РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО КРИТЕРИЯ ЗОНАЛЬНО-ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ ПО ДАННЫМ ГАЗОПРОЯВЛЕНИЙ

DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED PROBABILITY CRITERION OF THE ZONAL-LOCAL FORECAST OF OIL AND GAS POTENTIAL OF THE TERRITORY OF THE VERKHNEKAMSKY DEPOSIT OF POTASSIUM AND MAGNESIUM SALTS ACCORDING TO GAS EVENTS

В. И. Галкин**Vladislav I. Galkin**

Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research
Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

О. А. Мелкишев**Oleg A. Melkishev**

Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research
Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

С. В. Варушкин**Stanislav V. Varushkin**

Пермский национальный
исследовательский
политехнический университет,
ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь»,
г. Пермь, Российская Федерация

Perm National Research Polytechnic
University,
LUKOIL-Perm LLC, Perm,
Russian Federation

В целях разработки вероятностно-статистических моделей прогноза нефтегазоносности исследованы геохимические характеристики соляных пластов Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей.

По данным 28 характеристик по 374 скважинам исследованы значения концентраций KCl и MgCl₂ в двух группах: первая группа на территориях, где наблюдается группирование выделения газов; вторая группа, где газовыделения по площади и разрезу не наблюдаются. Сопоставление средних значений характеристик производилось при помощи *t*-критерия Стьюдента, а сравнение плотностей распределений — по критерию Пирсона χ^2 .

Выполненный анализ газопроявлений по площади и разрезу показал, что наблюдается определенное группирование выделения газов. По этим группам показателей построены индивидуальные одномерные вероятностные модели прогноза газоносности. Полученные индивидуальные вероятности являлись основой получения дискриминантной функции Z_x для прогнозирования газоносности в толще солей. На основании этих данных были построены индивидуальные и комплексные модели прогноза газопроявлений на территории Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей и построена схема прогноза газоносности.

По данной группе критериев был разработан следующий критерий нефтегазоносности $P_n(Z_x)$, основанный на построении регрессионных моделей значений Z_x . По рассчитанным значениям $P_n(Z_n)$ была построена схема вероятности нефтегазоносности по площади исследований.

Для получения информации об адекватности построенной модели многомерной линейной регрессии был проведен анализ остатков регрессии.

Ключевые слова

прогноз нефтегазоносности;
газоносность солей;
газопроявления;
вероятностно-статистические
модели; локальные остатки;
Верхнекамское месторождение
калийно-магневых солей;
Пермский край

Для выявления наиболее перспективных зон для проведения геологоразведочных работ был разработан комплексный критерий нефтегазоносности по данным газопроявлений — $P_n(MNX)$. При расчёте обобщённого показателя дополнительно к геохимическим характеристикам использованы мощностные и гипсометрические критерии.

In order to develop statistical models, a study of geochemical characteristics of salt formations of the Verkhnekamsky deposit of potassium and magnesium salts was held.

The article discusses the characteristics associated with the geochemical composition — concentrations of KCl and $MgCl_2$. In total, 28 characteristics were considered for 374 wells. Characteristics were compared using Student's t-test and Pearson's chi-squared test χ^2 .

The performed analysis of gas events by area and section revealed a certain grouping of gas evolution. Individual one-dimensional probabilistic models constructed for predicting gas content based on these groups of indicators were built. The obtained individual probabilities served as the basis for obtaining the discriminant function Z_x for predicting the gas content in the thickness of salts.

Based on this group of criteria, the following criterion of oil and gas potential $P_n(Z_x)$ was developed. Values were calculated for all wells drilled for prospecting and exploration for salt.

To obtain information on the adequacy of the constructed model of multidimensional linear regression, an analysis of regression residues was carried out.

To identify the most promising areas for geological exploration, a comprehensive criterion of oil and gas potential was developed according to gas events — $P_n(MNX)$. In addition to geochemical characteristics, hypsometric and thickness criteria were used when calculating the generalized indicator.

Key words

forecast of oil and gas content;
gas content of salts; gas events;
probabilistic and statistical models;
geochemical characteristics;
local residues; Verkhnekamsky field
of potassium and magnesium salts;
Perm region

Известно, что газовый фактор играет основную роль в инициировании и процессе протекания газовыделений при бурении геологоразведочных скважин и газодинамических явлений при подземных горных работах. В работах [1, 2] собраны все сведения о газовыделениях, зафиксированных при бурении солеразведочных скважин на территории Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), приведенные в архивных данных и отчетах о поисково-оценочных работах. Эти данные были обобщены и использованы для построения вероятностно-статистической модели прогноза нефтегазоносности.

Первоначально для разработки моделей прогноза газовыделений было выполнено сравнение средних значений концентраций (К) KCl и $MgCl_2$ по площадям, где наблюдались газопроявления (класс 1), и площадям, где они не наблюдались (класс 2), по обучающей выборке объемом 374 скважины (рисунк 1).

Выполнено сравнение средних значений и распределений концентраций KCl и $MgCl_2$ с

помощью вычисления t -критерия Стьюдента и критерия Пирсона χ^2 . Построение индивидуальных вероятностных моделей основано на изучении плотности распределений двух классов. На первом этапе строятся гистограммы для классов 1 и 2. Затем определяют частоты объектов, попавших в различные интервалы варьирования показателя. По этим данным в каждом интервале вычисляются вероятности принадлежности к территориям с газопроявлениями. Далее интервальные вероятности принадлежности к 1 классу сопоставляются со средними интервальными значениями показателя. По этим величинам рассчитывается парный коэффициент корреляции r и строится уравнение регрессии. Последующая корректировка этих моделей выполняется из условия, что среднее значение вероятностей для территорий с газопроявлениями должно быть больше 0,5, а для территорий за пределами зон газопроявлений — меньше 0,5. Модели, построенные по показателям концентрации, и области их использования приведены в таблице 1.

Рисунок 1. Схема расположения скважин из обучающей выборки по газопрооявлениям

Таблица 1. Индивидуальные вероятностные модели для отнесения скважин к территориям с газопрооявлениями по химическому составу пластов

Параметр концентрации в пластах	Верхняя строка — уравнение вероятности принадлежности к классу территорий с газопрооявлениями; средняя — область применения модели; нижняя — диапазон изменения вероятности	Критерии $\frac{t}{P}$ $\frac{\chi^2}{P}$	Верхняя строка — среднее значение вероятностей для территорий с газопрооявлениями; нижняя — среднее значение вероятностей для территорий без газопрооявлений
К-KCl, %	$P(K-KCl) = 0,518 - 0,0012K-KCl$ 4,20–51,01 % 0,45–0,51	$\frac{-4,62644}{0,000005}$ 20,96747 $\frac{0,000029}{0,000029}$	$\frac{0,501 \pm 0,005}{0,498 \pm 0,005}$
К-MgCl ₂ , %	$P(K-MgCl_2) = 0,464 + 0,00383 MgCl_2$ 0,40–29,77 % 0,46–0,58	$\frac{0,70951}{0,478450}$ $\frac{1,147383}{0,941283}$	$\frac{0,501 \pm 0,018}{0,498 \pm 0,018}$
И-KCl, %	$P(И-KCl) = 0,721 - 0,0128 И-KCl$ 4,38–53,46 % 0,03–0,661	$\frac{-2,93651}{0,003526}$ $\frac{8,794491}{0,012311}$	$\frac{0,511 \pm 0,068}{0,489 \pm 0,074}$
И-MgCl ₂ , %	$P(И-MgCl_2) = 0,405 + 0,00755 И-MgCl_2$ 0,04–32,49 % 0,40–0,65	$\frac{1,80477}{0,071919}$ $\frac{4,266590}{0,118446}$	$\frac{0,504 \pm 0,044}{0,495 \pm 0,048}$
З- KCl, %	$P(З-KCl) = 0,667 - 0,0106 З-KCl$ 4,08–50,74 % 0,17–0,62	$\frac{-2,12834}{0,034683}$ $\frac{5,827626}{0,054268}$	$\frac{0,506 \pm 0,050}{0,494 \pm 0,057}$

Продолжение таблицы 1

Параметр концентрации в пластах	Верхняя строка — уравнение вероятности принадлежности к классу территорий с газопроявлениями; средняя — область применения модели; нижняя — диапазон изменения вероятности	Критерии $\frac{t}{P}$ $\frac{\chi^2}{P}$	Верхняя строка — среднее значение вероятностей для территорий с газопроявлениями; нижняя — среднее значение вероятностей для территорий без газопроявлений
З-MgCl ₂ , %	$P(З-MgCl_2) = 0,334+0,01442 З-MgCl_2$ 0,04–29,10 % 0,33–0,74	<u>3,63037</u> 0,000859 11,50631 0,003173	<u>0,514±0,081</u> 0,485±0,087
Ж- KCl, %	$P(Ж-KCl) = 0,682-0,0100 Ж-KCl$ 4,34–54,65 % 0,17–0,64	<u>–2,83589</u> 0,004820 <u>9,065819</u> 0,0107749	<u>0,511±0,064</u> 0,490±0,074
Ж-MgCl ₂ , %	$P(Ж-MgCl_2) = 0,365+0,01116 Ж-MgCl_2$ 0,01–31,05 % 0,36–0,70	<u>3,01844</u> 0,002716 <u>9,735859</u> 0,007689	<u>0,511±0,073</u> 0,488±0,079
Е- KCl, %	$P(Е-KCl) = 0,781-0,0172Е-KCl$ 4,03–45,27 % 0,01–0,71	<u>–5,90098</u> 0,000000 <u>33,48189</u> 0,000000	<u>0,540±0,064</u> 0,488±0,101
Е-MgCl ₂ , %	$P(Е-MgCl_2) = 0,273+0,01959 Е-MgCl_2$ 0,01–29,60 % 0,27–0,81	<u>5,00502</u> 0,000001 <u>26,24633</u> 0,000002	<u>0,532±0,101</u> 0,469±0,140
Д- KCl, %	$P(Д-KCl) = 0,689-0,0128 Д-KCl$ 0,90–37,41 % 0,23–0,67	<u>–2,05825</u> 0,040262 <u>5,023857</u> 0,081112	<u>0,505±0,050</u> 0,494±0,053
Д-MgCl ₂ , %	$P(Д-MgCl_2) = 0,313+0,01606 Д-MgCl_2$ 0,04–29,13 % 0,31–0,76	<u>4,27848</u> 0,000024 <u>1,60055</u> 0,000055	<u>0,524±0,096</u> 0,477±0,115
Г- KCl, %	$P(Г-KCl) = 0,544-0,0025Г- KCl$ 4,61–62,78 % 0,38–0,53	<u>–3,77588</u> 0,000186 <u>14,24637</u> 0,000806	<u>0,502±0,011</u> 0,497±0,014
Г-MgCl ₂ , %	$P(Г-MgCl_2) = 0,333+0,01377 Г-MgCl_2$ 0,20–28,42 % 0,33–0,71	<u>4,04427</u> 0,000064 <u>17,68109</u> 0,000145	<u>0,522±0,094</u> 0,479±0,108
В- KCl, %	$P(В- KCl) = 0,734-0,0106 В-KCl$ 6,36–45,08 % 0,27–0,67	<u>–3,03914</u> 0,002540 <u>9,220180</u> 0,000000	<u>0,512±0,074</u> 0,488±0,076
В-MgCl ₂ , %	$P(В-MgCl_2) = 0,347+0,01302 В-MgCl_2$ 0,01–29,21 % 0,34–0,71	<u>4,57540</u> 0,000006 <u>20,66834</u> 0,000033	<u>0,527±0,112</u> 0,473±0,117
Б- KCl, %	$P(Б-KCl) = 0,621-0,0038Б-KCl$ 4,72–58,08 % 0,40–0,60	<u>–1,19599</u> 0,232463 <u>2,02881</u> 0,363150	<u>0,501±0,033</u> 0,498±0,027
Б-MgCl ₂ , %	$P(Б-MgCl_2) = 0,473+0,00495 Б-MgCl_2$ 0,01–27,30 % 0,47–0,61	<u>1,42814</u> 0,154090 <u>2,713754</u> 0,257464	<u>0,502±0,037</u> 0,497±0,037
АБ- KCl, %	$P(АБ-KCl) = 0,747-0,0076 АБ-KCl$ 14,20–57,55 % 0,31–0,64	<u>–2,13607</u> 0,033326 <u>5,612466</u> 0,060432	<u>0,506±0,055</u> 0,494±0,053

Продолжение таблицы 1

Параметр концентрации в пластах	Верхняя строка — уравнение вероятности принадлежности к классу территорий с газопроявлениями; средняя — область применения модели; нижняя — диапазон изменения вероятности	Критерии $\frac{t}{P}$ $\frac{\chi^2}{P}$	Верхняя строка — среднее значение вероятностей для территорий с газопроявлениями; нижняя — среднее значение вероятностей для территорий без газопроявлений
АБ-MgCl ₂ , %	$P(\text{АБ-MgCl}_2) = 0,480+0,00610$ АБ-MgCl ₂ 0,30–20,90 % 0,48–0,61	$\frac{1,14822}{0,251615}$ $\frac{2,097674}{0,350345}$	$\frac{0,501\pm 0,029}{0,498\pm 0,029}$
А- KCl, %	$P(\text{А- KCl}) = 0,669-0,0053$ А-KCl 4,66–60,46 % 0,35–0,64	$\frac{-1,95224}{0,051659}$ $\frac{5,775009}{0,055715}$	$\frac{0,505\pm 0,049}{0,495\pm 0,050}$
А-MgCl ₂ , %	$P(\text{А-MgCl}_2) = 0,498+0,01063$ А-MgCl ₂ 0,01–3,96 % 0,49–0,54	$\frac{2,03238}{0,042825}$ $\frac{4,521724}{0,104261}$	$\frac{0,501\pm 0,002}{0,499\pm 0,002}$
К1-KCl, %	$P(\text{К1- KCl}) = 0,645-0,0046$ К1-KCl 10,05–60,55 % 0,36–0,60	$\frac{-1,58565}{0,113669}$ $\frac{4,375074}{0,112193}$	$\frac{0,503\pm 0,040}{0,496\pm 0,041}$
К1-MgCl ₂ , %	$P(\text{К1-MgCl}_2) = 0,499+0,00579$ К1-MgCl ₂ 0,02–1,96 % 0,49–0,51	$\frac{3,17092}{0,001646}$ $\frac{9,968223}{0,006846}$	$\frac{0,501\pm 0,001}{0,499\pm 0,001}$
К2-KCl, %	$P(\text{К2-KCl}) = 0,610-0,0042$ К2-KCl 8,64–54,16 % 0,38–0,58	$\frac{-1,22962}{0,219463}$ $\frac{3,523853}{0,171714}$	$\frac{0,502\pm 0,030}{0,498\pm 0,032}$
К2-MgCl ₂ , %	$P(\text{К2-MgCl}_2) = 0,449+0,00571$ К2-MgCl ₂ 0,02–1,47 % 0,49–0,51	$\frac{3,09799}{0,002096}$ $\frac{9,640507}{0,008065}$	$\frac{0,501\pm 0,001}{0,499\pm 0,001}$
К3-KCl, %	$P(\text{К3-KCl}) = 0,696-0,0133$ К3-KCl 3,30–49,40 % 0,04–0,65	$\frac{-3,34199}{0,000916}$ $\frac{12,82371}{0,001642}$	$\frac{0,514\pm 0,071}{0,486\pm 0,088}$
К3-MgCl ₂ , %	$P(\text{К3-MgCl}_2) = 0,507-0,0337$ К3-MgCl ₂ 0,01–3,76 % 0,38–0,51	$\frac{-0,14902}{0,881619}$ $\frac{0,987265}{0,941283}$	$\frac{0,501\pm 0,003}{0,499\pm 0,001}$

Примечания: шифр параметров: XX-KCl — концентрация KCl в пласте XX; XX-MgCl₂ — концентрация MgCl₂ в пласте XX.

По вышеприведенным формулам были вычислены значения индивидуальных вероятностей по всем 374 скважинам. Сравнение для двух изучаемых классов индивидуальных вероятностей выполнено по критериям t и χ^2 , которое показало, что из 28 только 16 вероятностей являются информативными: $P(\text{К-KCl})$, $P(\text{И-KCl})$, $P(\text{З-KCl})$, $P(\text{З-MgCl}_2)$, $P(\text{Ж-KCl})$, $P(\text{Ж-MgCl}_2)$, $P(\text{Е-KCl})$, $P(\text{Е-MgCl}_2)$, $P(\text{Д-MgCl}_2)$, $P(\text{Г-KCl})$, $P(\text{Г-MgCl}_2)$, $P(\text{В-KCl})$, $P(\text{В-MgCl}_2)$, $P(\text{К1-MgCl}_2)$, $P(\text{К2-MgCl}_2)$, $P(\text{К3-KCl})$.

О том, что газоносность пластов является дифференцированной, свидетельствуют графики изменения средних значений индивидуальных вероятностей в пластах, в зависимо-

сти от концентрации KCl и MgCl₂, которые приведены на рисунках 2, 3.

Отсюда видно, что для всех пластов для территорий с газопроявлениями значения вероятностей больше 0,5, для территорий без газопроявлений — меньше 0,5. Для территорий с газопроявлениями максимальная средняя вероятность наблюдается для пласта Е.

Отсюда видно, что для всех пластов для территорий с газопроявлениями значения вероятностей больше 0,5, для территорий без газопроявлений — меньше 0,5. Для территорий с газопроявлениями максимальные средние вероятности наблюдается для пластов Е, Д, Г, В; для пластов К, Б, АБ, А, К1, К2, К3

Рисунок 2. Распределения средних значений вероятностей по пластам по КСl

Рисунок 3. Распределения средних значений вероятностей по пластам по $MgCl_2$

значения вероятностей незначительно больше 0,5 и практически не изменяются. Для территорий без газопоявлений минимальные средние вероятности имеются также для этих пластов, а для пластов К, Б, АБ, А, К1, К2, К3 значения вероятностей незначительно меньше 0,5 и практически не изменяются.

Все это показывает, что газоносность пластов крайне неоднородна, поэтому для комплексной оценки связи вероятностей газоносности, вычисленных с помощью построенных линейных моделей, с фактической газоносно-

стью использован пошаговый линейный дискриминантный анализ (ПЛДА) [3].

В результате реализации данного метода по химическому составу пластов получена следующая линейная дискриминантная функция:

$$Zx = 5,175P(E - KCl) + 2,473P(B - MgCl_2) + 49,390P(K - KCl) + 3,369P(E - MgCl_2) + 190,632P(K1 - MgCl_2) + 87,458P(K3 - MgCl_2) + 4,425P(K3 - KCl) - 7,795P(K2 - KCl) - 23,321 \times P(AB - MgCl_2) - 4,037P(I - MgCl_2) + 302,769P \times (K2 - MgCl_2) + 12,865P(B - MgCl_2) - 311,891,$$

при $R=0,429$, $\chi^2=74,6268$, $p=0,000$.

Формирование очередности включения показателей в функцию происходило в последовательности, приведенной в уравнении.

По данной функции были вычислены значения Z_x , с помощью которых определены вероятности газопоявлений $P(Z_x)$. Зависимость $P(Z_x)$ от Z_x приведена на рисунке 4.

Отсюда видно, что при изменении значений Z_x от отрицательных к положительным, вероятности $P(Z_x)$ закономерно увеличиваются.

Для прогноза нефтегазоносности по значениям $P(Z_x)$ была использована выборка сква-

жин в пределах площадей сейсморазведочных работ 3D. В данном случае значения $P(Z_x)$ были определены в контурах месторождений нефти и газа (класс 1, $n = 86$ скважин) и вне контуров (класс 2, $n = 80$ скважин). Сравнение средних значений $P(Z_x)$ выполнено с помощью критерия Стьюдента t (таблица 2).

Отсюда видно, что средние значения многомерного вероятностного критерия $P_n(Z_x)$ статистически различаются, $p = 0,042$. Отметим, что среднее значение $P_n(Z_x)$ для территорий в пределах контуров нефтегазоносно-

Рисунок 4. Зависимость $P(Z_x)$ от Z_x

Таблица 2. Сравнение средних значений и вероятностная модель прогноза нефтегазоносности по критерию $P(Z_x)$

Параметр	Статистические характеристики показателей		Критерии $\frac{t}{p}$	Верхняя строка — уравнение вероятности принадлежности к классу в контуре нефтегазоносности; средняя — область применения модели; нижняя — диапазон изменения вероятности
	Класс 1 В контуре нефтегазоносности $n = 86$	Класс 2 Вне контура нефтегазоносности $n = 80$		
$P_n(Z_x)$	$0,512 \pm 0,061$	$0,487 \pm 0,091$	$\frac{-2,0497}{0,0420}$	$P_n(Z_x) = 0,504 + 0,076Z_x$ $-3,830 - 1,925$ $0,212 - 0,650$

сти больше 0,5, для территорий за контурами нефтегазоносности — меньше 0,5. По разработанной модели были вычислены значения $P_n(Z_x)$ по 856 поисковым и разведочным скважинам на соль и по этим данным построена схема вероятности нефтегазоносности по территории ВКМКС (рисунок 5).

Отсюда видно, что наиболее высокими значениями вероятности $P_n(Z_x)$ характеризуются территории южной части Березниковского па-

леоплато и ряд участков на западной границе ВКМКС.

Визуальный анализ данной схемы нефтегазоносности указывает на наличие географического тренда (рисунок 5). Наличие ярко выраженного регионального тренда может приводить к излишне регионализированной оценке территорий, особенно в масштабах, превышающих размеры локальных объектов (залежей и структур).

Рисунок 5. Схема изменения $P_n(Zx)$ на территории ВКМКС

С целью подтверждения нестационарного характера распределения $P_n(Zx)$ по исследуемой площади был проведен вариограммный анализ. Вариограмма показателя $P_n(Zx)$ приведена на рисунке 6.

Представленная экспериментальная вариограмма не обладает отчетливо выраженной стационарностью, что подтверждает наличие регионального тренда в значениях $P_n(Zx)$.

Для более детального исследования мелко-масштабного влияния рассматриваемого критерия можно применить метод анализа локальных остатков. Суть данного метода сводится к расчету локальных остатков (по формуле) и их статистическому анализу:

$RES_{P_n(Zx)} = P_n(Zx)_{fact} - P_n(Zx)_{trend}$,
 где $RES_{P_n(Zx)}$ — значение локального остатка (д.ед.); $P_n(Zx)_{fact}$ — значение $P_n(Zx)$ в рассматриваемой точке (д.ед.); $P_n(Zx)_{trend}$ — значение поверхности тренда в точке (д.ед.).

В результате реализации данного метода по химическому составу пластов получена следующая линейная функция тренда $P_n(Zx)_{trend}$, зависящая от координат (x, y):

$$P_n(Zx)_{trend} = 3,4349 - 4,0867 \times 10^{-6} x - 1,3983 \times 10^{-7} y \text{ при } R = 0,401.$$

В работах [1, 2] для прогнозирования нефтегазоносности подсолевой толщи были разработаны критерии $P_n(Zm)$ и $P_n(Zn)$, основанные на характеристиках мощности соляных пластов и абсолютных отметок пластов солей и основных отражающих горизонтов на территории ВКМКС. Функции трендов для данных критериев $P_n(Zm)_{trend}$ и $P_n(Zn)_{trend}$ имеют вид:

$$P_n(Zm)_{trend} = 0,6781 - 3,3389 \times 10^{-6} x - 7,4328 \times 10^{-8} y \text{ при } R = 0,860;$$

$$P_n(Zn)_{trend} = 2,8333 - 4,5043 \times 10^{-6} x - 1,5475 \times 10^{-8} y \text{ при } R = 0,891.$$

Рисунок 6. Вариограмма $P_n(Z_x)$ по всем направлениям

Таблица 3. Сравнение средних значений критериев нефтегазоносности и их локальных остатков

Параметр	Статистические характеристики показателей		Критерии $\frac{t}{p}$
	Класс 1 В контуре нефтегазоносности $n = 86$	Класс 2 Вне контура нефтегазоносности $n = 80$	
$P_n(Z_M)$	$0,510 \pm 0,068$	$0,491 \pm 0,070$	$\frac{1,8241}{0,0690}$
$P_n(Z_H)$	$0,505 \pm 0,049$	$0,495 \pm 0,049$	$\frac{1,3690}{0,1729}$
$P_n(Z_x)$	$0,512 \pm 0,060$	$0,488 \pm 0,090$	$\frac{2,0497}{0,0420}$
$RES_{P_n(Z_M)}_лин$	$0,033 \pm 0,064$	$0,003 \pm 0,060$	$\frac{3,1110}{0,0022}$
$RES_{P_n(Z_H)}_лин$	$0,001 \pm 0,039$	$0,003 \pm 0,027$	$\frac{-0,4130}{0,6790}$
$RES_{P_n(Z_x)}_лин$	$0,014 \pm 0,053$	$0,003 \pm 0,078$	$\frac{1,0883}{0,2781}$
$RES_{P_n(Z_M)}_кв$	$0,017 \pm 0,063$	$-0,018 \pm 0,063$	$\frac{3,4540}{0,0007}$
$RES_{P_n(Z_H)}_кв$	$-0,008 \pm 0,039$	$-0,002 \pm 0,027$	$\frac{-1,0660}{0,2880}$
$RES_{P_n(Z_x)}_кв$	$0,005 \pm 0,052$	$-0,002 \pm 0,073$	$\frac{0,6366}{0,5252}$
$P_n(RES_{P_n(Z_M)}_кв)$	$0,509 \pm 0,130$	$0,439 \pm 0,124$	$\frac{3,5060}{0,0007}$

Помимо расчета линейных трендов и их остатков ($RES_{P_n(Z_x)}_лин$) рассчитывались и нелинейные квадратические модели тренда и их локальные остатки ($RES_{P_n(Z_x)}_кв$).

Выполним сравнение распределений полученных значений с помощью вычисления t -критерия Стьюдента (таблица 3) в классах принадлежности скважин к нефтегазоносным территориям (классы 1, 2).

Результаты расчетов статистических критериев для исходных вероятностей указывают на статистически значимое различие средних значений для $P_n(Z_x)$ с достигаемым уровнем значимости $p = 0,04$. Для $P_n(Z_M)$ достигаемый уровень значимости несколько выше $p = 0,07$.

При переходе к локальным остаткам по линейным моделям для величины $RES_{P_n(Z_M)}_лин$ не установлено статистически значимого

различия средних, в то время как для $RES_{P_n(Z_M)}$ лин статистические характеристики стали значительно лучше. Достижимый уровень значимости p резко снизился относительно исходной вероятности $P_n(Z_M)$ и составил 0,0022.

При использовании остатков квадратичного тренда только для критерия $P_n(Z_M)$ получены статистически значимые различия средних с достигаемым уровнем значимости $p = 0,0007$.

Анализ t -критериев Стьюдента показывает, что для прогноза нефтегазоносности по данным гипсометрических отметок пластов и концентраций KCl и $MgCl_2$ в толще ВКМКС необходимо использовать исходные вероятности $P_n(Z_n)$ и $P_n(Z_x)$. А для повышения эффективности прогноза нефтегазоносности по данным мощности

соляных пластов целесообразно рассматривать локальные остатки от трендовой квадратичной функции $RES_{P_n(Z_M)}$ квад (таблица 3).

В результате анализа получена следующая функция вероятности от локальных остатков критерия мощности солей:

$$P_n(RES_{P_n(Z_M)} \text{ квад}) = 0,4782 + 2,0349 \times \times RES_{P_n(Z_M)} \text{ квад при } R = 0,981.$$

Для выявления наиболее перспективных зон был рассчитан комплексный критерий нефтегазоносности по данным газопроявлений — $P_n(MNX)$. Методика вычисления условных комплексных вероятностей для решения подобных прогнозных задач оценки нефтегазоносности приведена в работе [4, 5]. Значения $P_n(MNX)$ вычислены по следующей формуле:

$$P_n(MNX) = \frac{P_n(RES_{P_n(Z_M)} \text{ квад}) \times P_n(Z_n) \times P_n(Z_x)}{P_n(RES_{P_n(Z_M)} \text{ квад}) \times P_n(Z_n) \times P_n(Z_x) + (1 - P_n(RES_{P_n(Z_M)} \text{ квад})) \times (1 - P_n(Z_n)) \times (1 - P_n(Z_x))}.$$

Распределение полученных значений $P_n(MNX)$ приведено в таблице 4.

Отсюда видно, что модальный интервал для первого класса (в контуре нефтегазоносности) 0,5–0,6 (с частотой 0,302), для второго класса (вне контура нефтегазоносности) 0,4–0,5 (с частотой 0,300).

Анализ распределений $P_n(MNX)$ показывает, что до значений $P_n(MNX)$ менее 0,5 значения частот для территорий вне контура нефтегазоносности выше, чем для территорий в контуре нефтегазоносности. Для территорий в контуре нефтегазоносности при $P_n(MNX) > 0,5$ значения частот выше, чем для территорий вне контура нефтегазоносности, особенно это относится к диапазону 0,6–0,7.

Как и ранее, оценку информативности критерия $P_n(MNX)$ выполнена по критерию Стьюдента t (таблица 5).

Отсюда видно, что по критерию Стьюдента показатель $P_n(MNX)$ является информативным, полученные различия являются статистически значимыми. По значения $P_n(MNX)$, используя данные по всем изучаемым скважинам, построена схема изменения распределения $P_n(MNX)$ по площади исследований (рисунок 7).

Вне пределов разрабатываемых месторождений наибольшими значениями комплексного критерия нефтегазоносности $P_n(MNX)$ характеризуются участки, расположенные севернее от месторождения им. Сухарева и западнее от Логовского месторождения. Максимальные значения $P_n(MNX)$ в этих районах равны 0,75 д.ед. (скв. № 623) и 0,69 д.ед. (скв. № 662) соответственно. На остальной территории выделяются ряд локальных аномалий, где $P_n(MNX) > 0,60$ д.ед.: в южной части — к северу и западу от месторождения

Таблица 4. Распределение значений $P_n(MNX)$

Класс	Интервалы варьирования $P_n(MNX)$							
	0,1–0,2	0,2–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,6	0,6–0,7	0,7–0,8	0,8–0,9
В контуре нефтегазоносности	—	0,046	0,140	0,198	0,302	0,256	0,035	0,023
Вне контура нефтегазоносности	—	0,175	0,250	0,300	0,200	0,050	0,025	—

Таблица 5. Сравнение средних значений и вероятностей по критерию $P_n(MX)$

Параметр	Статистические характеристики показателей		Критерий $\frac{t}{p}$
	Класс 1 В контуре нефтегазоносности $n = 86$	Класс 2 Вне контура нефтегазоносности $n = 80$	
$P_n(MNX)$	$0,526 \pm 0,126$	$0,422 \pm 0,121$	5,4026 0,0000

Рисунок 7. Зонально-локальный прогноз нефтегазоносности территории ВКМКС по комплексному критерию $R_n(MNX)$

им. Архангельского, в центральной части — в непосредственной близости к Новологовской, Клестовской, Стрелецкой структурам и в районе Боровицкого прогиба ВКМКС вне границ Березниковского палеоплато, в северной части — к югу от Озерного месторождения.

Вывод

Разработанная модель зонально-локального прогноза нефтегазоносности позволяет на базе данных газовыделений, состава солей, строения осадочного чехла и особенностей его морфологии выделять наиболее перспективные зоны для последующей постановки детальных геологоразведочных работ.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галкин В.И., Мелкишев О.А., Варушкин С.В., Андрейко С.С., Лялина Т.А. Разработка статистической модели прогноза нефтегазоносности по газовыделениям в толще Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2020. Т. 20. № 1. С. 4–13. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1.
2. Варушкин С.В. Использование данных о газоносности соленосной толщи Соликамской депрессии для прогнозирования нефтегазоносности подсолевых отложений // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15. № 2. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2020/21_2020.html. DOI: 10.17353/2070-5379/21_2020. (дата обращения: 17.07.2020).

3. Галкин В.И., Растегаев А.В., Козлова И.А., Ванцева И.В., Кривошеков С.Н., Воеводкин В.Л. Прогнозная оценка нефтегазоносности структур на территории Соликамской депрессии // Нефтепромысловое дело. 2010. № 7. С. 4–7.

4. Галкин В.И., Козлова И.А., Растегаев А.В., Ванцева И.В., Кривошеков С.Н., Воеводкин В.Л. К методике оценки перспектив нефтегазоносности Соликамской депрессии по характеристикам локальных структур // Нефтепромысловое дело. 2010. № 7. С. 12–17.

5. Галкин В.И., Кривошеков С.Н. Разработка вероятностно-статистических моделей прогноза нефтегазоносности в условиях экологически напряженной территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 11. С. 52–53.

REFERENCES

1. Galkin V.I., Melkishev O.A., Varushkin S.V., Andreiko S.S., Lyalina T.A. Razrabotka statisticheskoi modeli prognoza neftegazonosnosti po gazovydeleniyam v tolshche Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliino-magnievyykh solei [Development of the Statistical Model to Forecast Oil and Gas Potential According to Gas Content in the Verkhnekamskoe Deposit of Potassium and Magnesium Salts]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo — Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, Vol. 20, No. 1, pp. 4–13. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1. [in Russian].
2. Varushkin S.V. Ispol'zovanie dannykh o gazonosnosti solenosnoi tolshchi Solikamskoi depressii dlya prognozirovaniya neftegazonosnosti podsolevykh otlozhenii [Using Data on the Gas Capability of the Salt Section of the Solikamsk Depression for the Forecasting of Petroleum Possibility of Subsalt Sequences]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika — Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 2020, Vol. 15, No. 2. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/2020/21_2020.html. DOI: 10.17353/2070-5379/21_2020. (accessed 17.07.2020). [in Russian].
3. Galkin V.I., Rastegaev A.V., Kozlova I.A., Vantseva I.V., Krivoshchekov S.N., Voevodkin B.L. Prognoznaya otsenka neftegazonosnosti struktur na territorii Solikamskoi depressii [Probable Estimation of Oil Content of Structures in Territory of Solikamsk Depression]. *Neftepromyslovoe delo — Oilfield Engineering*, 2010, No. 7, pp. 4–7. [in Russian].
4. 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 — Oilfield Engineering*, 2010, No. 7, pp. 12–17. [in Russian].
5. Galkin V.I., Krivoshchekov S.N. Razrabotka veroyatnostno-statisticheskikh modelei prognoza neftegazonosnosti v usloviyakh ekologicheski napryazhennoi territorii Verkhnekamskogo mestorozhdeniya kaliino-magnievyykh solei [Development of Probablity-Statistical Models of Oil-Gas Content Forecast in the Conditions of Ecologically Intense Territory of the Verkhnekamsky Deposit of Potassium Salts]. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse — Environment Protection in Oil and Gas Complex*, 2010, No. 11, pp. 52–53. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Галкин Владислав Игнатьевич, д-р геол.-минерал. наук, профессор, заведующий кафедрой «Геология нефти и газа», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

Vladislav I. Galkin, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of Oil and Gas Geology Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

e-mail: Vgalkin@pstu.ru

Мелкишев Олег Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Геология нефти и газа», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

Oleg A. Melkishev, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Oil and Gas Geology Department, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

e-mail: Melkishev@pstu.ru

Варушкин Станислав Владимирович, аспирант кафедры «Геология нефти и газа», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ведущий геолог отдела геологоразведочных работ, ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь», г. Пермь, Российская Федерация

Stanislav V. Varushkin, Post-graduate Student of the Department of Oil and Gas Geology, Perm National Research Polytechnic University, Leading Geologist of the Geological Exploration Department, LUKOIL-Perm LLC, Perm, Russian Federation

e-mail: geologist-07@mail.ru