

УДК 622 + 553.98.044

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2023

Вероятностно-статистический прогноз нефтегазоносности локальных структур на территории Ижемской ступени**Е.С. Ожгибесов**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

Probabilistic-Statistical Forecast of Oil and Gas Content of Local Structures on the Izhemsk Stage Territory**Evgeny S. Ozhgibesov**

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 05.09.2023. Принята / Accepted: 27.11.2023. Опубликовано / Published: 30.03.2024

Ключевые слова:

вероятностно-статистическая модель, прогноз нефтегазоносности, подготовленные структуры, критерии нефтегазоносности, нефть, комплексный критерий, доманиковый горизонт, условная вероятность, дискриминантный анализ.

Представлена методика прогноза нефтегазоносности локальных структур вероятностно-статистическими методами на территории Ижемской ступени. Основные перспективы нефтегазоносности на данном участке связаны с погребенными структурами, приуроченными к зоне барьерных рифов доманикового возраста. Целью работы является разработка комплексной вероятностной модели для оценки геологических рисков и ранжирования подготовленных структур по перспективности их ввода в глубокое бурение. В работе были проанализированы морфологические параметры структур по кровле доманикового горизонта: амплитуды, площади, абсолютные отметки сводов, размеры осей структур, а также толщины доманикового горизонта и удаленность структур от глубоководного склона. Для построения вероятностных моделей исходные данные разделены на два класса: нефтенасыщенные и пустые структуры. Информативность выбранных показателей оценена с помощью t -критерия Стьюдента. Установлено статистическое различие средних значений следующих параметров: амплитуда, размер длинной оси структур, толщина доманиковых отложений и удаленность свода структуры от глубоководного склона. Также выявлен и исключен из дальнейшего анализа наименее информативный параметр – абсолютная отметка свода структур. Для детального анализа распределения значений параметров были построены категоризованные гистограммы по классам нефтенасыщенных и пустых структур. На первом этапе по каждому параметру были рассчитаны условные интервальные вероятности и построены индивидуальные вероятностные модели нефтегазоносности. На втором этапе все показатели объединены в комплексную модель. Для оценки качества модели построена категоризованная гистограмма комплексных вероятностей по классам структур, а также проведено сопоставление полученных вероятностей с результатами дискриминантного анализа. Установлено, что модель успешно разделяет пустые и нефтенасыщенные структуры по граничному значению комплексной вероятности 0,5 доли ед. В результате применения построенной модели рассчитано, что в пределах рассматриваемой площади наиболее перспективной в отношении нефтегазоносности является Пильгорская структура.

Keywords:

probabilistic-statistical model, oil and gas potential forecast, prepared structures, oil and gas potential criteria, oil, complex criterion, Domanik horizon, conditional probability, discriminant analysis.

A methodology for predicting the oil and gas content of local structures using probable statistical methods on the territory of the Izhemsk stage is presented. The main oil and gas prospects in this area are associated with buried structures confined to the zone of Domanik barrier reefs. The goal of the work was to develop a comprehensive probabilistic model for assessing geological risks and ranking prepared structures according to the prospects of their introduction into deep drilling. The work analyzed the morphological parameters of the structures on the roof of the Domanik horizon: amplitudes, areas, absolute elevations of the arches, dimensions of the axes of the structures, as well as the thickness of the Domanik horizon and the distance of the structures from the deep-sea slope. To build probabilistic models, the initial data was divided into two classes: oil-saturated and empty structures. The information content of the selected indicators was assessed using Student's t -test. A statistical difference in the average values of the following parameters was established: amplitude, the size of the long axis of the structures, the thickness of the Domanik deposits and the distance of the structure's arch from the deep-sea slope. Also the least informative parameter – the absolute arch elevation was identified and excluded from further analysis. For a detailed analysis of the parameter values distribution, categorized histograms were constructed according to the classes of oil-saturated and empty structures. At the first stage, conditional interval probabilities were calculated for each parameter and individual probabilistic models of oil and gas content were built. At the second stage, all indicators were combined into a complex model. To assess the quality of the model, a categorized histogram of complex probabilities by structure class was constructed, and the obtained probabilities were compared with the results of discriminant analysis. It was established that the model successfully separated empty and oil-saturated structures according to the boundary value of the complex probability of 0.5 units. As a result of applying the constructed model, it was calculated that within the area under consideration, the most promising in terms of oil and gas content was the Pilegorskaya structure.

© Ожгибесов Евгений Сергеевич (ORCID: 0009-0004-8235-0836) – ассистент кафедры «Геология нефти и газа» (тел.: +007 (908) 261 81 55, e-mail: ozhgibesov2015@yandex.ru).

© Evgeny S. Ozhgibesov (Author ID in Scopus: 5748658400, ORCID: 0009-0004-8235-0836) – Assistant at the Department of Oil and Gas Geology (tel.: +007 (908) 261 81 55; e-mail: ozhgibesov2015@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ожгибесов Е.С. Вероятностно-статистический прогноз нефтегазоносности локальных структур на территории Ижемской ступени // Недропользование. – 2023. – Т.23, №4. – С.159–165. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.4.2

Please cite this article in English as:

Ozhgibesov E.S. Probabilistic-Statistical forecast of oil and gas content of local structures on the Izhemsk stage territory. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2023, vol.23, no.4, pp.159-165. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.4.2

Введение

В тектоническом отношении Ижемская ступень является структурой I порядка, расположенной в центральной части Ижма-Печорской синеклизы. Ижемская ступень представляет собой моноклираль, полого погружающуюся в северо-восточном направлении. Основные перспективы нефтегазоносности на данном участке связаны с погребенными структурами, приуроченными к зоне барьерных рифов доманикового возраста, а именно к гребневой части рифа, сложенной, как правило, проницаемыми карбонатными разностями, и структурами облегаания рифовых массивов сирачойского возраста [1, 2].

В доманиковом время в результате резкого погружения территории в условиях морского осадконакопления в юго-западной части Ижемской ступени существовала некомпенсированная глубоководная впадина, окаймляемая с востока и севера извилистой полосой барьерных рифов, за которой осадконакопление протекало в шельфовых условиях. В зоне рифообразования сформировалась цепочка узких антиклинальных складок, образующих валобразное поднятие вдоль глубоководного склона.

В пределах изучаемого района промышленные скопления углеводородов связаны с карбонатными породами доманиково-турнейского нефтегазоносного комплекса. Здесь открыты Щельяюрское, Демаельское, Макарьельское, Верхневольминское, Низевое и Южно-Низевое, Южно-Седмесское нефтяные месторождения. Оценка перспектив нефтегазоносности проводится на Пильгорской площади, в пределах которой находится три локальных структуры, подготовленные к глубокому бурению: Пильгорская, Воскресенская, Восточно-Макарьельская. Выкопировка из схемы тектонического районирования представлена на рис. 1.

Обработка большого объема различной геолого-геофизической информации требует применения методов математической статистики и теории вероятностей [3–12]. Используемый в работе математический аппарат и его применение для

решения прогнозных задач приводится в [13–26]. С целью ранжирования подготовленных структур осуществлен прогноз нефтегазоносности вероятностно-статистическими методами, использование которого приведено в работах [27–38].

Построение одномерных вероятностных моделей

Для оценки перспектив нефтегазоносности проанализированы морфологические параметры структур по отражающему горизонту Πf_2 , приуроченному к кровле доманикового горизонта: абсолютные отметки сводовой части структур – $AO_{св}$, м; амплитуды – A , м; площади – S , км²; размеры длинные оси – $L_{дл}$, м; размеры короткой оси – $L_{кз}$, м. Также проанализированы толщины доманикового горизонта в пределах структур – $H_{дмр}$, м; удаленность сводов структур от глубоководной впадины – $L_{тс}$, км. Для построения вероятностно-статистических моделей структуры были разделены на два класса: 1-й класс – структуры с доказанной нефтеносностью; 2-й класс – структуры с отрицательными результатами бурения. Алгоритм построения одномерных вероятностных моделей описан в работах [39–41].

Для оценки информативности выбранных параметров было выполнено сравнение средних значений параметров по классам структур с помощью t -критерия Стьюдента. Результаты сравнения представлены в табл. 1.

Статистически различия средних значений показателей по классам установлены по амплитуде, размеру длинной оси структур, толщине доманиковых отложений и удаленности свода структуры от глубоководного склона. Также выявлено, что наименее информативным показателем является абсолютная отметка свода структур. В связи с этим данный параметр не будет использоваться для построения вероятностных моделей. Для детального изучения распределения параметров построены категоризованные гистограммы по классам структур (рис. 2).

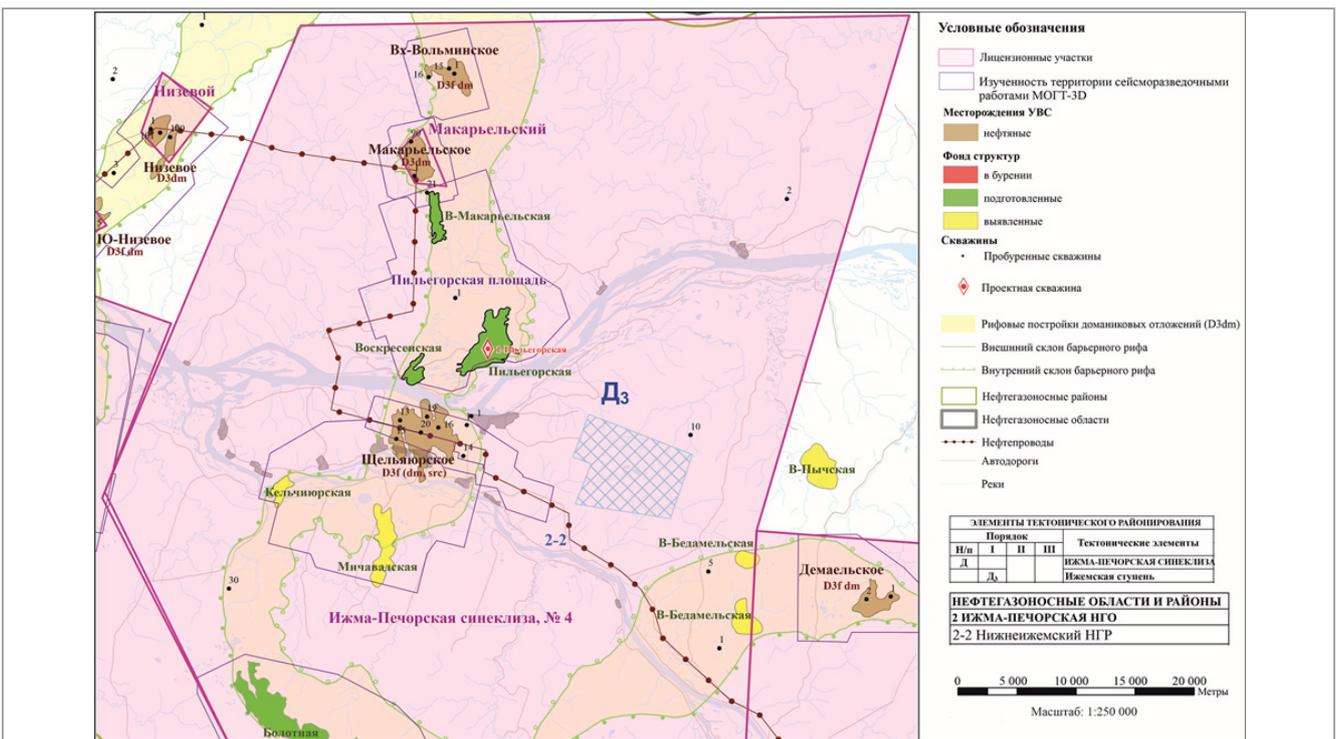


Рис. 1. Выкопировка из схемы тектонического районирования

Таблица 1

Статистические характеристики

Параметр	Среднее значение		<u>t-критерий</u>
	Нефтяные структуры	Пустые структуры	<u>p-value</u>
$AO_{св}$, м	-2054,29	-2056,57	<u>0,04</u> 0,97
A , м	34,14	20,00	<u>3,91</u> 0,002
S , км ²	6,03	3,99	<u>1,49</u> 0,162
$L_{д}$, км	4,10	3,42	<u>1,14</u> 0,275
$L_{к}$, км	2,36	1,39	<u>2,97</u> 0,012
H_{dm} , м	149,00	128,71	<u>2,93</u> 0,0127
$L_{тс}$, км	1,27	4,39	<u>-2,87</u> 0,014

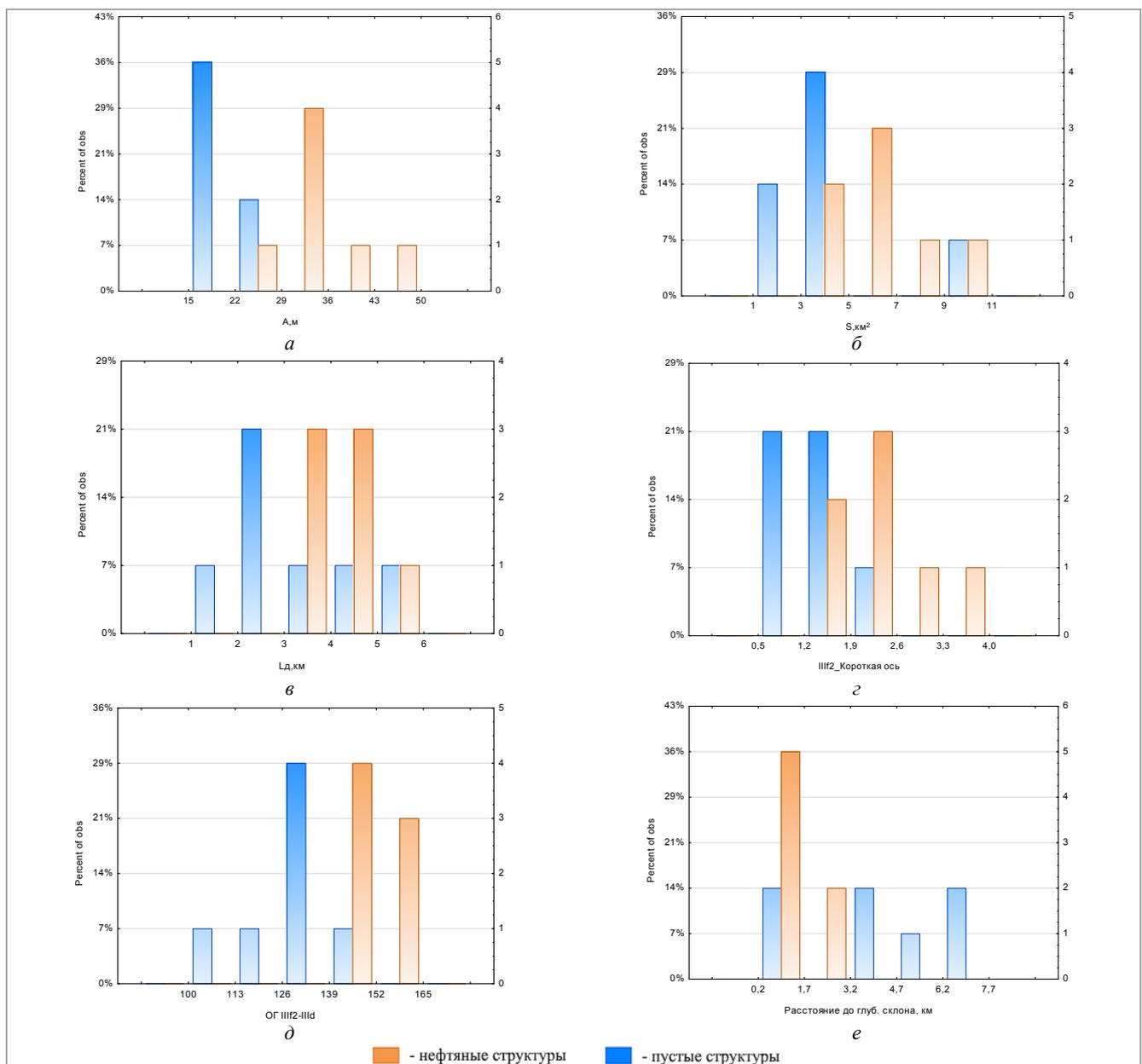


Рис. 2. Гистограммы показателей по категориям нефтяных и пустых структур: *a* – амплитуда; *б* – площадь; *в* – размер длинной оси; *г* – размер короткой оси; *д* – толщина доманиковых отложений; *е* – удаленность от глубоководного склона

Таблица 2

Условные интервальные вероятности

$A, м$	$P(A)$, доли ед.	$S, км^2$	$P(S)$, доли ед.	$L_{гн}, км$	$P(L_{гн})$, доли ед.
15–22	0	1–3	0	1–2	0
22–29	0,33	3–5	0,33	2–3	0
29–36	1	5–7	1	3–4	0,75
36–43	1	7–9	1	4–5	0,75
43–50	1	9–11	0,5	5–6	0,5
$L_{гн}, км$	$P(L_{гн})$, доли ед.	$H_{гнп}, м$	$P(H_{гнп})$, доли ед.	$L_{ггс}, км$	$P(L_{ггс})$, доли ед.
0,5–1,2	0	100–113	0	0,2–1,7	0,71
1,2–1,9	0,4	113–126	0	1,7–3,2	1
1,9–2,6	0,75	126–139	0	3,2–4,7	0
2,6–3,3	1	139–152	0,8	4,7–6,2	0
3,3–4	1	152–165	1	6,2–7,7	0

Таблица 3

Вероятностные модели

Параметр	Уравнение вероятностной модели	Диапазон применения	Диапазон вероятностей, доли ед.
$A, м$	$P(A) = -0,3722 + 0,0267 \cdot A$	15–50	0,0283–0,9628
$S, км^2$	$P(S) = 0,065 + 0,0835 \cdot S$	1–11	0,1485–0,9835
$L_{гн}, км$	$P(L_{гн}) = -0,1575 + 0,165 \cdot L_{гн}$	1–6	0,0075–0,8325
$L_{ггс}, км$	$P(L_{ггс}) = -0,1107 + 0,2714 \cdot L_{ггс}$	0,5–4	0,025–0,9749
$H_{гнп}, м$	$P(H_{гнп}) = -1,4165 + 0,0146 \cdot H_{гнп}$	100–165	0,0044–0,9925
$L_{ггс}, км$	$P(L_{ггс}) = 0,9749 - 0,1147 \cdot L_{ггс}$	0,2–7,7	0,092–0,952

Таблица 4

Индивидуальные и комплексные вероятности нефтегазоносности

Структура	Класс	$P(A)$, доли ед.	$P(S)$, доли ед.	$P(L_{гн})$, доли ед.	$P(L_{ггс})$, доли ед.	$P(H_{гнп})$, доли ед.	$P(L_{ггс})$, доли ед.	$P_{комп}$, доли ед.
Ю.-Седемеская	Нефт.	0,429	0,953	0,705	0,473	0,657	0,889	0,998
Демаельская	Нефт.	0,429	0,652	0,451	0,552	0,628	0,820	0,916
Бедамельская	Пустая	0,215	0,733	0,668	0,408	0,511	0,459	0,479
Ю.-Пычская	Пустая	0,028	0,324	0,291	0,275	0,540	0,183	0,001
С.-Болотная	Пустая	0,162	0,150	0,083	0,104	0,759	0,854	0,007
Щельюрская	Нефт.	0,749	0,498	0,514	0,704	0,847	0,751	0,992
В.-Щельюрская	Пустая	0,162	0,407	0,494	0,212	0,613	0,086	0,005
С.-Вольминская	Пустая	0,322	0,458	0,626	0,402	0,058	0,872	0,160
Стрелинская	Пустая	0,189	0,399	0,338	0,345	0,321	0,269	0,007
В.-Вольминское	Нефт.	0,295	0,574	0,453	0,432	0,963	0,929	0,992
Макарельская	Нефт.	0,963	0,580	0,585	0,351	0,920	0,946	1,000
Низевая	Нефт.	0,429	0,331	0,352	0,324	0,642	0,659	0,251
Ю.-Низевая	Нефт.	0,482	0,393	0,569	0,866	0,657	0,809	0,977
С.-Осиновая	Пустая	0,028	0,211	0,255	0,115	0,438	0,459	0,000
Пильгорская	–	0,349	0,900	0,998	0,975	0,584	0,356	0,98
В.-Макарельская	–	0,242	0,376	0,569	0,215	0,336	0,946	0,381
Воскресенская	–	0,242	0,297	0,272	0,296	0,409	0,843	0,073

По гистограмме амплитуд (см. рис. 2, а) установлено, что наиболее часто встречающиеся значения амплитуды для нефтяных структур находятся в интервале 29–36 м (29 %), для пустых – 15–22 м (36 %). Зона перекрытия классов определяется в интервале 22–29 м. Амплитуда больше 29 м характерна только для нефтяных структур.

Наиболее часто встречающиеся значения площади (см. рис. 2, б) для нефтяных структур находятся в интервале 5–7 км² (27 %), для пустых структур – 3–5 м (29 %). В основном для пустых структур характерно меньшее значение площади по сравнению с нефтенасыщенными.

По гистограмме размеров длинных осей структур (см. рис. 2, в) видно, что наиболее часто встречающиеся значения для нефтяных структур находятся в интервале 3–5 км (42 %), для пустых – 2–3 км (21 %). Зона перекрытия категорий определяется в интервале 3–6 км. Стоит отметить, что при значении данного параметра меньше 3 км встречаются только пустые структуры.

Наиболее часто встречающиеся значения длин коротких осей (см. рис. 2, б) для нефтяных структур находятся в интервале 1,9–2,6 км (21 %), для пустых структур – 0,5–1,9 м (42 %). Зона перекрытия классов 1,2–2,6 км.

Наиболее часто встречающиеся значения толщин доманикового горизонта (см. рис. 2, д) для нефтяных структур присутствуют в диапазоне 139–152 м (29 %),

для пустых – 126–139 м (29 %). Зона перекрытия категорий определяется в интервале 139–152 м. При толщинах меньше 139 м встречаются только пустые структуры.

По гистограмме удаленности от глубоководного склона (см. рис. 2, е) установлено, что нефтяные структуры встречаются при значениях данного параметра меньше 3,2 км, пустые структуры – на всем интервале значений 0,2–7,7 км.

В следующем шаге для каждого интервала, выделенного на гистограммах, определены частности по формуле:

$$P(X_j | W_k) = \frac{N_k}{N_q}, \quad (1)$$

где $P(X_j | W_k)$ – частность в k -м интервале для группы W_q ($q = 1$ – соответствует нефтяным структурам, а $q = 2$ – пустым структурам); N_k – число случаев содержания параметра X_j в k -м интервале; N_q – объем выборки структур с тем или иным характером насыщения.

Вычисленные частности использованы для расчета условных интервальных вероятностей нефтегазоносности:

$$P(W_q | X_j)_k = \frac{P(X_j | W_1)_k}{P(X_j | W_1)_k + P(X_j | W_2)_k}, \quad (2)$$

где $P(W_q|X_j)_k$ – условная интервальная вероятность принадлежности переменной X_j в k -м интервале к классу W_q .

Условные интервальные вероятности по каждому параметру представлены в табл. 2.

По полученным данным построены линейные вероятностные модели нефтегазоносности структур по каждому параметру. Методы построения вероятностных моделей для прогноза нефтегазоносности приведены в работах [42]. Полученные уравнения моделей и ограничения их использования представлены в табл. 3.

По уравнениям вероятностных моделей видно, что вероятность нефтегазоносности характеризуется прямой зависимостью от амплитуды, площади структуры, размеров длинной и короткой осей, толщины доманиковых отложений, и обратной зависимостью – с удаленностью от глубоководного склона. Также важно отметить, что полученные вероятностные модели являются корректными: диапазон вероятностей находится в диапазоне от 0 до 1 доли ед. и все модели пересекают линию с вероятностью 0,5 доли ед.

Построение комплексной модели

При прогнозировании нефтегазоносности необходимо учитывать все рассматриваемые показатели в совокупности. Для этого в исследовании рассчитывается комплексный показатель, применение которого описано в работах [43]. Расчет комплексной вероятности произведен по формуле:

$$P_{\text{комп}} = \frac{\prod_{j=1}^m P(W_n | X_j)}{\prod_{j=1}^m P(W_n | X_j) + \prod_{j=1}^m (1 - P(W_n | X_j))}, \quad (3)$$

В табл. 4 приведены значения условных вероятностей для каждого параметра, а также комплексная вероятность нефтегазоносности эталонных и подготовленных структур.

Для проверки полученной вероятностно-статистической модели построена гистограмма комплексных вероятностей по классам нефтенасыщенных и пустых структур (рис. 3).

По рис. 3 и табл. 4 видим, что все нефтяные структуры характеризуются комплексной вероятностью больше 0,5 доли ед. Для всех пустых структур вероятность нефтеносности составляет меньше 0,5 доли ед., причем большинство находится в интервале 0–0,1 доли ед.

Еще одним методом проверки полученной модели является сравнение комплексной вероятности нефтегазоносности, выявленной в ходе вероятностно-статистического анализа $P_{\text{компн}}$ с вероятностью нефтегазоносности по результатам дискриминантного анализа $P_{\text{компл}}$ (дискр). Возможности применения дискриминантного анализа для решения прогнозных задач приведены в работах [44, 45]. Для сравнения полученных вероятностей построено поле корреляции (рис. 4).

По полю корреляции установлено, что структуры разделились на две группы: нефтенасыщенные

Библиографический список

1. Пармузина Л.В., Лагутина Ю.А., Смирнова А.Е. Расчленение и корреляция отложений верхнедевонского комплекса Ижемской ступени // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2015. – № 2(110). – С. 17–25. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-2-17-25
2. Антоновская Т.В. Доманиковый горизонт – основной нефтегазоматеринский комплекс Тимано-Печорской провинции // Геология нефти и газа. – 2016. – № 4. – С. 62–69.
3. Михалевиц И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий). – Иркутск, 2006. – 115 с.

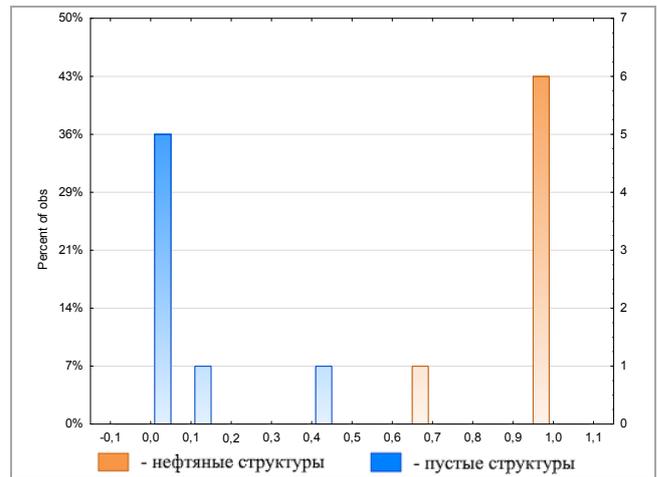


Рис. 3. Гистограмма комплексных вероятностей по категориям

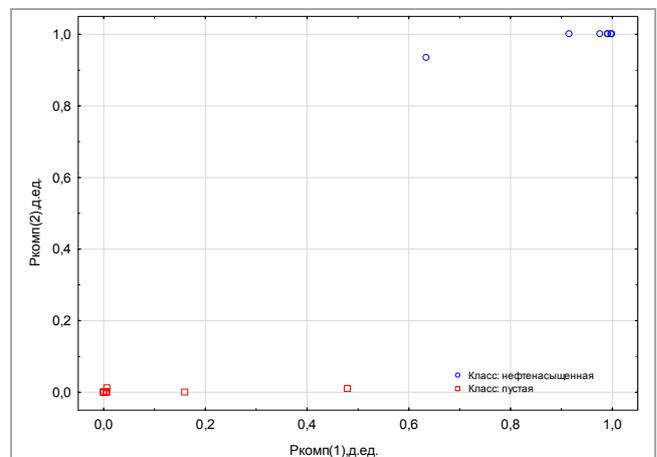


Рис. 4. Поле корреляции $P_{\text{компл}}$ и $P_{\text{компл}}$ (дискр)

с комплексными вероятностями по обоим видам анализа больше 0,5 доли ед. и пустые – с вероятностями меньше 0,5 доли ед. Таким образом, полученная вероятностно-статистическая модель является приемлемой для ранжирования структур по перспективам нефтегазоносности.

Заключение

Наибольшую вероятность нефтеносности 0,98 доли ед. имеет Пильгорская структура. Перспективность бурения данной структуры подтверждает и тот факт, что к данной структуре приурочено наибольшее среди всех рассматриваемых структур количество подготовленных ресурсов, что является одним из значимых факторов при выборе первоочередного объекта.

Восточно-Макарельская структура по результатам анализа имеет комплексную вероятность 0,381 доли ед., что ниже граничного значения. Воскресенская структура имеет наименьшую комплексную вероятность из всех рассмотренных структур, что говорит о неперспективности проведения на ней поисково-оценочных работ.

4. Андрейко С.С. Разработка математической модели метода прогнозирования газодинамических явлений по геологическим данным для условий Верхнекамского месторождения калийных солей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – № 21. – С. 345–353. DOI: 10.15593/224-9923/2016.21.6
5. Девис Дж. Статистика и анализ геологических данных. – М.: Мир, 1977. – 353 с.
6. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. – New York – London – Sydney – Toronto, 1977. – 606 p.
7. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Репина В.А. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – № 19. – С. 145–154. DOI: 10.15593/224-9923/2016.19.5
8. Wang P., Nair V. Statistical Analysis of Oil and Gas Discovery Data // Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources. – 1988. – Vol. 223. – P. 199-214.
9. Krysin N, Sologubova M. V. Probabilistic and statistical justification of the forecast of oil and gas potential in the area with established industrial oil capacity // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. – 2022 – Vol. 1021. – № 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012015
10. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics // AAPG. – Tulsa, Oklahoma, 1994. – 231 p.
11. Watson G.S. Statistic on spheres. – New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983. – 238 p.
12. Improving exploration success through uncertainty mapping, the Keg River reef play, Western Canada Sedimentary Basin / Z. Chen, K. Osadetz, H. Gao, P. Hannigan // Bull. Can. Petrol. Geol. – 2001. – Vol. 49, no. 3. – P. 367–375. DOI: 10.2113/49.3.367
13. Поморский Ю.Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных: монография. – Л., 1960. – 174 с.
14. Черепанов С.С. Комплексное изучение трещиноватости карбонатных залежей методом Уоррена-Рута с использованием данных сейсмофацциального анализа (на примере турнефаменской залежи Озерного месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 6–12. DOI: 10.15593/224-9923/2015.14.1
15. Галкин В.И., Пономарева И.Н., Черепанов С.С. Разработка методики оценки возможностей выделения типов коллекторов по данным кривых восстановления давления (КВД) по геолого-промысловым характеристикам пласта (на примере фаменской залежи Озерного месторождения) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 32–40. DOI: 10.15593/224-9923/2015.17.4
16. Черепанов С.С., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н. Оценка фильтрационно-емкостных свойств трещиноватых карбонатных коллекторов месторождений Предуральяского краевого прогиба // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 3. – С. 62–65.
17. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dinamic data analysis. – Paris: Kappa Engineering, 2008. – 694 p.
18. Van Golf-Racht T.D. Fundamentals of fractured reservoir engineering / Elsevier scientific publishing company. – Amsterdam – Oxford – New York, 1982. – 709 p.
19. Horne R.N. Modern well test analysis: A computer aided approach. – 2nd ed. – Palo Alto: Petroway Inc, 2006. – 257 p.
20. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to liner regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
21. Галкин В.И., Кунищких А.А. Статистическое моделирование расширяющегося тампонажного состава // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 215–244. DOI: 10.15593/224-9923/2017.3.2
22. Chen Z., Osadetz K. Undiscovered Petroleum Accumulation Mapping Using Model-Based Stochastic Simulation // Math Geol. – 2006. – Vol. 38. – P. 1–16. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032092
23. Koshkin K.A., Melkishev O.A. Use of derivatives to assess preservation of hydrocarbon deposits // International Conference Information Technologies in Business and Industry. – Tomsk, 2018. – Vol. 1015. – P. 032092.
24. Probability mapping of petroleum occurrence with a multivariate-Bayesian approach for risk reduction in exploration, Nanpu Sag of Bohay Bay Basin, China / H. Suyun, G. Qiulin, C. Zhuoheng, M. Shiyun, X. Hongbin // Geologos – 2009. – Vol. 15 (2). – P. 91–102.
25. Improving exploration success through uncertainty mapping, the Keg River reef play, Western Canada Sedimentary Basin / Z. Chen, K. Osadetz, H. Gao, P. Hannigan // Bull. Can. Petrol. Geol. – 2001 – Vol. 49(3). – P. 367–375. DOI: 10.2113/49.3.367
26. On the generation of probabilistic forecasts from deterministic models / E. Camporeale, X. Chu, O. Agapitov, J. Bortnik // Space Weather – 2019. – Vol. 17. – P. 455–475. DOI: 10.1029/2018SW002026
27. A method of predicting oil and gas resource spatial distribution based on Bayesian network and its application / Q. Guo, H. Ren, J. Yu, J. Wang, J. Liu, N. Chen // Journal of Petroleum Science and Engineering – 2021. – Vol. 208. – № 109267. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109267
28. Milkov A.V. Risk tables for less biased and more consistent estimation of probability of geological success (PoS) for segments with conventional oil and gas prospective resources // Earth-Science Reviews – 2015. – Vol. 150 – P. 453–476. DOI: 10.2307/2982158
29. Meisner J., Demirmen F. The creaming method: a bayesian procedure to forecast future oil and gas discoveries in mature exploration provinces // Journal of the Royal Statistical Society. Series A. – 1981. – Vol. 144, № 1. – P. 1–31. DOI: 10.1306/St1383C14
30. Kaufman G.M., Balcer Y., Kruyt D. A probabilistic model of oil and gas discovery. Estimating the volume of undiscovered oil and gas resources // Am. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology / J. Haun ed. – 1975. – Vol. 1 – P. 113–142.
31. Probabilistic Forecasting for Oil Producing Wells Using Seq2seq Augmented Model / H. Afifi, M. Elmahdy, M. Saban, M. Abuelkheir // Eng. Proc. – 2022. – Vol. 18(1) – P. 16. DOI: 10.3390/engproc2022018016
32. Wijaya N., Sheng J. Probabilistic forecasting and economic evaluation of pressure-drawdown effect in unconventional oil reservoirs under uncertainty of water blockage severity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 185. – № 06646. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106646
33. Olea R.A., Cook T.A., Coleman J.L. A Methodology for the Assessment of Unconventional (Continuous) Resources with an Application to the Greater Natural Buttes Gas Field, Utah // Nat. Resour. Res. – 2010. – Vol. 19. – P. 237–325. DOI: 10.1007/s11053-010-9127-8
34. Dore A.G., Sinding-Larsen R. Risk analysis and full-cycle probabilistic modelling of prospects: a prototype system developed for the Norwegian shelf // Norwegian Petroleum Society Special Publications. – 1996. – Vol. 6. – P. 153–165. DOI: 10.1016/S0928-8937(07)80016-6
35. Соснин Н.Е. Разработка статистических моделей для прогноза нефтегазоносности (на примере терригенных девонских отложений Северо-Татарского свода) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 5. – С. 16–25.
36. Зональный прогноз нефтегазоносности юрских отложений в пределах территории деятельности ТПП «Когальмнефтегаз» / В.И. Галкин, В.В. Бродягин, А.А. Потрясов, К.Г. Скачек, А.Н. Шайхутдинов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 31–35.
37. Кривошеков С.Н., Галкин В.И. Построение матрицы элементарных ячеек при прогнозе нефтегазоносности вероятностно-статистическими методами на территории Пермского края // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2008. – № 8. – С. 20–23.
38. Галкин В.И., Кривошеков С.Н. Обоснование направлений поисков месторождений нефти и газа в Пермском крае // Научные исследования и инновации. – 2009. – Т. 3, № 4. – С. 3–7.
39. Галкин В.И., Шайхутдинов А.Н. Построение статистических моделей для прогноза дебитов нефти по верхнеюрским отложениям Когальмского региона // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 1. – С. 52–54.
40. Галкин В.И., Шайхутдинов А.Н. О возможности прогноза нефтегазоносности юрских отложений вероятностно-статистическими методами (на примере территории деятельности ТПП «Когальмнефтегаз») // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 6. – С. 11–14.
41. Галкин В.И., Растегаев А.В., Галкин С.В. Вероятностно-статистическая оценка нефтегазоносности локальных структур / УрО РАН. – Екатеринбург, 2001. – 277 с.
42. Галкин В.И., Жуков Ю.А., Шишкин М.А. Применение вероятностных моделей для локального прогноза нефтегазоносности / УрО РАН. – Екатеринбург, 1990. – 108 с.
43. Кошкин К.А., Татаринов И.А. Разработка вероятностных моделей зонального прогноза нефтегазоносности центральной части Пермского свода по структурно-мощностным критериям // Недропользование. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 2–8. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.1.1
44. Деметьев Л.Ф. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии. – М.: Недра, 1987. – 264 с.
45. Галкин В.И., Соснин Н.Е. Разработка геолого-математических моделей для прогноза нефтегазоносности сложнопостроенных структур в девонских терригенных отложениях // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 28–31.

References

1. Parmuzina L.V., Lagutina Iu.A., Smirnova A.E. Raschlenenie i korreliatsiia otlozhenii verkhnedevonskogo kompleksa Izhemskoi stupeni [Sequence and correlation of deposits of Izhma step Upper Devonian complex]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 2015, no. 2 (110), pp. 17-25. DOI: 10.31660/0445-0108-2015-2-17-25
2. Antonovskaia T.V. Domanikovy gorizont - osnovnoi neftegazomaterinskii kompleks Timano-Pechorskoi provintsii [The Domanik horizon - the principle oil-gas source complex of the Timan-Pechora province]. *Geologiya nefii i gaza*, 2016, no. 4, pp. 62-69.
3. Mikhalevich I.M., Primina S.P. Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoi informatsii (s ispol'zovaniem komp'yuternykh tekhnologii) [Application of mathematical methods in the analysis of geological information (using computer technology)]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi universitet, 2006, 115 p.
4. Andreiko S.S. Razrabotka matematicheskoi modeli metoda prognozirovaniia gazodinamicheskikh iavlenii po geologicheskim dannym dlia uslovii Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Development of mathematical model of gas-dynamic phenomena forecasting method according to geological data in conditions of Verkhnekamskoe potash salt deposit.]. *Vestnik Permского natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2016, no. 21, pp. 345-353. DOI: 10.15593/224-9923/2016.21.6
5. Devis Dzh. Statistika i analiz geologicheskikh dannykh [Statistics and analysis of geological data]. Moscow: Mir, 1977, 353 p.
6. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. New York - London - Sydney - Toronto, 1977, 606 p.

7. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Repina V.A. Issledovanie protsessa nefteizvlecheniia v kollektorakh razlichnogo tipa pustotnosti s ispol'zovaniem mnogomernogo statisticheskogo analiza [Study of oil recovery from reservoirs of different void types with use of multidimensional statistical analysis]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2016, no. 19, pp. 145-154. DOI: 10.15593/224-9923/2016.19.5
8. Wang P., Nair V. Statistical Analysis of Oil and Gas Discovery Data. *Quantitative Analysis of Mineral and Energy Resources*, 1988, vol. 223, pp. 199-214.
9. Krysin N., Solobubova M. V. Probabilistic and statistical justification of the forecast of oil and gas potential in the area with established industrial oil capacity. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1021, no. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/1021/1/012015
10. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. *AAPG*. Tulsa, Oklahoma, 1994, 231 p.
11. Watson G.S. *Statistic on spheres*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1983, 238 p.
12. Chen Z., Osadetz K., Gao H., Hannigan P. Improving exploration success through uncertainty mapping, the Keg River reef play, Western Canada Sedimentary Basin. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 2001, vol. 49, no. 3, pp. 367-375. DOI: 10.2113/49.3.367
13. Pomorskii Iu.L. Metody statisticheskogo analiza eksperimental'nykh dannykh [Methods for statistical analysis of experimental data]. Leningrad, 1960, 174 p.
14. Cherepanov S.S. Kompleksnoe izuchenie treshchinovatosti karbonatnykh zalezhei metodom Uorrena-Ruta s ispol'zovaniem dannykh seismofatsial'nogo analiza (na primere turnefamenskoi zalezhi Ozernogo mestorozhdeniia) [Integrated research of carbonate reservoir fracturing by Warren-Root method using seismic facies analysis (evidence from Tournaian-Famennian deposit of Ozernoe field)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2015, no. 14, pp. 6-12. DOI: 10.15593/224-9923/2015.14.1
15. Galkin V.I., Ponomareva I.N., Cherepanov S.S. Razrabotka metodiki otsenki vozmozhnosti vydeleniia tipov kollektorov po dannykh krivyykh vosstanovleniia davleniia (KVD) po geologo-promyslovym kharakteristikam plasta (na primere famenskoi zalezhi Ozernogo mestorozhdeniia) [Development of the methodology for evaluation of possibilities to determine reservoir types based on pressure build-up curves, geological and reservoir properties of the formation (case study of Famen deposits of Ozernoe field)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2015, no. 17, pp. 32-40. DOI: 10.15593/224-9923/2015.17.4
16. Cherepanov S.S., Martiushev D.A., Ponomareva I.N. Otsenka fil'tratsionnoemkostnykh svoystv treshchinovatykh karbonatnykh kollektorov mestorozhdenii Predural'skogo kraevogo progiba [Evaluation of filtration-capacitive properties of fractured carbonate reservoir of Predural'skogo edge deflection]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2013, no. 3, pp. 62-65.
17. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. *Dinamic data analysis*. Paris: Kappa Engineering, 2008, 694 p.
18. Van Golf-Racht T.D. *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier scientific publishing company, 1982, 709 p.
19. Horne R.N. *Modern well test analysis: A computer aided approach*. 2nd ed. Palo Alto: Petroway Inc, 2006, 257 p.
20. Montgomery D.C., Peck E.A. *Introduction to liner regression analysis*. - New York: John Wiley & Sons, 1982, 504 p.
21. Galkin V.I., Kunitiskikh A.A. Statisticheskoe modelirovanie rasshiriaushchegosia tamponazhnogo sostava [Statistical modelling of expanding cement slurry]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2017, vol. 16, no. 3, pp. 215-244. DOI: 10.15593/224-9923/2017.3.2
22. Chen Z., Osadetz K. Undiscovered Petroleum Accumulation Mapping Using Model-Based Stochastic Simulation. *Math Geol.*, 2006, vol. 38, pp. 1-16. DOI: 10.1007/s11004-005-9000-1
23. Koshkin K.A., Melkishev O.A. Use of derivatives to assess preservation of hydrocarbon deposits. *International Conference Information Technologies in Business and Industry*. Tomsk, 2018, vol. 1015, 032092 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032092
24. Suyun H., Qiulin G., Zhuoheng C., Shiyun M., Hongbin X. Probability mapping of petroleum occurrence with a multivariate-Bayesian approach for risk reduction in exploration, Nanpu Sag of Bohay Bay Basin, China. *Geologos*, 2009, vol. 15 (2), pp. 91-102.
25. Chen Z., Osadetz K., Gao H., Hannigan P. Improving exploration success through uncertainty mapping, the Keg River reef play, Western Canada Sedimentary Basin. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 2001, vol. 49(3), pp. 367-375. DOI: 10.2113/49.3.367
26. Camporeale E., Chu X., Agapitov O., Bortnik J. On the generation of probabilistic forecasts from deterministic models. *Space Weather*, 2019, vol. 17, pp. 455-475. DOI: 10.1029/2018SW002026
27. Guo Q., Ren H., Yu J., Wang J., Liu J., Chen N. A method of predicting oil and gas resource spatial distribution based on Bayesian network and its application. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 208, no. 109267. DOI: 10.1016/j.petrol.2021.109267
28. Milkov A.V. Risk tables for less biased and more consistent estimation of probability of geological success (PoS) for segments with conventional oil and gas prospective resources. *Earth-Science Reviews*, 2015, vol. 150, pp. 453-476. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.08.006
29. Meisner J., Demirmen F. The creaming method: a bayesian procedure to forecast future oil and gas discoveries in mature exploration provinces. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A*, 1981, vol. 144, no. 1, pp. 1-31. DOI: 10.2307/2982158
30. Kaufman G.M., Balcer Y., Kruyt D. A probabilistic model of oil and gas discovery. Estimating the volume of undiscovered oil and gas resources. *Am. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology*. J. Haun ed, 1975, vol. 1, pp. 113-142. DOI: 10.1306/St1383C14
31. Afifi H., Elmahdy M., Saban M., Abuelkheir M. Probabilistic Forecasting for Oil Producing Wells Using Seq2seq Augmented Model. *Eng. Proc.*, 2022, vol. 18 (1), 16 p. DOI: 10.3390/engproc2022018016
32. Wijaya N., Sheng J. Probabilistic forecasting and economic evaluation of pressure-drawdown effect in unconventional oil reservoirs under uncertainty of water blockage severity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 185, no. 06646. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106646
33. Olea R.A., Cook T.A., Coleman J.L. A Methodology for the Assessment of Unconventional (Continuous) Resources with an Application to the Greater Natural Buttes Gas Field, Utah. *Nat. Resour. Res.*, 2010, vol. 19, pp. 237-325. DOI: 10.1007/s11053-010-9127-8
34. Dore A.G., Sinding-Larsen R. Risk analysis and full-cycle probabilistic modelling of prospects: a prototype system developed for the Norwegian shelf. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 1996, vol. 6, pp. 153-165. DOI: 10.1016/S0928-8937(07)80016-6
35. Sosnin N.E. Razrabotka statisticheskikh modelei dlia prognoza neftegazonosnosti (na primere terrigenykh devonskikh otlozhenii Severo-Tatarskogo svoda) [Development of statistical models for predicting oil-and-gas content (on the example of terrigenous Devonian sediments of North Tatar arch)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 5, pp. 16-25.
36. Galkin V.I., Brodiagin V.V., Potriashov A.A., Skachek K.G., Shaikhutdinov A.N. Zonal'nyi prognoz neftegazonosnosti iurskikh otlozhenii v predelakh territorii deiatel'nosti TPP "Kogalymneftegaz" [Zonal forecast of oil and gas content of Jurassic deposits within the territory of activity of TPP "Kogalymneftegaz"]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2008, no. 8, pp. 31-35.
37. Krivoshechekov S.N., Galkin V.I. Postroenie matritsy elementarnykh iacheek pri prognoze neftegazonosnosti veroiatnostno-statisticheskimi metodami na territorii Permskogo kraia [Construction of a matrix of elementary cells in the forecast of oil and gas content by probabilistic-statistical methods in the territory of the Perm Territory]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2008, no. 8, pp. 20-23.
38. Galkin V.I., Krivoshechekov S.N. Obosnovanie napravlenii poiskov mestorozhdenii nefi i gaza v Permskom krae [Justification of directions for searching for oil and gas fields in the Perm Krai] *Nauchnye issledovaniia i innovatsii*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 3-7.
39. Galkin V.I., Shaikhutdinov A.N. Postroenie statisticheskikh modelei dlia prognoza debitov nefi po verkhneurskim otlozheniim Kogalym'skogo regiona [Construction of statistical models for forecasting oil production rates for the Upper Jurassic deposits of the Kogalym region]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2010, no. 1, pp. 52-54.
40. Galkin V.I., Shaikhutdinov A.N. O vozmozhnosti prognoza neftegazonosnosti iurskikh otlozhenii veroiatnostno-statisticheskimi metodami (na primere territorii deiatel'nosti TPP "Kogalymneftegaz" [On the possibility of forecasting the oil and gas content of Jurassic deposits using probabilistic and statistical methods (using the example of the territory of activity of the TPP "Kogalymneftegaz"). *Geologiya, geofizika i razrabotka neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2009, no. 6, pp. 11-14.
41. Galkin V.I., Rastegaev A.V., Galkin S.V. Veroiatnostno-statisticheskaiia otsenka neftegazonosnosti lokal'nykh struktur [Probabilistic and statistical assessment of oil and gas potential of local structures]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2001, 277 p.
42. Galkin V.I., Zhukov Iu.A., Shishkin M.A. Primenenie veroiatnostnykh modelei dlia lokal'nogo prognoza neftegazonosnosti [Application of probabilistic models for local forecast of oil and gas content]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1990, 108 p.
43. Koshkin K.A., Tatarinov I.A. Razrabotka veroiatnostnykh modelei zonal'nogo prognoza neftegazonosnosti tsentral'noi chasti Permskogo svoda po strukturalno-moshchnostnykh kriteriiam [Development of Zone Forecast probability Models for Oil and Gas Potential in the Central Part of the Permian Uplift by Structural and Capacity Criteria]. *Nedropol'zovanie*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 2-8. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.1.1
44. Dement'ev L.F. *Matematicheskie metody i EVM v neftegazovoi geologii* [Mathematical methods and computers in oil and gas geology]. Moscow: Nedra, 1987, 264 p.
45. Galkin V.I., Sosnin N.E. Razrabotka geologo-matematicheskikh modelei dlia prognoza neftegazonosnosti slozhnopostroennykh struktur v devonskikh terrigenykh otlozheniakh [Geological development of mathematical models for the prediction of oil and gas complex-built structures in the Devonian clastic sediments]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2013, no. 4, pp. 28-31.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.