

DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/27_2020

УДК 553.98.042.001.57

Попова О.А.

Общество с ограниченной ответственностью «Газпромнефть Научно-Технический Центр» (ООО «Газпромнефть НТЦ»), Санкт-Петербург, Россия, Popova.OAna@gazpromneft-ntc.ru

ВЛИЯНИЕ КОРРЕЛЯЦИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрен вопрос использования корреляций между подсчетными параметрами в вероятностных геологических моделях. При создании вероятностных моделей 1D, в которых учет неопределенностей осуществляется посредством перемножения распределений, зачастую не уделяют должного внимания существующим взаимосвязям между параметрами, что в результате приводит к некорректной оценке ресурсной базы проектов и принятию неоптимальных решений. Продемонстрирована степень влияния взаимозависимостей на результаты моделирования, а также описаны случаи типовых корреляций, которые требуется проанализировать при вероятностном моделировании.

Ключевые слова: корреляции между подсчётными параметрами, взаимосвязи между параметрами, геологические неопределенности, вероятностная геологическая модель.

Ни для кого не секрет, что все преимущества вероятностного геологического моделирования могут быть уничтожены низким качеством исполнения модели. Существует огромное количество причин, которые могут повлиять на прогнозную способность модели – от упрощенного взгляда на геологию пласта, ограниченного лишь одной из возможных геологических концепций на основе специфического предыдущего опыта исполнителя [Попова, 2018], до выбранного метода моделирования. Взаимозависимости между неопределенными параметрами и рисками (возможными событиями) также могут оказать значительное влияние на результаты вероятностного моделирования [Harbaugh, Davis, Wendebourg, 1995; Alexander, Lohr, 1998; Stabell, 2000; Purvis, 2003]. Может показаться, что, варьируя каждый параметр, иногда в довольно широких пределах, принимаются во внимание все возможные варианты геологического строения рассматриваемых объектов, однако так можно добавить в модель реализации, которые не имеют под собой геологического обоснования. Таким образом, некорректный учет корреляций между параметрами может исказить истинное представление о степени неопределенности в объемах ресурсной базы и привести к неоптимальному решению по активу.

Влияние корреляций особенно ощутимо при работе с большим количеством перспективных ловушек [Wang, 2000]. Рассматривая их как полностью независимые, диапазон оценки P10-P90, зачастую используемый в практике, будет достаточно узким, даже если по

каждому из объектов существует значительная неопределенность¹. В результате, после бурения нескольких поисковых скважин легко можно оказаться в хвосте распределения, далеко за пределами интервала P10-P90², даже при условии, что по каждому из объектов оценка подтверждена.

Ниже рассмотрена эта идея на синтетическом примере по группе залежей, которые характеризуются одинаковой степенью неопределенности в подсчетных параметрах. Диапазон по каждому параметру приведен в табл. 1.

Таблица 1

Диапазоны подсчетных параметров для единичной залежи

	Площадь нефтеносности, тыс. м ²	Эффективная нефтенасыщенная толщина, м	Коэффициент пористости, д. ед.	Коэффициент нефтенасыщенности, д. ед.	Объемный коэффициент, м ³ /м ³	Плотность нефти, т/м ³
Минимум	1 000	1	0,1	0,55	1,05	0,7
Наиболее вероятное значение	10 000	20	0,2	0,70	1,24	0,8
Максимум	100 000	100	0,3	0,85	1,43	0,9

Расчеты выполнены методом Монте-Карло в количестве 10000 реализаций. Отношение P10/P90 для единичного объекта составило 16,5. Рассматривая группу объектов совместно, соотношение P10/P90 резко снижается при увеличении количества объектов (рис. 1). В данном случае это поведение лучше всего описывается степенным законом. Следует отметить, что изменение соотношения P10/P90 зависит не только от количества объектов, но и от диапазонов неопределенности и веса каждого из объектов в суммарном распределении ресурсной базы.

Если в модель добавить взаимосвязь между параметрами разных залежей с положительной корреляцией, при неизменных распределениях для каждого отдельного объекта диапазон P10-P90 по группе залежей расширяется и изменение соотношения P10 к P90 при увеличении количества объектов падает менее значительно (рис. 2). (Отрицательные корреляции, напротив, ведут к сужению диапазона P10-P90 при прочих равных). В

¹ Из-за существующей в отрасли двойственности в определениях необходимо уточнить, что в данной работе подразумевается, что с вероятностью 90% запасы будут не менее P90.

² При методически корректной оценке неопределенностей попадание в интервал P10-P90 будет обеспечено только в 80% случаев. При недостаточном учете корреляций вероятность попадания в диапазон P10-P90 будет меньше.

экстремальном случае, когда запасы между залежами полностью зависимы (то есть, например, подтверждение минимальных значений в одном из объектов предполагает подтверждение минимальных значений в другом), суммарная оценка P10 (P90) будет равна арифметической сумме оценок P10 (P90) по отдельным залежам.

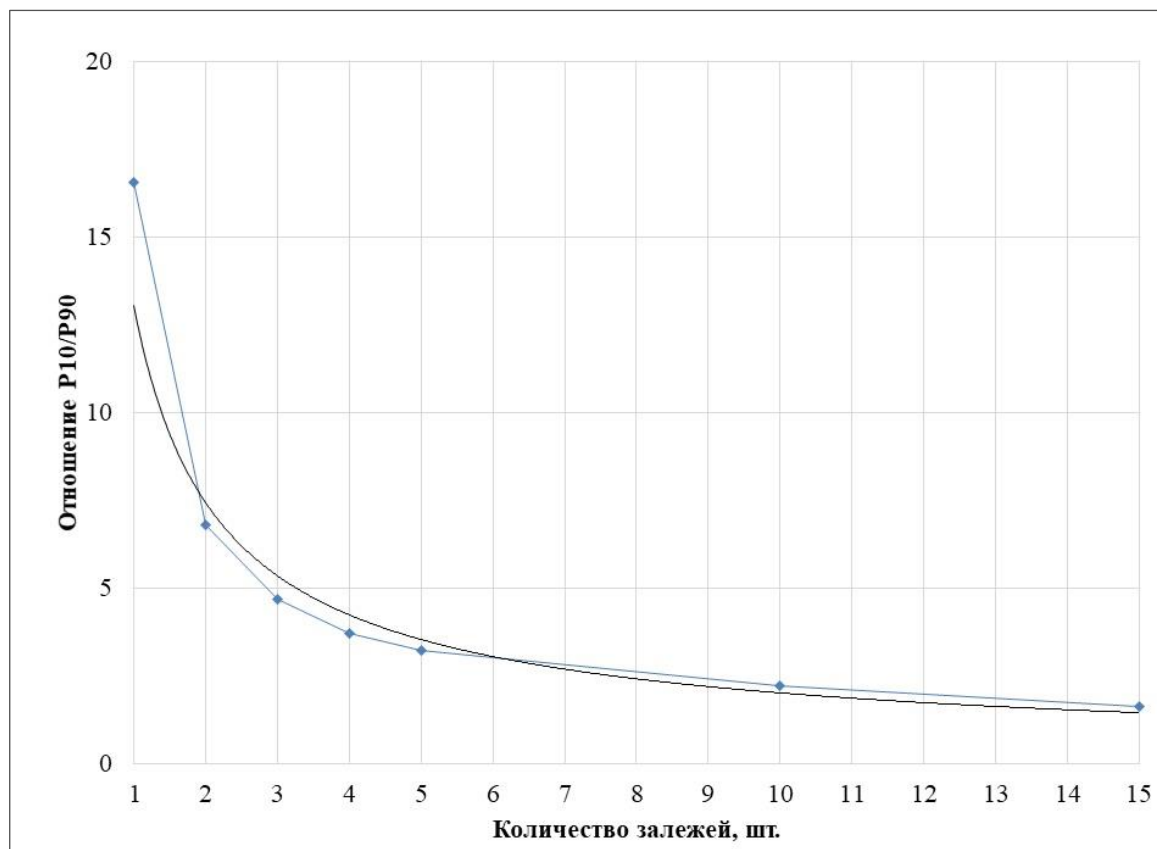


Рис. 1. График изменения отношения P10/P90 по проекту в целом с ростом количества объектов в проекте

Степенная линия тренда обозначена черным цветом.

При анализе группы залежей/перспективных ловушек в рамках одного проекта отсутствие внимания к возможным зависимостям между подсчетными параметрами и факторами геологического успеха разных объектов может повлечь за собой значительные ошибки в оценке его потенциала. Если проект охватывает большое количество объектов и все они рассматриваются как полностью независимые, неопределенности каждого из них в некоторой степени нивелируют друг друга. В результате такой оценки получают островершинное распределение (с положительным эксцессом), где отношение P10 к P90 оказывается довольно маленьким, что вызывает ложную уверенность в потенциале проекта. Реальный диапазон неопределенности может быть значительно шире, если между различными объектами или характеристиками этих объектов существуют недоучтенные взаимосвязи. Другими словами, часто реальная оценка проекта будет находиться между результатом

независимого суммирования распределений запасов/ресурсов по отдельным объектам и результатом арифметического сложения точечных оценок (например, P10, P50, P90).³ Этот вопрос особенно актуален для проектов, в состав которых входит большое количество перспективных ловушек, для которых необходимо учитывать зависимости не только между подсчетными параметрами, но и между факторами геологического успеха, так как в дальнейшие расчеты профилей добычи и экономического потенциала проекта часто уходят только три точечных оценки P10, P50, P90 целиком по проекту, а не по каждому объекту в отдельности.

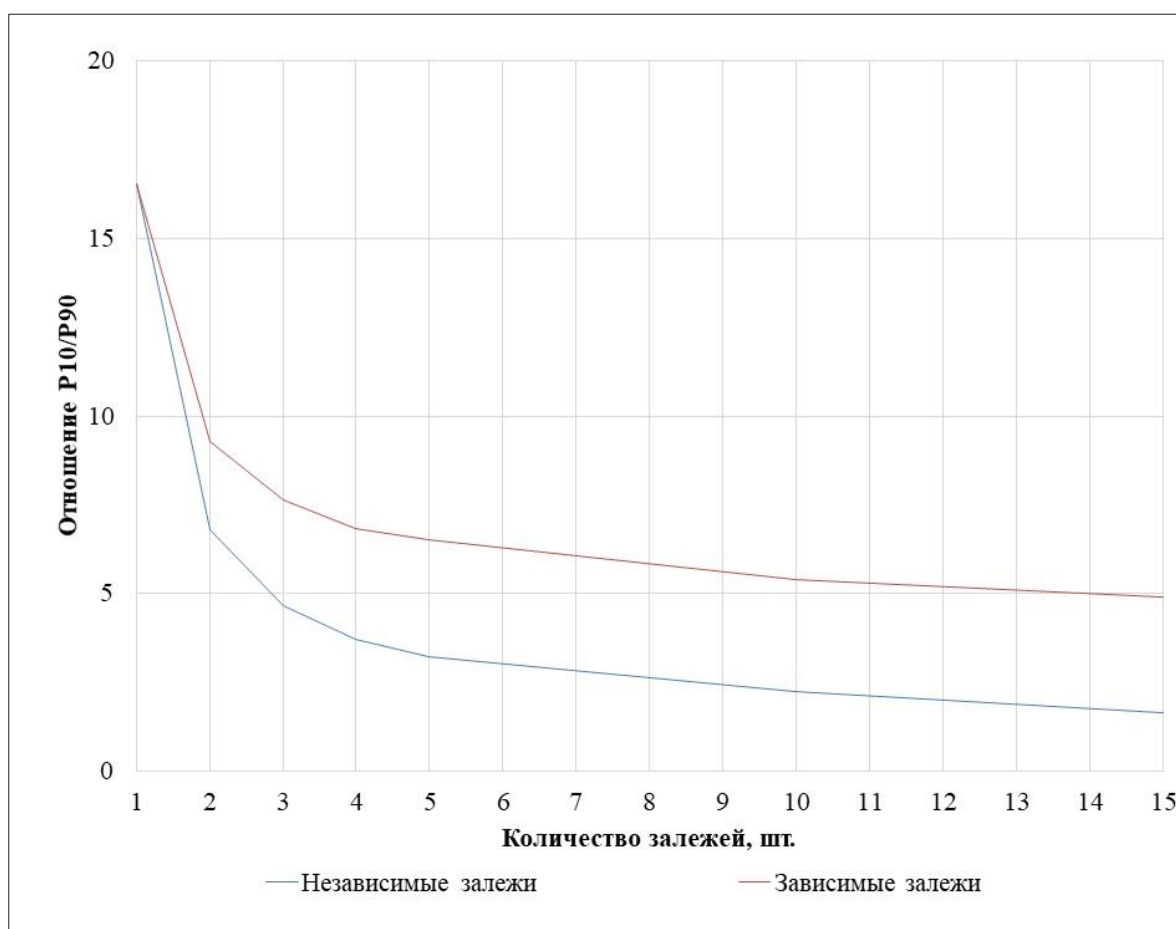


Рис. 2. График изменения отношения P10/P90 по проекту в целом с ростом количества объектов в проекте

В случае полной независимости залежей (голубым цветом), в случае наличия корреляции ($R=0,8$) между площадями различных залежей (красным цветом).

В практическом выражении зависимости между параметрами разных объектов проекта могут возникать во многих случаях, вот примеры некоторых из них:

- при оценке нескольких ловушек, расположенных в пределах единой антиклинальной

³ Исключением будут случаи при наличии очень сильных взаимосвязей с отрицательной корреляцией.

структуры в конформно залегающих пластах, зависимости могут присутствовать между вероятностью существования ловушки (один из факторов геологического успеха) для всех объектов и наибольшей площадью, соответствующей максимальному заполнению структурной ловушки (англ., spill point);

- при подсчете запасов в различных блоках, разделенных разломами, в пределах одного пласта, если в положении разломов существует неопределенность, может наблюдаться отрицательная корреляция между площадями блоков;

- при рассмотрении группы ловушек, расположенных рядом друг с другом, вероятности успеха по различным факторам, толщины и свойства могут характеризоваться значительной неопределенностью, но быть зависимы между различными объектами.

Зависимости между подсчетными параметрами в вероятностной модели возможны и для одной залежи или перспективной ловушки. Так, площадь нефте-/газоносности часто имеет некоторую степень корреляции с эффективной нефте-/газонасыщенной толщиной для массивных залежей. Сила взаимосвязи зависит от комбинации ряда характеристик – геометрии структуры, неопределенности в ее прогнозе и диапазоне возможных глубин флюидных контактов, при этом корреляция может иметь как положительную, так и отрицательную направленность. В условиях проектов с высокой степенью геологических рисков добавление в 1D вероятностную модель зависимостей между подсчетными параметрами единичного объекта может оказать довольно значимое влияние на оценку ресурсной базы, даже при невысоких коэффициентах корреляции между параметрами (рис. 3). Необходимо отметить, что использование ложных корреляций между параметрами также может оказать негативное влияние на результаты моделирования. Далее рассмотрены такие параметры, как пористость, проницаемость и начальная водонасыщенность. Если средняя пористость высокая в какой-то из реализаций вероятностной модели, то часто ожидают увидеть высокие значения средней проницаемости и низкие – водонасыщенности, так как подобные зависимости наблюдаются в большинстве традиционных коллекторов. Однако, зависимости, которые часто существуют внутри единичной реализации геологической модели, могут оказаться некорректными, когда речь идет о средних свойствах по набору реализаций вероятностной модели. Аналогично разнице между мерами неопределенности параметров в вероятностной модели и их вариативностью в пределах детерминированной модели [Begg, Welsh, Bratvold, 2014], необходимо четко разграничивать типы и масштабы потенциально коррелируемых/потенциально взаимосвязанных величин. Когда речь идет о слабоизученных объектах, анализ наличия или отсутствия зависимостей между средними

параметрами можно производить с помощью залежей-аналогов⁴ (рис. 4, 5). Использование ожидаемых, но неподтвержденных данными корреляций в таком случае может привести к пропуску возможных комбинаций параметров, таких как «высокая пористость – низкая водонасыщенность» и наоборот. А значит, программа геологоразведочных работ и стратегия разработки могут быть сформированы неоптимальным образом.

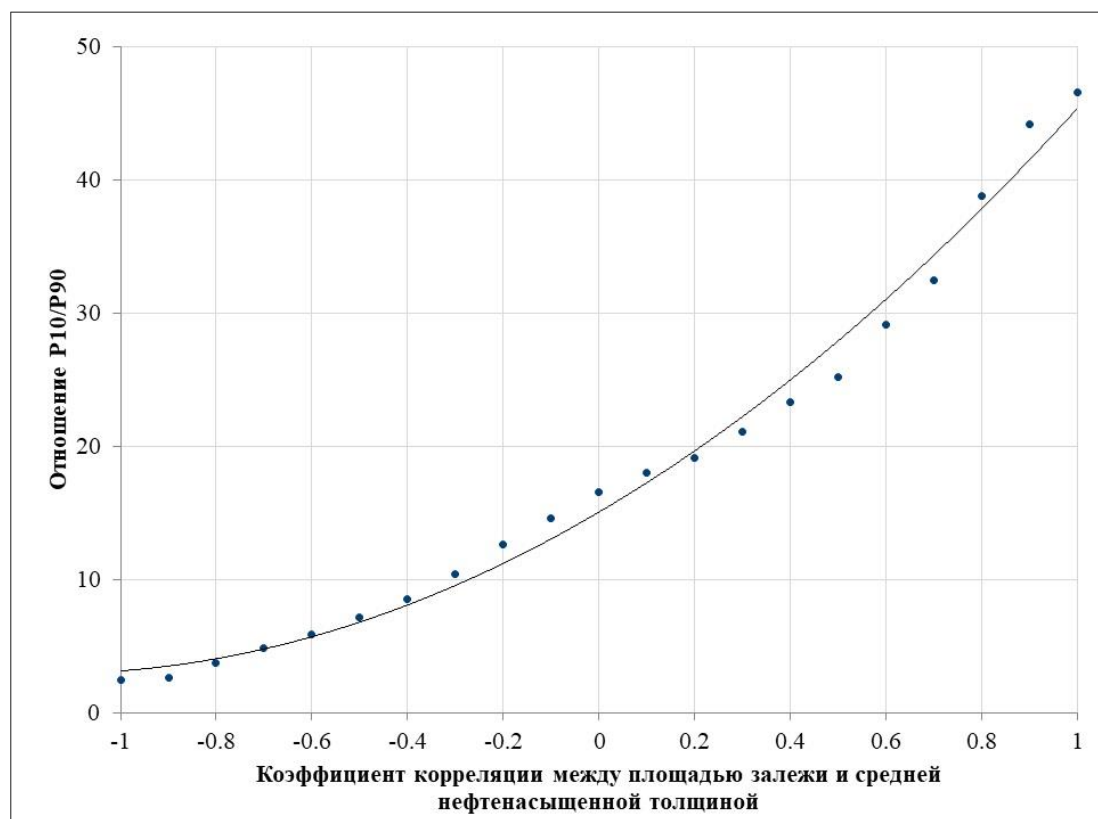


Рис. 3. График отношения P10/P90 с изменением коэффициента корреляции между площадью залежи и средней нефтенасыщенной толщиной в вероятностной модели

Далее рассмотрено влияние описанных особенностей корреляций на примере меловых отложений одного из разведываемых месторождения Западной Сибири. Месторождение многопластовое, сложного строения. С целью проектирования программы доизучения и проведения опытно-промышленных работ проведена вероятностная оценка запасов 22 продуктивных пластов (табл. 2, названия пластов приведены условно), значительно отличающихся по своим геологическим характеристикам. Залежи в пластах М1-М6 альб-сеноманского возраста массивные, коллекторы латерально выдержанные, представлены отложениями дельт волнового и приливно-отливного типов, песчанистость разреза в среднем колеблется от 50 до 80%, пористость достигает 28-30%.

⁴ В качестве аналогов использованы данные по мировым месторождениям с учетом условий седиментации и геодинамического типа бассейна.

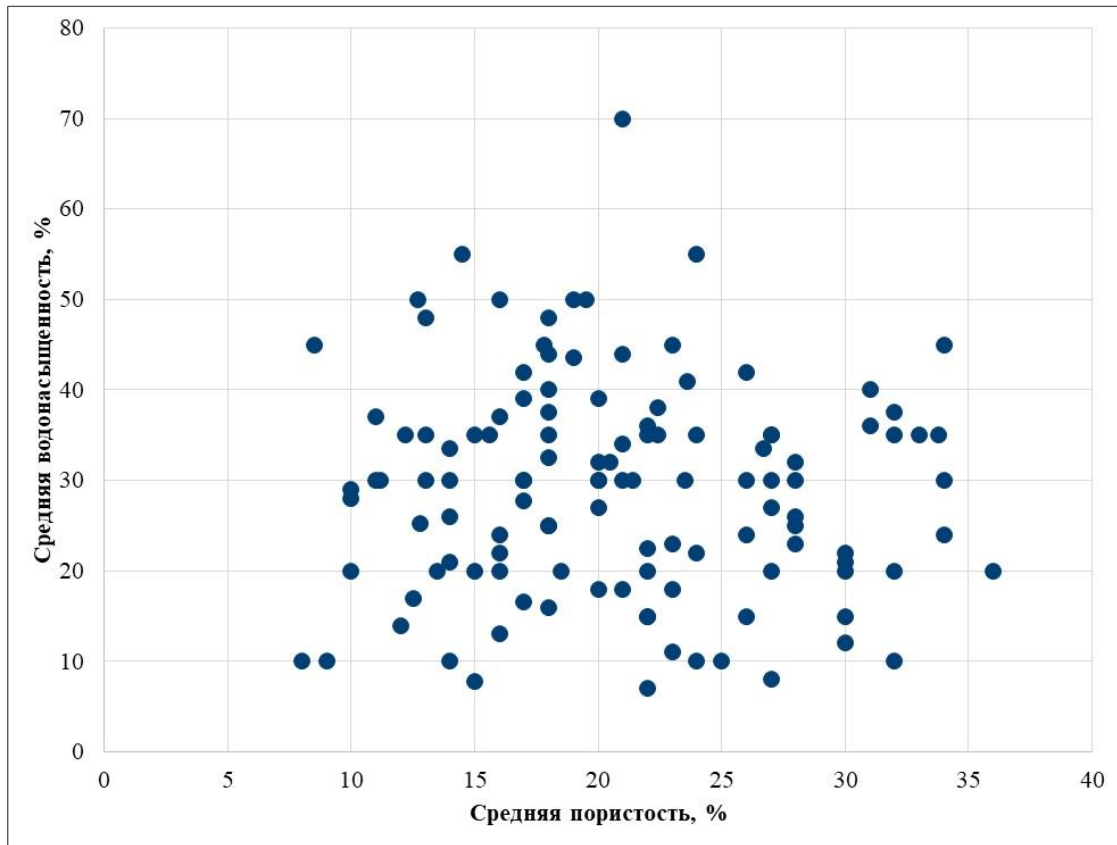


Рис. 4. Кросс-плот «средняя пористость – средняя водонасыщенность» для набора месторождений аналогов X

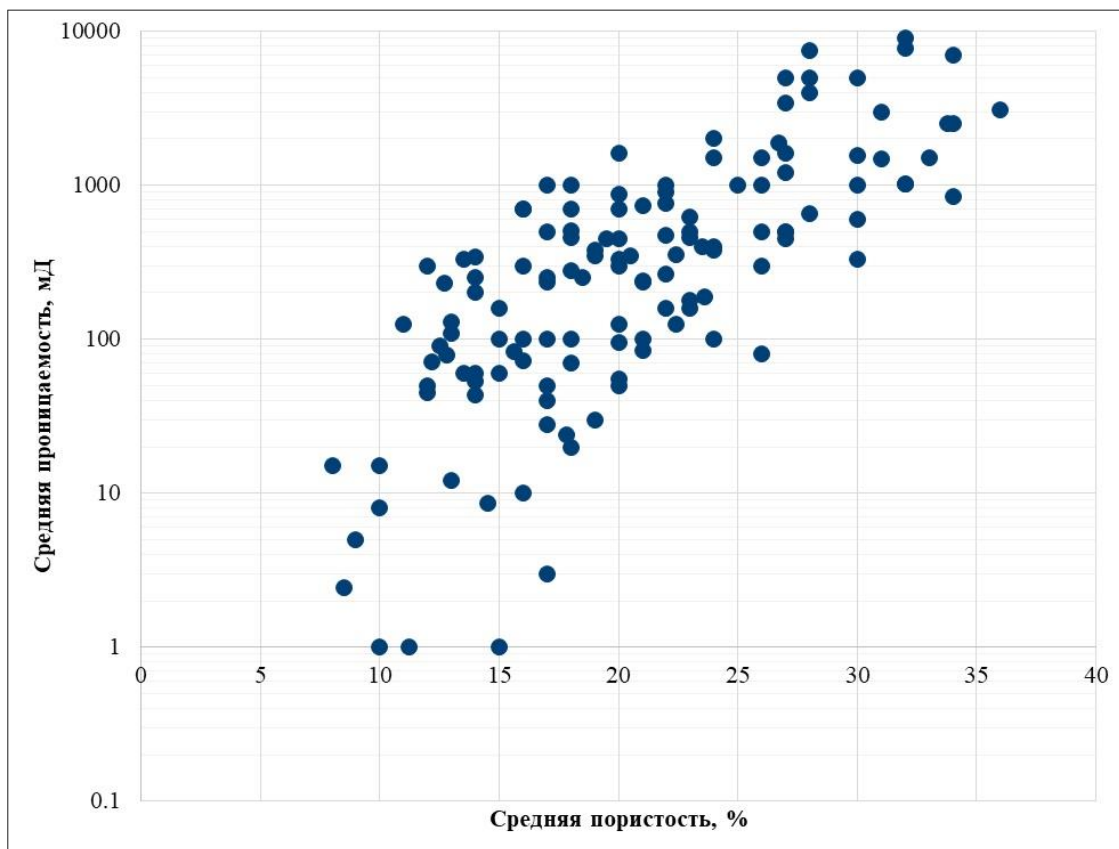


Рис. 5. Кросс-плот «средняя пористость – средняя проницаемость» для набора месторождений аналогов X

Таблица 2

Результаты вероятностной оценки запасов по отдельным пластам

Пласт (усл.)	Геологические запасы газа, млрд. м ³			P10/P90	(P10-P90)/P50
	P90	P50	P10		
M1	59	73	90	1,5	42%
M2	16	21	27	1,7	52%
M3	9	11	14	1,5	43%
M4	95	111	129	1,4	30%
M5	15	19	24	1,6	47%
M6	141	162	182	1,3	26%
M7	9	15	22	2,4	85%
M8	4	8	12	2,7	98%
M9	11	17	23	2,0	70%
M10	35	47	60	1,7	53%
M11	11	16	22	2,0	69%
M12	16	22	30	1,9	66%
M13	4	8	13	3,6	127%
M14	15	22	33	2,2	80%
M15	4	8	14	3,3	114%
M16	5	9	13	2,7	97%
M17	28	39	52	1,8	61%
M18	16	22	30	1,9	66%
M19	18	30	45	2,4	89%
M20	48	62	84	1,8	58%
M21	9	13	18	2,1	75%
M22	7	13	21	2,9	109%

Залежи в пластах M7-M15 аптского возраста сложного строения, тектонически и литологические экранированные, средняя песчаность в них не превышает 30%, средняя пористость - не более 20%, разрез характеризуется высокой степенью изменчивости, отмечаются резкие изменения фильтрационно-емкостных свойств на незначительных расстояниях, отложения рассматриваемого интервала сформированы преимущественно в аллювиальных условиях. В пластах M16-M22 дельтового и мелководно-морского генезиса с песчаностью 40-50% и пористостью 14-15% выявлены тектонически экранированные залежи.

Отношение P10/P90 для отдельных пластов меняется от 1,3 до 3,6 в зависимости от сложности геологического строения и степени изученности объекта (рис. 6). В качестве независимой интегральной оценки изученности используется доля запасов по категории C1 в утвержденных запасах, числящихся на Государственном балансе. Залежи в пластах M1-M6 характеризуются относительно простым геологическим строением и имеют показатели P10 к P90 в пределах 1,3-1,7. Доля запасов C1 в этих залежах превышает 90%. Менее разведанные

залежи нижележащих пластов сложного геологического строения имеют более высокие оценки показателя P_{10}/P_{90} , причем, в объектах с запасами сопоставимого объема, отношение P_{10} к P_{90} растет с уменьшением геологической изученности.

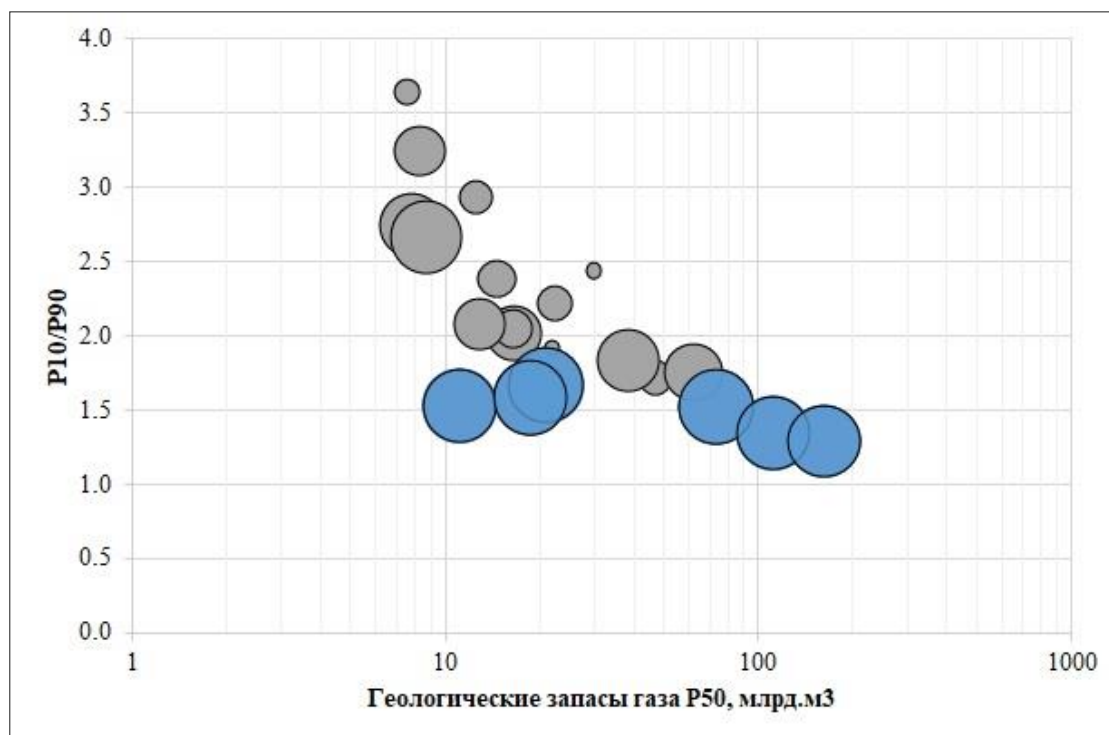


Рис. 6. Диаграмма зависимости отношения P_{10}/P_{90} от оценки запасов P_{50}

Диаметр круга соответствует отношению запасов по категориям $C1/(C1+C2)$, пласты М1-М6 обозначены синим цветом.

Суммарные оценки запасов по пластам М1-М22 рассчитаны различными способами: при полном независимом сложении распределений запасов отдельных пластов, с учетом корреляций подсчетных параметров разных залежей, при полном зависимом суммировании оценок P_{10} , P_{50} , P_{90} , полученных по каждому пласту (табл. 3). Во всех случаях оценки P_{50} оказались сопоставимы. Наиболее широкий диапазон получен при третьем способе сложения, который предполагает, что в каждом из пластов подтверждается одна из оценок P_{90} , P_{50} или P_{10} , хотя в действительности вероятность такой ситуации стремится к нулю. Отношение P_{10} к P_{90} в таком случае составляет 1,7, что существенно ниже этого показателя, полученного при анализе большинства рассмотренных пластов (см. табл. 2). Это связано с тем, что в оценке суммарного диапазона неопределенности больший вес вносят наиболее крупные по запасам пласты. Самый узкий диапазон оценок P_{10} - P_{90} получен при независимом вероятностном суммировании распределений отдельных залежей. Однако в рамках данного проекта зависимости в оценках разных пластов возникают за счет локализации залежей в пределах единой структуры, учет корреляций в таком случае увеличивает показатель P_{10}/P_{90} с 1,1 до 1,3. Таким образом, приведенный пример демонстрирует, что способ агрегирования

результатов при получении суммарной оценки по нескольким объектам в значительной степени влияет на результирующий диапазон геологических запасов P10-P90.

Таблица 3

Результаты вероятностной оценки запасов по группе пластов М

	Геологические запасы газа, млрд. м ³			P10/P90	(P10-P90)/P50
	P90	P50	P10		
Независимое суммирование распределений	708	759	805	1,1	13%
Суммирование с учетом корреляций между объектами	649	756	871	1,3	29%
Суммирование точечных оценок P10, P50, P90	574	746	956	1,7	51%

Далее описан эффект зависимостей между подсчетными параметрами единичного объекта на примере залежи в пласте М22. На основе 2D модели выявлена положительная корреляция между площадью залежи и средней газонасыщенной толщиной, по данным месторождений-аналогов – между средней пористостью и средней газонасыщенностью по залежи (рис. 7, 8). Показатель P10/P90 по рассматриваемому объекту составляет 2,9. Исключение данных корреляций из расчета приводит к сокращению этого показателя до 2,6, а увеличение силы зависимости между подсчетными параметрами - к его росту (табл. 4). Следовательно, степень взаимосвязи между подсчетными параметрами отдельно взятой залежи тоже влияет на результаты вероятностной оценки ресурсной базы.

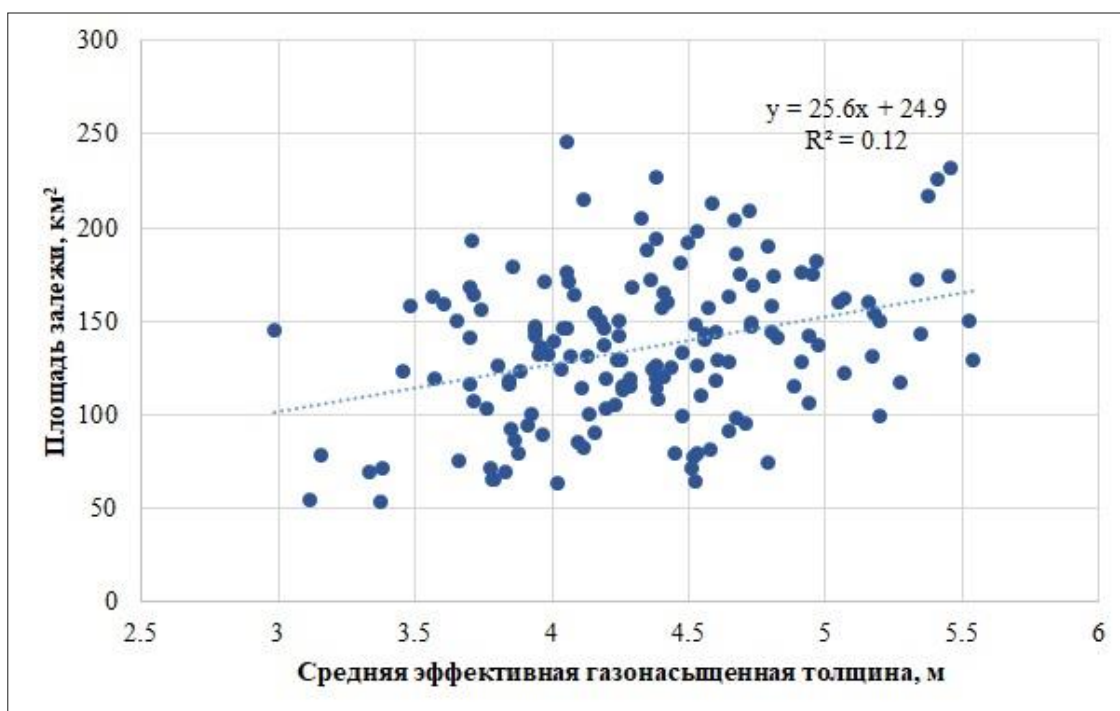


Рис. 7. Кросс-плот «средняя эффективная газонасыщенная толщина – площадь залежи» для пласта М22

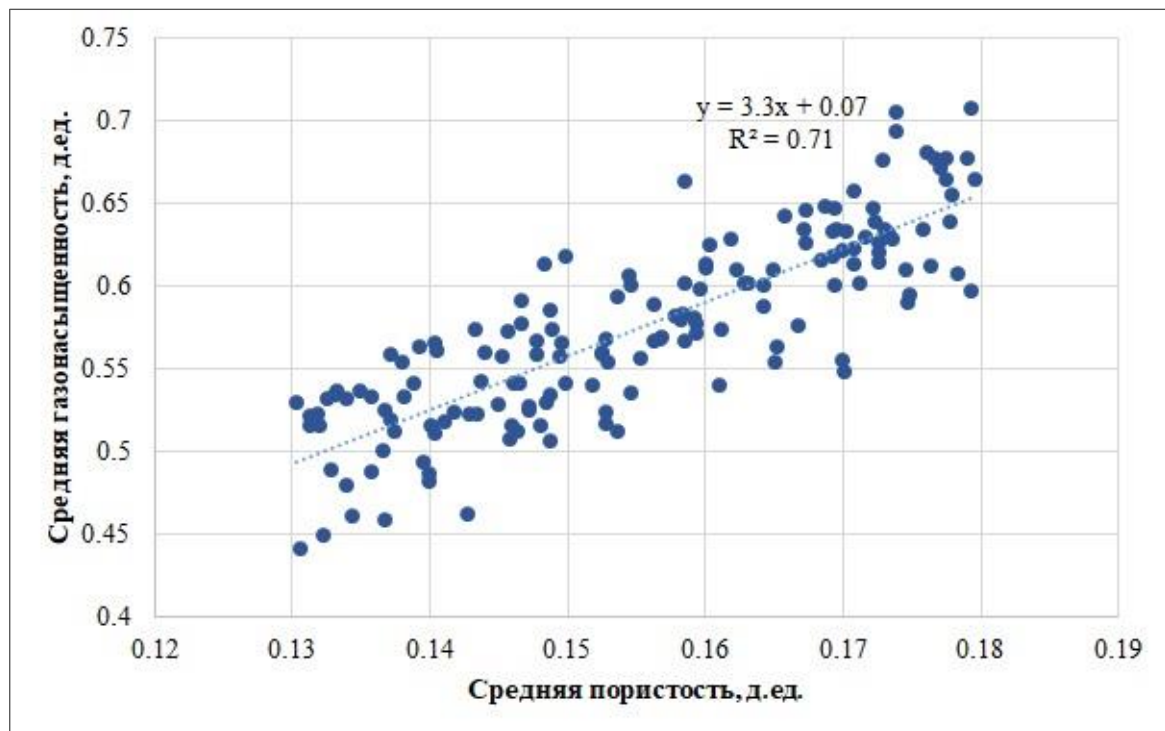


Рис. 8. Кросс-плот «средняя пористость – средняя газонасыщенность» для пласта М22

Таблица 4

Результаты вероятностной оценки запасов по пласту М

	Геологические запасы газа, млрд. м ³			P10/P90	(P10-P90)/ P50
	P90	P50	P10		
Оценка по 2D модели	7,1	12,8	20,7	2,9	107%
Оценка по 1D модели без учета корреляций	7,7	12,8	19,8	2,6	94%
Оценка по 1D модели с $R^2=1$	6,7	12,8	22,6	3,4	124%

Таким образом, приведенные примеры показывают, что оценка неопределенностей с помощью вероятностных геологических моделей связана не только со сложностями в определении диапазонов возможных значений различных параметров, но и с характеристикой зависимостей между ними, так как последние также оказывают значительное влияние на результаты оценки проекта. Без детального изучения и обоснования всех неоднозначных параметров и взаимосвязей между ними невозможно ожидать, что результаты вероятностного моделирования дадут лучшие результаты, чем детерминированный подход.

Литература

Попова О.А. Роль концептуальной геологической модели в вероятностной оценке месторождения // Европейская ассоциация геочеловеческих и инженеров. – 2018. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802014>

Alexander J.A., Lohr J.R. Risk Analysis: Lessons Learned // Society of petroleum engineers. – 1998. DOI: <https://doi.org/10.2118/49030-MS>

Begg S.H., Welsh M.B., Bratvold R.B. Uncertainty vs. Variability: What's the Difference and Why is it Important? // Society of petroleum engineers. – 2014. DOI: <https://doi.org/10.2118/169850-MS>

Harbaugh J.W., Davis J.C., Wendebourg J. Computing Risk for Oil Prospects: Principles and Programs. – Pergamon. – 1995. – 452 p.

Purvis D.C. Judgment in Probabilistic Analysis // Society of petroleum engineers. – 2003. DOI: <https://doi.org/10.2118/81996-MS>

Stabell C.B. Alternative Approaches to Modeling Risks in Prospects with Dependent Layers // Society of petroleum engineers. – 2000. DOI: <https://doi.org/10.2118/63204-MS>

Wang B., Kokolis G.P., Rapp W.J., Litvak B.L. Dependent Risk Calculations in Multiple-Prospect Exploration Evaluations // Society of petroleum engineers. – 2000. DOI: <https://doi.org/10.2118/63198-MS>

Popova O.A.

LLC Gazpromneft Science and Technology Centre (LLC Gazpromneft STC), St. Petersburg, Russia,
Popova.OAna@gazpromneft-ntc.ru

INFLUENCE OF CORRELATIONS ON RESULTS OF PROBABILISTIC GEOLOGICAL MODELLING

The paper deals with utilization of correlations between volumetric parameters in probabilistic geological models. When creating 1D probabilistic models in which uncertainties assessment is realized by multiplication of distributions, interrelationships between parameters often are not considered well that cause incorrect results of hydrocarbons-in-place estimation and adoption of non-optimal decisions. The degree of interdependencies influence on the modelling results is demonstrated, as well as cases of typical correlations that should be analyzed in probabilistic modelling are described.

Keywords: *correlations between volumetric parameters, interdependences between parameters, geological uncertainties, probabilistic geological model.*

References

- Alexander J.A., Lohr J.R. Risk Analysis: Lessons Learned. Society of petroleum engineers, 1998. DOI: <https://doi.org/10.2118/49030-MS>
- Begg S.H., Welsh M.B., Bratvold R.B. Uncertainty vs. Variability: What's the Difference and Why is it Important? Society of petroleum engineers, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2118/169850-MS>
- Harbaugh J.W., Davis J.C., Wendebourg J. Computing Risk for Oil Prospects: Principles and Programs. Pergamon, 1995, 452 p.
- Popova O.A. *Rol' kontseptual'noy geologicheskoy modeli v veroyatnostnoy otsenke mestorozhdeniya* [The role of conceptual geological model in probabilistic field assessment]. Evropeyskaya assotsiatsiya geouchenykh i inzhenerov, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802014>
- Purvis D.C. Judgment in Probabilistic Analysis. Society of petroleum engineers, 2003. DOI: <https://doi.org/10.2118/81996-MS>
- Stabell C.B. Alternative Approaches to Modeling Risks in Prospects with Dependent Layers. – Society of petroleum engineers, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2118/63204-MS>
- Wang B., Kokolis G.P., Rapp W.J., Litvak B.L. Dependent Risk Calculations in Multiple-Prospect Exploration Evaluations. Society of petroleum engineers, 2000. DOI: <https://doi.org/10.2118/63198-MS>

© Попова О.А., 2020

