ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 553.98:553.04

Вероятностная геолого-экономическая оценка трудноизвлекаемых запасов карбонатного девона

Б.Г. Ганиев, А.А. Лутфуллин, Р.М. Хабипов, К.Д. Шуматбаев, Е.О. Беляков, Р.Р. Аглямов
Департамент разработки месторождений СП «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, Альметьевск, Российская Федерация

Представлена вероятностная оценка карбонатных объектов верхнего девона с учётом неоднородности продуктивной толщи, условий осадконакопления и сохранности залежей. Для заволжского, данково-лебедянского, елецкого и евланово-ливенского горизонтов сохранены самостоятельные геологические характеристики. Палеогеографические и прогнозные карты связаны с ресурсной оценкой, пятифакторной моделью шанса геологического успеха gCoS и сценарным расчётом ожидаемой денежной стоимости EMV. На примере данково-лебедянского объекта показана схема экономической оценки. Ценность дополнительной информации VOI рассматривается как основание выбора дальнейших исследований.

Ключевые слова:карбонатный девон; трудноизвлекаемые запасы; заволжский горизонт; данково-лебедянский горизонт; неоднородность; ресурсы нефти; геологический риск; ожидаемая денежная стоимость; EMV; ценность дополнительной информации; VOI.

Для цитирования: Б.Г. Ганиев, А.А. Лутфуллин, Р.М. Хабипов, К.Д. Шуматбаев, Е.О. Беляков, Р.Р. Аглямов (2026). Вероятностная геолого-экономическая оценка трудноизвлекаемых запасов карбонатного девона Трудноизвлекаемые запасы,1(3), с. 12-22.

Probabilistic geological and economic assessment of hard-to-recover reserves in Devonian carbonates

B.G. Ganiev, A.A. Lutfullin, R.M. Khabipov, K.D. Shumatbaev, E.O. Belyakov, R.R. Aglyamov
Field Development Department, Tatneft-Dobycha, PJSC Tatneft, Almetyevsk, Russian Federation

A probabilistic assessment of Upper Devonian carbonate targets is presented, taking into account reservoir heterogeneity, depositional conditions and the preservation of hydrocarbon accumulations. The distinct geological characteristics of the Zavolzhsky, Dankovo-Lebedyansky, Elets and Evlanovo-Liven horizons are retained. Palaeogeographic and predictive maps are linked to resource assessment, a five-factor model of geological chance of success (gCoS) and scenario-based calculation of expected monetary value (EMV). An economic assessment framework is illustrated using a Dankovo-Lebedyansky target as an example. The value of additional information (VOI) is considered as a basis for selecting further studies.

Keywords: carbonate Devonian, hard-to-recover reserves, Zavolzhsky horizon, Dankovo-Lebedyansky horizon, heterogeneity, oil resources, geological risk, expected monetary value, value of information, VOI.

Recommended citation: Ganiev B.G., Lutfullin A.A., Khabipov R.M., Shumatbaev K.D., Belyakov E.O., Aglyamov R.R. (2026). Probabilistic geological and economic assessment of hard-to-recover reserves in Devonian carbonates. Hard-to-recover reserves, 1(3), pp. 12-22.

Введение

Неоднородность карбонатного девона проявляется в чередовании проницаемых прослоев и плотных разделов, изменяющихся по площади и толщине. Её формирование связано с глубиной морского бассейна, поступлением глинистого материала и положением органогенных построек (Хисамов и др., 2010; Хисамов и др., 2016). Поэтому ресурсная оценка требует согласованного описания строения продуктивной толщи и условий существования залежей.

Цель работы — связать геологическую характеристику заволжских, данково-лебедянских и смежных верхнедевонских объектов с вероятностной оценкой ресурсов, геологического успеха и экономического результата. На этой основе рассматривается выбор исследований, способных изменить решение об изучении и освоении объекта.

Методика вероятностной оценки ресурсов

Ресурсы оцениваются объёмным методом. Для исходных параметров задаются диапазоны значений и законы распределения, позволяющие учитывать возможные варианты строения залежи (Алтунин и др., 2017):

$$Q = F \cdot h_{эф} \cdot k_{п} \cdot k_{н} \cdot \theta \cdot \rho \qquad (1)$$

где Q — геологический объём нефти в массовом выражении; F — площадь; $h_{эф}$ — эффективная нефтенасыщенная толщина; $k_{п}$ и $k_{н}$ — коэффициенты пористости и нефтенасыщенности; θ — пересчётный коэффициент; ρ — плотность нефти.

Диапазон результата характеризуют уровни P10 (большая оценка), P50 (средний уровень) и P90 (меньшая оценка).

Наибольшая чувствительность установлена к пористости и эффективной нефтенасыщенной толщине: размах оценки составляет около 50% по каждому параметру. Для нефтенасыщенности он равен около 31%, для площади — около 21% (рисунок 1). Эти значения не являются долями одного целого.



Рис. 1. Чувствительность расчётной оценки к неопределённости исходных параметров

При задании диапазонов пористости и эффективной толщины необходимо учитывать строение проницаемой части разреза (Беляков и др., 2024).

Неоднородность продуктивной толщи карбонатного девона

Доля проницаемой части — отношение эффективной толщины к общей; используемое название «коэффициент песчанистости» не меняет его смысла для карбонатных пород. Коэффициент расчленённости характеризует среднее число проницаемых прослоев и вертикальную неоднородность горизонта.

Таблица 1 – Характеристики проницаемой части верхнедевонских горизонтов

Горизонт	Доля проницаемой части, доли единицы	Коэффициент расчленённости
Заволжский	0,58	5,15
Данково-лебедянский	0,50	3,98
Елецкий	0,52	3,67
Евланово-ливенский	0,42	5,59

Характеристики горизонтов приведены в таблице 1 и на рисунках 2 и 3. Они используются при построении геологической модели, а не для самостоятельного ранжирования объектов.

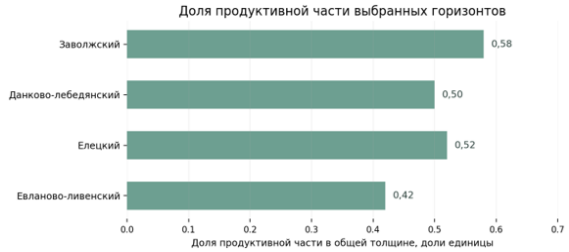


Рис. 2. Доля проницаемой части в продуктивной толще



Рисунок 3 Среднее число проницаемых интервалов в разрезе

Пространственное представление неоднородности

Площадное распространение, доля проницаемой части и расчленённость характеризуют разные стороны неоднородности. Их соотношение показано на рисунке 4 без привязки к конкретным скважинам.

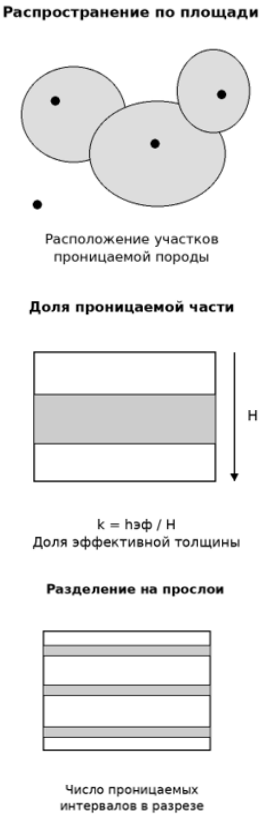


Рис. 4. Три стороны описания неоднородности продуктивной толщи

Одномерная модель пригодна для первичной оценки, но не отражает взаимного положения прослоев и межскважинных изменений. Крупномасштабная неоднородность уточняется пространственной моделью и не включается формально в одномерную вероятность наличия коллектора.

Геологическую основу пространственной модели задают условия осадконакопления, определяющие состав и распространение пород (рисунок 5). Их развитие для рассматриваемых горизонтов прослеживается далее по палеогеографическим реконструкциям.

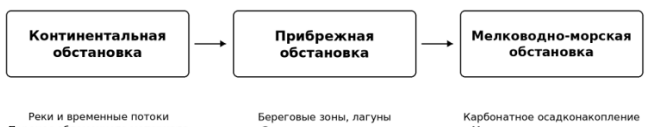


Рисунок 5 Обстановки накопления осадков и характер осадочного материала

Палеогеографические предпосылки формирования коллекторов

Для елецких и данково-лебедянских отложений существенны ранне- и среднефаменские условия: мелководье преимущественно на западе и поступление глинистого материала, местами ограничивавшее развитие крупных органогенных построек (рисунок 6).

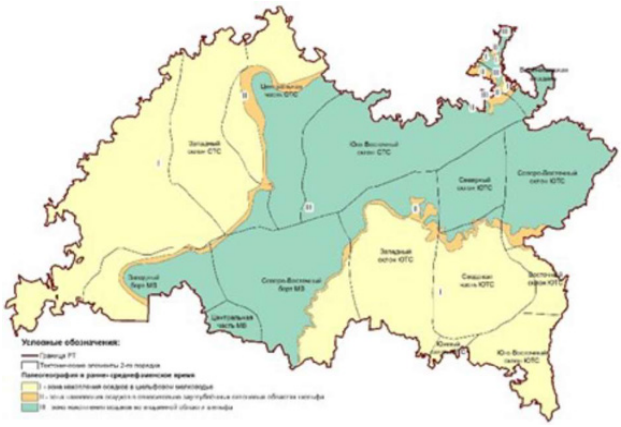


Рис.6. Условия ранне- и среднефаменского времени [1]

В позднефаменское, заволжское время сохранялись мелководные, склоновые и впадинные области шельфа. На строение отложений влияли частичный размыв и смещение органогенных построек в бортовые зоны прогиба (рисунок 7).

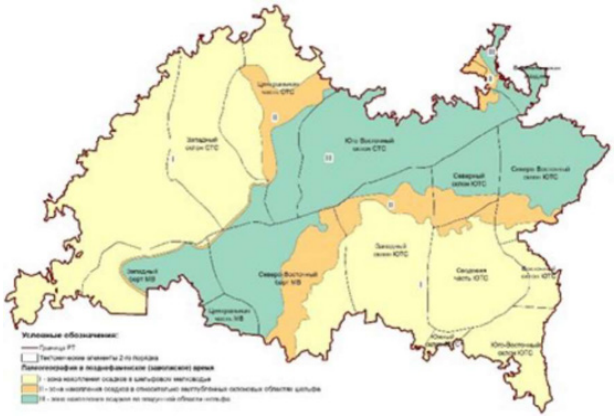


Рис. 7. Условия позднефаменского, заволжского времени [1]

В семилукское время на западе накапливался карбонатный, глинистый и глинисто-карбонатный материал, тогда как на востоке погружение сопровождалось развитием глубоководных условий (рисунок 8).

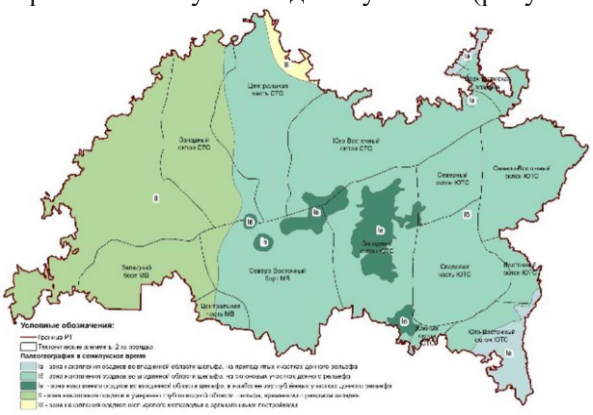
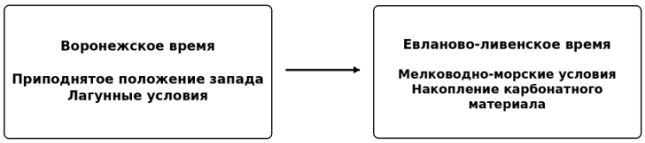


Рис. 8. Палеогеографическая схема семилукского времени

В воронежское время приподнятая западная часть территории характеризовалась лагунными условиями. К началу евланово-ливенского времени их сменили мелководно-морские обстановки с накоплением карбонатного материала (рисунок 9).



Последовательность изменения условий осадконакопления

Рис. 9. Изменение условий в воронежско-евланово-ливенское время

Палеогеографические реконструкции обосновывают прогноз состава и мощности коллекторов. Для оценки существования залежи дополнительно рассматриваются условия её заполнения и сохранности.

Оценка шанса геологического успеха (gCoS)

Ресурсная модель характеризует возможный объём нефти, а шанс геологического успеха gCoS — выполнение условий существования залежи (Нугуманова и др., 2025). В принятой пятифакторной модели:

$$gCoS = P_{нп} \cdot P_{м} \cdot P_{к} \cdot P_{л} \cdot P_{с} \qquad (2)$$

где $P_{нп}$ — вероятность наличия нефтематеринской породы;

$P_{м}$ — вероятность миграции флюида;

$P_{к}$ — вероятность наличия коллектора;

$P_{л}$ — вероятность наличия ловушки;

$P_{с}$ — вероятность наличия покрышки и сохранности залежи.

Произведение вероятностей является модельным приближением: наличие коллектора или ловушки не подтверждает заполнение и сохранность залежи. Составляющая Pc совместно учитывает покрышку и условия удержания нефти.

Составляющие gCoS оцениваются для конкретного объекта каждого горизонта. Прогнозная карта не заменяет проверку пяти условий существования залежи.

Региональные условия миграции и накопления углеводородов рассматриваются в пределах фаменско-турнейского комплекса с сохранением самостоятельности горизонтов (рисунок 10) (Ларочкина, 2013).

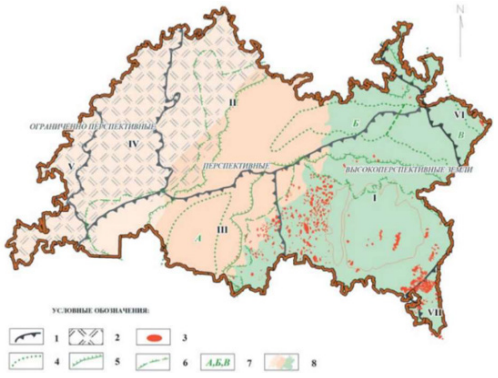


Рисунок 10 Региональное районирование фаменско-турнейского комплекса (Ларочкина, 2013)

При оценке сохранности фаменско-турнейских залежей учитываются состав, толщина и выдержанность перекрывающих пород. Алексинско-тульские отложения образуют зональный экран; изменение его толщины приведено на рисунке 11 (Ларочкина, 2013).

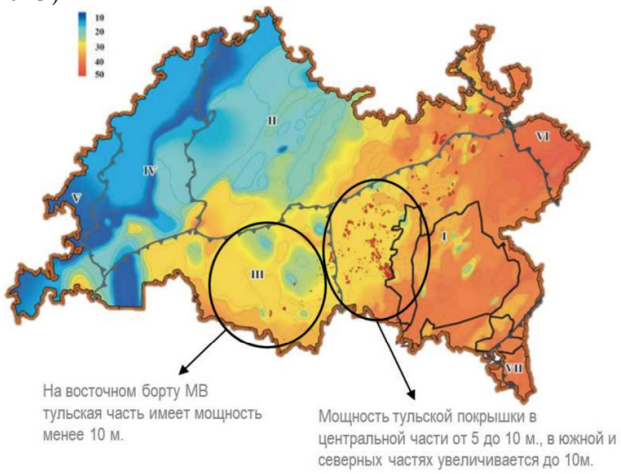


Рис. 11. Региональное изменение толщины алексинско-тульских отложений (Ларочкина, 2013)

Изменчивый состав и присутствие карбонатных пород с невысокими изолирующими свойствами обусловливают неоднородность экрана. Поэтому Рс оценивается с учётом его зональных и местных особенностей и не выводится из наличия коллектора Рк.

Полученный gCoS используется для учёта вероятности подтверждения ресурсной оценки, а затем задаёт веса успеха и неуспеха в экономическом расчёте.

Ресурсный потенциал и прогноз распространения залежей

Для каждого объекта объединяются прогноз распространения залежей, вероятностная оценка объёма и gCoS. Первые два результата характеризуют положение объекта и неопределённость ресурсов, третий — шанс подтверждения залежи.

Ожидаемый ресурсный потенциал определяется в трёхточечном приближении с весами 0,3; 0,4; 0,3:

$$gCoS = P_{нп} \cdot P_{м} \cdot P_{к} \cdot P_{л} \cdot P_{с} \qquad (3)$$

Карты данково-лебедянского и заволжского горизонтов сопоставляются с палеогеографическими реконструкциями и параметрами проницаемых интервалов. Моделирование сохраняет стратиграфическую принадлежность, разобщённость прогнозных областей и положение отдельных прослоев.

Данково-лебедянский горизонт

Прогноз данково-лебедянских залежей основан на фаменских условиях осадконакопления и пространственном положении карбонатных пород (рисунок 12). Средняя доля проницаемой части составляет 0,50, коэффициент расчленённости — 3,98 (таблица 1).

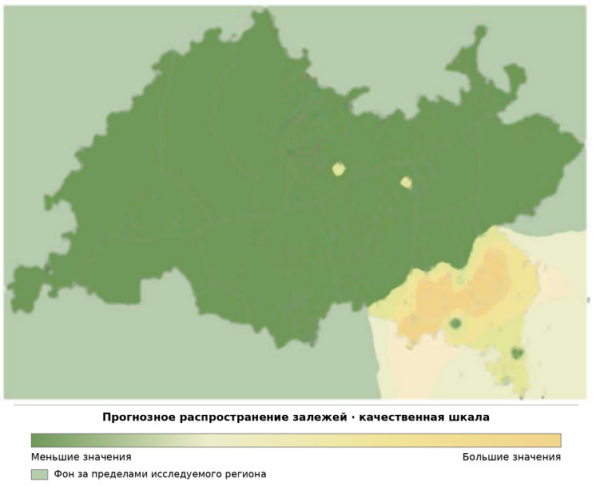


Рис. 12. Прогноз распространения залежей данково-лебедянского горизонта

На карте зелёные оттенки соответствуют меньшим значениям прогнозного показателя, светло-жёлтые и жёлто-оранжевые − его возрастанию. Шкала не отражает запасы или gCoS.

Заволжский горизонт

Прогноз заволжских залежей связывается с позднефаменской историей, частичным размывом и смещением органогенных построек (рисунок 13). Средняя доля проницаемой части равна 0,58, коэффициент расчленённости − 5,15 (таблица 1).

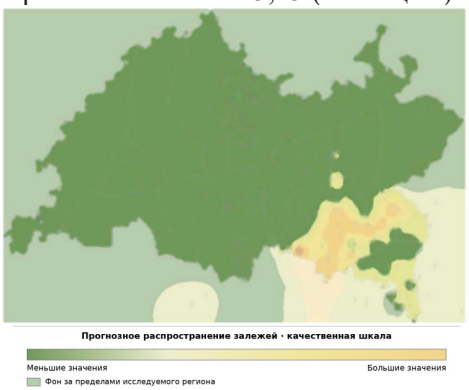


Рис.13 Прогноз распространения залежей заволжского надгоризонта

Направления изучения выделяются с учётом состава пород, нефтенасыщенной толщины и сохранности залежей. Прогнозный показатель возрастает от зелёных к жёлто-оранжевым оттенкам; фоновая заливка за пределами региона к классам прогноза не относится.

Для экономической оценки выделенных объектов ресурсные модели дополняются сценариями разработки и согласованной схемой затрат.

Экономическая оценка и последовательность освоения

Ожидаемая денежная стоимость EMV связывает поступления от добычи и затраты с вероятностью геологического успеха, учитывая как успешные, так и неуспешные исходы (Емельянова, Пороскун, 2016).

Сценарии геологии и разработки

Рассматриваются девять сочетаний трёх сценариев геологии и трёх сценариев разработки. В каждой группе P10 и P90 имеют веса 0,3, P50 − 0,4. Обозначения сценариев относятся к уровням исходных распределений, а веса задают процедуру сведения результатов:

$$w_{ij} = p_i \cdot q_j \sum i \sum j w_{ij} = 1 \quad (4)$$

Таблица 2 – Веса сочетаний сценариев геологии и разработки

Геология / разработка	P10: 0,3	P50: 0,4	P90: 0,3
P10: 0,3	0,09	0,12	0,09
P50: 0,4	0,12	0,16	0,12
P90: 0,3	0,09	0,12	0,09

Каждому сочетанию (таблица 2) соответствует чистый дисконтированный доход NPV − приведённый к моменту оценки результат поступлений и затрат. При взвешивании сохраняются положительные и отрицательные значения:

$$S_h = \sum i \sum j (w_{ij} \cdot NPV_{h,ij}) \quad (5)$$

$$EMV_h = gCoS_h \cdot S_h - (1 - gCoS_h) \cdot C_{поиск,h} \quad (6)$$

где h − горизонт в конкретном объекте; S_h − взвешенный сценарный доход при успехе; $C_{поиск}$ − затраты на поисковое бурение, теряемые при неуспехе.

Расчёт EMV отдельных горизонтов

Для данково-лебедянского объекта ветвь успеха включает девять сценарных сочетаний, ветвь неуспеха − потери на поисковое бурение (рисунок 14).

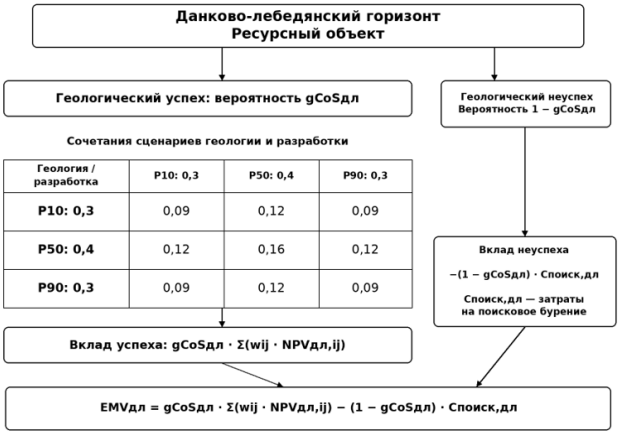


Рис. 14. Сценарная схема расчёта EMV данково-лебедянского горизонта

При бурении одной поисковой скважины стоимостью $C_{поиск,дл}$:

$$EMV_{дл} = gCoS_{дл} \cdot S_{дл} - (1 - gCoS_{дл}) \cdot C_{поиск,дл} \quad (7)$$

Для заволжского объекта используются собственные сценарии и параметры при той же структуре расчёта:

$$EMV_{зав} = gCoS_{зав} \cdot S_{зав} - (1 - gCoS_{зав}) \cdot C_{поиск,зав} \quad (8)$$

Учёт затрат и совместное освоение горизонтов

Затраты включаются в NPV по принятой схеме освоения (таблица 3). Доходы и расходы выражаются в согласованных единицах и приводятся к одной дате; стоимость бурения определяется сметой проекта.

Таблица 3 – Состав затрат и их учёт при оценке девонских объектов

Вид затрат	Порядок учёта в экономической модели
Бурение поисковой скважины	По смете проекта; при геологическом неуспехе учитываются потери на поисковое бурение
Бурение эксплуатационной скважины	В составе затрат соответствующего сценария разработки
Обустройство	В соответствии с принятой схемой освоения
Оборудование	По составу оборудования выбранного варианта разработки
Ввод в работу существующей скважины, проходящей через целевой интервал	В сценарии использования существующего фонда скважин

Совместное освоение нескольких горизонтов оценивается по 10 000 сочетаний реализаций с учётом исходов по залежам и бурения до наиболее глубокого целевого интервала. Из распределения выделяются P10, P50 и P90.

Общие скважины и инфраструктура учитываются в единой схеме доходов и затрат, поэтому результаты отдельных горизонтов не складываются механически.

При принятом допущении независимости исходов вероятность подтверждения хотя бы одной залежи равна:

$$gCoS_{объекта} = 1 - \prod h (1 - gCoS_h) \quad (9)$$

где $gCo_{Sобъект}a$ − вероятность подтверждения хотя бы одной залежи в рассматриваемой группе горизонтов; h − индекс горизонта; $gCoS_h$ − вероятность геологического успеха для этого горизонта; $(1 - gCoS_h)$ − вероятность геологического неуспеха.

Знак $\prod_h$ означает последовательное умножение по всем рассматриваемым горизонтам, а не букву «П».

Например, для двух горизонтов произведение записывается как $(1 - gCoS_1) \cdot (1 - gCoS_2)$. Его вычи-

тание из единицы даёт вероятность хотя бы одного успеха; единица соответствует полной вероятности (100 %). Применяется указанное перед формулой допущение независимости исходов.

Обоснование последовательности освоения

Положительный EMV характеризует положительный ожидаемый результат принятой модели. Наличие благоприятного сценария само по себе не обеспечивает такой результат: учитываются обе ветви исходов и все сценарные NPV [Емельянова, Пороскун, 2016].

Последовательность бурения и обустройства определяется с учётом EMV, близости объектов, существующей инфраструктуры и распределения затрат во времени. Если выбор зависит от неуточнённых геологических предпосылок, оценивается целесообразность предварительных исследований.

Ценность дополнительной информации при выборе исследований

Необходимость уточнения модели до принятия затратного решения оценивается через ценность дополнительной информации VOI (Value of Information). Исследование экономически оправданно, когда ожидаемая выгода от изменения решения превышает затраты на получение данных (Bratvold et al., 2009).

При исходных данных D_0 выбирается действие $a \in A$: продолжение поиска, изменение положения или целевого интервала скважины, вариант освоения либо отказ от вложений. Нулевой результат отказа допустим лишь при отсутствии последующих обязательных расходов.

Критерий – максимум ожидаемого денежного результата без отдельной поправки на предпочтение риска. Базовая оценка лучшего доступного решения имеет вид (Bratvold et al., 2009):

$$V_0 = \max_{a \in A} EMV\left(a \middle| D_0\right) \qquad (10)$$

где V_0 – ожидаемая денежная стоимость наилучшего решения до получения дополнительной информации; D_0 – имеющиеся исходные данные; a – отдельное действие; A – набор допустимых действий; $EMV(a \mid D_0)$ – ожидаемая денежная стоимость действия a по исходным данным D_0.

Обозначение $\max_{a} \in A$ означает выбор наибольшего значения EMV среди всех допустимых действий. Знак ∈ читается «принадлежит»: действие a выбирается из набора A. Вертикальная черта | читается «при условии» и отделяет оцениваемое действие от данных, на которых основана оценка.

Для программы исследований T учитываются все возможные результаты y, включая неоднозначные, их вероятности и оптимальное действие при каждом результате. Ожидаемая стоимость выбора до оплаты исследования равна:

$$V_T = \sum yP\left(y \middle| D_0, T\right) \cdot \max_{a \in A} EMV\left(a \middle| D_0, y, T\right) \qquad (11)$$

где V_T – ожидаемая денежная стоимость стратегии с исследованием до вычета расходов на него; T – рассматриваемая программа исследований; y – один из возможных результатов исследования; $P(y \mid D_0, T)$ – вероятность получить результат y при исходных данных D_0 и проведении программы T.

$EMV(a \mid D_0, y, T)$ – ожидаемая денежная стоимость действия a после получения результата y; a – действие из набора допустимых действий A; $\max_a \in A$ – выбор наибольшего такого значения после каждого результата. Знак Σy означает суммирование по всем результатам y, а точка · – умножение. Результаты должны образовывать полный набор взаимоисключающих исходов исследования, сумма вероятностей которых равна единице.

Разность V_T и V_0 – VOI до учёта стоимости исследования (EVSI для неполной информации). Чистый эффект учитывает затраты на получение и интерпретацию данных Сиссл,T:

$$VOI_T = V_T - V_0; VOI_{чист,T} = VOI_T - C_{иссл,T} \qquad (12)$$

где VOI_T – ценность дополнительной информации до вычета расходов на исследование; V_T – ожидаемая стоимость стратегии с исследованием до его оплаты; V_0 – ожидаемая стоимость наилучшего решения без исследования; $C_{иссл,T}$ – затраты на получение и интерпретацию данных по программе T; $VOI_{чист,T}$ – чистый эффект после вычета этих затрат.

Индекс T указывает на рассматриваемую программу исследований, индекс «чист» – на результат после учёта её стоимости. Для неполной информации величина VOI_T соответствует EVSI – ожидаемой ценности выборочной информации. Положительный $VOI_{чист,T}$ означает, что ожидаемый эффект исследования превышает его стоимость в принятой модели; отрицательный – что стоимость не окупается этим эффектом.

Денежные величины приводятся к одной дате; перенос бурения или добычи учитывается пересчётом потоков. Расходы на исследование включаются однократно: по формуле (12) либо внутри полного дерева проекта, без повторного учёта уже понесённых общих затрат.

Если при любом результате оптимальным остаётся одно действие, VOI равна нулю (Bratvold et al., 2009). Следовательно, сужение диапазона P10–P90 не тождественно экономической ценности информации.

Обновление gCoS и сценарных оценок

Исследование уточняет конкретную составляю-

щую gCoS либо параметры нефтенасыщенной части и разработки. Учитываются все исходы: новые данные могут как повысить, так и снизить вероятность успеха (Bratvold et al., 2009).

Пусть H_h – наличие залежи в объекте горизонта h, $L_1(y)$ и $L_0(y)$ – вероятности результата y при наличии и отсутствии залежи. При фиксированных D_0 и T для результата ненулевой вероятности:

$$gCoS_h(y) = \frac{L_1(y)\cdot gCoS_h}{L_1(y)\cdot gCoS_h + L_0(y)\cdot(1-gCoS_h)} \qquad (13)$$

где $gCoS_h(y)$ – обновлённая вероятность наличия залежи после результата y; $gCoS_h$ – вероятность до исследования; h – индекс горизонта; y – полученный результат; $L_1(y)$ – вероятность такого результата при наличии залежи; $L_0(y)$ – вероятность того же результата при отсутствии залежи; $(1 - gCoS_h)$ – исходная вероятность отсутствия залежи.

Числитель $L_1(y) \cdot gCoS_h$ – совместная вероятность наличия залежи и получения результата y. Знаменатель – полная вероятность результата y: складываются случаи наличия и отсутствия залежи. Деление даёт вероятность наличия залежи при уже полученном результате. Исходные данные D0 и программа T здесь фиксированы и для краткости не повторяются в записи; знаменатель должен быть положительным.

Знаменатель формулы (13) равен вероятности результата y. Значения L_1 и L_0 обосновываются моделью наблюдений, проверенной на сопоставимых данных. При $L_1 = L_0$ результат не различает наличие и отсутствие залежи, но может уточнять её параметры, если эта связь задана отдельно.

После обновления модели пересчитываются объёмы и сценарные NPV. В девятисценарном приближении $S_h(y,a)$ – взвешенный доход действия a при успехе:

$$EMV_h(y,a) = gCoS_h(y)\cdot S_h(y,a) - [1 - gCoS_h(y)]\cdot C_{поиск,h}(a) \qquad (14)$$

где $EMV_h(y,a)$ – ожидаемая денежная стоимость действия a после результата y для горизонта h; a – рассматриваемый вариант действий; y – результат исследования; $gCoS_h(y)$ – обновлённая вероятность успеха; $[1 - gCoS_h(y)]$ – вероятность неуспеха.

$S_h(y,a)$ – взвешенный по сценариям чистый дисконтированный доход при успехе с учётом новых данных и выбранного действия; Споиск,h(a) – положительная величина затрат на поисковое бурение, теряемых при неуспехе. Первый член – ожидаемый вклад успешной ветви, второй – ожидаемые потери неуспешной ветви. В успешной ветви поисковое бурение должно быть учтено в составе затрат, формирующих $S_h(y,a)$; вычитаемый член относится только к ветви неуспеха.

Веса 0,3; 0,4; 0,3 не являются вероятностями результатов исследования. Условные веса и параметры согласуются с обновлённой моделью и зависимостями между толщиной, свойствами пород и объёмом. Уточнение пористости или эффективной толщины может изменять S_h без изменения gCoS; двойной учёт информационного эффекта недопустим.

Для заволжских объектов проверяются сохранённость продуктивной части и положение прослоев с учётом позднефаменской истории и размыва. Для остальных горизонтов предмет проверки определяется их собственными геологическими предпосылками.

Возможные направления исследований и связанные с ними решения приведены в таблице 4. Это постановка оценки VOI, а не перечень выполненных работ или рейтинг горизонтов.

Таблица 4 – Связь геологической неопределённости, исследования и решения

Что требуется уточнить	Возможная проверка	Пересматриваемый элемент решения
Положение кровли, границ залежи и контакта нефти с водой	Согласование сейсмических построений со скважинными данными	Положение поисковой скважины; площадь и нефтенасыщенная толщина в модели
Пористость и нефтенасыщенность	Совместная интерпретация геофизических исследований скважин и лабораторных исследований керна	Распределение объёма и сценарные NPV; условия перехода к освоению
Чередование проницаемых и плотных прослоев	Послойное сопоставление разрезов и уточнение пространственной модели	Целевые интервалы и вариант их вовлечения в разработку
Условия удержания нефти	Уточнение состава, толщины и выдержанности перекрывающих пород	Составляющая Рс – наличие покрышки и сохранность залежи; решение о продолжении поисковых работ

Анализ чувствительности (рисунок 1) выделяет параметры для проверки, но не определяет VOI: ценность исследования зависит от возможности изменить решение, а не только от размаха параметра.

Порог решения и предельная ценность информации

При выборе между поисковым проектом и отказом с нулевым результатом, положительном Sh и фиксированных потерях $C_{поиск,h}$ формула (6) задаёт порог:

$$gCoS_{h,кр} = \frac{C_{поиск,h}}{S_h + C_{поиск,h}} \qquad (15)$$

где $gCoS_{h,кр}$ – критическое, или пороговое значение вероятности геологического успеха; h – индекс горизонта; индекс «кр» означает «критическое»; $C_{поиск,h}$ – положительная величина потерь на поисковое бурение при неуспехе; S_h – положительный взвешен-

ный сценарный доход при успехе. В знаменателе складываются S_h и $C_{поиск,h}$.

Порог получен из условия равенства EMV нулю по формуле (6). Это граница равноценности поискового проекта и отказа с нулевым денежным результатом при принятых фиксированных S_h и $C_{поиск,h}$; это не универсальная нормативная вероятность для всех объектов.

Выше порога EMV положительна, ниже предпочтителен отказ; на границе решения равноценны. При изменении S_h порог пересчитывается, поэтому исследование оценивается по возможной смене решения, а не по достижению заданного gCoS.

Ценность полной информации EVPI равна разности между ожидаемой стоимостью выбора при заранее известном состоянии и V_0. При неизменном наборе действий и возможности не использовать данные (Bickel, 2008):

$$0 \leq VOI_T \leq EVPI \qquad (16)$$

где VOIT − ценность информации по программе T до вычета затрат на её получение; EVPI (Expected Value of Perfect Information) − ожидаемая ценность полной информации, то есть предельная выгода от знания фактического состояния объекта до выбора действия; знак ≤ означает «меньше или равно». Ноль задаёт нижнюю границу информационной выгоды, EVPI − её верхнюю границу.

Границы относятся именно к информационной выгоде при неизменных доступных действиях и условиях их реализации и при возможности не использовать данные. Они не означают неотрицательности чистого эффекта: расходы на исследование и последствия переноса сроков могут сделать полную стратегию менее выгодной. Чистый эффект оценивается отдельно по формуле (12).

EVPI ограничивает информационную выгоду, но не обосновывает смету конкретного исследования. Даже при EVPI выше стоимости работ необходимо оценить их чистый эффект по формуле (12), включая влияние сроков (Bickel, 2008).

Последовательность исследований

Программа строится от решения к препятствующей ему неопределённости и способу её проверки. После каждого результата модель обновляется, а необходимость следующего исследования оценивается заново.

Для многопластового объекта данные одной скважины распространяются на другие интервалы только при обоснованной связи. VOI оценивается совместно, без механического сложения по горизонтам и повторного учёта общих расходов. При совмещении исследовательской и производственной задач

$$gCoS_{h,кр} = \frac{C_{поиск,h}}{S_h + C_{поиск,h}} \qquad (15)$$

где $gCoS_{h,кр}$ − критическое, или пороговое значение вероятности геологического успеха; h − индекс горизонта; индекс «кр» означает «критическое»; $C_{поиск,h}$ − положительная величина потерь на поисковое бурение при неуспехе; S_h − положительный взвешенный сценарный доход при успехе. В знаменателе складываются S_h и $C_{поиск,h}$.

Порог получен из условия равенства EMV нулю по формуле (6). Это граница равноценности поискового проекта и отказа с нулевым денежным результатом при принятых фиксированных S_h и $C_{поиск,h}$; это не универсальная нормативная вероятность для всех объектов.

Выше порога EMV положительна, ниже предпочтителен отказ; на границе решения равноценны. При изменении S_h порог пересчитывается, поэтому исследование оценивается по возможной смене решения, а не по достижению заданного gCoS.

Ценность полной информации EVPI равна разности между ожидаемой стоимостью выбора при заранее известном состоянии и V_0. При неизменном наборе действий и возможности не использовать данные (Bickel, 2008):

$$0 \leq VOI_T \leq EVPI \qquad (16)$$

где VOIT − ценность информации по программе T до вычета затрат на её получение; EVPI (Expected Value of Perfect Information) − ожидаемая ценность полной информации, то есть предельная выгода от знания фактического состояния объекта до выбора действия; знак ≤ означает «меньше или равно». Ноль задаёт нижнюю границу информационной выгоды, EVPI − её верхнюю границу.

Границы относятся именно к информационной выгоде при неизменных доступных действиях и условиях их реализации и при возможности не использовать данные. Они не означают неотрицательности чистого эффекта: расходы на исследование и последствия переноса сроков могут сделать полную стратегию менее выгодной. Чистый эффект оценивается отдельно по формуле (12).

EVPI ограничивает информационную выгоду, но не обосновывает смету конкретного исследования. Даже при EVPI выше стоимости работ необходимо оценить их чистый эффект по формуле (12), включая влияние сроков (Bickel, 2008).

Последовательность исследований

Программа строится от решения к препятствую

задач затраты и поступления включаются в единое дерево проекта (раздел «Учёт затрат и совместное освоение горизонтов»).

Обобщённое дерево решений для оценки VOI приведено на рисунке 15. Оно показывает выбор между решением по имеющимся данным и предварительным исследованием, без привязки к конкретному горизонту и без условных числовых оценок (Bratvold et al., 2009; Bickel, 2008).

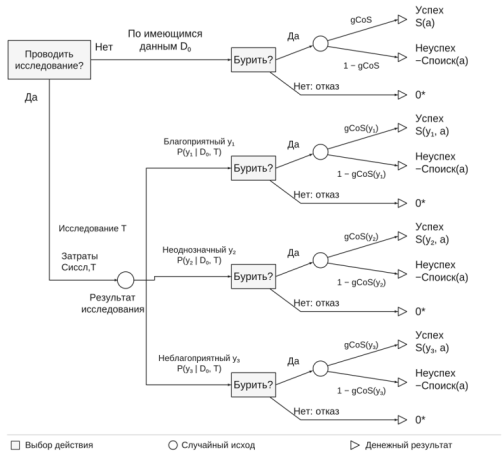


Рис. 15. Обобщённое дерево решений для оценки ценности дополнительной информации (VOI)

На схеме y_1, y_2, y_3 − возможные результаты исследования; S − взвешенный сценарный NPV при успехе; Споиск − потери на поисковое бурение при неуспехе. Индекс горизонта опущен. * Нулевой результат отказа допустим только при отсутствии обязательных последующих расходов.

Дерево оценивается справа налево: денежные результаты взвешиваются по вероятностям, в узлах решений выбирается наибольшая EMV. Затем результаты исследования учитываются по формуле (11), а чистый эффект − по формуле (12). Затраты Сиссл,T вычитаются один раз для всей ветви исследования, в том числе при последующем отказе; повторно в конечные значения на схеме они не включены.

Выводы

Предложенная методика связывает неоднородность карбонатного девона и условия формирования залежей с ресурсной и экономической оценкой. Геологические модели и прогнозные карты характеризуют строение объектов, вероятностные расчёты − диапазон ресурсов, gCoS − шанс подтверждения залежи, EMV − ожидаемый денежный результат.

VOI дополняет оценку выбором исследований, способных изменить решение и оправдать свои затраты. Для заволжских, данково-лебедянских и смежных горизонтов программа изучения и освоения формируется по собственным геологическим предпосылкам с согласованным учётом общих затрат.

Литература

1. *Хисамов Р.С., Губайдуллин А.А., Базаревская В.Г., Юдинцев Е.А. (2010). Геология карбонатных сложно построенных коллекторов девона и карбона Татарстана / под ред. Р.С. Хисамова. Казань: Фэн Академии наук РТ, 283 с. ISBN 978-5-9690-0125-1.*

2. *Хисамов Р.С., Базаревская В.Г., Михайлова О.В., Подавалов В.Б. (2016). Доманиковые продуктивные отложения Татарстана − аналог «сланцевых плев» США. Недропользование XXI век, 3(60), с. 82-91. https://nedra21.ru/archive/54/1126/*

3. *Ларочкина И.А. (2013). Концепция системного геологического анализа при поисках и разведке месторождений нефти на территории Татарстана. Казань: Фэн Академии наук РТ, 232 с.*

4. *Алтунин А.Е., Семухин М.В., Ядрышникова О.А. (2017). Вероятностные и нечеткие модели оценки неопределенностей и рисков при подсчете запасов углеводородов. Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика, 3(2), с. 85-99. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2017-3-2-85-99*

5. *Емельянова Н.М., Пороскун В.И. (2016). Методы геолого-экономической оценки объектов поиска месторождений нефти и газа с учетом неопределенности и риска. Недропользование XXI век, 5(62), с. 190-201. https://nedra21.ru/archive/56/1207/ (дата обращения: 10.09.2026).*

6. *Bratvold R.B., Bickel J.E., Lohne H.P. (2009). Value of Information in the Oil and Gas Industry: Past, Present and Future. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 12(4), pp. 630-638. https://doi.org/10.2118/110378-PA*

7. *Bickel J.E. (2008). The Relationship Between Perfect and Imperfect Information in a Two-Action Risk-Sensitive Problem. Decision Analysis, 5(3), pp. 116-128. https://doi.org/10.1287/deca.1080.0118*

8. *Беляков Е.О., Лутфуллин А.А., Хабипов Р.М., Зиятдинов А.Г., Данилов Д.С., Толибова М.Ф., Ломоносов А.Т., Пушин К.А., Храмкова Ю.О. (2024). Особенности выбора показателей вероятностного распределения подсчетных параметров и учета количества пластов в горизонте при оперативной 1D вероятностной оценке запасов углеводородов в карбонатных отложениях. Актуальные проблемы нефти и газа: сборник трудов VII Всероссийской молодежной научной конференции. Москва, с. 117-120.*

9. *Нугуманова Н.В., Ломоносов А.Т., Судаков В.А., Зацепина А.В., Беляков Е.О., Лутфуллин А.А., Хабипов Р.М., Зиятдинов А.Г., Данилов Д.С. (2025). Оценка вероятности геологического успеха при поисковых работах на залежи нефти. Технологическое лидерство и устойчивое развитие: инновационные подходы и решения для будущего нефтегазовой от-*

расли: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию образования ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. Казань, с. 293-299.

Сведения о авторах

Ганиев Булат Галиевич – кандидат технических наук, начальник департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, автор множества научных работ.

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина 75.

E-mail: ganievbg@tatneft.ru

Лутфуллин Азат Абузаровичм – доктор технических наук, доцент, заместитель начальника департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, автор множества научных работ.

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 75.

E-mail: lutfullinaa@tatneft.ru

Хабипов Ришат Минехарисович – начальник отдела мониторинга разработки месторождений и недропользования департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, автор множества научных работ, лауреат Всероссийского конкурса «Инженер года».

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 75.

E-mail: HabipovRM@tatneft.ru

Шуматбаев Кирилл Дмитриевич – кандидат геолого-минералогических наук, главный эксперт по петрофизическим исследованиям департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, соавтор передовых научных исследований.

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 75.

E-mail: Shumatbaevkd@tatneft.ru

Беляков Евгений Олегович – главный специалист отдела мониторинга разработки месторождений и недропользования департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, аспирант Института проблем нефти и газа РАН, г. Москва, автор множества научных работ.

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 75.

E-mail: belyakoveo@tatneft.tatar

Аглямов Руслан Радикович – специалист отдела мониторинга разработки месторождений и недропользования департамента разработки месторождений структурного подразделения «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина, автор научных работ.

Россия, 423450, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 75.

References

1. Khisamov R.S., Gubaidullin A.A., Bazarevskaya V.G., Yudintsev E.A. (2010). Geology of Complexly Structured Devonian and Carboniferous Carbonate Reservoirs of Tatarstan / ed. by R.S. Khisamov. Kazan: Fen, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 283 p. ISBN 978-5-9690-0125-1.

2. Khisamov R.S., Bazarevskaya V.G., Mikhailova O.V., Podavalov V.B. (2016). Domanik Productive Deposits of Tatarstan as an Analogue of U.S. Shale Plays. Subsoil Use XXI Century, 3(60), pp. 82-91. https://nedra21.ru/archive/54/1126/

3. Larochkina I.A. (2013). Concept of Systematic Geological Analysis in Oil Field Prospecting and Exploration in Tatarstan. Kazan: Fen, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, 232 p.

4. Altunin A.E., Semukhin M.V., Yadryshnikova O.A. (2017). Probabilistic and Fuzzy Models for Assessing Uncertainties and Risks in Hydrocarbon Reserve Estimation. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, 3(2), pp. 85-99. https://doi.org/10.21684/2411-7978-2017-3-2-85-99

5. Emelyanova N.M., Poroskun V.I. (2016). Methods of Geological and Economic Evaluation of Oil and Gas Exploration Targets under Uncertainty and Risk. Subsoil Use XXI Century, 5(62), pp. 190-201. https://nedra21.ru/archive/56/1207/ (accessed: 10.09.2026).

6. Bratvold R.B., Bickel J.E., Lohne H.P. (2009). Value of Information in the Oil and Gas Industry: Past, Present and Future. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 12(4), pp. 630-638. https://doi.org/10.2118/110378-PA

7. Bickel J.E. (2008). The Relationship Between Perfect and Imperfect Information in a Two-Action Risk-Sensitive Problem. Decision Analysis, 5(3), pp. 116-128. https://doi.org/10.1287/deca.1080.0118

8. Belyakov E.O., Lutfullin A.A., Khabipov R.M., Ziyatdinov A.G., Danilov D.S., Tolibova M.F., Lomonosov A.T., Pushin K.A., Khramkova Yu.O. (2024). Specific Features of Selecting Probability Distribution Parameters for Reserve Estimation Variables and Accounting for the Number of Reservoirs within a

Horizon in Rapid 1D Probabilistic Assessment of Hydrocarbon Reserves in Carbonate Deposits. Current Problems of Oil and Gas: Proceedings of the VII All-Russian Youth Scientific Conference. Moscow, pp. 117-120.

9. Nugumanova N.V., Lomonosov A.T., Sudakov V.A., Zatsepina A.V., Belyakov E.O., Lutfullin A.A., Khabipov R.M., Ziyatdinov A.G., Danilov D.S. (2025). Assessment of the Probability of Geological Success in Oil Deposit Exploration. Technological Leadership and Sustainable Development: Innovative Approaches and Solutions for the Future of the Oil and Gas Industry: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 75th Anniversary of PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin. Kazan, pp. 293-299.

About the Authors

Bulat G. Ganiev – Candidate of Technical Sciences, Head of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, author of numerous scientific papers.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Azat A. Lutfullin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, author of numerous scientific papers.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Rishat M. Khabipov – Head of the Field Development Monitoring and Subsoil Use Division of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, author of numerous scientific papers, Laureate of the All-Russian “Engineer of the Year” Competition.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Kirill D. Shumatbaev – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Petrophysics Expert of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, co-author of advanced scientific research.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Evgeny O. Belyakov – Chief Specialist of the Field Development Monitoring and Subsoil Use Division of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, Postgraduate Student at the Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, author of numerous scientific papers.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Ruslan R. Aglyamov – Specialist of the Field Development Monitoring and Subsoil Use Division of the Field Development Department of the Tatneft-Dobycha structural unit of PJSC Tatneft named after V.D. Shashin, author of scientific papers.

75 Lenin St., Almetyevsk, Republic of Tatarstan, 423450, Russian Federation.

E-mail:

Статья поступила в редакцию 02.09.2026
Принята к публикации 06.10.2026
Опубликована 30.10.2026