

DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/12_2019

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@list.ru, poroskun@list.ru

СУММИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ОЦЕНОК ЧИСТОГО ДИСКОНТИРОВАННОГО ДОХОДА ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С УЧЕТОМ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА

Рассмотрены методы суммирования вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода локальных объектов (подготовленных к бурению ловушек) с учетом геологического риска, связанного с этими объектами: метод Монте-Карло и аналитический метод, предложенный авторами. Задача решена для условий: а) различных вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода ловушек; б) различных величин рискованного капитала для разных ловушек; в) различных вероятностных показателей геологического риска ловушек. Показано, что вероятностные оценки суммарных величин чистого дисконтированного дохода, полученные рассматриваемыми методами, совпадают. Проанализированы характерные особенности этих оценок и определены условия их практического применения.

Ключевые слова: локальные объекты (подготовленные к бурению ловушки), вероятностные оценки чистого дисконтированного дохода ловушек, суммирование вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода ловушек, учет геологического риска.

Суммирование оценок геолого-экономических показателей локальных объектов (подготовленных к поисковому бурению ловушек) – необходимая операция при решении ряда задач геологоразведки нефти и газа на поисково-оценочном этапе. Потребность в получении интегральных (суммарных) значений геолого-экономических показателей ловушек возникает при оценке перспективности различных целевых территорий в пределах административных, условных или иных границ, степень изученности которых соответствует выделению в них подготовленных ловушек, характеризующихся возможностью открытия при их бурении залежей нефти и газа. Процедура суммирования оценок используется в компаниях при проектировании и оптимизации программы по бурению (при формировании портфеля ловушек).

В качестве геолого-экономических показателей для этого используются:

- величина ресурсов ловушки категории $D_0(C_3)$ – величина запасов залежи при условии ее наличия в ловушке;
- величина чистого дисконтированного дохода (ЧДД) ловушки, под которым понимается доход от реализации продукции в случае открытия в ловушке залежи.

Оценки геолого-экономических показателей для поисковых объектов представляют собой прогнозные величины, получаемые в условиях существенного дефицита необходимой для их определения информации. Недостаток исходной информации приводит к неопределенности геологического, технологического и экономического моделирования и, как следствие, к неопределенности прогнозных оценок целевых показателей. В таких условиях возможность повышения качества и объективности принятия решений состоит в переходе от детерминированных оценок целевых показателей к вероятностным оценкам и разработке методов проведения с ними необходимых аналитических операций по правилам теории вероятностей (в том числе и процедуры суммирования).

Задача суммирования вероятностных оценок ресурсов нефти и газа локальных объектов рассмотрена в публикации авторов [Емельянова, Пороскун, 2019]. В данной статье рассматриваются методы суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек.

Вероятностная оценка чистого дисконтированного дохода ловушки

Вероятностная оценка ЧДД ловушки представляет собой результат учета двух факторов, обуславливающих ее неопределенность: а) неточность геолого-экономической модели ловушки, по которой определяется оценка ее ЧДД, и б) вероятностный характер условий наличия в ловушке промышленной залежи [Емельянова, Пороскун, 2016].

Учет первого фактора формализуется путем задания функций распределения вероятностей для величины ЧДД - функции плотности вероятностей $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}})$ и интегральной функции распределения $F(\text{ЧДД}_{\text{лов}})$:

$$f(\text{ЧДД}_{\text{лов}}) = f(m_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}, \sigma_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}^2) \text{ и } F(\text{ЧДД}_{\text{лов}}) = F(m_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}, \sigma_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}^2),$$

где $m_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}$ и $\sigma_{\text{ЧДД}_{\text{лов}}}^2$ - соответственно математическое ожидание и дисперсия вероятностной оценки ЧДД ловушки.

Учет второго фактора формализуется путем введения понятия «геологический риск ловушки», под которым будем понимать дискретную функцию, представленную вероятностями двух возможных состояний ловушки – наличия в ней промышленной залежи (успех ловушки) ($P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$) и отсутствия в ней промышленной залежи (неудача ловушки) ($P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$):

$$\text{«геологический риск ловушки»} \rightarrow (P_{\text{усп}}^{\text{лов}}, P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}) \quad (1).$$

На вероятности $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ наложено условие ($P_{\text{усп}}^{\text{лов}} + P_{\text{неуд}}^{\text{лов}} = 1$).

Условия решения задачи

Задача суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек решается при следующих условиях:

1. Задано число ловушек $N_{\text{лов}}$, оценки ЧДД для которых подлежат суммированию.

2. Заданы величины рискового капитала для ловушек в случае отсутствия в них промышленных залежей $K_{\text{риск}}^{\text{лов}i}$ ($i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$).

3. Суммируемые вероятностные оценки ЧДД ловушек различны, то есть характеризуются различными функциями распределения вероятностей $f(\text{ЧДД}_{\text{лов},i})$ и $F(\text{ЧДД}_{\text{лов},i})$ ($i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$).

4. Геологический риск для ловушек, представленный вероятностями ($P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$, $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$), различен для разных ловушек.

5. Отсутствует статистическая зависимость между суммируемыми вероятностными оценками.

Рассматриваются два варианта суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек:

а) суммирование вероятностных оценок ЧДД ловушек без учета геологического риска ловушек;

б) суммирование вероятностных оценок ЧДД ловушек с учетом геологического риска ловушек.

Суммирование вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода ловушек без учета геологического риска

Вероятностную оценку суммарной величины ЧДД (ЧДД_{Σ}) представим функциями распределения вероятностей - функцией плотности вероятностей $f(\text{ЧДД}_{\Sigma}) = f(m_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}, \sigma_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}^2)$ и кумулятивной функцией распределения $F(\text{ЧДД}_{\Sigma}) = F(m_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}, \sigma_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}^2)$, где $m_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}$ и $\sigma_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}^2$ - соответственно математическое ожидание и дисперсия вероятностной оценки суммарной величины ЧДД.

Суммирование вероятностных оценок ЧДД ловушек без учета геологического риска производится по правилам суммирования случайных величин. Вид и параметры функций распределения $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ определяются видом и параметрами функций распределения вероятностных оценок ЧДД ловушек - $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ и $F(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$, $i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$.

При принятии для функций $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ и $F(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ стандартного закона распределения (логнормального, нормального и пр.) функции $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ будут логнормальными или стремящимися к нормальному распределению при увеличении числа суммируемых оценок. При отсутствии статистической зависимости между суммируемыми вероятностными оценками математическое ожидание и дисперсия вероятностной оценки суммарной величины ЧДД, в соответствии с теоремой сложения математических ожиданий и дисперсий, определяются по формулам:

$$m_{\text{ЧДД}_{\Sigma}} = \sum_i m_{\text{ЧДД}_{\text{лов}i}}, \quad \sigma_{\text{ЧДД}_{\Sigma}}^2 = \sum_i \sigma_{\text{ЧДД}_{\text{лов}i}}^2, \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}} \quad (2).$$

Если функции распределения $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ и $F(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ не поддаются описанию стандартными законами, вероятностная оценка суммарной величины ЧДД в виде функций $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ может быть получена методом Монте-Карло. В этом случае параметры функций $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})$ получаются статистически.

Ниже приведен пример суммирования вероятностных оценок ЧДД для трех ловушек, исходные данные для которых содержатся в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные агрегируемых объектов

| Номер объекта | Вероятностные оценки ЧДД | Параметры вероятностных оценок ЧДД ловушек | | Параметры вероятностной оценки суммарной величины ЧДД | |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| | | $m_{\text{ЧДДлов}}$, млн. руб. | $\sigma_{\text{ЧДДлов}}$, млн. руб. | $m_{\text{ЧДД}\Sigma}$, млн. руб. | $\sigma_{\text{ЧДД}\Sigma}$, млн. руб. |
| 1 | $f(\text{ЧДД}_{\text{лов},1})$, $F(\text{ЧДД}_{\text{лов},1})$ | 150 | 65 | 1250 | 320 |
| 2 | $f(\text{ЧДД}_{\text{лов},2})$, $F(\text{ЧДД}_{\text{лов},2})$ | 720 | 275 | | |
| 3 | $f(\text{ЧДД}_{\text{лов},3})$, $F(\text{ЧДД}_{\text{лов},3})$ | 380 | 150 | | |

На рис. 1 представлены функции распределения вероятностной оценки суммарной величины ЧДД для рассматриваемого примера.

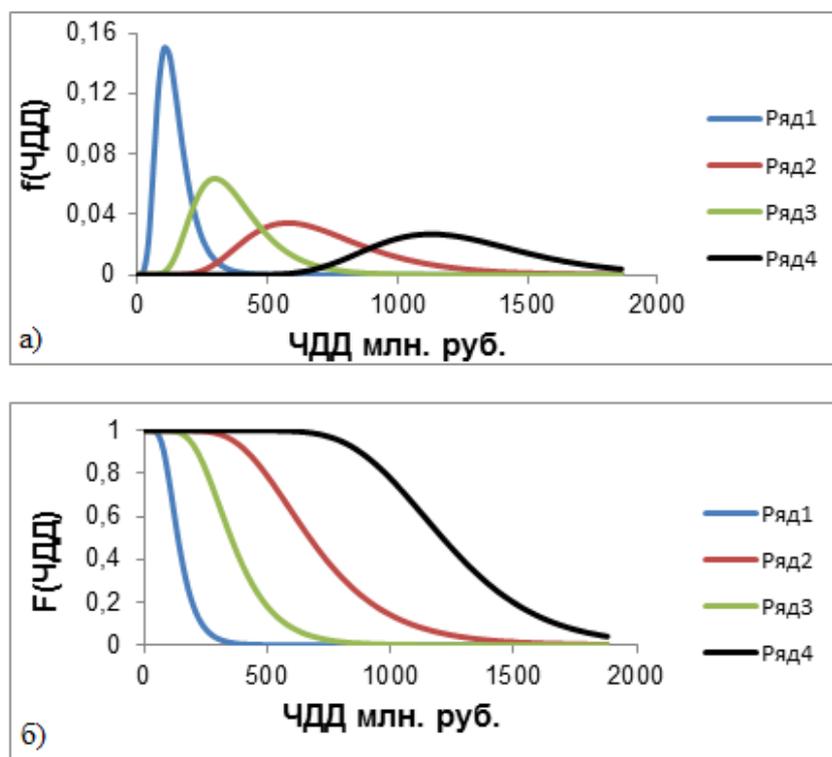


Рис. 1. Функции распределения вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода агрегируемых ловушек и их суммарной величины

Ряд 1 – вероятностная оценка ЧДД ловушки 1; Ряд 2 – вероятностная оценка ЧДД ловушки 2; Ряд 3 – вероятностная оценка ЧДД ловушки 3; Ряд 4 – вероятностная оценка суммарной величины ЧДД.

В качестве точечной вероятностной оценки суммарной величины ЧДД следует принять математическое ожидание $m_{\text{ЧДД}\Sigma}$ функций распределения $f(\text{ЧДД}\Sigma)$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)$. По кумулятивной функции распределения $F(\text{ЧДД}\Sigma)$ определяются 90%, 50%, 10%-ные квантили вероятностной оценки суммарной величины ЧДД.

Суммирование вероятностных оценок чистого дисконтированного дохода ловушек с учетом геологического риска

Суммирование вероятностных оценок ЧДД ловушек с учетом геологического риска приводит к получению вероятностной оценки суммарной величины ЧДД, характеризующейся функциями распределения вероятностей $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}} = f(m_{\text{ЧДД}\Sigma\text{риск}}, \sigma_{\text{ЧДД}\Sigma\text{риск}}^2)$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}} = F(m_{\text{ЧДД}\Sigma\text{риск}}, \sigma_{\text{ЧДД}\Sigma\text{риск}}^2)$.

Задачу суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек с учетом геологического риска будем решать двумя методами:

- методом стохастического моделирования Монте-Карло;
- аналитическим методом, предлагаемым авторами.

Метод Монте-Карло

Схема метода Монте-Карло представлена на рис. 2.

Работа метода Монте-Карло (в компьютерной реализации) проводится в циклическом режиме. На каждом j -ом цикле для каждой i -ой ловушки с учетом вероятностей $P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}$ моделируется условие наличия или отсутствия в ловушке залежи. В соответствии со статусом ловушек, определенным таким образом, производится оценка их ЧДД: для ловушек, идентифицированных как непродуктивные, то есть не содержащие залежи, принимается $\text{ЧДД}_{\text{лов}} = -K_{\text{риск}}^{\text{лов}}$; для ловушек, идентифицированных как продуктивные, то есть содержащие залежи, величина ЧДД определяется в соответствии с функцией распределения $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}})$, характеризующей конкретную ловушку. Величины ЧДД, смоделированные для всех ловушек, суммируются арифметически и получается одна реализация суммарной величины ЧДД - $\text{ЧДД}_{\Sigma j}$. По окончании циклического процесса формируется совокупность значений $\{\text{ЧДД}_{\Sigma j}\}$ ($j = 1, \dots$, число циклов), статистическая обработка которой направлена на получение функций $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$.

Схема содержит два датчика случайных чисел. Один датчик случайных чисел с равномерным законом распределения вероятностей в диапазоне $(0 \div 1)$ используется для моделирования случайного события, характеризующегося вероятностями $P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}$ (для моделирования геологического риска ловушки). Второй датчик случайных чисел с законом распределения вероятностей $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ используется для моделирования величины

ЧДД_{ловi} в i-ой ловушке (при условии наличия в ней залежи).

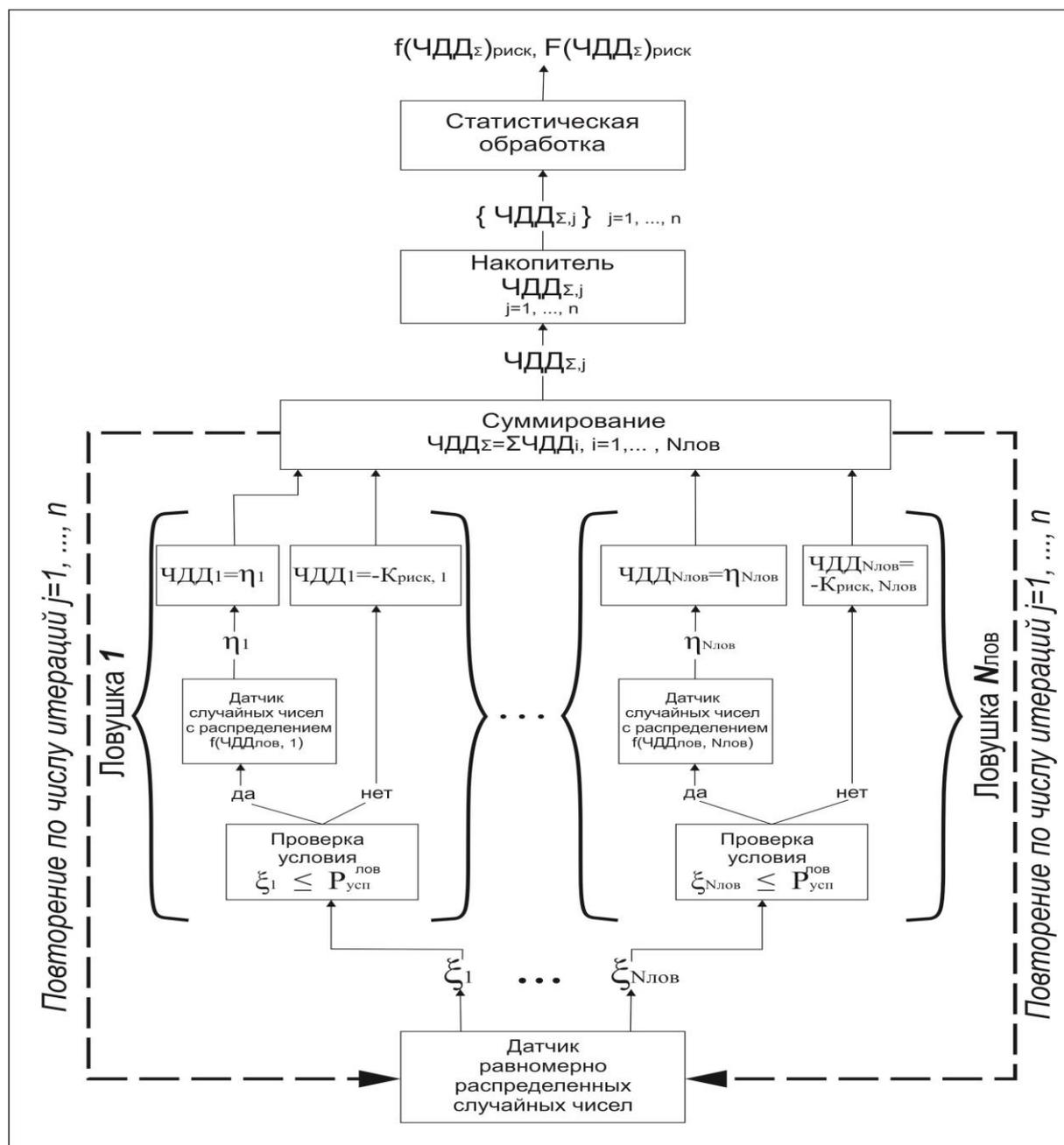


Рис. 2. Схема метода Монте-Карло

Работа метода Монте-Карло сводится к следующей последовательности вычислительных процедур.

На j -ой итерации для каждой ловушки моделируется случайная величина ξ_i с равномерным законом распределения в диапазоне $(0 \div 1)$. Если полученное значение ξ_i окажется меньше вероятности $P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ ($\xi_i < P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$), ловушка считается продуктивной, и оценка ее ЧДД участвует в процессе суммирования. Величина ЧДД для этой ловушки ($\text{ЧДД}_{\text{лов}i}$) моделируется в соответствии с функцией распределения $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$, для чего в датчике

случайных чисел с законом распределения $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ получается случайное число η_i , которое используется в качестве оценки $\text{ЧДД}_{\text{лов}i}$: $\text{ЧДД}_{\text{лов}i} = \eta_i$. Если значение ξ_i окажется больше вероятности $P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ ($\xi_i > P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$), ловушка считается пустой, и оценке $\text{ЧДД}_{\text{лов}i}$ присваивается значение $(-K_{\text{риск}i})$: $\text{ЧДД}_{\text{лов}i} = -K_{\text{риск}i}$. Все полученные значения ЧДД ловушек суммируются для одной реализации суммарной оценки ЧДД .

Аналитический метод

Задачу получения функций $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ сформулируем следующим образом. Требуется определить вероятностную оценку суммарной величины ЧДД ловушек в предположении, что для каждой ловушки существует ненулевая вероятность $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}$ того, что эта ловушка окажется пустой. В этом случае ЧДД ловушки определяется потерями, оцениваемыми величиной рискованного капитала $K_{\text{риск}i}$ ($\text{ЧДД}_{\text{лов}i} = -K_{\text{риск}i}$).

Аналитическое решение задачи сводится к формализации набора следующих возможных ситуаций:

- все ловушки окажутся пустыми; тогда суммарная оценка ЧДД , соответствующая этой ситуации, будет равна $\text{ЧДД}_{\Sigma} = \sum_i (-K_{\text{риск}i})$, $i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$;

- только одна (любая) из $N_{\text{лов}}$ ловушек будет содержать залежь; тогда суммарная оценка ЧДД ловушек будет равна:

$$\text{ЧДД}_{\Sigma, n} = \text{ЧДД}_{\text{лов}i} - \sum_j K_{\text{риск}j}; \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}}, \quad j = 1, \dots, N_{\text{лов}}; \quad j \neq i,$$

где n – номер комбинации оценок ЧДД успешной и неудачных ловушек; число таких комбинаций равно числу сочетаний из $N_{\text{лов}}$ элементов по одному элементу – $C_{N_{\text{лов}}}^1$, то есть $n = 1, \dots, C_{N_{\text{лов}}}^1$;

- только две любые из $N_{\text{лов}}$ ловушек будут содержать залежь; тогда суммарная оценка ЧДД ловушек будет равна:

$$\text{ЧДД}_{\Sigma, n} = \text{ЧДД}_{\text{лов}i} + \text{ЧДД}_{\text{лов}t} - \sum_j K_{\text{риск}j}, \quad i, t = 1, \dots, N_{\text{лов}}, \quad i \neq t; \quad j \neq i, t;$$

число комбинаций по две оценки ЧДД для успешных ловушек разных индексов определяется числом сочетаний из $N_{\text{лов}}$ элементов по два элемента – $C_{N_{\text{лов}}}^2$, то есть $n = 1, \dots, C_{N_{\text{лов}}}^2$; и т.д.

- все $N_{\text{лов}}$ ловушек будут содержать залежь; тогда суммарная оценка ЧДД ловушек будет равна

$$\text{ЧДД}_{\Sigma, n} = \sum_i \text{ЧДД}_{\text{лов}i}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}},$$

число таких комбинаций определяется числом сочетаний из $N_{\text{лов}}$ элементов по $N_{\text{лов}}$ элементам – $C_{N_{\text{лов}}}^{N_{\text{лов}}} = 1$, то есть $n = 1$.

Каждой комбинации оценок ЧДД в перечисленных ситуациях соответствует вероятность осуществления P_{nm} , где m – характеристика ситуации, обозначающая число

успешных ловушек в ней, $m = 1, \dots, N_{\text{лов}}$; n – номер комбинации оценок ЧДД в m -ой ситуации, $n = 1, \dots, C_{N_{\text{лов}}}^m$. Вероятность P_{nm} вычисляется по формуле Бернулли [Вентцель, 2006]:

$$P_{nm} = \prod_i P_{\text{усп}}^{\text{лов}i} \times \prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лов}j}, \quad i, j = 1, \dots, N_{\text{лов}}, j \neq i \quad (3),$$

где $\prod_i P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ – произведение вероятностей успеха ловушек, оценки ЧДД которых составляют n -ую комбинацию в m -ой ситуации; $\prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лов}j}$ – произведение вероятностей неудачи для ловушек, индексы которых не совпадают с индексами оценок ЧДД успешных ловушек, составляющих n -ую комбинацию в m -ой ситуации.

Ситуации, когда все ловушки окажутся пустыми, соответствует вероятность P_0 , вычисляемая по формуле:

$$P_0 = \prod_i P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}} \quad (4).$$

Математическая формализация перечисленных ситуаций позволяет определить аналитическое представление для вероятностной оценки суммарной величины ЧДД (функций $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$) в следующем виде:

$$f(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}} = \begin{cases} \sum_m \sum_n f^*(\text{ЧДД}_{nm}) & \text{при } \text{ЧДД}_{\Sigma} > 0; \\ P_0 & \text{при } \text{ЧДД}_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_{\text{лов}}} (-K_{\text{риск}j}); \end{cases}$$

$$F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}} = \begin{cases} \sum_m \sum_n F^*(\text{ЧДД}_{nm}) & \text{при } \text{ЧДД}_{\Sigma} > 0; \\ \sum_m \sum_n F^*(0) + P_0 = 1 & \text{при } \text{ЧДД}_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_{\text{лов}}} (-K_{\text{риск}j}) \end{cases} \quad (5).$$

Функции $f^*(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F^*(\text{ЧДД}_{nm})$ определяются по формулам:

$$f^*(\text{ЧДД}_{nm}) = P_{nm} \times f(\text{ЧДД}_{nm} - \sum_j K_{\text{риск}j}),$$

$$F^*(\text{ЧДД}_{nm}) = P_{nm} \times F(\text{ЧДД}_{nm} - \sum_j K_{\text{риск}j}) \quad (6).$$

В формулах (6) функции $f(\text{ЧДД}_{nm} - \sum_j K_{\text{риск}j})$ и $F(\text{ЧДД}_{nm} - \sum_j K_{\text{риск}j})$ представляют вероятностную оценку суммарной величины ЧДД успешных ловушек, входящих в n -ую комбинацию для m -ой ситуации – $f(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F(\text{ЧДД}_{nm})$, с поправкой на суммарную величину рискованного капитала для неудачных ловушек в этой комбинации. Параметры этих функций определяются по формуле (2).

Схема компьютерной реализации аналитического метода суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек представлена на рис. 3.

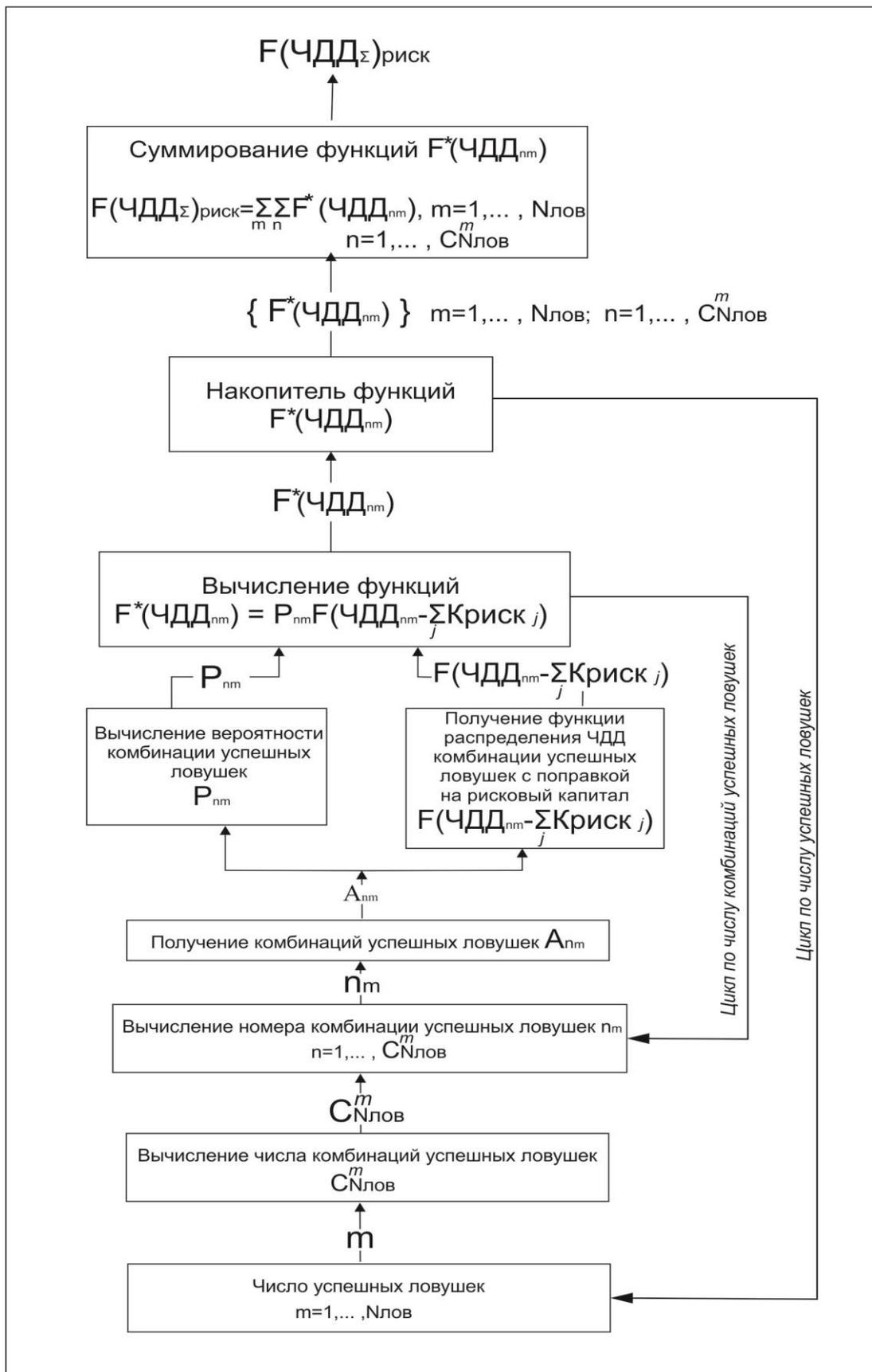


Рис. 3. Схема аналитического метода

Примечание. Схема аналитического метода представлена на рис. 3 для получения функции $F(ЧДД_{\Sigma})_{\text{риск}}$. Схема метода для получения функции $f(ЧДД_{\Sigma})_{\text{риск}}$ аналогична описанной.

Входами схемы являются: число ловушек $N_{\text{лов}}$; функции распределения вероятностных оценок ЧДД ловушек $f(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$ и $F(\text{ЧДД}_{\text{лов}i})$, $i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$; величины рискового капитала ловушек $K_{\text{риски}i}$, $i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$; значения вероятностей успеха $P_{\text{усп}}^{\text{лов}i}$ и неудачи $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}$, $i = 1, \dots, N_{\text{лов}}$ для ловушек.

Вычисления по схеме аналитического метода проводятся в режиме с двумя циклами - внешним и внутренним.

Внешний цикл осуществляется по числу успешных ловушек $m = 1, \dots, N_{\text{лов}}$. На каждой итерации этого цикла вычисляется параметр $C_{N_{\text{лов}}}^m$, определяющий размер внутреннего цикла, на котором производятся основные операции по вычислению набора функций $f^*(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F^*(\text{ЧДД}_{nm})$, подлежащих суммированию по формуле (5).

Внутренний цикл управляется параметром «n» ($n = 1, \dots, C_{N_{\text{лов}}}^m$), который используется для идентификации комбинаций успешных ловушек при значениях «m», задаваемых во внешнем цикле (A_{nm}). Идентификация комбинации производится по индексу «nm», в котором значение «n» соответствует номеру итерации внутреннего цикла, значение «m» - номеру итерации внешнего цикла. Такая процедура обеспечивает сплошную индексацию функций $f^*(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F^*(\text{ЧДД}_{nm})$, участвующих в формулах суммирования (5).

Во внутреннем цикле при каждом значении индекса «nm» последовательно выполняются следующие операции:

- получение комбинации успешных ловушек (A_{nm});
- вычисление для комбинации (A_{nm}) вероятности ее реализации P_{nm} (формула (3)) и функций $f(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F(\text{ЧДД}_{nm})$;
- вычисление функций $f^*(\text{ЧДД}_{nm})$ и $F^*(\text{ЧДД}_{nm})$ (формула (6)), которые сохраняются в накопителе.

Заключительной операцией является получение функций $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ по формуле (5) - вероятностной оценки суммарной величины ЧДД ловушек.

Сопоставление методов суммирования вероятностных оценок ЧДД ловушек проводилось путем сравнения результатов их применения на конкретном примере, исходные данные для которого приведены в табл. 2.

Вероятностные оценки суммарной величины ЧДД в виде кумулятивной функции распределения $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$, полученные методами Монте-Карло и аналитическим, приведены на рис. 4.

Исходные данные агрегируемых ловушек

| Номер объекта | Вероятностные оценки ЧДД | Параметры вероятностных оценок ЧДД ловушек | | Геологический риск | | Рисковый капитал |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
| | | $m_{\text{ЧДДлов}}$, млн. руб. | $\sigma_{\text{ЧДДлов}}$, млн. руб. | $P_{\text{усп}}^{\text{лов}}$ | $P_{\text{неуд}}^{\text{лов}}$ | $K_{\text{риск}}^{\text{лов}}$, млн. руб. |
| 1 | $F(\text{ЧДД}_{\text{лов,1}})$ | 150 | 65 | 0,12 | 0,88 | 20 |
| 2 | $F(\text{ЧДД}_{\text{лов,2}})$ | 720 | 275 | 0,31 | 0,69 | 60 |
| 3 | $F(\text{ЧДД}_{\text{лов,3}})$ | 380 | 150 | 0,16 | 0,84 | 40 |
| Вероятность $P_0 = 0,88 * 0,69 * 0,84 = 0,51$ | | | | | | |

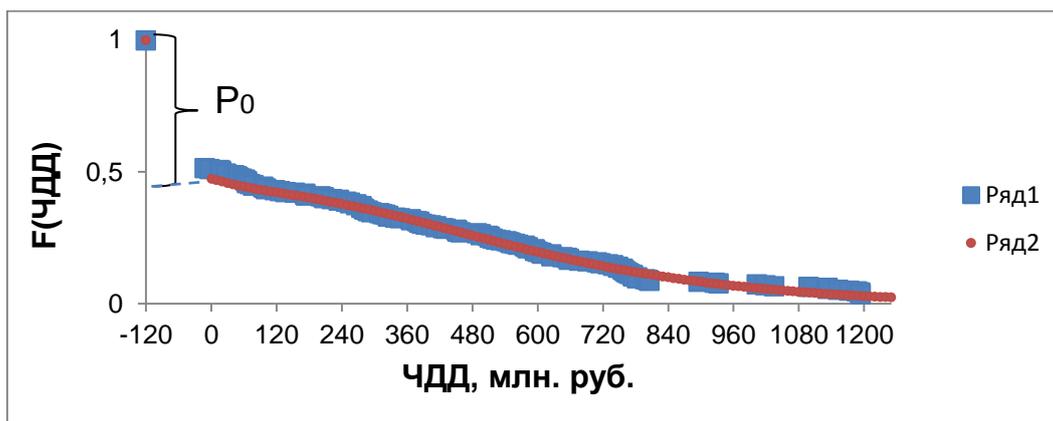


Рис. 4. Графики функций распределения вероятностных оценок суммарной величины чистого дисконтированного дохода, полученных методами Монте-Карло и аналитическим. Ряд 1 – функция $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$, полученная методом Монте-Карло; Ряд 2 – функция $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$, полученная аналитическим методом.

Интерпретация и форматирование вероятностных оценок суммарной величины чистого дисконтированного дохода с учетом геологического риска для ловушек

Функции $f(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}_{\Sigma})_{\text{риск}}$ являются функциями дискретно-непрерывного типа (см. формулы (5) и рис. 4): дискретная часть представлена парой «значение $\text{ЧДД}_{\Sigma} = \sum_{j=1}^{N_{\text{лов}}} (-K_{\text{риск}j})$, вероятность этого значения (P_0)»; непрерывная часть представлена функциями, получаемыми как результат суммирования взвешенных по вероятностям P_{nt} функций $f(\text{ЧДД}_{nt} - \sum_j K_{\text{риск}j})$ и $F(\text{ЧДД}_{nt} - \sum_j K_{\text{риск}j})$.

По аналогии с условием успеха и неудачи для отдельной ловушки введем понятия «успех» и «неудача» для суммарной величины ЧДД_{Σ} . Понятию «успех» соответствует ситуация, при которой в совокупности рассматриваемых ловушек существует хотя бы одна ловушка, содержащая промышленную залежь; понятию «неудача» - ситуация, при которой все ловушки предполагаются пустыми.

Для вероятностной характеристики условий успеха и неудачи для суммарной величины ЧДД_{Σ} будем использовать понятия «вероятность успеха» и «вероятность неудачи»

суммарной величины ЧДД - $P_{\text{усп}}^{\text{ЧДД}\Sigma}$ и $P_{\text{неуд}}^{\text{ЧДД}\Sigma}$, которые определим следующим образом:

$$P_{\text{неуд}}^{\text{ЧДД}\Sigma} = P_0, \quad P_{\text{усп}}^{\text{ЧДД}\Sigma} = 1 - P_0 \quad (7).$$

Уравнения (7) будем рассматривать как вероятностную характеристику *геологического риска для суммарной величины ЧДД*:

«геологический риск для суммарной величины ЧДД» $\rightarrow (P_{\text{усп}}^{\text{ЧДД}\Sigma}, P_{\text{неуд}}^{\text{ЧДД}\Sigma})$.

Модель геологического риска для суммарной величины ЧДД ловушек представлена на рис. 5.

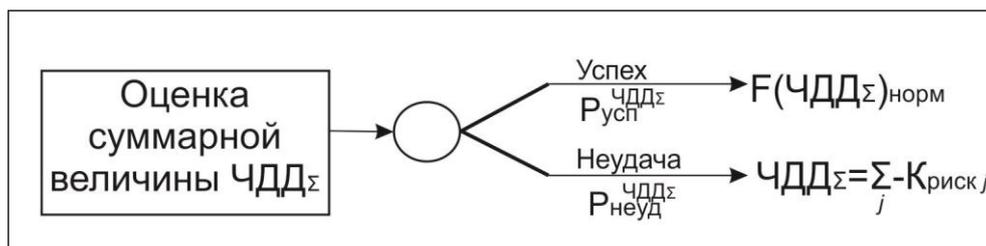


Рис. 5. Модель геологического риска для суммарной величины чистого дисконтированного дохода ловушек

Введение понятия геологического риска для суммарной величины ЧДД создает предпосылки для рассмотрения двух модификаций вероятностной оценки суммарной величины ЧДД_Σ:

- вероятностной оценки суммарной величины ЧДД_Σ без учета ее геологического риска;
- вероятностной оценки суммарной величины ЧДД_Σ с учетом ее геологического риска.

Вероятностная оценка суммарной величины ЧДД без учета ее геологического риска соответствует ситуации, при которой исключается из рассмотрения условие отсутствия промышленных залежей во всех ловушках. Такая оценка представлена на рис. 5 непрерывными функциями $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{норм}}$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{норм}}$, полученными путем нормирования непрерывных составляющих функций $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$ вероятностью успеха $P_{\text{усп}}^{\text{ЧДД}\Sigma} = (1 - P_0)$ следующим образом:

$$f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{норм}} = \frac{1}{(1-P_0)} \times f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}, \quad F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{норм}} = \frac{1}{(1-P_0)} \times F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}} \quad (8).$$

Вероятностная оценка суммарной величины ЧДД с учетом ее геологического риска включает в рассмотрение возможность существования ситуации, при которой все ловушки окажутся пустыми. Такая оценка представлена дискретно–непрерывными функциями $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$ и $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$ (формулы (5) и рис. 4).

На рис. 6 приведены графики вероятностных оценок суммарной величины ЧДД без

учета и с учетом геологического риска, рассчитанные для ловушек, исходные данные для которых приведены в табл. 2.

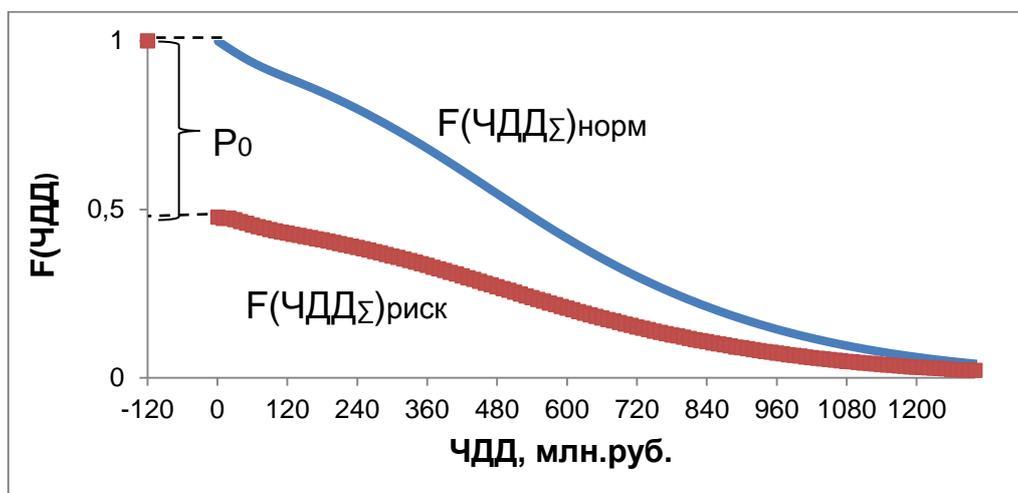


Рис. 6. Графики вероятностных оценок суммарной величины чистого дисконтированного дохода ловушек без учета ($F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$) и с учетом ($F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{риск}}$) геологического риска

Введение модификации вероятностной оценки суммарной величины ЧДД в виде нормированных функций $f(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$ и $F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$ позволяет использовать два самостоятельных показателя для количественной характеристики качества набора ловушек:

а) возможный доход от реализации продукции набора ловушек в случае успеха (при условии наличия промышленных залежей в одной или большем числе ловушек);

б) вероятность неудачи ($P_{\text{неуд}}^{\text{ЧДД}_\Sigma} = P_0$) - вероятность отсутствия промышленных залежей во всех рассматриваемых ловушках.

Эти два показателя позволяют соотнести величину дохода от будущих открытий в случае успеха и риск потерь в случае неудачи, то есть оптимизировать стратегию геологоразведочных работ.

Формулы для вычисления параметров вероятностных оценок суммарной величины чистого дисконтированного дохода

На основании аналитического метода (формулы (5)) в работе получены формулы для вычисления параметров – математического ожидания и дисперсии - вероятностных оценок суммарной величины ЧДД двух модификаций – без учета (для функций $f(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$, $F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$) и с учетом (для функций $f(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{риск}}$, $F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{риск}}$) геологического риска для суммарной величины ЧДД.

Для функций $f(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$, $F(\text{ЧДД}_\Sigma)_{\text{норм}}$:

$$m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}} = \frac{1}{(1-P_0)} \times \sum_i [\text{ОДС}_i \times (1 - \prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лов}j}) + m_{\text{ЧДДлов}i} \times P_{\text{усп}}^{\text{лов}i} \times \prod_j P_{\text{неуд}}^{\text{лов}j}],$$

$$i = 1, \dots, N_{\text{лов}}, \quad j = 1, \dots, N_{\text{лов}}, j \neq i,$$

где ОДС_i - показатель ожидаемой денежной стоимости ресурсов i -ой ловушки, вычисляемый по формуле [Емельянова, Пороскун, 2016]:

$$\text{ОДС}_{\text{лов}i} = m_{\text{ЧДДлов}i} \times P_{\text{усп}}^{\text{лов}i} - K_{\text{риск}i} \times P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i} \quad (9).$$

$$\sigma_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}}^2 = \sum_i \sigma_{\text{ЧДДлов}i}^2 \times P_{\text{усп}}^{\text{лов}i} + \sum_i (m_{\text{ЧДДлов}i} - K_{\text{риск}i})^2 \times P_{\text{усп}}^{\text{лов}i} \times P_{\text{неуд}}^{\text{лов}i}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}}.$$

Для функций $f(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$, $F(\text{ЧДД}\Sigma)_{\text{риск}}$:

$$m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{риск}}} = \sum_i \text{ОДС}_{\text{лов}i}, \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}}.$$

Из формулы (9) следует, что ожидаемая денежная стоимость ресурсов совокупности ловушек равна арифметической сумме ожидаемых денежных стоимостей ресурсов отдельных ловушек:

$$\text{ОДС}_{\Sigma} = \sum_i \text{ОДС}_{\text{лов}i}. \quad i = 1, \dots, N_{\text{лов}} \quad (10).$$

По приведенным выше формулам для примера, представленного в табл. 2, вычислены параметры $m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}}$, $\sigma_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}}^2$, $m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{риск}}}$ и сопоставлены с соответствующими параметрами, полученными методами Монте-Карло и аналитическим. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры вероятностных оценок ЧДД Σ

| Методы | Параметры | | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| | $m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}}$ млн. руб. | $\sigma_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{норм}}}^2$ млн. руб. | $m_{\text{ЧДД}\Sigma_{\text{риск}}}$ млн. руб. |
| Монте-Карло | 206,4 | 377 | 538,2 |
| Аналитический | 206 | 366 | 553,6 |
| Теоретический (по формулам) | 209,4 | 371 | 552,4 |

Сходимость результатов аналитических расчетов (по формулам) параметров вероятностных оценок суммарной величины ЧДД ловушек с результатами стохастического моделирования методом Монте-Карло подтверждает корректность предлагаемого аналитического метода суммирования вероятностных оценок ЧДД локальных объектов.

Заключение

В статье рассмотрены методы суммирования вероятностных оценок ЧДД для локальных поисковых объектов (подготовленных к бурению ловушек) с учетом геологического риска:

- метод Монте-Карло;

- аналитический метод, предложенный авторами.

Показано, что вероятностная оценка суммарной величины ЧДД при учете геологического риска для ловушек представляет собой дискретно-непрерывную функцию, состоящую из двух компонент: а) непрерывной компоненты, определенной на оси ЧДД > 0 , б) дискретной компоненты, представленной парой «суммарное значение рискованного капитала для всех ловушек; вероятность отсутствия залежей во всех ловушках».

Такое поведение вероятностной оценки суммарной величины ЧДД позволило ввести понятия «успех» и «неудача» для суммарной величины ЧДД. В качестве вероятностной характеристики условий успеха и неудачи для суммарной величины ЧДД, по аналогии с формализацией условий успеха и неудачи для отдельной ловушки, введено понятие «геологический риск» для суммарной величины ЧДД. Это создает предпосылки для рассмотрения двух типов вероятностной оценки суммарной величины ЧДД:

- а) вероятностной оценки суммарной величины ЧДД без учета ее геологического риска;
- б) вероятностной оценки суммарной величины ЧДД с учетом ее геологического риска.

Введение вероятностной оценки суммарной величины ЧДД без учета геологического риска для суммарной величины ЧДД позволяет использовать два самостоятельных показателя для количественной характеристики качества совокупности ловушек - возможный доход от реализации продукции ловушек в случае успеха и риск материальных потерь в случае неудачи.

В работе получены аналитические выражения для параметров вероятностной оценки суммарной величины ЧДД (математического ожидания (среднего значения) и дисперсии) двух модификаций – без учета и с учетом геологического риска для суммарной величины ЧДД. Вычисленные по этим формулам значения указанных параметров могут быть использованы для экспресс-оценки геолого-экономической значимости агрегируемых ловушек при проектировании геологоразведочных работ.

К достоинствам аналитического метода по сравнению с методом Монте-Карло следует отнести следующее. Аналитический метод обеспечивает возможность:

- непосредственно получить вероятностную оценку суммарной величины ЧДД набора ловушек в виде ее функций распределения;
- проанализировать влияние геологического риска ловушек на закономерности вероятностной оценки суммарной величины ЧДД; результаты такого анализа позволили переформатировать вероятностную оценку суммарной величины ЧДД в форму, допускающую более адекватную их смысловую интерпретацию, что повышает эффективность принятия управленческих решений по оптимизации геологоразведки, проводимых на основе этих оценок;

- определить параметры вероятностной оценки суммарной величины ЧДД для совокупности ловушек, используемые для оптимизации программы по бурению.

Литература

Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М. Высшая школа, 2006. - 575 с.

Емельянова Н.М., Порожун В.И. Методы геолого-экономической оценки объектов поиска месторождений нефти и газа с учетом неопределенности и риска // Недропользование XXI век. - 2016. - №5(62). - С. 190-201.

Емельянова Н.М., Порожун 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. 31-37.

Emelyanova N.M., Poroskun V.I.

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

SUMMATION OF PROBABILISTIC NET PRESENT VALUE ESTIMATES OF LOCAL OBJECTS TAKING INTO ACCOUNT OF A GEOLOGICAL RISK

The article considers the methods of summation probabilistic net present value (NPV) estimates of local oil and gas objects (prepared for drilling traps) with account of the geological risk associated with these objects: Monte-Carlo method and the analytical method, proposed by authors. The problem is solved for the following conditions: a) various probabilistic NPV estimates of the traps; b) various risk capital of the traps; c) various probabilistic characteristics of trap's geological risk. It is shown that the probabilistic total NPV estimates, obtained by applying the methods under consideration, coincide. The specific characteristics of these estimates are analyzed, and conditions of their practical application are defined.

Keywords: *local objects (prepared for drilling traps, probabilistic net present value (NPV) estimates; summation of the trap probabilistic net present value (NPV) estimates; geological risk accounting.*

References

Emel'yanova N.M., Poroskun V.I. *Metody geologo-ekonomicheskoy otsenki ob"ektov poiska mestorozhdeniy nefiti i gaza s uchetom neopredelennosti i riska* [Methods of geological and economic assessment of objects of search for oil and gas fields, taking into account uncertainty and risk]. *Nedropol'zovanie XXI vek*, 2016, no. 5(62), pp. 190-201.

Emel'yanova N.M., Poroskun V.I. *Summirovaniye veroyatnostnykh otsenok resursov nefiti i gaza lokal'nykh ob"ektov s uchetom geologicheskogo riska* [Summation of 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. 31-37.

Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 575 p.

© Емельянова Н.М., Пороскун В.И., 2019