравнив результаты их применения для получения вероятностных оценок ресурсов участка недр на условном примере. В качестве примера выбрана геологическая модель участка с



вероятностными параметрами, описанными выше.

Вероятностные оценки суммарных ресурсов участка в виде функций распределения  $F(Q_{\Sigma})$ , полученные аналитическим методом и методом Монте-Карло, показаны на рис. 3. Расчетные параметры этих оценок – математическое ожидание  $m_{Q_{\Sigma}}$ , вероятность успеха для участка (вероятность наличия на участке хотя бы одной промышленной залежи)  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$ , вероятность неудачи для участка (вероятность отсутствия на участке промышленных залежей)  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$  приведены в табл. 2. В табл. 2 также приведены значения этих параметров, рассчитанные для функции  $F(Q_{\Sigma})$ , полученной без учета зависимости геологических рисков ловушек.



**Рис. 3. Вероятностные оценки ресурсов участка, полученные разными методами**

1 - функция  $F(Q_{\Sigma})$ , полученная методом Монте-Карло; 2 - функция  $F(Q_{\Sigma})$ , полученная аналитическим методом.

Таблица 2

**Параметры функции  $F(Q_{\Sigma})$ , полученной разными методами**

	$m_{Q_{\Sigma}}$	$P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$	$P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$
Аналитический метод	58,5167	0,765875	0,234
Метод Монте-Карло	58,4848	0,7497	0,25
Без учета зависимости геологических рисков	58,52	0,815	0,185

Сопоставление результатов применения предложенных в статье методов суммирования вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (ловушек) с учетом зависимости их геологических рисков показало полную их идентичность. Это позволяет сделать вывод о математической корректности методов и о возможности применения любого из них при решении соответствующих прикладных задач.

### Геологические условия применения методов

Особенностью методов, предложенных для получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа для участка, является их базирование на учете взаимной зависимости геологических рисков агрегируемых локальных объектов (ловушек). В статье принято, что эта зависимость обусловлена наличием на оцениваемом участке единых геологических факторов, контролирующих процесс образования на нем залежей нефти и газа. Такие участки обладают специфичностью, выраженной в «однородности» их геологического строения. В зарубежной практике геологоразведки такие участки названы «плеями», которым дано следующее определение [Роуз, 2011]: «плей представляет собой географически и стратиграфически ограниченную область, характеризующуюся наличием общих геологических факторов, необходимых для образования однотипных скоплений нефти и газа».

Адекватное применение рассмотренных математических методов сопряжено с необходимостью выполнения соответствия: тип оцениваемого участка по критерию однородности его геологического строения – математический метод оценивания ресурсов участка. Если целевой участок не удовлетворяет этому условию, его следует разделить на «типовые» (в смысле указанного соответствия) зоны, проводить вероятностное оценивание ресурсов выделенных зон и суммировать полученные для зон результаты.

### Заключение

Рассмотрены методы суммирования вероятностных оценок ресурсов локальных объектов (ловушек) с учетом взаимной зависимости их геологических рисков, составляющие основу методологии получения вероятностной оценки ресурсов нефти и газа для участка недр. Формализация зависимости геологических рисков агрегируемых ловушек производилась путем разделения и вероятностного описания геологических факторов, приводящих к формированию залежей нефти и газа, на общие, свойственные для всех ловушек участка, и локальные, действующие в пределах отдельных локальных объектов.

Предложены и проанализированы два метода: а) аналитический метод; б) метод Монте-Карло. Аналитический метод целиком базируется на математическом подходе и завершается получением математических формул, алгоритмизация которых позволит провести процедуру подсчета оценок ресурсов на ЭВМ. Для метода Монте-Карло предложена аналитическая формула, стохастическое моделирование по которой приводит к результату, тождественному полученному аналитическим методом.

Вероятностная оценка суммарных ресурсов участка по типу описывающей ее функции  $F(Q_{\Sigma})$  идентична вероятностной оценке ресурсов локального объекта (ловушки) с учетом его геологического риска [Емельянова, Пороскун, 2010]. Это позволяет ввести для вероятностной

оценки суммарных ресурсов участка показатель геологического риска, определяемый вероятностями успеха и неудачи для участка -  $P_{\text{усп}}^{\text{уч}}$  и  $P_{\text{неуд}}^{\text{уч}}$ , и рассматривать два типа вероятностной оценки ресурсов участка:

- а) с учетом геологического риска для участка;
- б) без учета геологического риска для участка.

Приведен способ пересчета вероятностной оценки ресурсов участка при учете геологического риска для участка в вероятностную оценку ресурсов участка без учета геологического риска для участка.

Вероятностная оценка ресурсов участка без учета геологического риска для участка позволяет проводить оценивание геолого-экономической перспективности участка по двум критериям:

- а) величине прогнозных ресурсов участка в случае его продуктивности;
- б) величине геологического риска для участка, представленного вероятностями успеха и неудачи для участка.

Определены геологические условия практического применения предложенных методов.

### Литература

*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.

*Пороскун В.И., Стернин М.Ю., Шепелев Г.И.* Вероятностная оценка запасов на начальных стадиях изучения залежей нефти и газа // Геология нефти и газа. - 1999. - №5-6. - С. 59-63.

*Роуз П.Р.* Анализ рисков и управление нефтегазопроисковыми проектами. - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2011. - 301 с.

*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](http://www.ngtp.ru/rub/11/13_2015.pdf). DOI: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/13\\_2015](https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2015)

The CCOP guidelines for risk assessment of petroleum prospects: Bangkok, Thailand, Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programme in East and Southeast Asia, 2000, 35 p.

**Emelyanova N.M., Poroskun V.I.**

FGBU "VNIGNI", Moscow, Russia, poroskun@list.ru

## **PROBABILISTIC OIL AND GAS RESOURCE ASSESSMENT FOR SUBSURFACE AREAS TAKING INTO ACCOUNT THE DEPENDENCE OF GEOLOGICAL RISKS OF AGGREGATED LOCAL OBJECTS BY AREA AND SECTION**

*The article discusses the methods for obtaining a probabilistic estimate of oil and gas resources for subsurface areas based on summing up probabilistic estimation of local objects (traps) resources, taking into account the dependence of their geological risks. The formalization of the dependence of geological risks of traps was carried out by separating and probabilistic description of the geological factors, leading to the formation of oil and gas deposits, into common areas for all traps and local ones that operate within individual local objects. Two methods are proposed and analyzed: analytical method and Monte Carlo method. The identity of the results of both methods is confirmed by the given conditional example.*

*The statistical interpretation of the probabilistic assessment of the site resources is given which allowed us to introduce the concept of "geological risk" for the site and thus to determine two types of resource estimates – taking into account the geological risk, and excluding geological risk. The geological conditions for the practical application of the proposed methods are defined.*

**Keywords:** *probabilistic oil and gas resource estimates; dependence of geological risks of local objects; summation of probabilistic estimates of resources of local objects, taking into account their 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.

Poroskun V.I. Sternin M.Yu., Shepelev G.I. *Veroyatnostnaya otsenka zapasov na nachal'nykh stadiyakh izucheniya zalezhey nefi i gaza* [Probabilistic estimation of reserves in the early stages of exploring oil and gas deposits]. *Geologiya nefi i gaza*, 1999, no. 5-6, pp. 59-63.

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

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](http://www.ngtp.ru/rub/11/13_2015.pdf). DOI: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/13\\_2015](https://doi.org/10.17353/2070-5379/13_2015)

The CCOP guidelines for risk assessment of petroleum prospects: Bangkok, Thailand, Coordinating Committee for Coastal and Offshore Geoscience Programme in East and Southeast Asia, 2000, 35 p.

© Емельянова Н.М., Пороскун В.И., 2021

