

УДК 622 + 553.982.2.276.6

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2023

Разработка геолого-статистических моделей для оценки подтверждаемости геолого-морфологических характеристик структур Башкирского свода Пермского края**Е.С. Колесников**

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

Development of Geostatistical Models for Assessing the Confirmability of Geomorphological Characteristics of the Geological Structures (Bashkir Svod, Perm Krai)**Evgeniy S. Kolesnikov**

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

Получена / Received: 06.03.2023. Принята / Accepted: 28.08.2023. Опубликовано / Published: 25.03.2024

Ключевые слова:

геолого-морфологические характеристики, амплитуда структуры, ранжирование структур, геолого-разведочные работы, подтверждаемость структур глубоким бурением, оценка рисков, отражающий горизонт, геолого-статистический анализ, дискриминантный анализ.

В настоящее время, несмотря на относительно высокую точность подготовки структур к глубокому бурению, в Пермском крае по данным сейсморазведочных работ 3D наблюдается несоответствие между геолого-морфологическими характеристиками структур по результатам бурения и характеристиками по данным паспорта подготовленной структуры к глубокому бурению, из-за чего возникает необходимость разработки геолого-статистического подхода, позволяющего более точно оценить риски неподтверждения геолого-морфологических характеристик подготовленных к глубокому бурению структур, а также определить первоочередность объектов для дальнейших геологоразведочных работ.

В данной работе рассматривается один из вариантов разработки геолого-статистического подхода к классовой дифференциации 25 структур отражающего горизонта II^k и 21 структуры отражающего горизонта II^l, подготовленных сейсморазведочными работами 3D и на текущий момент уже разбуренных поисково-оценочными скважинами в пределах Башкирского свода Пермского края.

Исходными данными для анализа являлись следующие данные по паспорту подготовленных к глубокому бурению структур: амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта, площадь структуры по соответствующему отражающему горизонту, отношение длины структуры к её ширине, угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка, расстояние от структуры до края ближайшего тектонического элемента второго порядка и расстояние от структуры до центра ближайшего тектонического элемента второго порядка. Для каждой модели были определены и описаны характер и степень влияния изученных показателей на подтверждаемость амплитуды бурением.

Оценка дифференциации структур по классам и точность определения границ классов были подтверждены при классификации структур тестовой выборки с помощью дискриминантного анализа.

Данный геолого-статистический подход может применяться для более точной оценки рисков, связанных с проблемой неподтверждаемости геолого-морфологических характеристик подготовленных к глубокому бурению структур, а также для определения первоочередных объектов геолого-разведочных работ, независимо от их географического расположения и принадлежности тектоническим элементам.

Keywords:

geological and morphological characteristics, structure amplitude, structures ranking, geological exploration, confirmability of structures by deep drilling, risk assessment, seismic reflectors, geological and statistical analysis, discriminant analysis.

Today, despite the relatively high accuracy of preparing geological structures for deep drilling in the Perm Krai using 3D seismic, there is a discrepancy between the geological and morphological characteristics of structures before drilling and according to drilling results, which makes it necessary to develop a geological and statistical approach that makes it possible to more accurately assess the risks of non-confirmation of the geological and morphological characteristics of structures prepared for deep drilling, as well as to determine the priority of objects for further geological exploration work.

This work describes one of the options for developing a geological and statistical approach for rank differentiation of 25 structures of the II^k seismic reflector and 21 structures of the II^l seismic reflector, prepared by 3D seismic exploration. These structures has been already drilled by prospecting and appraisal wells within the Bashkir arch (Perm Krai).

The initial data for the analysis were from the passport of structures prepared for deep drilling: the amplitude of the structure, the structure area according to the corresponding reflecting horizon, the ratio of the structure length to its width, the angle between the long axis of the structure and the axis of the nearest tectonic second order element, the distance from the structure to the edge of the nearest second order tectonic element and the distance from the structure to the center of the nearest second order tectonic element.

For each model, the nature and degree of influence of the studied indicators on the confirmability of the amplitude by drilling was determined and described.

The assessment of differentiation of structures by class and the accuracy of determining class boundaries were confirmed when classifying the structures of the test sample using discriminant analysis.

This geological and statistical approach can be used for a more accurate assessment of the risks associated with the problem of the unconfirmability of the geological and morphological characteristics of structures prepared for deep drilling, as well as for identifying priority objects for geological exploration work, regardless of their geographical location and belonging to tectonic elements.

© **Колесников Евгений Сергеевич** – геолог отдела геологии и лицензирования (тел.: +007 (912) 580 50 60, e-mail: zhenya.kolesnikov.1997@mail.ru).

© **Evgeniy S. Kolesnikov** – PhD Student at the Department of the Department of Oil and Gas Geology (tel.: +007 (912) 580 50 60, e-mail: zhenya.kolesnikov.1997@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Колесников Е.С. Разработка геолого-статистических моделей для оценки подтверждаемости геолого-морфологических характеристик структур Башкирского свода Пермского края // Недропользование. – 2023. – Т.23, №3. – С.111-121. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.2

Please cite this article in English as:

Kolesnikov E.S. Development of Geostatistical Models for Assessing the Confirmability of Geomorphological Characteristics of the Geological Structures (Bashkir Svod, Perm Krai). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2023, vol.23, no.2, pp.111-121. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.3.2

Введение

В настоящее время, несмотря на относительно высокую точность подготовки структур к глубокому бурению, в Пермском крае по данным сейсморазведочных работ 3D наблюдается несоответствие между геолого-морфологическими характеристиками структур по результатам бурения и характеристиками по данным паспорта структуры подготовленной к глубокому бурению, из-за чего возникает необходимость разработки геолого-статистического подхода, позволяющего более точно оценить риски неподтверждения геолого-морфологических характеристик подготовленных к глубокому бурению структур, а также определить первоочередность объектов для дальнейших геолого-разведочных работ [1–10].

Дифференциация структур по классам перспективности и обоснование границ выделенных классов

Для анализа зависимостей амплитуд структур по данным поисково-оценочного бурения (A_p) от различных геолого-морфологических показателей, таких как амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта ($A_{п}$), площадь структуры по соответствующему отражающему горизонту ($S_{ог}$), отношение длины структуры к её ширине (D/S), угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка (γ), расстояние от структуры до края ближайшего тектонического элемента второго порядка (L_k), расстояние от структуры до центра ближайшего тектонического элемента второго порядка ($L_{ц}$), в программном обеспечении Statistica была выполнена пошаговая множественная регрессия для групп разного количества структур N , разбуренных поисково-оценочными скважинами на территории Башкирского свода Пермского края [10–34].

Регрессия выполнялась для N от 3 до 18 структур включительно по отражающим горизонтам (ОГ) Π^k и $\Pi^п$.

Ранжирование выборки было произведено в порядке возрастания амплитуд структур, подтвердившихся глубоким бурением (A_b).

В табл. 1 и 2 представлены результаты регрессионного исследования $A_b = f(A_{п}, S_{ог}, D/S, \gamma, L_k, L_{ц})$ для ОГ Π^k и ОГ $\Pi^п$.

Результаты регрессионного исследования для ОГ Π^k и $\Pi^п$ позволили объединить полученные геолого-статистические модели, близкие по характеру влияния значимых показателей. Так, и для ОГ Π^k , и для ОГ $\Pi^п$ были выделены три класса структур [12–14].

Результаты регрессионного исследования для ОГ Π^k представлены в табл. 1.

Класс «0» ОГ Π^k характеризует интервал N , где наблюдается формирование первой геолого-статистической модели, обусловленное постепенным увеличением N от 3 до 8. Стабилизация первой геолого-статистической модели происходит при N , равным 9. Статистически значимых показателей в классе «0» нет.

Класс «1» ОГ Π^k соответствует первой устойчивой геолого-статистической модели, прослеживающейся при N от 9 до 12.

Статистически значимыми показателями, контролирующими модель в данном интервале, являются угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка (γ) и фрагментарно амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта ($A_{п}$).

Коэффициент множественной корреляции (R^2) в данном интервале изменяется от 0,629 до 0,777. Величина p -критерия в данном интервале сформированной геолого-статистической модели варьируется от 0,051 до 0,002.

Перестроение геолого-статистической модели с первой на вторую происходит при N равным 13.

Класс «2» ОГ Π^k соответствует второй устойчивой геолого-статистической модели, прослеживающейся при N от 13 до 18.

Статистически значимым показателем в данном интервале является амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта ($A_{п}$).

Коэффициент множественной корреляции (R^2) в данном интервале изменяется от 0,558 до 0,893. Величина p -критерия в данном интервале сформированной геолого-статистической модели варьируется от 0,017 до 0,000.

Результаты регрессионного исследования для ОГ $\Pi^п$ представлены в табл. 2.

Класс «0» ОГ $\Pi^п$ характеризует интервал N , где наблюдается формирование первой геолого-статистической модели, обусловленное постепенным увеличением N от 3 до 6. Стабилизация первой геолого-статистической модели происходит при N , равным 7. Статистически значимых показателей в классе «0» нет.

Класс «1» ОГ $\Pi^п$ соответствует первой устойчивой геолого-статистической модели, прослеживающейся при N от 7 до 14.

Статистически значимым показателем, контролирующим модель в данном интервале, является угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка (γ).

Коэффициент множественной корреляции (R^2) в данном интервале изменяется от 0,682 до 0,886. Величина p -критерия в данном интервале варьируется от 0,000 до 0,004.

Перестроение геолого-статистической модели с первой на вторую происходит при N , равным 15.

Класс «2» ОГ $\Pi^п$ соответствует второй устойчивой геолого-статистической модели, прослеживающейся при N от 16 до 19.

Статистически значимыми показателями в данном интервале являются амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта ($A_{п}$), и фрагментарно угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка (γ).

Коэффициент множественной корреляции (R^2) в данном интервале изменяется от 0,847 до 0,880. Величина p -критерия в данном интервале варьируется около 0,000.

Наблюдается различная зависимость A_b от показателей $A_{п}$, $S_{ог}$, D/S , γ , L_k и $L_{ц}$ в разных интервалах N , что указывает на возможность дифференциации значения A_b на три диапазона (класса) для каждого отражающего горизонта.

Таблица 1

Результаты регрессионного исследования для ОГ II^к

N п/п	A _п , м	A _б , м	B, доли ед.	Коэффициенты при показателях, доли ед.						R ² , доли ед.	p-кр., доли ед.	Класс
				A _п	S _{ог}	D/S	γ	L _к	L _ц			
1	10	3										
2	16	8										
3	14	9	-1,837		0,005				0,000	1,000		0
4	11	10	9,797		-0,001			-0,001	0,000	1,000		0
5	13	10	7,866					-0,001	0,000	0,957	0,043	0
6	11	11	7,679					-0,001		0,323	0,240	0
7	16	12	-0,311	1,334	-0,004			-11,989		0,575	0,405	0
8	15	13	6,023			1,543				0,305	0,156	0
9	13	17	7,138	0,573				-0,202		0,629	0,051	1
10	18	18	6,822	0,606				-0,206		0,745	0,008	1
11	15	19	7,353	0,618				-0,230		0,776	0,003	1
12	17	19	4,809	0,818				-0,224		0,754	0,002	1
13	17	19	-5,727	1,575		-1,946				0,558	0,017	2
14	20	26	-6,139	1,708		-2,061	-4,786			0,728	0,004	2
15	27	29	-2,119	1,380		-1,706	-5,074			0,785	0,001	2
16	26	31	-2,345	1,399		-1,735	-5,017			0,841	0,000	2
17	33	35	-0,983	1,320		-1,754	-5,668			0,880	0,000	2
18	29	39	-1,977	1,402		-1,992	-4,401			0,893	0,000	2

Примечание: здесь и в табл. 2 жирным шрифтом выделены статистически значимые показатели, для которых значение p-критерия, характеризующего вероятность ошибки первого рода, меньше или равно 0,05; N – порядковый номер структур; B – свободный член регрессионной модели.

Таблица 2

Результаты регрессионного исследования для ОГ II^п

N п/п	A _п , м	A _б , м	B, доли ед.	Коэффициенты при показателях, доли ед.						R ² , доли ед.	p-кр., доли ед.	Класс
				A _п	S _{ог}	D/S	γ	L _к	L _ц			
1	9	7										
2	14	7										
3	16	11	23,000					-24,000		1,000		0
4	15	14	14,407		0,007	-1,957	-18,397			1,000		0
5	14	16	12,512			1,357	-17,644	0,000	0,000	1,000		0
6	16	16	11,609		0,001	1,022	-18,136	0,000	0,001	1,000		0
7	18	18	19,860					-0,204		0,838	0,004	1
8	20	20	19,915					-0,205		0,883	0,001	1
9	21	20	20,442					-0,216		0,886	0,000	1
10	17	24	21,303					-0,235		0,886	0,000	1
11	18	26	22,464					-0,252		0,762	0,001	1
12	24	26	23,101					-0,268		0,784	0,000	1
13	19	28	24,043					-0,279		0,701	0,000	1
14	23	28	24,816					-0,293		0,682	0,000	1
15	31	36	6,972	1,048		-1,931	-0,115			0,847	0,000	2
16	34	36	7,590	1,017		-1,920	-0,121			0,878	0,000	2
17	32	39	4,113	1,165		-1,891	-0,080			0,880	0,000	2
18	33	45	1,203	1,276		-2,326				0,879	0,000	2

Таблица 3

Фактические и расчетные границы классов

Класс	Тип структуры	A _б по ОГ II ^к , м		A _б по ОГ II ^п , м	
		фактический интервал	расчетный интервал	фактический интервал	расчетный интервал
«0»	Малоперспективные	< 13	< 15	< 16	< 17
«1»	Среднеперспективные	17 < ... < 19	15 < ... < 19	18 < ... < 28	17 < ... < 32
«2»	Высокоперспективные	19 <	19 <	36 <	32 <

Таблица 4

Зависимость свободного члена уравнений регрессии (B) от амплитуды структуры (A_B)

Показатель	ОГ	Класс	Уравнение зависимости	Коэф. корр. r	Характер корреляции
A_B	II ^K	«0»	$2,2536 + 0,2415 \cdot A_B$	0,074	Положительная слабая
		«1»	$16,5285 - 0,5478 \cdot A_B$	-0,449	Отрицательная слабая
		«2»	$-10,6977 + 0,2508 \cdot A_B$	0,812	Положительная высокая
	II ^П	«0»	$46,1277 - 2,1576 \cdot A_B$	-0,978	Отрицательная высокая
		«1»	$10,9544 + 0,4648 \cdot A_B$	0,957	Положительная высокая
		«2»	$31,3071 - 0,6753 \cdot A_B$	-0,977	Отрицательная высокая

Таблица 5

Зависимость A_B от разных показателей

Показатель (x)	ОГ	Класс	Уравнение зависимости	Коэф. корр. r	Характер корреляции
A_{II}	II ^K	«0»	$6,25 + 0,3438 \cdot A_{II}$	0,482	Положительная слабая
		«1»	$14,7797 + 0,2203 \cdot A_{II}$	0,510	Положительная средняя
		«2»	$3,0385 + 1,0577 \cdot A_{II}$	0,890	Положительная высокая
	II ^П	«0»	$32,2727 - 1,1818 \cdot A_{II}$	-0,479	Отрицательная слабая
		«1»	$14,6591 + 0,4545 \cdot A_{II}$	0,291	Положительная слабая
		«2»	$19,5 + 0,6 \cdot A_{II}$	0,183	Положительная слабая
γ	II ^K	«0»	$12,5476 - 0,0857 \cdot \gamma$	-0,487	Отрицательная слабая
		«1»	$18 + 0,0667 \cdot \gamma$	0,522	Положительная средняя
		«2»	$22,8814 + 0,3144 \cdot \gamma$	0,960	Положительная высокая
	II ^П	«0»	$17,2727 - 0,1152 \cdot \gamma$	-0,700	Отрицательная средняя
		«1»	$24 - 2,5714 \cdot \gamma$	-0,058	Отрицательная слабая
		«2»	$30,2169 + 0,2602 \cdot \gamma$	0,807	Положительная высокая
D/S	II ^K	«0»	$8,7102 + 0,898 \cdot D/S$	0,751	Положительная высокая
		«1»	$19,1133 - 0,6101 \cdot D/S$	-0,282	Отрицательная слабая
		«2»	$47,0413 - 11,3281 \cdot D/S$	-0,650	Отрицательная средняя
	II ^П	«0»	$14,7429 - 0,1969 \cdot D/S$	-0,093	Отрицательная слабая
		«1»	$30,0038 - 3,3265 \cdot D/S$	-0,719	Отрицательная средняя
		«2»	$50,58 - 7,9237 \cdot D/S$	0,420	Положительная слабая
$S_{ог}$	II ^K	«0»	$10,7303 + 8,3461E-5 \cdot S_{ог}$	0,034	Положительная слабая
		«1»	$18,6987 - 0,0002 \cdot S_{ог}$	-0,404	Отрицательная слабая
		«2»	$25,2196 + 0,0026 \cdot S_{ог}$	0,417	Положительная слабая
	II ^П	«0»	$16,0155 - 0,0015 \cdot S_{ог}$	-0,372	Отрицательная слабая
		«1»	$26,0356 - 0,0011 \cdot S_{ог}$	-0,343	Отрицательная слабая
		«2»	$33,9529 + 0,0028 \cdot S_{ог}$	0,602	Положительная средняя
L_K	II ^K	«0»	$10,9675 + 0,0002 \cdot L_K$	0,268	Положительная слабая
		«1»	$18,0263 + 8,3775E-5 \cdot L_K$	0,632	Положительная средняя
		«2»	$29,88 + 0,0002 \cdot L_K$	0,050	Положительная слабая
	II ^П	«0»	$14,1998 + 0,0007 \cdot L_K$	0,696	Положительная средняя
		«1»	$23,6705 + 0,0001 \cdot L_K$	0,174	Положительная слабая
		«2»	$39,0214 + 0,0003 \cdot L_K$	0,121	Положительная слабая
L_{II}	II ^K	«0»	$10,9056 - 1,1629E-5 \cdot L_{II}$	-0,045	Отрицательная слабая
		«1»	$17,5669 + 6,2671E-5 \cdot L_{II}$	0,540	Положительная средняя
		«2»	$24,5051 + 0,0006 \cdot L_{II}$	0,355	Положительная слабая
	II ^П	«0»	$12,2836 + 0,0002 \cdot L_{II}$	0,424	Положительная слабая
		«1»	$22,9692 + 0,0001 \cdot L_{II}$	0,245	Положительная слабая
		«2»	$26,6512 + 0,0012 \cdot L_{II}$	0,531	Положительная средняя

Расчетные граничные значения разных классов A_B приняты как средние значения между фактическими граничными значениями классов (табл. 3) [32–38].

Зависимости свободного члена (B) от амплитуды структуры (A_B) по ОГ II^K и ОГ II^П приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что по ОГ II^K для класса «0» прослеживается слабая положительная зависимость B от показателя A_B , для класса «1» – слабая отрицательная, для класса «2» – высокая положительная; по ОГ II^П для

класса «0» – высокая отрицательная; для класса «1» – высокая положительная; для класса «2» – высокая отрицательная [32–37].

Результаты анализа зависимости свободного члена уравнений регрессии (B) от амплитуды структуры (A_B) по ОГ II^K и ОГ II^П приведены в табл. 4.

Анализ зависимости свободного члена уравнений регрессии (B) от амплитуды структуры (A_B) по ОГ II^K и ОГ II^П доказывает, что определение границ классов «0», «1» и «2» выполнено верно.

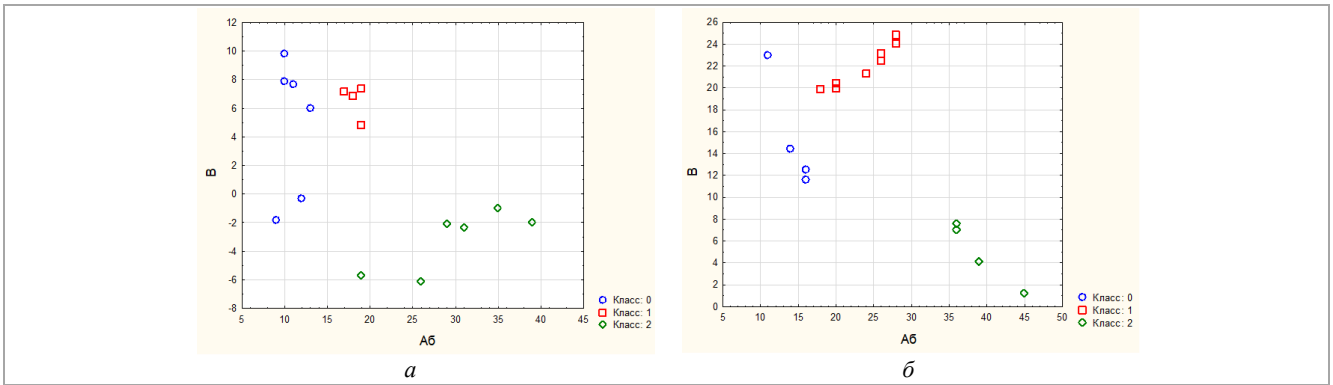


Рис. 1. Поля корреляции $B = f(A_b)$ для ОГ II^K (а) и ОГ II^K (б)

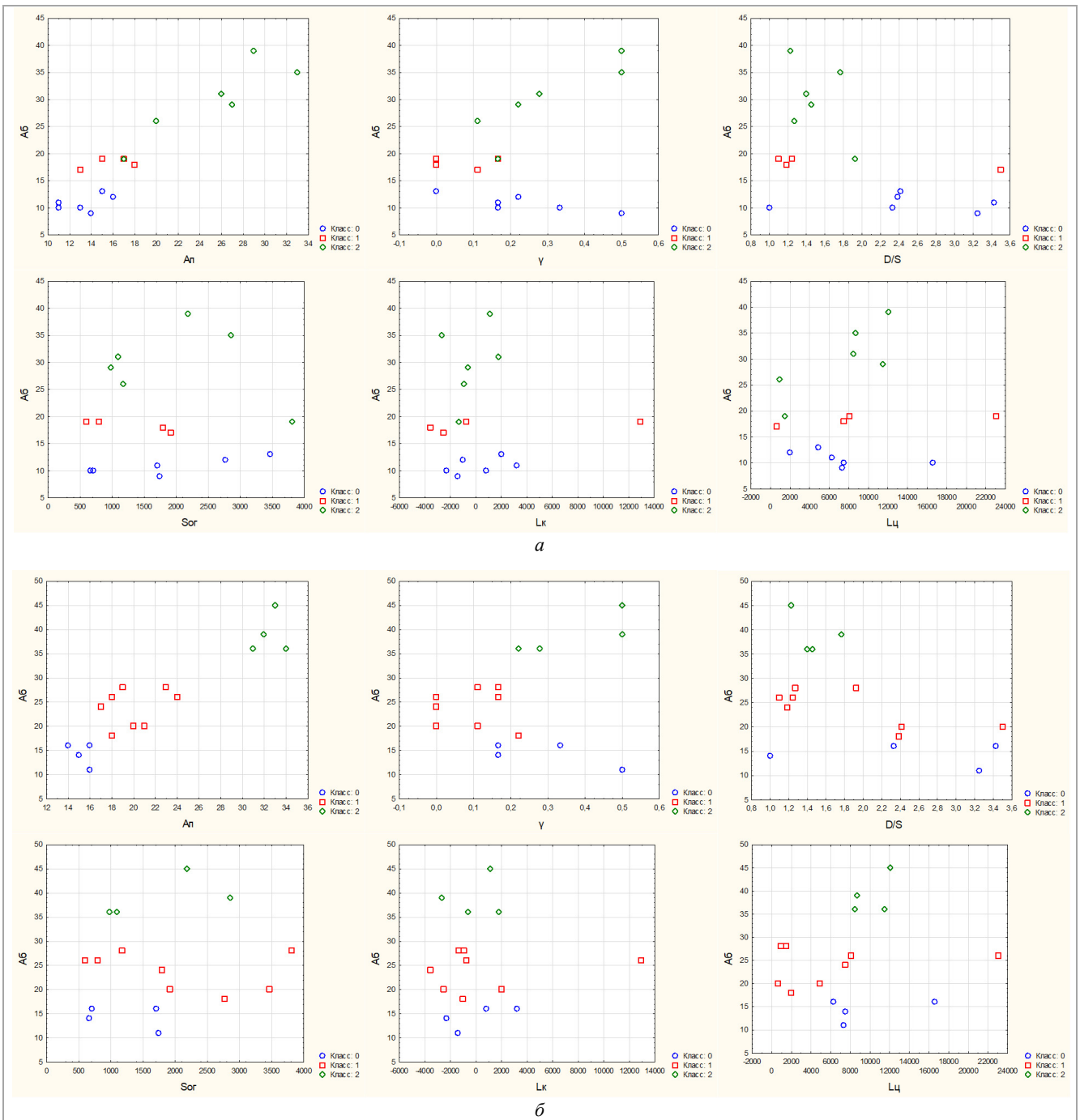


Рис. 2. Поля корреляции $A_b = f(x)$: а – для ОГ II^K; б – для ОГ II^П

Канонические дискриминантные функции

ОГ	Корень	Константа	$A_{П}$	$S_{ог}$	D/S	γ	$L_{ц}$	Соб. зн.
ОГ II ^к	Кор. 1	-3,006	0,266	0,000	-0,380	-0,808	0,000	3,036
	Кор. 2	0,782	0,020	0,000	0,116	-5,271	0,000	0,559
ОГ II ^п	Кор. 1	-11,581	0,492	0,001	-0,402	2,178	0,000	15,748
	Кор. 2	-2,241	0,032	-0,001	0,552	6,035	0,000	1,815

Таблица 7

Качественная характеристика дискриминантного анализа

N	Лямбда Уилкса, доли ед.	Частная лямбда, доли ед.	F -критерий – (3.18)	p -критерий, доли ед.	Толерантность	R^2
Для ОГ II ^к						
$A_{П}$	0,417	0,381	8,937	0,005	0,763	0,237
$S_{ог}$	0,164	0,971	0,167	0,849	0,655	0,345
D/S	0,166	0,955	0,257	0,778	0,687	0,313
γ	0,231	0,689	2,478	0,129	0,756	0,244
$L_{ц}$	0,186	0,854	0,941	0,420	0,570	0,431
Для ОГ II ^п						
$A_{П}$	0,258	0,082	61,353	0,000	0,726	0,274
$S_{ог}$	0,032	0,667	2,750	0,108	0,541	0,459
D/S	0,025	0,851	0,964	0,412	0,691	0,310
γ	0,049	0,430	7,282	0,010	0,801	0,199
$L_{ц}$	0,024	0,903	0,589	0,572	0,650	0,350

Поля корреляции для ОГ II^к и ОГ II^п между $A_{Б}$ и разными показателями приведены на рис. 2.

Результаты анализа полей корреляции представлены в табл. 5.

Оценка зависимостей произведена по значениям коэффициента корреляции (r).

Исходя из результатов анализа полей корреляции, можно сделать следующие **выводы** [39–43]:

1. Класс «0». Для малоперспективных структур до 15 метров по ОГ II^к прослеживается высокая положительная зависимость $A_{Б}$ от показателя D/S ; слабая положительная – от $A_{П}$, $L_{к}$ и $S_{ог}$; слабая отрицательная – от γ и $L_{ц}$. Для малоперспективных структур до 17 м по ОГ II^п прослеживается средняя положительная зависимость $A_{Б}$ от показателя $L_{к}$; средняя отрицательная – от γ ; слабая положительная – от $L_{ц}$; слабая отрицательная – от $A_{П}$, $S_{ог}$ и D/S .

2. Класс «1». Для среднеперспективных структур от 15 до 19 м по ОГ II^к прослеживается средняя положительная зависимость $A_{Б}$ от показателей $A_{П}$, γ , $L_{к}$, $L_{ц}$; слабая отрицательная – от D/S и $S_{ог}$. Для среднеперспективных структур от 17 до 32 метров по ОГ II^п прослеживается средняя отрицательная зависимость $A_{Б}$ от показателя D/S ; слабая положительная – от $A_{П}$, $L_{ц}$ и $L_{к}$; слабая отрицательная – от $S_{ог}$ и γ .

3. Класс «2». Для высокоперспективных структур от 19 метров по ОГ II^к прослеживается высокая положительная зависимость $A_{Б}$ от показателей γ и $A_{П}$; средняя отрицательная – от D/S ; слабая положительная – от $S_{ог}$, $L_{ц}$ и $L_{к}$. Для высокоперспективных структур от 32 метров по ОГ II^п прослеживается высокая положительная зависимость $A_{Б}$ от показателя γ ; средняя положительная – от $S_{ог}$ и $L_{ц}$; слабая положительная – от D/S , $A_{П}$ и $L_{к}$.

Оценка использования построенных моделей на практике

Для оценки использования на практике разработанной модели дифференциации структур был проведен дискриминантный анализ [18–20, 43–48].

Канонические дискриминантные функции, определяющие процесс классифицирования, подчинялись законам, указанным в табл. 6.

Собственные значения корней функции Кор. 1 и Кор. 2, характеризующие качество дифференцирования, соответственно равны 3,036 и 0,559 для ОГ II^к и 15,748 и 1,815 для ОГ II^п. Это означает, что в данном случае наиболее действенным будет разделение классов по Кор. 1 дискриминантной функции, поскольку чем больше собственное значение функции, тем эффективней разделение [43–45].

Качественные характеристики дискриминантного анализа для ОГ II^к и ОГ II^п представлены в табл. 7.

Лямбда Уилкса, характеризующая отношение внутригрупповой изменчивости к общей и определяющая качество группировки, в данном случае колеблется в пределах 0,164–0,417 долей ед. для ОГ II^к и 0,024–0,258 долей ед. для ОГ II^п, что означает, что для ОГ II^п группы более однородны внутри себя, чем для ОГ II^к, и практически не пересекаются между собой.

Частная лямбда определяет ценность того или иного признака классификации, т.е. определяет степень изменчивости лямбды Уилкса после добавления переменной. То есть чем меньше её значение, тем ценнее оказывается признак. В данном случае наиболее ценной переменной для ОГ II^к является $A_{П}$, а для ОГ II^п – $A_{П}$ и γ .

Таблица 8

Апостериорные вероятности для ОГ II^к

N	Выборка	Класс	Апостериорные вероятности		
			Класс «0» ($p = 0,444$)	Класс «1» ($p = 0,222$)	Класс «2» ($p = 0,333$)
1	обуч.	«0»	0,999	0,001	0,000
2	экз.	«0»	0,984	0,016	0,000
3	экз.	«0»	0,978	0,022	0,000
4	обуч.	«0»	0,984	0,011	0,005
5	экз.	«0»	0,999	0,001	0,000
6	экз.	«0»	0,950	0,050	0,000
7	экз.	«0»	0,999	0,001	0,000
8	обуч.	«0»	0,985	0,015	0,000
9	обуч.	«0»	0,662	0,337	0,002
10	обуч.	«0»	0,820	0,180	0,000
11	экз.	«0»	0,973	0,027	0,000
12	обуч.	«0»	0,863	0,137	0,000
13	обуч.	«0»	0,782	0,147	0,071
14	обуч.	«0»	0,514	0,471	0,015
15	экз.	«1»	0,016	0,983	0,001
16*	обуч.	«0»	0,758	0,239	0,003
17	обуч.	«1»	0,079	0,742	0,178
18	обуч.	«1»	0,230	0,769	0,000
19	обуч.	«1»	0,057	0,888	0,055
20*	обуч.	«0»	0,591	0,136	0,273
21	обуч.	«2»	0,013	0,080	0,907
22	обуч.	«2»	0,001	0,019	0,981
23	обуч.	«2»	0,001	0,009	0,990
24	обуч.	«2»	0,000	0,000	1,000
25	обуч.	«2»	0,000	0,001	0,999

Примечание: неправильные классификации обучающей выборки отмечены (*) и вызваны принадлежностью значения A_B к граничному значению классов.

Таблица 9

Апостериорные вероятности для ОГ II^п

N	Выборка	Класс	Апостериорные вероятности		
			Класс «0» ($p = 0,333$)	Класс «1» ($p = 0,444$)	Класс «2» ($p = 0,222$)
1	экз.	«0»	0,929	0,071	0,000
2	обуч.	«0»	1,000	0,000	0,000
3	обуч.	«0»	1,000	0,000	0,000
4	экз.	«0»	1,000	0,000	0,000
5	обуч.	«0»	0,998	0,003	0,000
6	обуч.	«0»	0,871	0,129	0,000
7	обуч.	«0»	0,999	0,001	0,000
8	обуч.	«0»	0,965	0,035	0,000
9	обуч.	«1»	0,011	0,989	0,000
10	обуч.	«1»	0,000	1,000	0,000
11	обуч.	«1»	0,034	0,966	0,000
12	обуч.	«1»	0,003	0,997	0,000
13	обуч.	«1»	0,014	0,986	0,000
14	обуч.	«1»	0,000	1,000	0,000
15	обуч.	«1»	0,000	1,000	0,000
16	обуч.	«1»	0,000	1,000	0,000
17	экз.	«1»	0,000	1,000	0,000
18	обуч.	«2»	0,000	0,000	1,000
19	обуч.	«2»	0,000	0,000	1,000
20	обуч.	«2»	0,000	0,000	1,000
21	обуч.	«2»	0,000	0,000	1,000

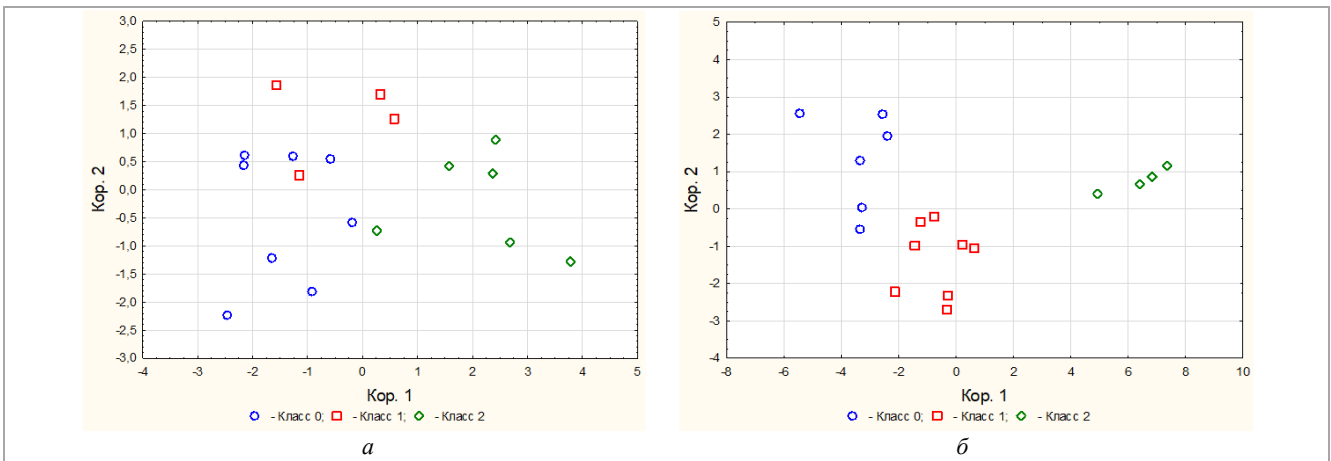


Рис. 3. График корней дискриминантных функций Кор. 1 и Кор. 2 для ОГ II^К (а) и ОГ II^И (б)

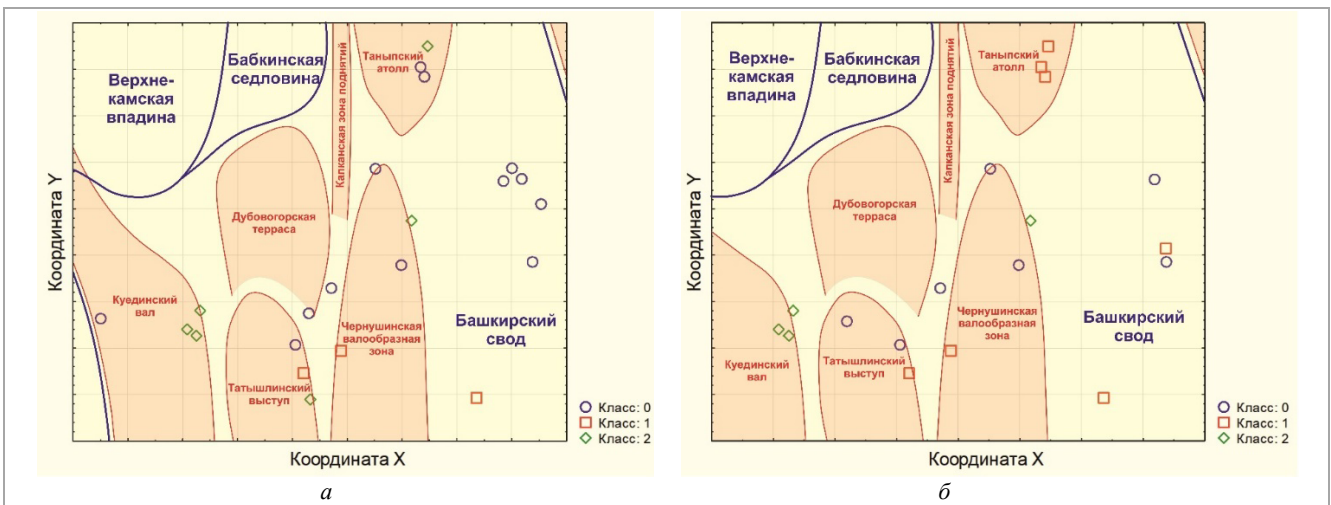


Рис. 4. Схема распределения различных классов структур по результатам анализа апостериорных вероятностей для ОГ II^К (а) и ОГ II^И (б); синим цветом выделены границы тектонических элементов первого порядка, красным – второго

Графики корней дискриминантных функций Кор. 1 и Кор. 2 для ОГ II^К и ОГ II^И представлены на рис. 3.

По ОГ II^К класс «0» располагается только в отрицательных значениях Кор. 1 и как в отрицательных, так и в положительных значениях Кор. 2; класс «1» располагается как в отрицательных, так и положительных значениях Кор. 1 и только в положительных значениях Кор. 2; класс «2» располагается только в положительных значениях Кор. 1 и как в отрицательных, так и в положительных значениях Кор. 2.

По ОГ II^И класс «0» располагается только в отрицательных значениях Кор. 1 и как в отрицательных, так и в положительных значениях Кор. 2; класс «1» располагается как в отрицательных, так и положительных значениях Кор. 1 и только в отрицательных значениях Кор. 2; класс «2» располагается только в положительных значениях Кор. 1 и только в положительных значениях Кор. 2.

Апостериорные вероятности, полученные в результате дискриминантного анализа, характеризующие вероятность принадлежности структуры к конкретному классу, представлены в табл. 8 и 9 для ОГ II^К и ОГ II^И соответственно [38, 41–42].

Схема совместного распределения различных классов структур по результатам анализа апостериорных вероятностей, полученных при использовании дискриминантного анализа, представлена на рис. 4.

Из рисунка можно сделать вывод, что данный подход к ранжированию может применяться для различных структур, независимо от их географического расположения и принадлежности тектоническим элементам, поскольку структуры всех классов распределены повсеместно.

Заключение

В результате анализа зависимостей амплитуд структур по данным поисково-оценочного бурения от различных геолого-морфологических показателей, таких как амплитуда структуры, подготовленной к глубокому бурению по данным паспорта, площадь структуры по соответствующему отражающему горизонту, отношение длины структуры к ее ширине, угол между длинной осью структуры и осью ближайшего тектонического элемента второго порядка, расстояние от структуры до края ближайшего тектонического элемента второго порядка и расстояние от структуры до центра ближайшего тектонического элемента второго порядка, были разработаны

геолого-статистические модели трех классов структур с разной перспективностью. Для каждой модели были определены и описаны характер и степень влияния изученных показателей на подтверждаемость амплитуды бурением.

Оценка дифференциации структур по классам и точность определения границ классов были подтверждены при классификации структур тестовой выборки с помощью дискриминантного анализа.

Данный геолого-статистический подход может применяться для более точной оценки рисков, связанных с проблемой неподтверждаемости геолого-морфологических характеристик подготовленных к глубокому бурению структур, а также для определения первоочередных объектов геологоразведочных работ, независимо от их географического расположения и принадлежности тектоническим элементам.

Библиографический список

1. Галкин В.И., Растегаев А.В., Галкин С.В. Вероятностно-статистическая оценка нефтегазоносности локальных структур. – Екатеринбург, 2011. – 299 с.
2. 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.
3. Геохимические показатели РОВ пород как критерии оценки перспектив нефтегазоносности / В.И. Галкин, И.А. Козлова, О.А. Мелкишев, М.А. Шадрин // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 9. – С. 28–31.
4. Cosentino L. Integrated reservoir studies. – Paris: Editions Technip, 2001. – 400 p.
5. Armstrong M. Basic Linear Geostatistics. – Springer, 1998. – 155 p.
6. 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: 10.2307/2982158
7. О возможности прогнозирования нефтегазоносности фаменских отложений с помощью построения вероятностно-статистических моделей / В.И. Галкин, И.А. Козлова, С.Н. Кривошеков, Е.В. Пятунина, С.Н. Пестова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 10. – С. 22–27.
8. 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.
9. Дифференцированная вероятностная оценка генерационных процессов в отложениях доманикового типа Пермского края / В.И. Галкин, Т.В. Карасева, И.А. Козлова, М.А. Носов, С.Н. Кривошеков // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 12. – С. 103–105.
10. Галкин В.И., Соловьев С.И. Районирование территории Пермского края по степени перспективности приобретения нефтяных участков недр // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 16. – С. 14–24. DOI:10.15593/224-9923/2015.16.2.
11. Южаков А.Л. Прогноз нефтегазоносности структур по тектоническим элементам отражающего горизонта ПК южной части Пермского края // Новые направления нефтегазовой геологии и геохимии. Развитие геологоразведочных работ: сборник материалов II Междунар. науч. конф. – Пермь, 2019. – С. 195–200.
12. Deutsch C.V. Geostatistical Reservoir modelling. – Oxford University Press, 2002.
13. Поморский Ю.Л. Методы статистического анализа экспериментальных данных: монография. – Л., 1960. – 174 с.
14. Isaaks E.H., Srivastava R.M. An Introduction to Applied Geostatistics. – Oxford University Press, 1989. – 561 p.
15. Kovalevskiy E. Geological Modelling on the Base of Geostatistics: Course Note. – Student Lecture Tour. – RUSSIA & CIS, 2011–2012.
16. Воеводкин В.Л., Галкин В.И., Кривошеков С.Н. Исследование влияния критериев нефтегазоносности и изученности территории Пермского края на распределение месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 6. – С. 30–34.
17. Zhuoheng Ch., Osadetz K.G. Geological Risk Mapping and Prospect Evaluation Using Multivariate and Bayesian Statistical Methods, Western Sverdrup Basin of Canada // AAPG Bulletin. – 2006. – Vol. 90. – № 6. – P. 859–872. DOI: 10.1306/01160605050
18. Галкин С.В. Вероятностный прогноз геологических рисков при поисках месторождений нефти и газа. – Пермь: Книжный мир, 2009. – 224 с.
19. Kaufman M.G. Statistical issues in the assessment of undiscovered oil and gas resources. – MITCEEP, 1992. – 30 p.
20. К методике оценки перспектив нефтегазоносности Соликамской депрессии по характеристикам локальных структур / В.И. Галкин, И.А. Козлова, А.В. Растегаев, И.В. Ванцева, С.Н. Кривошеков, В.Л. Воеводкин // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 12–17.
21. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. – New York: Oxford University Press, 1998. – 369 p.
22. Южаков А.Л. Классификация структурных локальных остатков отражающего горизонта ПК на примере юга Пермского края // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XI Всерос. науч.-техн. конф., г. Пермь, 7–9 ноября 2018 г. – Пермь, 2018. – С. 85.
23. Путилов И.С. Научное обоснование вероятностно-статистических методов прогноза нефтегазоносности структур в условиях высокоизученных территорий. – Пермь, 2016. – 369 с.
24. Лядова Н.А., Яковлев Ю.А., Распопов А.В. Геология и разработка нефтяных месторождений Пермского края. – М.: ВНИИОЭНГ, 2010. – 335 с.
25. Путилов И.С. Разработка технологий комплексного изучения геологического строения и размещения месторождений нефти и газа. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 285 с.
26. Галкин С.В., Лобанов Д.С. Использование многомерных статистических моделей при оперативном контроле извлекаемых запасов визейских залежей Пермского края // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 126–136. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3463
27. Кривошеков С.Н. Разработка регионально-зональных критериев прогноза нефтегазоносности территории Пермского Прикамья вероятностно-статистическими методами // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 10. – С. 10–14.
28. Кривошеков С.Н., Галкин В.И., Волкова А.С. Разработка вероятностно-статистической методики прогноза нефтегазоносности структур // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 28–31.
29. Montgomery D.C., Peck E.A., Introduction to linear regression analysis. – New York: John Wiley & Sons, 1982. – 504 p.
30. Михалевич И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий). – Иркутск, 2006. – 115 с.
31. Фокин А. Риски и неопределенности в геологоразведочном процессе // Новатор. – 2011. – № 43. – С. 8–12.
32. Путилов И.С. Трехмерное геологическое моделирование при разработке нефтяных и газовых месторождений. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 72 с.
33. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. – New York – London – Sydney – Toronto, 1977. – 606 p.
34. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics // AAPG. – Tulsa, Oklahoma, 1994. – 231 p.
35. Ампилов Ю.П. Методы геолого-экономического моделирования ресурсов и запасов нефти и газа с учетом неопределенности и риска. – М.: Геоинформмарк, 2002. – 201 с.
36. Horne R.N. Modern well test analysis: A computer aided approach. – 2nd ed. – Palo Alto: Petroway Inc, 2006. – 257 p.
37. Путилов И.С., Галкин В.И. Разработка методики вероятностно-статистического прогноза нефтегазоносности локализованных структур (на примере южной части Пермского края) // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 4. – С. 26–29.
38. Кривошеков С.Н., Кочнев А.А., Санников И.В. Перспективы нефтегазоносности отложений доманикового типа на территории Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 18–26. DOI: 10.15593/2224-9923/2013.9.2
39. Дементьев Л.Ф. Математические методы и ЭВМ в нефтегазовой геологии. – М.: Недра, 1987. – 264 с.
40. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Расчеты в условиях риска и неопределенности в нефтегазовых технологиях. – М.; Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та, 2004. – 296 с.
41. Prediction of residual oil saturation by using the ratio of amplitude of time-lapse seismic data / L. Meng, L. Zhen, L. Minzhu, Z. Huilai // Geophysics. – 2017. – Vol. 82, № 1. – P. 1–12. DOI: 10.1190/geo2015-0453.1

42. Davis J.C. *Statistics and Data Analysis in Geology*. – 3rd Edition. – John Wiley & Sons, 2002. – 656 p.
43. Галкин В.И., Жуков Ю.А., Шишкин М.А. Применение вероятностных моделей для локального прогноза нефтегазоносности. – Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 1990. – 108 с.
44. Путилов И.С., Галкин В.И. Применение вероятностного статистического анализа для изучения фациальной зональности турне-фаменского карбонатного комплекса Сибирского месторождения // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 9. – С. 112–114.
45. Дюбруль О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных / Евр. ассоциация геочелючных и инженеров (EAGE). – М., 2002. – 296 с.
46. Давыденко А.Ю. Вероятностно-статистические методы в геолого-геофизических приложениях. – Иркутск, 2007. – 29 с.
47. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. *Dinamic data analysis*. – Paris: Kappa Engineering, 2008. – 694 p.
48. Комплексный подход к изучению доманиковых отложений на территории Пермского края / И.С. Путилов, С.И. Соловьев, А.А. Обухов, Е.В. Пятунина // Перспективы увеличения ресурсной базы разрабатываемых отложений, в том числе из доманиковых отложений: сборник докладов по итогам межрегион. науч.-практ. конф., посвященной 70-летию НГДУ «Ленингорскнефть», Карабаш, 6–7 августа 2015 г. / ПАО «Татнефть». – Альметьевск, 2015. – С. 71–78.

References

1. 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, 2011, 299 p.
2. Galkin V.I., Krivoshchekov S.N. Obosnovanie napravlenii poiskov mestorozhdenii nefiti 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.
3. Galkin V.I., Kozlova I.A., Melkishev O.A., Shadrina M.A. Geokhimicheskie pokazateli ROV porod kak kriterii otsenki perspektiv neftegazonosnosti [Geochemical indicators of dispersed organic matter (DOM) of rocks as criteria of hydrocarbon potential evaluation]. *Neftepromyslovoe delo*, 2013, no. 9, pp. 28-31.
4. Cosentino L. *Integrated reservoir studies*. Paris: Editions Technip, 2001, 400 p.
5. Armstrong M. *Basic Linear Geostatistics*. Springer, 1998, 155 p.
6. 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
7. Galkin V.I., Kozlova I.A., Krivoshchekov S.N., Piatunina E.V., Pestova S.N. O vozmozhnosti prognozirovaniia neftegazonosnosti famenskikh otlozhenii s pomoshch'iu postroeniia veroiatnostno-statisticheskikh modeli [On the possibility of predicting the oil and gas content of Famennian deposits using the construction of probabilistic-statistical models]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefitnykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2007, no. 10, pp. 22-27.
8. Krivoshchekov 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 when predicting oil and gas content using probabilistic and statistical methods in the Perm Krai]]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefitnykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2008, no. 8, pp. 20-23.
9. Galkin V.I., Karaseva T.V., Kozlova I.A., Nosov M.A., Krivoshchekov S.N. Differentsirovannaia veroiatnostnaia otsenka generatsionnykh protsessov v otlozheniakh domanikovoogo tipa Permskogo kraia [Differentiated probabilistic assessment of the generation processes in Domanic sediments of Perm region]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 12, pp. 103-105.
10. Galkin V.I., Solov'ev S.I. Raionirovanie territorii Permskogo kraia po stepeni perspektivnosti priobreteniia nefitnykh uchastkov nedr [Classification of Perm Krai areas according to prospectivity for oil fields acquisition]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2015, no. 16, pp. 14-24. DOI: 10.15593/224-9923/2015.16.2
11. Iuzhakov A.L. Prognoz neftegazonosnosti struktur po tektonicheskim elementam otrazhaiushchego gorizonta IIK iuzhnoi chasti Permskogo kraia [Forecast of oil and gas content of structures based on tectonic elements of reflecting horizon IIK in the southern part of the Perm Krai]. *Novye napravleniia neftegazovoi geologii i geokhimii. Razvitie geologorazvedochnykh работ. Sbornik materialov II Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Perm'*, 2019, pp. 195-200.
12. Deutsch C.V. *Geostatistical Reservoir modelling*. Oxford University Press, 2002.
13. Pomorskiĭ Iu.L. *Metody statisticheskogo analiza eksperimental'nykh dannykh* [Methods of statistical analysis of experimental data: monograph]. Leningrad, 1960, 174 p.
14. Isaaks E.H., Srivastava R.M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, 1989, 561 p.
15. Kovalevskiy E. *Geological Modelling on the Base of Geostatistics: Course Note*. Student Lecture Tour. RUSSIA & CIS, 2011-2012.
16. Voevodkin V.L., Galkin V.I., Krivoshchekov S.N. Issledovanie vliianiia kriteriev neftegazonosnosti i izuchennosti territorii Permskogo kraia na raspredelenie mestorozhdenii uglevodorodov [Investigation of the influence of the oil and gas content criteria and geological and geophysical knowledge on the distribution of hydrocarbon deposits in the Perm Region]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2012, no. 6, pp. 30-34.
17. Zhuoheng Ch., Osadetz K.G. *Geological Risk Mapping and Prospect Evaluation Using Multivariate and Bayesian Statistical Methods*, Western Sverdrup Basin of Canada. *AAPG Bulletin*, 2006, vol. 90, no. 6, pp. 859-872. DOI: 10.1306/01160605050
18. Galkin S.V. Veroiatnostnyi prognoz geologicheskikh riskov pri poiskakh mestorozhdenii nefiti i gaza [Probabilistic forecast of geological risks when searching for oil and gas fields]. Perm': Knizhnyi mir, 2009, 224 p.
19. Kaufman M.G. *Statistical issues in the assessment of undiscovered oil and gas resources*. MITCEEPR, 1992, 30 p.
20. Galkin V.I., Kozlova I.A., Rastegaev A.V., Vantseva I.V., Krivoshchekov S.N., Voevodkin V.L. K metodike otsenki perspektiv neftegazonosnosti Solikamskoi depressii po kharakteristikam lokal'nykh struktur [Estimation procedure of petroleum potential of Solikamsk depression based on local structures parameters]. *Neftepromyslovoe delo*, 2010, no. 7, pp. 12-17.
21. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. New York: Oxford University Press, 1998, 369 p.
22. Iuzhakov A.L. Klassifikatsiia strukturnykh lokal'nykh ostatkov otrazhaiushchego gorizonta IIK na primere iuga Permskogo kraia [Classification of structural local remains of the reflecting horizon IIK using the example of the south of the Perm Krai]. *Problemy razrabotki mestorozhdenii uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh. Materialy XI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Perm', 7-9 November 2018*. Perm', 2018, 85 p.
23. Putilov I.S. Nauchnoe obosnovanie veroiatnostno-statisticheskikh metodov prognoza neftegazonosnosti struktur v usloviakh vysokoizuchennykh territorii [Scientific substantiation of probabilistic and statistical methods for predicting the oil and gas content of structures in highly studied areas]. Perm', 2016, 369 p.
24. Liadova N.A., Iakovlev Iu.A., Raspopov A.V. *Geologiya i razrabotka nefitnykh mestorozhdenii Permskogo kraia* [Geology and development of oil fields in the Perm Krai]. Moscow: VNIIOENG, 2010, 335 p.
25. Putilov I.S. *Razrabotka tekhnologii kompleksnogo izucheniia geologicheskogo stroeniia i razmeshcheniia mestorozhdenii nefiti i gaza* [Development of technologies for comprehensive study of the geological structure and location of oil and gas fields]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 285 p.
26. Galkin S.V., Lobanov D.S. Ispolzovanie mnogomernykh statisticheskikh modeli pri operativnom kontrole izvlekaemykh zapasov vizeiskikh zalezhei Permskogo kraia [Use of multidimensional statistical models for operational control of recoverable reserves for the Visean deposits of the Perm region]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 126-136. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3463
27. Krivoshchekov S.N. *Razrabotka regional'no-zonal'nykh kriteriev prognoza neftegazonosnosti territorii Permskogo Prikam'ia veroiatnostno-statisticheskimi metodami* [Development of regional-zonal criteria for forecasting oil and gas content of the Perm Kama region using probabilistic and statistical methods]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2011, no. 10, pp. 10-14.
28. Krivoshchekov S.N., Galkin V.I., Volkova A.S. *Razrabotka veroiatnostno-statisticheskoi metodiki prognoza neftegazonosnosti struktur* [Development of a probabilistic-statistical methodology for predicting the oil and gas content of structures]. *Neftepromyslovoe delo*, 2010, no. 7, pp. 28-31.
29. Montgomery D.C., Peck E.A., *Introduction to linear regression analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1982, 504 p.
30. Mikhalevich I.M. *Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoi informatsii (s ispol'zovaniem komp'iuternykh tekhnologii)* [Application of mathematical methods in the analysis of geological information (using computer technology)]. Irkutsk, 2006, 115 p.
31. Fokin A. Riski i neopredelennosti v geologorazvedochnom protsesse [Risks and uncertainties in the geological exploration process]. *Novator*, 2011, no. 43, pp. 8-12.
32. Putilov I.S. *Trekhnmernoe geologicheskoe modelirovanie pri razrabotke nefitnykh i gazovykh mestorozhdenii [3D geological modeling for oil and gas field development]*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2011, 72 p.

33. Johnson N.L., Leone F.C. Statistics and experimental design. New York - London - Sydney - Toronto, 1977, 606 p.
34. Yarus J.M. Stochastic modeling and geostatistics. AAPG. Tulsa, Oklahoma, 1994, 231 p.
35. Ampilov Iu.P. Metody geologo-ekonomicheskogo modelirovaniia resursov i zapasov nefti i gaza s uchetom neopredelennosti i riska [Methods for geological and economic modeling of oil and gas resources and reserves taking into account uncertainty and risk]. Moscow: Geoinformmark, 2002, 201 p.
36. Horne R.N. Modern well test analysis: A computer aided approach. 2nd ed. Palo Alto: Petroway Inc, 2006, 257 p.
37. Putilov I.S., Galkin V.I. Razrabotka metodiki veroiatnostno-statisticheskogo prognoza neftegazonosnosti lokalizovannykh struktur (na primere iuzhnoi chasti Permskogo kraia) [Developing the technology for probabilistic and statistical forecast of oil-and-gas-bearing capacity of the South Perm Region]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 4, pp. 26-29.
38. Krivoshchekov S.N., Kochnev A.A., Sannikov I.V. Perspektivy neftegazonosnosti otlozhenii domanikovogo tipa na territorii Permskogo kraia [Oil and gas prospects of domanic sediments in Perm Krai]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2013, no. 9, pp. 18-26. DOI: 10.15593/2224-9923/2013.9.2
39. 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.
40. Altunin A.E., Semukhin M.V. Raschety v usloviakh riska i neopredelennosti v neftegazovykh tekhnologiiakh [Calculations under conditions of risk and uncertainty in oil and gas technologies]. Moscow, Tiumen': Tiumenskii gosudarstvennyi universitet, 2004, 296 p.
41. Meng L., Zhen L., Minzhu L., Huilai Z. Prediction of residual oil saturation by using the ratio of amplitude of time-lapse seismic data. *Geophysics*, 2017, vol. 82, no. 1, pp. 1-12. DOI: 10.1190/geo2015-0453.1
42. Davis J.C. Statistics and Data Analysis in Geology. 3Rd Edition. John Wiley & Sons, 2002, 656 p.
43. 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.
44. Putilov I.S., Galkin V.I. Primenenie veroiatnostnogo statisticheskogo analiza dlia izucheniia fatsial'noi zonal'nosti turne-famenskogo karbonatnogo kompleksa Sibirskogo mestorozhdeniia [Application of probabilistic statistical analysis to study the facies zoning of the Tournai-Famennian carbonate complex of the Siberian field]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2007, no. 9, pp. 112-114.
45. Diubru' O. Ispol'zovanie geostatistiki dlia vklucheniia v geologicheskuiu model' seismicheskikh dannykh [Using geostatistics to incorporate seismic data into a geological model]. Moscow: Evropeiskaia assotsiatsiia geouchenykh i inzhenerov (EAGE), 2002, 296 p.
46. Davydenko A.Iu. Veroiatnostno-statisticheskie metody v geologo-geofizicheskikh prilozheniiah [Probabilistic-statistical methods in geological and geophysical applications]. Irkutsk, 2007, 29 p.
47. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dinamie data analysis. Paris: Kappa Engineering, 2008, 694 p.
48. Putilov I.S., Solov'ev S.I., Obukhov A.A., Piatunina E.V. Kompleksnyi podkhod k izucheniiu domanikovykh otlozhenii na territorii Permskogo kraia [An integrated approach to the study of Domanik deposits in the Perm region]. *Perspektivy uvelicheniia resursnoi bazy razrabatyvaemykh otlozhenii, v tom chisle iz domanikovykh otlozhenii. Sbornik dokladov po itogam mezhhregional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 70-letiiu NGDU "Leninogorskneft", Karabash, 6-7 August 2015*. Al'met'evsk: PAO "Tatneft", 2015, pp. 71-78.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.