

*На правах рукописи*



**ШАТРОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ**

**ОЦЕНКА РЕСУРСОВ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ОСНОВЕ  
СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И  
ОБЪЁМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОИСКОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 25.00.12 - Геология, поиски и разведка  
нефтяных и газовых месторождений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Уфа – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель

**Котенёв Юрий Алексеевич**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Геология и разведка  
нефтяных и газовых месторождений»

Официальные оппоненты

**Галкин Владислав Игнатьевич**

доктор геолого-минералогических наук,  
профессор, ФГБОУ ВО «Пермский  
национальный исследовательский технический  
университет», заведующий кафедрой «Геология  
нефти и газа».

**Базаревская Венера Гильмеахметовна**

кандидат геолого-минералогических наук,  
Татарский научно-исследовательский и  
проектный институт нефти (ТатНИПИнефть)  
публичного акционерного общества "Татнефть"  
имени В.Д. Шашина, заместитель директора по  
научной работе в области геологии  
трудноизвлекаемых запасов.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Российский государственный  
университет нефти и газа (НИУ) имени  
И.М. Губкина»

Защита состоится «28» июня 2018 г в 16.00 часов в конференц-зале на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.129.02 на базе АО НПФ «Геофизика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450005, г. Уфа, ул. 8 Марта, д. 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО НПФ «Геофизика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» и на сайте <http://www.npf-geofizika.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Беляева Альбина Сагитовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

По мере увеличения степени изученности большинства нефтегазоносных провинций страны, в массиве неоткрытых запасов неуклонно возрастает доля мелких и мельчайших по запасам залежей, разработка которых может оказаться нерентабельной при отсутствии синергии с другими мелкими залежами. В связи с этим возрастает значимость корректного учёта неопределённостей для групп близко расположенных поисковых объектов, с учётом пространственных зависимостей и корреляций. Настоящее исследование посвящено разработке соответствующей методики, в его основу положен опыт решения теоретических и практических задач, возникающих при проведении технико-экономической оценки поисковых активов углеводородного сырья.

Тема работы и содержание исследований соответствуют пункту 2 области исследований, определяемой паспортом специальности 25.00.12 – «Геология, поиски и разведка нефтяных и газовых месторождений»: «2. Прогнозирование, поиски, разведка и геолого-экономическая оценка месторождений: методология прогнозирования, оценки ресурсов и подсчет запасов нефти и газа; современные методы поисков и разведки месторождений».

### **Степень разработанности темы**

Главные отечественные научные школы в области теории и практических приложений количественной оценки перспектив нефтегазоносности были сформированы во ВНИГНИ, ВНИГРИ, ЗапСибНИГНИ, СНИИГГИМСе, ВНИИЗарубежгеология, ИГГ АН СССР (ныне ИНГГ СО РАН), ИГИРГИ, ВНИИгаз, ИГИРНИГМ и других организациях. Выдающийся вклад в это направление геологической науки внесли советские и российские ученые: А.А. Бакиров, М.Д. Белонин, И.О. Брод, Л.М. Бурштейн, Н.И. Буялов, И.М. Губкин, Ф.Г. Гурари, Н.А. Еременко, А.Э. Конторович, Н.А. Крылов, В.Р. Лившиц, М.С. Моделевский, С.Г. Неручев, И.И. Нестеров, А.А. Трофимук, Э.Э. Фотиади, В.И. Шпильман и другие. В области вероятностной оценки запасов и ресурсов значимые результаты получены, наряду с перечисленными,

М.Д. Белониным, В.И. Галкиным, С.В. Галкиным, Л.С. Грековой, В.И. Деминым, Н.М. Емельяновой, А.Б. Золотухиным, Р.И. Коганом, О.С. Красновым, С.Н. Кривощёковым, О.А. Мелкишевым, Ю.В. Подольским, В.И. Пороскуном, И.С. Путиловым, А.Е. Старобинцем, М.Ю. Стерниным, Е.Ф. Фроловым, А.Я. Фурсовым, Г.И. Шепелевыми другими.

За рубежом значительный вклад в разработку вероятностных методов оценки ресурсов внесли Э. Биккель, П. Дельфинер, Ф. Демирмен, Дж. Дэвис, Г. Кауфман, Э. Кейпен, Дж. Маккей, Р. Мегилл, Дж. Мурза, П. Невендорп, Р. Отис, П. Роуз, Дж. Л. Смит, Ч. Стейбелл, Д. Уайт, Д. Харбух и другие.

К настоящему времени детально проработана методика анализа геологических факторов формирования и сохранности залежей углеводородов (УВ) и основанный на этом анализе расчёт вероятности существования месторождения. Параллельно развивалась теория и практика применения метода Монте-Карло (МК) для вероятностного моделирования подсчётных параметров поискового объекта, с формированием вероятностного распределения ресурсов оцениваемой залежи. Общепринятым на сегодня подходом является выполнение анализа геологических факторов и проведение моделирования МК отдельно для имеющихся поисковых объектов. В результате удаётся получить для каждого поискового объекта вероятность подтверждения в нём углеводородной залежи, а также вероятностное распределение приуроченных к ней ресурсов.

К сожалению, этот набор индивидуальных оценок по отдельным поисковым объектам не поддаётся технологичному объединению для формирования интегральной оценки всего участка. Проведение такого объединения (агрегации) дополнительно затрудняется из-за наличия взаимных зависимостей и корреляций между геологическими факторами, а также подсчётными параметрами разных объектов.

### **Цель диссертационной работы:**

Совершенствование методов поиска и оценки ресурсов углеводородов путём комплексной обработки двух составных элементов неопределённости

ресурсной базы: вероятности существования месторождения и величины его возможных запасов.

**Объектом исследования** являются ресурсы углеводородов, приуроченные к ограниченной площади в пределах единой зоны нефтегазоносности, в масштабе типичного лицензионного участка недр.

**Предмет исследования** - два составных элемента неопределённости ресурсной базы: вероятность существования месторождения на оцениваемой площади и возможная величина его запасов. Кроме того, исследуется проблема адаптации результатов вероятностного моделирования ресурсов для повышения корректности их экономической оценки.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

1 Обоснование принципа совместного вероятностного численного моделирования подсчётных параметров поисковых объектов и геологических факторов, контролирующих вероятность формирования залежей.

2 Разделение геологических факторов (наличие коллектора, покрышки и т.д.) на протяжённые и локальные составляющие и сведение их в матрицу поисковых объектов.

3 Выработка системы рекомендаций по вероятностному моделированию подсчётных параметров.

4 Обеспечение учёта корреляций между подсчётными параметрами – как между парами параметров в пределах единой залежи, так и между значениями одного параметра в разных поисковых объектах.

5 Создание методики статистического соотнесения дискретных значений ресурсов с наиболее вероятной конфигурацией «подтвердившихся» поисковых объектов – для оптимизации сценарных расчётов.

6 Получение на базе матрицы поисковых объектов аналитических выражений для расчёта вероятности существования месторождения.

### **Научная новизна диссертации**

1 Разработан и обоснован метод вероятностной оценки локализованных ресурсов, в рамках которого совместно учитываются две ключевые неопределённости ресурсной базы: неопределённость существования углеводородных залежей в поисковых объектах и неопределённость объёмных параметров этих залежей.

2 Разработан метод статистического соотнесения произвольного значения ресурсов с наиболее вероятным для него количеством и конфигурацией «подтвердившихся» поисковых объектов, а также с конкретным представительным набором их подсчётных параметров, позволяющий проводить сценарные расчёты разработки и обустройства не для абстрактной скалярной величины ресурсов, а для конкретного, наиболее вероятного набора геологических объектов и параметров.

3 Впервые получено аналитическое выражение, позволяющее для произвольного количества пластов и структур рассчитывать вероятность существования месторождения с учётом разделения геологических факторов на протяжённые и локальные компоненты.

### **Положения, выносимые на защиту**

1 Метод вероятностной оценки, основанный на совместном (и одновременном для всех потенциальных залежей) учёте как объёмных характеристик каждой залежи, так и вероятности её существования.

2 Метод стохастического соответствия сценарных вариантов разработки месторождения наиболее вероятным комбинациям подтвердившихся поисковых объектов и наборам значений их подсчётных параметров.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Применение разработанного метода позволяет получать несмещённые оценки вероятности существования месторождения и строить корректные вероятностные распределения ресурсов УВ непосредственно для объекта экономической оценки - лицензионного участка или группы участков, исключая выполнение изолированных оценок для составных частей

лицензионных участков (отдельных залежей, отдельных структур), корректное объединение которых представляет собой практически нерешаемую задачу.

Применение метода обеспечивает объективную экономическую оценку поискового актива, что снижает риск ошибочных решений в двух аспектах: с одной стороны, риск неэффективных инвестиций в случае необъективно завышенной оценки; с другой стороны, риск упущенной выгоды в случае отказа от эффективных инвестиций. Для государства, в свою очередь, использование разработанного метода предоставляет корректную оценку ресурсов тех или иных площадей экономического пространства страны, что позволяет предотвратить занижение стартовых платежей за лицензии, а также оптимизировать политику лицензирования в целом.

### **Степень достоверности результатов**

Достоверность и обоснованность научных выводов, а также изложенных в работе практических рекомендаций базируется на использовании теоретических положений, обоснованных в многочисленных исследованиях российских и зарубежных учёных. Диссертация является обобщением теоретических и практических разработок, выполненных за годы работы по геолого-экономической оценке многих десятков геологоразведочных, а также добычных активов. Во второй главе представлено обзорное сопоставление практических результатов геологоразведочных работ на лицензионных участках, ресурсная база которых была оценена защищаемым методом.

### **Апробация результатов исследования**

Отдельные результаты исследования были доложены на Международной конференции ВНИГРИ «Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы», состоявшейся в г. Санкт-Петербург в июле 2015 г. Методика проходила неоднократные обсуждения на совещаниях в ПАО АНК «Башнефть».

Разработанный метод совместного моделирования подсчётных параметров и геологических факторов принят к использованию в ПАО АНК «Башнефть» и ООО «БашНИПИнефть» и применяется на регулярной основе

при проведении технико-экономической оценки всех поисковых активов, а также при принятии решений о целесообразности продолжения геологоразведочных работ. За период 2012-2017 гг выполнены ТЭО более чем по 130 поисковым активам, 20 из них приобретены по результатам оценки.

### **Публикации**

Основные результаты опубликованы в 8 научных трудах, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация объемом 160 страниц состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 130 наименований, включает 34 рисунка и 12 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** раскрыта актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость проведенного исследований, обозначены научные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** кратко изложена история внедрения вероятностных подходов к оценке ресурсов и запасов углеводородов, рассмотрены ключевые понятия, лежащие в основе вероятностной оценки: неопределённость, риск, вероятность геологического успеха, ожидаемая стоимость проекта и мера чувствительности к риску. Выделены два ключевых аспекта неопределённости, сопутствующие поисково-разведочным работам: неопределённость, связанная с вероятностью существования месторождения, и неопределённость возможной величины его запасов.

Далее рассмотрены два основных инструмента, применяемые в поисковой геологии для учёта этих двух неопределённостей. Для оценки вероятности геологического успеха традиционно применяется анализ геологических факторов: оценивается вероятность наличия материнской породы, коллектора, покрывки, структурного замыкания, осуществления



миграции, сохранности залежи. Каждому фактору присваивается вероятность его реализации, произведение этих значений используется как вероятность существования углеводородной залежи. Для количественной оценки возможных запасов предполагаемого месторождения применяется моделирование подсчётных параметров методом МК, в результате формируется вероятностное распределение ресурсов.

Далее в главе указывается, что эти два инструмента неизменно рассматриваются в научной литературе изолированно друг от друга. Кроме того, каждый из этих инструментов обычно описывается применительно к единственной залежи, проблема же агрегации оценок с построением интегральной вероятности наличия хотя бы одной залежи, а также величины суммарных ресурсов для случая нескольких подсчётных объектов - либо вообще не затрагивается, либо лишь упоминается.

Такая неполнота рассмотрения не является случайной, поскольку до сих пор фактически отсутствует метод корректного объединения изолированных оценок вероятностей подтверждения отдельных залежей и их объёмных характеристик, который учитывал бы взаимные пространственные зависимости между наличием или отсутствием залежей в разных поисковых объектах, а также корреляции между объёмными параметрами этих залежей.

В разделе 1.6 на конкретных вычислительных примерах демонстрируется проблема агрегации вероятностных оценок, выполненных отдельно для разных поисковых объектов. Показано, что в результате получаются ошибочные оценки вероятности открытия и некорректные вероятностные распределения суммарных ресурсов оцениваемой площади. Сделан вывод о том, что в рамках стандартной методики – с отдельной вероятностной оценкой ресурсов каждого поискового объекта и последующим объединением этих отдельных оценок – происходит частичная подмена вероятностного подхода детерминистическим: суммирование обрискованных оценок по всем поисковым объектам связано с неявным предположением о существовании жёсткой

зависимости между подтверждаемостью всех объектов. Между тем, в общем случае такая зависимость является лишь частичной.

В заключительном разделе первой главы сформулированы три основные и три второстепенные задачи, решение которых обеспечит достижение главной цели исследования. Первые три задачи – разработка нового принципа вероятностной оценки ресурсов (задача №1) и техническая реализация этого принципа, обеспечивающая корректный учёт вероятностных (задача №2) и объёмных (задача №3) характеристик поисковых объектов. Задачи №4-6 связаны с дальнейшим развитием и адаптацией разработанного метода.

Во **второй главе** изложены основные положения разработанного метода моделирования рисков и неопределённостей, сопутствующих поисково-разведочным работам на нефть и газ. В основе метода лежит матрица поисковых объектов, строки которой представляют собой потенциально продуктивные пласты, а столбцы – выявленные, подготовленные или предполагаемые структуры. Каждая ячейка матрицы является подсчётным объектом – потенциальной залежью, приуроченной к определённому столбцу и определённой структуре (при этом часть ячеек может быть исходно исключена из рассмотрения). Матрица может иметь произвольное количество столбцов и строк, что позволяет моделировать площадь с произвольным количеством перспективных структур и потенциально продуктивных пластов. При этом возможность адресно занулять отдельные ячейки позволяет применять матрицу для моделирования произвольной конфигурации реальных поисковых объектов, в том числе формируя в разных структурах различающиеся наборы потенциально продуктивных пластов, а также – для произвольного сочетания разных типов ловушек.

Для учёта взаимных корреляций подтверждаемости разных поисковых объектов, которые обусловлены пространственной зависимостью геологических факторов (контролирующих возможность формирования и сохранности каждой залежи), в работе реализовано разделение геологических факторов на протяжённые и локальные составляющие и отдельный учёт этих

составляющих в матрицепоисковых объектов. При этом для протяжённых компонент реализован механизм наследования значений вдоль строк и столбцов матрицы - для каждого параметра индивидуально, в соответствии с его геологической природой. Таким образом, при совместном моделировании поисковых объектов разработанный метод позволяет воспроизвести взаимные корреляции между вероятностью наличия или отсутствия действия каждого геологического фактора для любой пары поисковых объектов и, следовательно, для всей совокупности моделируемых объектов.

Матрица подсчётных объектов приведена на рисунке 1 со следующими обозначениями:  $S_i$  - вероятность наличия структурного замыкания в  $i$ -й структуре;  $R_j$  - региональная (протяжённая) составляющая геологических факторов, наследуемая вдоль  $j$ -го пласта;  $L_{ji}$  - совокупность локальных составляющих геологических факторов в поисковом объекте, находящемся «на пересечении»  $i$ -й структуры и  $j$ -го пласта.

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

Рисунок 1 - Матрица подсчётных объектов и области действия геологических факторов

Метод также позволяет увеличивать или уменьшать вклад протяжённой компоненты соответствующего геологического фактора в зависимости от степени изменчивости свойств того или иного пласта по простиранию, степени преемственности структурного фактора по разрезу, преимущественно вертикального или горизонтального характера миграции и т.д. В результате

повышается или снижается вероятность одновременного подтверждения или неподтверждения поисковых объектов, приуроченных к соответствующему пласту или структуре и, следовательно, изменяется вид получающегося вероятностного распределения суммарных ресурсов оцениваемой площади, а также оценка вероятности существования месторождения. Выбор же той или иной модели зависимости делается на основе анализа геологического строения оцениваемого разреза.

В качестве примера на рисунке 2 представлено сопоставление трёх вариантов расчёта для случая одного потенциально продуктивного пласта и двух перспективных структур, к каждой из которых может быть приурочено по одной залежи. Во всех трёх вариантах вероятность наличия каждой из двух залежей составляет 0.5, но различаются вклады региональной и локальной компонент в неопределённость: в первом варианте вся неопределённость отнесена к локальной составляющей, в третьем - к региональной, во втором варианте она равномерно распределена между двумя компонентами. Графики демонстрируют, что первый вариант характеризуется наибольшей вероятностью наличия *хотя бы одной* залежи, наименьшей величиной математического ожидания (без учёта риска) и одновременно самой высокой дисперсией вероятностного распределения ресурсов.

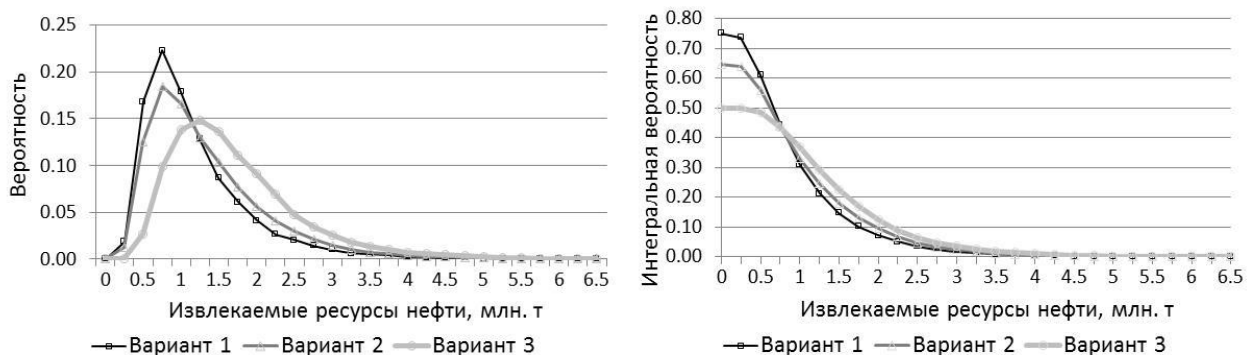


Рисунок 2 -Сравнение трёх моделей оценки с различным соотношением региональной и локальной неопределённости геологических факторов

В процессе совместного моделирования геологических факторов и подсчётных параметров методом МК формируется массив вероятностных

реализаций. В каждой вероятностной реализации каждый поисковый объект получает определённый статус всех геологических факторов, в соответствии с которыми соответствующая залежь считается либо существующей, либо не существующей (в пределах данной вероятностной реализации). Кроме того, каждая «существующая» залежь получает определённый набор значений всех подсчётных параметров и, следовательно, характеризуется определённой величиной ресурсов УВ. Отношение количества вероятностных реализаций, содержащих хотя бы одну «существующую» залежь, к общему количеству реализаций МК, даёт численную оценку вероятности наличия месторождения (хотя бы одной залежи).

Далее во второй главе рассматриваются вопросы, связанные с вероятностным моделированием подсчётных параметров поисковых объектов. Предложен и обоснован подход к формированию «входных» вероятностных распределений, на основе которых проводится моделирование МК. Данная задача разбита на три последовательных этапа, каждый из которых разобран в работе отдельно:

- 1) выбор набора параметров для моделирования;
- 2) выбор *типа* распределения для каждого параметра;
- 3) задание конкретных численных значений каждого распределения.

Первый этап, в свою очередь, разделён на четыре подзадачи:

- 1) выбор допустимых вариантов фазового состава для каждого поискового объекта;
- 2) принятие решения о том, являются ли объектом совместного вероятностного моделирования геологические или вероятностные ресурсы (указаны достоинства и недостатки каждого из этих двух вариантов);
- 3) выбор способа моделирования продуктивной толщины залежи;
- 4) принятие решения о представлении каждого подсчётного параметра в виде вероятностного распределения либо о применении упрощённого подхода - с использованием констант для слабо варьируемых параметров или же единого вероятностного распределения для произведения этих параметров.

Второй и третий этапы отдельно проанализированы в работе применительно к моделированию площади залежи. Показано, что в большинстве случаев данный параметр играет определяющую роль. Проанализированы доводы за и против использования логнормального распределения для моделирования площади, предложен подход к формированию логнормального распределения, позволяющий избежать занижения значений.

Для третьего, ключевого из перечисленных выше этапов, отдельно рассмотрена проблема выбора нижних пределов (в том числе условных) для вероятностных распределений параметров. С использованием условного понятия «минимальной залежи», показана логическая связь между трактовкой вероятности действия геологических факторов и нижними пределами распределений подсчётных параметров.

Наряду с упоминающимися во многих публикациях корреляциями между разными подсчётными параметрами в пределах единой залежи (например, коэффициент пористости - коэффициент нефтенасыщенности), в работе выделен и другой тип корреляций: между значениями одного и того же подсчётного параметра в разных подсчётных объектах. По аналогии с настройкой действия геологических факторов, структура матрицы поисковых объектов, лежащая в основе разработанного метода, позволяет прописать корреляционные зависимости подсчётных параметров, которые также действуют либо вдоль строк (в пределах пласта), либо вдоль столбцов (в пределах структуры).

В главе приведены результаты расчётов, показывающих эффект от учёта или неучёта корреляций обоих типов для результирующего вероятностного распределения ресурсов. Показано, что в обоих случаях учёт корреляций приводит к возрастанию дисперсии распределения. Значение  $P_{10}$  уменьшается, а  $P_{90}$  - увеличивается<sup>1</sup>. Значение  $P_{50}$  уменьшается, если распределение ресурсов

---

<sup>1</sup> В соответствии с принятым в мат. статистике определением квантилей,  $P_{10} \leq P_{50} \leq P_{90}$ . Данный вопрос рассматривается в Главе 1 (раздел 1.5, стр. 30).

вытянуто в области высоких значений, что имеет место в большинстве случаев. Математическое ожидание при учёте корреляций первого типа - увеличивается, при учёте корреляций второго типа - не меняется. Последнее объясняется тем, что в первом случае коррелируемые величины перемножаются (подсчётные параметры), а во втором - суммируются (ресурсы отдельных подсчётных объектов). В качестве иллюстрации на рисунке 3 представлены два варианта расчётов для модели одного пласта и трёх структур: с учётом и без учёта корреляций 2-го типа (в разделе 2.5 диссертации пример описан более подробно).

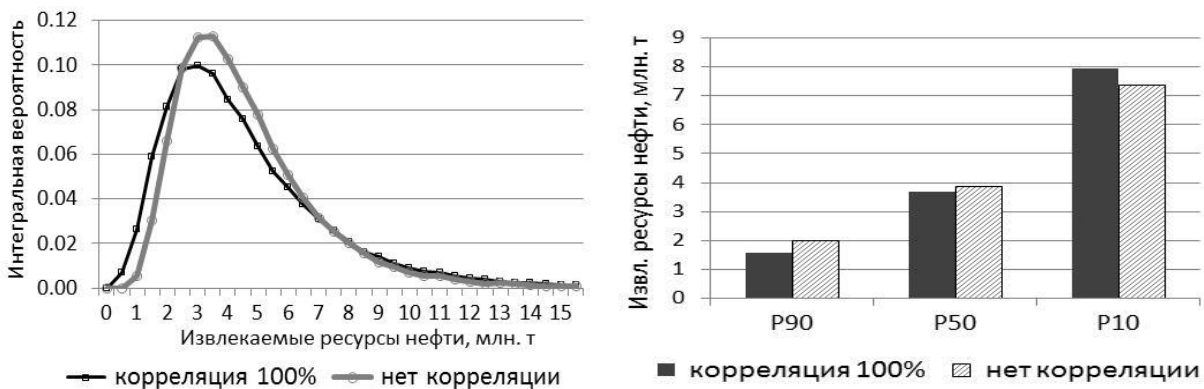


Рисунок 3 –Распределение ресурсов с учётом и без учёта корреляции между значениями подсчётных параметров в разных залежах

Сопоставление результатов расчётов, выполненных с учётом и без учёта корреляций геологических факторов, с результатами расчётов, выполненных с учётом и без учёта корреляций подсчётных параметров, демонстрирует, что в первом случае расхождение между результатами оказывается более значительным. Это объясняется тем, что при учёте корреляций геологических факторов в каждой вероятностной реализации МК меняется *количество залежей*, в то время как корреляции между подсчётными параметрами регулируют только перераспределение повышенных и пониженных значений подсчётных параметров между реализациями МК. Влияние количества залежей

на величину суммарных ресурсов в общем случае оказывается более существенным.

В разделе 2.6 второй главы приведены прогнозные оценки ресурсной базы по группе из 11 участков, на которых часть или все структуры были в дальнейшем опробованы бурением. Анализ данных показывает приемлемую сходимость прогноза с фактом.

В **третьей главе** изложенный метод рассматривается в общем контексте технико-экономической оценки поисковых активов. В частности, анализируются дополнительные возможности, открывающиеся на этапах расчёта технологических показателей разработки, поверхностного обустройства и экономики.

В первых двух разделах главы обосновывается необходимость учёта набора сценарных вариантов при выполнении технико-экономической оценки (ТЭО) поисковых лицензионных участков. Показано, что переход от вероятностной оценки ресурсов к детерминистическому расчёту сценарных вариантов добычи, обустройства и экономики приводит к необходимости представлять непрерывное вероятностное распределение ресурсов в виде набора дискретных значений с соответствующими весовыми коэффициентами. Приведены различные варианты такой дискретизации.

Поставлена задача по оптимизации сценарных расчётов: каждому из дискретных значений ресурсов сопоставить набор наиболее вероятных для него значений ключевых подсчётных параметров. Например, для корректного учёта капитальных затрат на поверхностное обустройство необходимо спрогнозировать наиболее вероятное для каждого сценарного варианта количество и набор подтвердившихся структур. Для расчёта проектного количества эксплуатационных скважин – поставить каждому варианту в соответствие обоснованные значения площади нефтеносности.

Показано, что некорректно использовать для этих целей конкретные наборы значений параметров, стоящие непосредственно в тех реализациях МК, с которых «сняты» соответствующие процент или смоделированного



распределения ресурсов при его дискретизации (например,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  и  $P_{90}$ ). В связи со стохастической природой метода, данные значения могут характеризоваться произвольным разбросом, а потому они не являются представительными для соответствующей величины запасов и не должны использоваться в этой роли в дальнейших расчётах.

Для решения данной задачи предложена методика статистического соотнесения дискретных значений ресурсов с представительными для них значениями подсчётных параметров. Методика основана на статистическом анализе конечной совокупности вероятностных реализаций из двумерного массива параметров, формируемого в результате совместного моделирования поисковых объектов (вероятностное распределение суммарных ресурсов является составной частью данного массива). Для каждого дискретного значения ресурсов анализируются реализации, лежащие в симметричной окрестности вокруг соответствующего процентиля вероятностного распределения ресурсов. В результате удаётся определить значения параметров, представительные для каждой конкретной величины ресурсов.

Таблица 1 - Определение «представительных» значений параметров в окрестностях целевых процентилей, на примере площади залежи

№ реализации	1	2	...	901	...	999	1000	1001	...	1100	...	...	4999	5000	5001	...	...	...	8999	9000	9001	...	...	9999	10000
процентиль	$P_0$	$P_{0.01}$	...	$P_{09}$	...	$P_{09.99}$	$P_{10}$	$P_{10.01}$	...	$P_{11}$	...	...	$P_{49.99}$	$P_{50}$	$P_{50.01}$	...	...	...	$P_{89.99}$	$P_{90}$	$P_{90.01}$	...	...	$P_{99.99}$	$P_{100}$
ресурсы, тыс.т	31.1	34.4	...	246.7	...	261.2	261.3	261.4	...	273.4	...	...	831.0	831.3	831.3	...	...	...	2578	2580	2582	...	...	19416	22254
площадь, км <sup>2</sup>	1.2	0.8	...	4.2	...	4.1	2.8	3.0	...	4.6	...	...	9.8	4.4	5.7	...	...	...	12.0	33.9	32.0	...	...	37.8	50.1
эф. н. толщ., м	1.0	1.7	...	1.7	...	2.1	2.9	2.5	...	1.8	...	...	3.0	6.6	5.1	...	...	...	6.6	2.1	3.1	...	...	16.6	16.7
пористость, %	19.7	19.2	...	23.0	...	20.9	19.8	22.5	...	18.9	...	...	21.0	19.7	18.9	...	...	...	21.5	21.1	16.5	...	...	22.6	20.6

Реализация предложенного подхода визуализирована в таблице 1, содержащей 10 тысяч реализаций метода МК для случая одной залежи. Проведённый анализ – осреднение 200 значений в каждой из трёх окрестностей – позволил присвоить трём сценарным вариантам следующие значения площади нефтеносности:  $P_{10} = 3.9$  км<sup>2</sup>,  $P_{50} = 8.8$  км<sup>2</sup>,  $P_{90} = 17.0$  км<sup>2</sup>. Если бы

значения площадей были взяты непосредственно из реализаций МК, относящихся к соответствующим процентилем (2.8, 4.4 и 33.9 км<sup>2</sup>), то ошибки составили бы для P<sub>10</sub> – 28%, для P<sub>50</sub> – 50%, для P<sub>90</sub> – 99%.

В таблице 2 представлен более сложный статистический анализ реализаций МК, позволяющий каждому из трёх процентилей поставить в соответствие наиболее вероятное количество залежей, а также их наиболее вероятную конфигурацию. Расчёт выполнен для случая двух пластов трёх структур. В анализе учитывается как частота встречаемости каждой залежи в окрестности соответствующего процентиля, так и статистический вклад каждой залежи в величину суммарных ресурсов данного процентиля. Кроме того, при формировании конфигурации залежей изначально фиксируется ожидаемый для данного процентиля набор структур. Результатом анализа являются наиболее вероятные для каждого из трёх сценарных вариантов наборы залежей, с конкретными величинами ресурсов. Они приведены в правой части таблицы.

Таблица 2 – Формирование ожидаемых наборов структур по вариантам

		«встречаемость», д.е.			"вклад" в ресурсы, тыс. т			наборы залежей, тыс. т		
		Стр. 1	Стр. 2	Стр. 3	Стр. 1	Стр. 2	Стр. 3	Стр. 1	Стр. 2	Стр. 3
P <sub>10</sub>	Пласт 1	0.51	0.21	0.09	224	92	40	483	0	0
	Пласт 2	0.23	0.04	0.01	102	18	7	0	0	0
P <sub>50</sub>	Пласт 1	0.58	0.34	0.13	459	338	118	858	0	0
	Пласт 2	0.51	0.28	0.11	641	371	125	1197	0	0
P <sub>90</sub>	Пласт 1	0.54	0.55	0.26	684	1239	482	1028	1859	0
	Пласт 2	0.51	0.67	0.24	1022	2538	737	0	3811	0

В главе приведён также более наглядный пример практического применения разработанного подхода – схемы поверхностного обустройства, построенные в рамках ТЭО Губеевского лицензионного участка для сценарных вариантов P<sub>10</sub>, P<sub>50</sub> и P<sub>90</sub>.

В четвёртой главе поставлена и решена задача по разработке математического аппарата для аналитического расчёта вероятности существования месторождения - с учётом введённого во второй главе разделения геологических факторов на протяжённые и локальные

составляющие, для произвольного количества поисковых объектов. Аналитическое решение призвано дополнить предложенный во второй главе подход к оценке вероятности наличия месторождения через отношение количества вероятностных реализаций МК, в которых подтвердилась хотя бы одна залежь, к общему количеству реализаций: поскольку метод МК имеет численную природу, то получаемое таким образом значение является приблизительным (причём при увеличении количества вероятностных реализаций МК погрешность убывает относительно медленно).

Для построения аналитического решения сначала проанализирован частный случай: один потенциально продуктивный пласт,  $n$  перспективных структур. Для этого частного случая получена следующая формула:

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

где  $P_g$  - вероятность существования хотя бы одной залежи,  $M$  - вероятность наличия материнских пород,  $R$  - вероятность подтверждения региональных составляющих геологических факторов для коллектора, покрышки и миграции (для рассматриваемого единственного пласта),  $S_i$  - вероятность наличия структурного замыкания в  $i$ -й структуре;  $L_i$  - совокупность локальных составляющих геологических факторов в конкретном поисковом объекте.

Для общего случая –  $n$  структур и  $m$  пластов получена формула, которая и является основным теоретическим результатом четвёртой главы:

$$P_g = M \left[ 1 - \sum_{p=0}^m \sum_{y=1}^{C_m^p} \left( \prod_{j=1}^p (R_j) \cdot \prod_{j=p+1}^m (1-R_j) \cdot \sum_{k=0}^n \sum_{x=1}^{C_n^k} \left( \prod_{i=1}^k \left( S_i \prod_{jj=1}^p (1-L_{jj}^i) \right) \cdot \prod_{i=k+1}^n (1-S_i) \right) \right) \right] \quad (2)$$

На рисунке 4 представлены пояснения по структуре данного выражения.

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

регионально подтвердившиеся пласты      регионально не подтвердившиеся пласты      подтвердившиеся структуры      не подтвердившиеся структуры

↓      ↓      ↓      ↓

двойное суммирование по всем возможным наборам регионально подтвердившихся пластов      двойное суммирование по всем возможным наборам подтвердившихся структур      Только по регионально подтвердившимся пластам

Рисунок 4 - Пояснение структуры формулы 2

В разделе 4.4 приведены результаты серии численных расчётов для демонстрации корректности полученной формулы. Показано, что значение вероятности, рассчитываемое описанным во второй главе численным методом, при увеличении количества реализаций МК демонстрирует сходимость к решению, полученному по данной аналитической формуле.

В заключительном разделе главы указаны возможные области применения разработанного математического аппарата: кроме непосредственно расчёта вероятности существования месторождения, на основе полученных аналитических выражений можно построить алгоритм для формирования оптимальной (с точки зрения теории рисков) очередности опоискования группы структур бурением.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Рассмотрены существующие в науке подходы к вероятностной оценке ресурсов УВ и выделены два ключевых аспекта неопределённости ресурсной базы: неопределённость, связанная с наличием или отсутствием залежей УВ на оцениваемой площади, и неопределённость, связанная с возможным количеством и размерами предполагаемых залежей. Рассмотрен аналитический инструментарий, традиционно применяемый для учёта этих двух неопределённостей: 1) анализ геологических факторов и присвоение каждому из них вероятности его реализации с перемножением этих вероятностей; 2) задание вероятностных распределений подсчётных параметров и

перемножение их методом Монте-Карло (МК) с получением вероятностного распределения ресурсов соответствующего подсчётного объекта.

2 Предложен и обоснован принцип интегрированной оценки неопределённостей, основанный на совместном моделировании методом МК как подсчётных параметров, так и геологических факторов всех поисковых объектов одновременно (решена первая задача).

3 Решена задача обеспечения корректного учёта взаимных зависимостей между наличием либо отсутствием действия каждого геологического фактора в разных поисковых объектах – решена за счёт разделения геологических факторов на протяжённые и локальные составляющие.

4 Проработан методический подход к вероятностному моделированию подсчётных параметров потенциальных залежей (задача третья). Процесс построения вероятностных распределений для подсчётных параметров разделён на три этапа, по каждому из которых сформирован ряд рекомендаций: 1) определение набора подсчётных параметров, подлежащих моделированию; 2) выбор типа вероятностного распределения; 3) внесение количественных параметров распределения.

5 Решена проблема обеспечения корректного учёта корреляций между значениями подсчётных параметров (задача четвёртая). Выделены в отдельную категорию пространственные корреляции между значениями одного параметра в разных поисковых объектах – в пределах единого пласта или структуры.

6 Осуществлена адаптация разработанного метода оценки ресурсов для проведения сценарных расчётов разработки и поверхностного обустройства предполагаемого месторождения, с использованием предложенной автором методики статистического анализа вероятностных реализаций метода МК, позволяющей каждому сценарному варианту поставить в соответствие наиболее вероятную для него конфигурацию подсчётных объектов (структур, пластов, залежей), а также наиболее вероятные значения их параметров.

7 Получены аналитические выражения для расчёта вероятности существования месторождения на оцениваемой площади.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты опубликованы в 8 научных трудах, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ:

1. Шатров, С. В. Вероятностная оценка геолого-разведочных активов углеводородного сырья / С. В. Шатров // Нефтяное хозяйство. – 2012. - №4. - С.13-17.

2. Шатров, С. В. Вероятностная оценка ресурсов нефти блока 12 в Ираке / С. В. Шатров // Нефтяное хозяйство. – 2013. - №4. - С. 86-89.

3. Шатров, С. В. Расчёт вероятности открытия месторождения с учётом взаимной зависимости параметров в пределах оцениваемых пластов и структур / С. В. Шатров // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. - Т.10. - №2. - 14 с.

4. Шатров, С. В. Аналитические формулы расчёта вероятности открытия месторождения для усложнённых моделей зависимости геологических факторов / С. В. Шатров // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2015. - Т.10. №4. 20 с.

5. Шатров, С. В. Дискретизация вероятностных распределений для формирования дерева вариантов при оценке геологоразведочных активов углеводородного сырья / С. В. Шатров, Ю. А. Котенёв // Нефтегазовое дело. 2015. - Т.13. - №3. - С.22-29.

*В других изданиях:*

6. Шатров, С. В. Критика распространённого подхода к вероятностному моделированию площади при оценке ресурсов методом Монте-Карло / С. В. Шатров // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в нефтегазовом деле - 2015». Сборник трудов. - Уфа. - 2015. - Т.1. - С. 292-299.

7. Николенко, В. В. Выбор распределения для моделирования площади при вероятностной оценке ресурсов углеводородов методом Монте-Карло /

В. В. Николенко, С. В. Шатров // Сборник трудов международной конференции «Трудноизвлекаемые запасы и нетрадиционные источники углеводородного сырья. Проблемы, перспективы, прогнозы». - 2015. - CD-ROM. 12 с.

8. Шатров, С.В. Новый подход к вычислению условных вероятностей продуктивности перспективных структур / С.В. Шатров // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Инновации и наукоемкие технологии в образовании и экономике» (г. Уфа, 2-3 апреля 2018 г.). -Ч.1. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2018. - С. 157-160.

Подписано в печать 25.04.2018 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая. Тираж 100 экз. Заказ 045.  
Гарнитура «TimesNewRoman». Отпечатано в типографии  
«ПЕЧАТНЫЙ ДОМЪ» ИП ВЕРКО.  
Объем 1 п.л. Уфа, Карла Маркса 12 корп. 5/1,  
т/ф: 27-27-600, 27-29-123