

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РЕСУРСОВ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

А. В. Макаров

Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань,
Российская Федерация

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7987-1842>, ✉ brad-pit1999@mail.ru

Аннотация: в статье рассматривается комплексный подход к оценке ресурсов газовых месторождений, основанный на интеграции статистических методов и динамического моделирования. Предложена математическая модель, учитывающая геолого-физические особенности пласта и фильтрационные характеристики. Разработан алгоритм, позволяющий производить оценку с учетом неопределенностей исходных данных. Приведены результаты апробации метода на реальных месторождениях, показавшие его эффективность по сравнению с традиционными подходами.

Ключевые слова: газовые месторождения, оценка ресурсов, математическая модель, алгоритм, фильтрационные характеристики, неопределенность данных, стохастическое моделирование.

Для цитирования: Макаров А. В. Стохастический подход к оценке ресурсов газовых месторождений в условиях неопределенности исходных данных. *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):126–131.

Поступила в редакцию: 20.01.2026.

В окончательном варианте: 18.02.2026.

A STOCHASTIC APPROACH TO ESTIMATING GAS FIELD RESOURCES UNDER INPUT DATA UNCERTAINTY

A. V. Makarov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7987-1842>, ✉ brad-pit1999@mail.ru

Abstract: we studied an integrated approach to estimating gas field resources by combining statistical methods with dynamic reservoir simulation. We developed a simulation model that accounts for geological and physical properties of the reservoir, as well as fluid flow characteristics. We proposed an algorithm that enables resource estimation under input data uncertainty. We tested the method on real gas fields and compared it with conventional approaches. The results show that the proposed approach improves estimation reliability and performance.

Keywords: gas fields, resource assessment, simulation model, algorithm, filtration characteristics, data uncertainty, stochastic modeling.

Cite this article: Makarov A. V. A Stochastic Approach to Estimating Gas Field Resources under Input Data Uncertainty. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):126–131.

Original article submitted: 20.01.2026.

Revision submitted: 18.02.2026.

Введение

Оценка ресурсов газовых месторождений представляет собой фундаментальную задачу в области нефтегазовой геологии и проектирования разработки месторождений [1–3]. Основная цель — определение потенциального количества углеводородов, которое может быть извлечено из недр с достаточной степенью экономической эффективности. Точность такой оценки напрямую влияет на стратегические решения: от обоснования инвестиций в разведку и обустройство до проектирования систем добычи и транспортировки газа [4]. Таким образом, ошибки на этапе оценки ресурсов могут привести к значительным финансовым потерям и нерациональному использованию недр.

Развитие стохастического подхода к оценке ресурсов газовых месторождений в условиях неопределенности исходных данных стало перспективным благодаря развитию информационных

и вычислительных технологий в самых различных сферах деятельности [5–9], а не только в газонефтяной отрасли [10–12].

Актуальность разработки совершенных методов оценки обусловлена возрастающей сложностью вводимых в разработку объектов. Новые месторождения часто характеризуются сложным геологическим строением, неоднородностью коллекторов, низкой проницаемостью и наличием зон с трудноизвлекаемыми запасами. Традиционные детерминистические подходы, такие как объемный метод, опирающиеся на усредненные значения параметров пласта, не способны адекватно учесть присущую этим параметрам природную изменчивость и стохастическую неопределенность. Использование единого «усредненного» набора данных маскирует реальные риски, что может привести как к излишнему оптимизму, так и к необоснованному пессимизму в оценках.

В связи с этим возникает необходимость в методах, которые не просто дают точечную оценку ресурсов, а позволяют количественно определить диапазон возможных значений и связанные с ними вероятности. Такой вероятностный подход обеспечивает более надежную основу для принятия управленческих решений в условиях риска. Данное исследование направлено на разработку именно такого метода, интегрирующего математическое моделирование фильтрационных процессов с алгоритмами статистического анализа для комплексной оценки ресурсов газовых месторождений с явным учетом неопределенностей [13].

В основе предлагаемого подхода лежит математическая модель фильтрации газа в пористой среде, базирующаяся на фундаментальных законах сохранения массы и состояния вещества. Для адекватного описания поведения реального газа в условиях изменяющихся пластовых давлений используется модифицированное уравнение фильтрации, учитывающее зависимость ключевых параметров от давления.

Основное дифференциальное уравнение [14], описывающее нестационарное распределение давления P в трехмерном пласте, может быть записано в следующем виде:

$$\operatorname{div} [(k(r) / \mu(P)) * \rho(P) * \operatorname{grad}(P)] = \partial / \partial t [\varphi(r) * \rho(P)] + Q(r, t),$$

где r — пространственная координата; t — время; $k(r)$ — абсолютная проницаемость пласта, являющаяся случайным полем, отражающим природную неоднородность коллектора; $\mu(P)$ — вязкость газа, зависящая от давления; $\rho(P)$ — плотность газа, рассчитываемая через уравнение состояния реального газа; $\varphi(r)$ — пористость, также представляемая как случайное поле; $Q(r, t)$ — функция источник/сток, моделирующая отбор или закачку газа через скважины.

Для учета неопределенностей геологического строения параметры $k(r)$ и $\varphi(r)$ задаются не единичными значениями, а своими статистическими характеристиками: математическими ожиданиями $M[k]$, $M[\varphi]$, дисперсиями $D[k]$, $D[\varphi]$ и пространственными корреляционными функциями. Это позволяет трансформировать детерминистическую модель в стохастическую.

Метод оценки ресурсов, построенный на данной модели, реализуется посредством специализированного алгоритма, который можно представить в виде последовательности вычислительных этапов.

Алгоритм оценки ресурсов:

1) Генерация ансамбля геологических реализаций представлена на рис. 1. На основе данных геофизических исследований скважин и сейсморазведки генерируется множество (ансамбль) равновероятных моделей пласта. Каждая модель представляет собой одну статистическую реализацию полей проницаемости $k(r)$ и пористости $\varphi(r)$, удовлетворяющую заданным статистическим характеристикам. Этот этап часто визуализируется как создание множества альтернативных «срезов» или «томограмм» пласта.

2) Динамическое моделирование. Для каждой сгенерированной геологической реализации производится численное решение уравнения фильтрации. В результате рассчитывается динамика изменения пластового давления и дебитов скважин во времени, что позволяет определить величину начальных извлекаемых ресурсов (G) для данной конкретной реализации модели.

3) Статистический анализ результатов. После обработки всего ансамбля моделей (несколько сотен или тысяч запусков) формируется итоговое распределение вероятностей для величины G . Анализируются его основные статистические моменты: математическое ожидание $M[G]$, дисперсия $D[G]$, а также строится доверительный интервал, например, $P10 - P50 - P90$. Значение $P90$

представляет собой консервативную оценку, указывающую, что с вероятностью 90% фактический результат окажется выше этой величины. Медианное значение $P50$ делит распределение пополам, означая равную вероятность как большего, так и меньшего итога. Оптимистичный сценарий $P10$ показывает, что с вероятностью 90% результат может оказаться ниже этого уровня, но с 10%-ной вероятностью его превысит. Таким образом, интервал от $P90$ до $P10$ наглядно отображает спектр геологической неопределенности, предоставляя специалистам не единое число, а обоснованный коридор для принятия решений, где $P90$ часто служит основой для подсчета запасов, а $P10$ отражает потенциальный ресурсный подъем. Этот вероятностный подход дает исчерпывающее представление как о базовом сценарии, так и о возможных отклонениях в обе стороны.

4) Анализ чувствительности. На данном этапе идентифицируются входные параметры модели (например, эффективная мощность пласта, проницаемость, начальное давление), которые вносят наибольший вклад в общую дисперсию $D[G]$ результата. Это позволяет оптимизировать программы дополнительных исследований, сфокусировавшись на сборе данных по наиболее влиятельным параметрам.

Критерием остановки вычислительного процесса является стабилизация статистических характеристик выходного распределения G при увеличении количества реализаций.

Апробация и результаты

Предложенный метод был апробирован на данных одного из месторождений Восточной Сибири [15]. Сравнение с традиционным объемным методом показало, что учет неопределенности приводит к расширению диапазона возможных значений извлекаемых ресурсов на 20-25%. В то время как объемный метод дал единственную оценку, стохастический подход позволил построить всю кривую распределения вероятностей. Это дало возможность количественно оценить риски: например, определить, что с вероятностью 90% ресурсы месторождения превышают значение $P90$ и с вероятностью 10% — значение $P10$. Значение $P90$ представляет собой консервативную оценку, указывающую, что с вероятностью 90% фактический результат окажется выше этой величины.

Анализ чувствительности выявил, что наибольшее влияние на конечный результат оказывает неопределенность в оценке эффективной мощности пласта и его проницаемости, в то время как влияние вариаций начального пластового давления оказалось менее значимым. Этот вывод имеет практическую ценность, так как указывает на приоритетность уточнения именно геометрической модели залежи и фильтрационно-емкостных свойств при проведении дальнейших геологоразведочных работ.

Представленный график (рис. 2) служит наглядным инструментом для комплексного анализа, раскрывая суть примененного стохастического подхода. Он не только демонстрирует принципиальное отличие между единственной цифрой, полученной по традиционной методологии, и целым спектром вероятностных сценариев, но и проясняет источники этой неопределенности. Визуализация позволяет сразу оценить, насколько шире становится диапазон возможных значений ресурсов при учете геологических рисков, а сопутствующий анализ чувствительности указывает на ключевые параметры, требующие первоочередного внимания в ходе дальнейших исследований. Такой объединенный формат презентации данных эффективно подчеркивает практическую ценность метода, трансформируя абстрактную статистику в конкретные ориентиры для принятия управленческих решений.

Визуализация объединяет ключевые выводы исследования в целостную картину. Левая часть графика демонстрирует принципиальное преимущество стохастического подхода над классическим объемным методом. Вместо единственной точечной оценки в 85 млн тонн новый метод раскрывает целый спектр вероятных сценариев — от консервативных 70 млн тонн ($P90$) до оптимистичных 105 млн тонн ($P10$). Ширина этого «коридора неопределенности», на 20–25% превышающего исходную оценку, количественно характеризует риск, присущий геологической модели месторождения. Правая часть диаграммы прямо указывает на источники этой неопределенности, ранжируя влияющие факторы: наибольший вклад вносят эффективная мощность пласта (45%) и его проницаемость (40%), тогда как начальное пластовое давление играет второстепенную роль (15%). Таким образом, график не только подтверждает, что вероятностная оценка дает более полное представление о ресурсах, но и определяет стратегические приоритеты для дальнейшего изучения недр, фокусируя внимание на уточнении геометрии залежи и фильтрационных свойств.

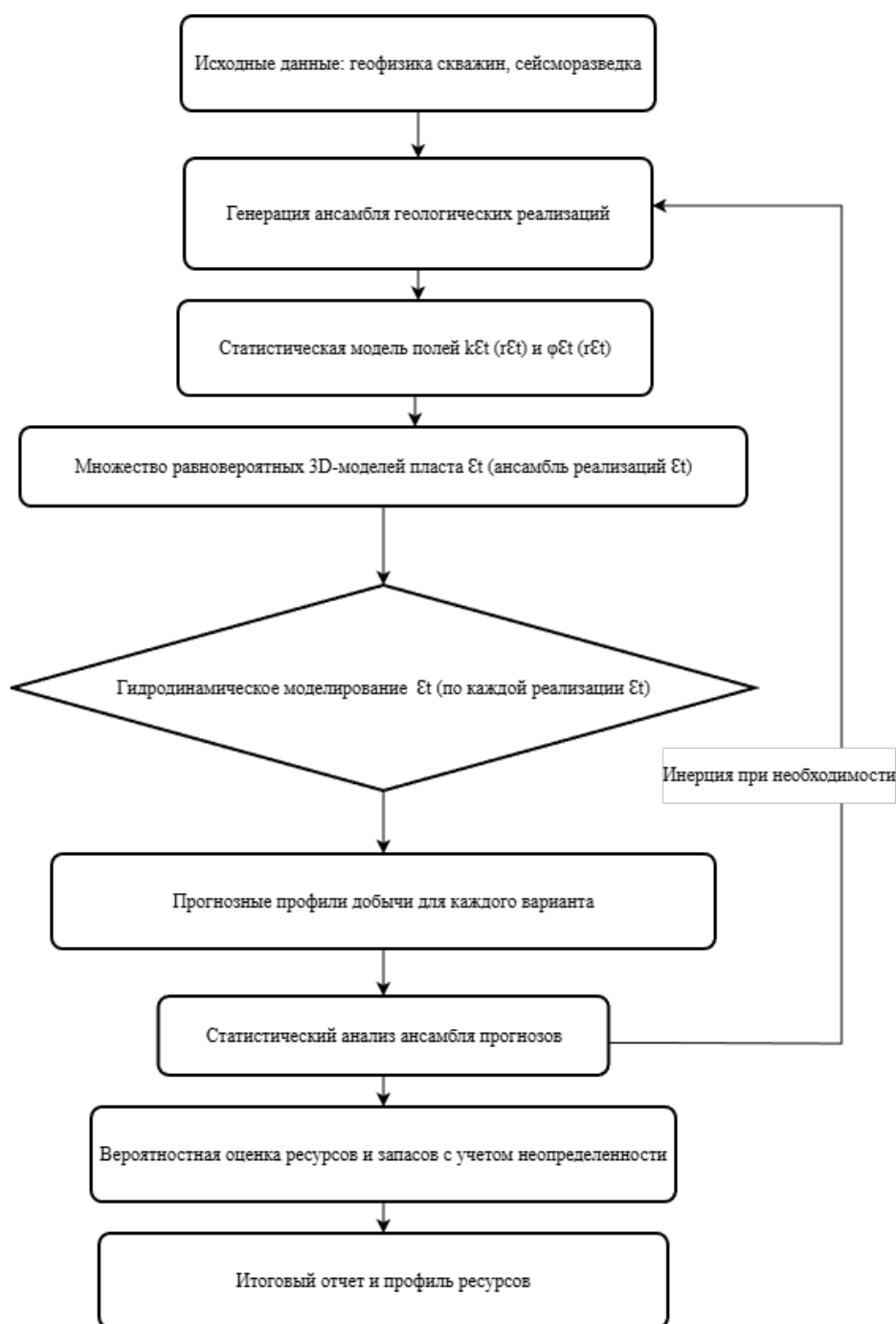


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки ресурсов

Заключение

Разработанный подход предоставляет инструмент для более обоснованной и надежной оценки ресурсов газовых месторождений, явным образом учитывающий неопределенность исходной геологической и физической информации. Использование стохастического подхода позволяет перейти от точечных оценок к вероятностным, что критически важно для управления рисками при проектировании разработки и обосновании инвестиций. Полученные результаты демонстрируют практическую значимость предложенного подхода. Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции данного метода с алгоритмами машинного обучения для автоматизации процесса построения и калибровки геологических моделей, а также для ускорения ресурсоемких вычислений при динамическом моделировании.



Рис. 2. Сравнение методов оценки ресурсов и анализ влияния факторов

ЛИТЕРАТУРА

- Макаров А. В. Выбор критериев для оценки ресурсов нефтегазовых месторождений. *Наука и практика — 2023*: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции. 2024:467–470. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65063957&pff=1>.
- Макаров А. В. Целенаправленность критериев для оценки ресурсов нефтегазовых месторождений. *Наука и практика — 2023*: материалы Всероссийской междисциплинарной научной конференции. 2024:471–473. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=65063961&pff=1>.
- Макаров А. В., Шуршев В. Ф. Методы оценки ресурсов газовых месторождений. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал*. 2024;1:110–114. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-110-114.
- Колотилов Ю. В., Шуршев В. Ф., Квятковская И. Ю. *Формализация задачи системного анализа: оценка риска эксплуатации объектов добычи и транспорта углеводородов*. М.: Известия; 2019. 160 с.
- Гайрабекова Т. И., Шуршев В. Ф. Разработка и последовательность реализации компонентов системы информационно-аналитического обеспечения. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2023;4:104–108. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-104-108.
- Хоменко Т. В., Шуршев В. Ф. Система интеллектуальной поддержки принятия решений на основе сверточной нейронной сети. *Информационные системы и технологии*. 2025;5:113–121. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=83048668>.
- Шуршев Т. В. Выбор средств разработки и проектирование интеллектуальной информационной системы на основе искусственного интеллекта. *Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского моря*: материалы XV Международной научно-практической конференции. 2024:312–315. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=70154713&pff=1>.
- Шуршев Т. В. Гибридные рекомендательные методы. *России — творческую молодежь*: материалы XVIII Всероссийской научно-практической студенческой конференции. 2025;3:186–189. Режим доступа: https://new.kti.ru/docs/konf/studkonf2025/%D1%82%D0%BE%D0%BC_3.pdf.
- Шуршев Т. В. Холодный старт в информационных аналитических системах. *Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития*: материалы Международной научно-практической конференции, проводимой в рамках Международного научно-практического форума «Инженерия 4.0 — 2025», посвященного 35-летию Российской инженерной академии. 2025:113–115. Режим доступа: [https://iti.khsu.ru/files/science/IT-2025/inzhenernyie_tehnologii_\(2025\).pdf](https://iti.khsu.ru/files/science/IT-2025/inzhenernyie_tehnologii_(2025).pdf).

10. Афанаскин И. В., Вольпин С. Г., Еникеев Б. Н., Ипатов А. И., Кременецкий М. И., Смирнов О. А., Федоров В. Н., Шагиев Р. Г., Шагиев Р. Р. Современное состояние исследований скважин и пластов нефтегазовых месторождений в России. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2022;2:45–86. DOI: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art5>.
11. Шуршев Т. В. Интеллектуальная поддержка принятия решений при распознавании дефектов сварных швов нефтяных трубопроводов. *Информационные технологии и технические средства управления (ICCT-2023)*: материалы VII Международной научной конференции. 2023:178–179.
12. Chen Z. Reservoir Simulation: Mathematical Techniques in Oil Recovery. SIAM; 2008. 250 p.
13. Popov P. A. et al. Multiscale Modeling and Simulations of Flows in Naturally Fractured Karst Reservoirs. *Communications in Computational Physics*. 2009;6(1):162–184.
14. Lie K. A. *An Introduction to Reservoir Simulation Using MATLAB*. Cambridge University Press; 2019. 318 p. DOI: 10.1017/9781108591416.
15. Андронов С. А., Горенкова Е. А., Гомонов А. А., Максименко И. А. Подходы к выбору реализаций при вероятностном моделировании геологической модели и анализ влияния на прогнозный профиль добычи. *ПРОНЕФТЬ: Профессионально о нефти*. 2023;8(4):25–32.