ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №3 2025
Домашняя страница журнала: http://vestnik.pstu.ru/geo/
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.831.322
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Роль зональности горно-геологических параметров шахтного поля в задаче локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям

С.С. Андрейко[1], В.О. Лядов[1], Е.А. Нестеров[2]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)
[2]Горный институт Уральского отделения Российской академии наук (Российская Федерация, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а)

The Role of Zonality of Mining and Geological Parameters of a Mine Field in the Problem of Local Forecasting of Zones Hazardous in Terms of Gas-Dynamic Phenomena

Sergei S. Andreiko[1], Vladimir O. Lyadov[1], Egor A. Nesterov[2]

[1]Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation)
[2]Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Building A, Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 05.03.2025. Принята / Accepted: 19.09.2025. Опубликована / Published: 24.10.2025

Ключевые слова:
локальное прогнозирование, статистический анализ, статистический критерий, газодинамические явления, задача классификации, дискриминантный анализ, сильвинит, калийный рудник, важность предикторов.

Современные темпы ведения горных работ не всегда обеспечивают равномерность эксплуатационной разведки по площади шахтного поля для получения горно-геологических локальных данных, очень важных в задачах, чувствительным к моделированию распределения этих данных. Чувствительным к адекватности представления распределения горно-геологических параметров в пространстве является и локальное прогнозирование газодинамических явлений, основанное на линейном дискриминантном анализе горно-геологических данных. В данном исследовании авторами рассмотрены особенности решения задачи локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям в условиях глубокого калийного рудника, имеющего неравномерную картину распределения фактических горно-геологических наблюдений, при которой почти треть шахтного поля не имеет каких-либо данных, а все наблюдения сосредоточены в восточной и западной частях шахтного поля. Посредством проверки горно-геологических данных по критерию Манна – Уитни установлены значимые различия в распределениях этих данных, подтверждая значимость зональных особенностей распределения, которые могут объясняться различиями в протекании эпигенетических процессов в соляном породном массиве на отдельных участках шахтного поля калийного рудника. Для проверки эффективности раздельного моделирования, основанного на зональных особенностях распределения горно-геологических данных, были созданы 3 модели распределения зон, опасных по газодинамическим явлениям посредством линейного дискриминантного анализа с использованием локальных выборок горно-геологических данных в восточной и западной частях шахтного поля, а также общей выборки данных. Модель, созданная на основе на общей выборке данных, показала меньшую эффективность классификации, составившую 76,5 %, по сравнению с совокупной эффективностью моделей, созданных с использованием локальных выборок данных, составившей 82,3 %. Сравнение стандартизованных коэффициентов дискриминантных функций созданных моделей классификации выявило значительные различия в важности предикторов моделей, что также указывает на целесообразность представленного подхода для избегания искажений при локальном прогнозировании. По мере доразведки шахтного поля и достижения равномерного распределения фактических наблюдений, вероятно, могут быть выявлены адекватные зависимости распределения рассматриваемых параметров, которые могут быть интегрированы в единую модель, однако при больших областях без данных большей точности позволяет добиться именно раздельный анализ шахтного поля с учетом зональных особенностей распределения горно-геологических параметров.

Keywords:
local forecasting, statistical analysis, statistical criterion, gas-dynamic phenomena, classification problem, discriminant analysis, sylvinite, potash mine, importance of predictors.

The current pace of mining operations does not always ensure uniformity of operational exploration over the area of the mine field to obtain local mining and geological data, which are very important in tasks sensitive to the modeling of the distribution of these data. Local forecasting of gas-dynamic phenomena based on the linear discriminant analysis of mining and geological data is also sensitive to the adequacy of the representation of the distribution of mining and geological parameters in space. In this study, the authors consider the features of solving the problem of local forecasting of zones hazardous for gas-dynamic phenomena in the conditions of a deep potash mine with an uneven distribution of actual mining and geological observations, in which almost a third of the mine field does not have any data, and all observations are concentrated in the eastern and western parts of the mine field. By checking the mining and geological data using the Mann-Whitney criterion, significant differences in the distributions of these data were established, confirming the importance of zonal distribution features that can be explained by differences in the course of epigenetic processes in the salt rock massif in individual sections of the potash mine field. To test the efficiency of separate modeling based on zonal distribution features of mining and geological data, three models of distribution of zones hazardous for gas-dynamic phenomena were created using linear discriminant analysis using local samples of mining and geological data in the eastern and western parts of the mine field, as well as a common data sample. The model created based on the common data sample showed lower classification efficiency of 76.5% compared to the combined efficiency of the models created using local data samples, which was 82.3%. Comparison of standardized coefficients of discriminant functions of the created classification models revealed significant differences in the importance of model predictors, which also indicates the appropriateness of the presented approach to avoid distortions in local forecasting. As the mine field is further explored and a uniform distribution of actual observations is achieved, adequate dependencies of the distribution of the parameters under consideration can probably be identified, which can be integrated into a single model; however, in large areas without data, a separate analysis of the mine field, taking into account the zonal features of the distribution of mining and geological parameters, allows achieving greater accuracy.

Андрейко Сергей Семенович (ORCID: 0000-0002-3524-8650) – доктор технических наук, профессор кафедры РМПИ (тел.: +007 (342) 219 84 38, e-mail: ssa@mi-perm.ru). Контактное лицо для переписки.
Лядов Владимир Олегович (ORCID: 0009-0009-4728-3400) – ассистент кафедры РМПИ (тел.: +007 (342) 219 84 38, e-mail: minevladimir1@gmail.com).
Нестеров Егор Анатольевич (ORCID: 0009-0008-8130-4490) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геотехнологических процессов и рудничной газодинамики (тел.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: mine_egor@mail.ru).

Sergei S. Andreyko (Author ID in Scopus: 6506180352, ORCID: 0000-0002-3524-8650) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mineral Deposits Development (tel.: +007 (342) 219 84 38, e-mail: ssa@mi-perm.ru). The contact person for correspondence.
Vladimir O. Lyadov (Author ID in Scopus: 6506180352, ORCID: 0009-0009-4728-3400) – Assistant at the Department of Mineral Deposits Development (tel.: +007 (342) 219 84 38, e-mail: minevladimir1@gmail.com).
Egor A. Nesterov (Author ID in Scopus: 57198023462, ORCID: 0009-0008-8130-4490) – PhD in Engineering, Senior Researcher at the Laboratory of Geotechnological Processes and Mine Gas Dynamics (tel.: +007 (342) 216 75 02, e-mail: mine_egor@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Андрейко, С.С. Роль зональности горно-геологических параметров шахтного поля в задаче локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям / С.С. Андрейко, В.О. Лядов, Е.А. Нестеров // Недропользование. – 2025. – Т.25, №3. – С. 262–270. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.17

Please cite this article in English as:
Andreiko S.S., Lyadov V.O., Nesterov E.A. The Role of Zonality of Mining and Geological Parameters of a Mine Field in the Problem of Local Forecasting of Zones Hazardous in Terms of Gas-Dynamic Phenomena. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.3, pp. 262-270. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.3.17

Введение

Устойчивое развитие горнодобывающей отрасли требует особого внимания вопросам безопасности ведения горных работ, которые тесно переплетены с вопросами экономической эффективности и социальной ответственности горнодобывающих компаний. В свою очередь, в условиях современного мира, где наука и технологии играют ключевую роль во многих процессах, именно научная обоснованность большинства аспектов ведения горных работ позволит добиться их эффективного и безопасного ведения. Однако ведение горных работ, в особенности на вновь разрабатываемых месторождениях, осложняется массой факторов, которые нельзя в полной мере нивелировать уже известными методами и технологиями из-за геологических особенностей разрабатываемых пластов и рудных тел и прочих отличий исследуемых объектов. Среди этих факторов есть и проблема газодинамических явлений (ГДЯ) в калийных рудниках.

Газодинамические явления в калийных рудниках являются известной проблемой разработки калийных пластов, проявляются в виде внезапных выбросов соли и газа, обрушения пород кровли, явлений комбинированного типа и отжимов призабойной части пород, сопровождающихся газовыделениями [1–10]. Несмотря на хорошую степень проработанности данной проблемы, вовлечение в разработку новых месторождений с уникальными геологическими условиями требует дополнительных научных исследований с учетом специфики объекта разработки [11–13]. Важной составляющей мероприятий, направленных на борьбу с возникающими газодинамическими явлениями, выступает локальное прогнозирование газодинамических явлений, которое решает задачу оценки вероятности развития этих явлений на отдельных участках шахтных полей рудников в пределах подготовленных к отработке панелей и блоков [14, 15]. Часто методы локального прогноза базируются на математических моделях, полученных в ходе анализа и поиска зависимостей в горно-геологических данных различного типа.

Поскольку методы локального прогнозирования газодинамических явлений в своем большинстве основаны на статистическом анализе горно-геологических данных, очень важно иметь качественный набор данных, способный достаточно адекватно представить искомые зависимости в распределениях тех или иных параметров. Требования к качеству выборки также усиливаются при увеличении неравномерности распределения горно-геологических параметров в силу определенных геологических особенностей залегания промышленных пластов полезного ископаемого, а также порядка выполнения доразведки месторождения и особенностей ведения горных работ. В подобных условиях точки наблюдений могут быть чрезмерно разнесены в пространстве и даже определяться большие области шахтного поля, не имеющие каких-либо данных, что вызывает искажения в представлении распределения тех или иных параметров промышленного пласта полезного ископаемого и вмещающих пород.

С подобным расположением наблюдений, создающим сложности в интерпретации, пришлось столкнуться при решении задачи локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, в пределах южной части шахтного поля калийного рудника, ведущего добычу на больших глубинах залегания промышленного пласта, где центральная часть шахтного поля не имеет никаких локальных данных по сильвинитовому пласту в силу расположения капитальных горных выработок околоствольного двора в вышележащих ангидрит-доломитовых породах [16]. Фактическое распределение точек наблюдений представлено на рис. 1. В данной ситуации почти треть шахтного поля представляет собой большую область без каких-либо наблюдений, что указывает на необходимость изучения корреляций и различий данных для последующего принятия решения о совместном или раздельном анализе при создании модели локального прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям.

Статистическая обработка и анализ первичных горно-геологических параметров

Первичный набор фактических горно-геологических данных включил в себя увязанные в пространстве данные шахтных экспериментальных исследований газоносности пород сильвинитового пласта по свободным и связанным газам, содержанию в этих газах метана, водорода, суммарного содержания тяжелых углеводородов (от этана до пентана), а также данных геологического опробования сильвинитовых пород и мощности сильвинитового слоя (табл. 1) [17, 18].

Для достижения валидности (заполнения данными по всем показателям) по всей выборке и дальнейшего анализа недостающие значения были извлечены посредством интерполяции методом кригинга раздельно в пределах восточной и западной частей шахтного поля, что позволяет достоверно восстановить



Рис. 1. Схема распределения точек наблюдений в пределах южной части шахтного поля

Таблица 1

Первичные эмпирические данные статистического анализа

Показатель	Обозначение	Количество наблюдений	
		запад	восток
Средняя газоносность сильвинитовых пород по свободным газам, м³/м³	Q	31	36
Содержание метана в свободных газах сильвинитовых пород, %	Q_{CH4}	25	31
Содержание водорода в свободных газах сильвинитовых пород, %	Q_{H2}		
Суммарное содержание тяжелых углеводородов (этан – пентан) в свободных газах сильвинитовых пород, %	Q_{C2-C5}		
Средняя газоносность сильвинитовых пород по связанным газам, м³/м³	q	17	17
Содержание метана в связанных газах сильвинитовых пород, %	q_{CH4}		
Содержание водорода в свободных газах сильвинитовых пород, %	q_{H2}		
Суммарное содержание тяжелых углеводородов (этан – пентан) в свободных газах сильвинитовых пород, %	q_{C2-C5}		
Содержание хлористого калия в сильвинитовых породах, %	C_{KCl}	68	93
Содержание хлорида магния в сильвинитовых породах, %	C_{MgCl2}		
Суммарное содержание сульфата кальция и нерастворимого остатка в сильвинитовых породах, %	C_{CaSO4}		
Фактическая мощность сильвинитового слоя промышленного пласта, м	m		

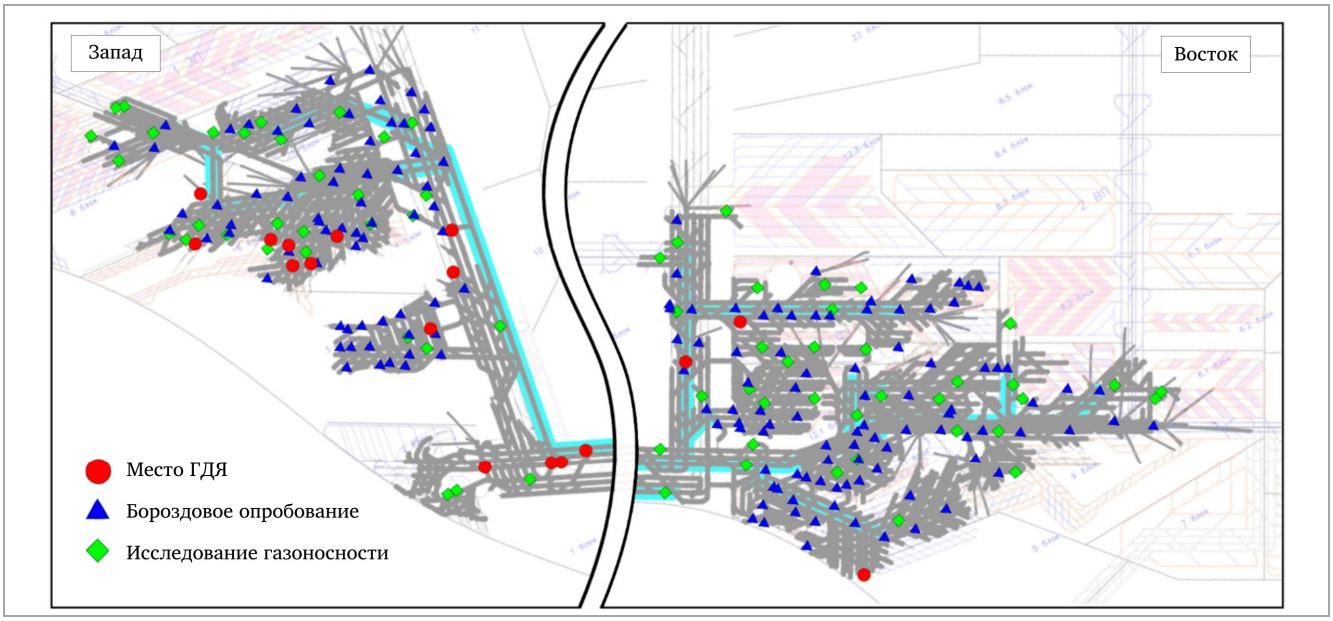


Рис. 2. Карта распределения наблюдений по категориям в пределах южной части шахтного поля

недостающие данные, учитывая достаточное расстояние между точками наблюдений [19–23]. Полученная выборка данных для статистического анализа вобрала в себя 245 валидных точек наблюдений, включая места произошедших газодинамических явлений, которые потребуются для обучения модели прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям. Схема расположения полученных наблюдений по категориям представлена на рис. 2.

Дальнейшее определение инструментов анализа требует оценки соответствия полученных данных нормальному распределению. Учитывая большой объем выборки, оптимальным будет использование критерия Колмогорова – Смирнова, основанного на сравнении эмпирической функции распределения (ступенчатой функции, отражающей распределение данных) с теоретической функцией распределения, в данном случае нормального, и измеряет максимальное расхождение между этими распределениями. Статистика этого критерия определяется следующим выражением [24]:

$$D_n = \sup_x \left| F_n(x) - F(x) \right|, \quad (1)$$

где sup – наименьшая верхняя граница (супремум) функции,

$F_n(x)$ – функция нормального распределения,

$F(x)$ – эмпирическая функция распределения.

Полученное расхождение сравнивается с критическим значением и делается вывод о схожести эмпирического распределения с нормальным [25–28]. Результаты проверки соответствия эмпирических данных нормальному распределению представлены в табл. 2.

Как видно из данных табл. 2, большая часть полученных распределений не соответствует нормальному, что вполне характерно для представленных горно-геологических данных при учете специфики их получения в ходе выполнения экспериментальных шахтных исследований. Таким образом, в данной ситуации параметрические статистические критерии согласия не могут быть применены достаточно эффективно, и стоит обратиться к непараметрическим критериям, которые не требуют нормальности распределения данных [29–35].

Таблица 2

Сводка проверки данных по критерию Колмогорова – Смирнова

Показатель	Наибольшее абсолютное экстремальное расхождение (статистика критерия D_n)	Значимость с поправкой Лиллиефорса
Q	0,137	0,001
Q_{CH4}	0,074	0,002
Q_{H2}	0,159	0,001
Q_{C2-C5}	0,07	0,005
q	0,106	0,001
q_{CH4}	0,152	0,001
q_{H2}	0,131	0,001
q_{C2-C5}	0,167	0,001
C_{KCl}	0,114	0,001
C_{MgCl2}	0,195	0,001
C_{CaSO4}	0,09	0,001
m	0.143	0,001

Оценка различий в распределениях горно-геологических данных

Исходя из числа групп в исследуемой выборке (запад и восток), требования устойчивости к выбросам и способности обнаруживать различия, когда они действительно есть, выбор пал на *U*-критерий Манна – Уитни, эквивалентный критерию Краскела – Уоллеса для двух групп [36; 37]. Данный статистический критерий по своей нулевой гипотезе проверяет, одинаковы ли распределения двух независимых выборок (или имеется сдвиг). При проверке этим критерием данные из двух выборок объединяются в один набор, после чего производится их ранжирование – присваивание рангов от наименьшего к наибольшему, причем совпадающим по значению элементам присваивается средний ранг. Далее для каждой из двух групп вычисляется сумма рангов, определяется значение *U*-статистики и выбирается минимальное значение из двух групп в соответствии со следующими выражениями [38]:

$$U_X = n \cdot m + \frac{n(n+1)}{2} - R_X; \quad (2)$$

$$U_Y = n \cdot m + \frac{m(m+1)}{2} - R_Y; \quad (3)$$

$$U = \min(U_X, U_Y), \quad (4)$$

где n, m – количество элементов рассматриваемых выборок;

R_x, R_y – суммы рангов рассматриваемых выборок.

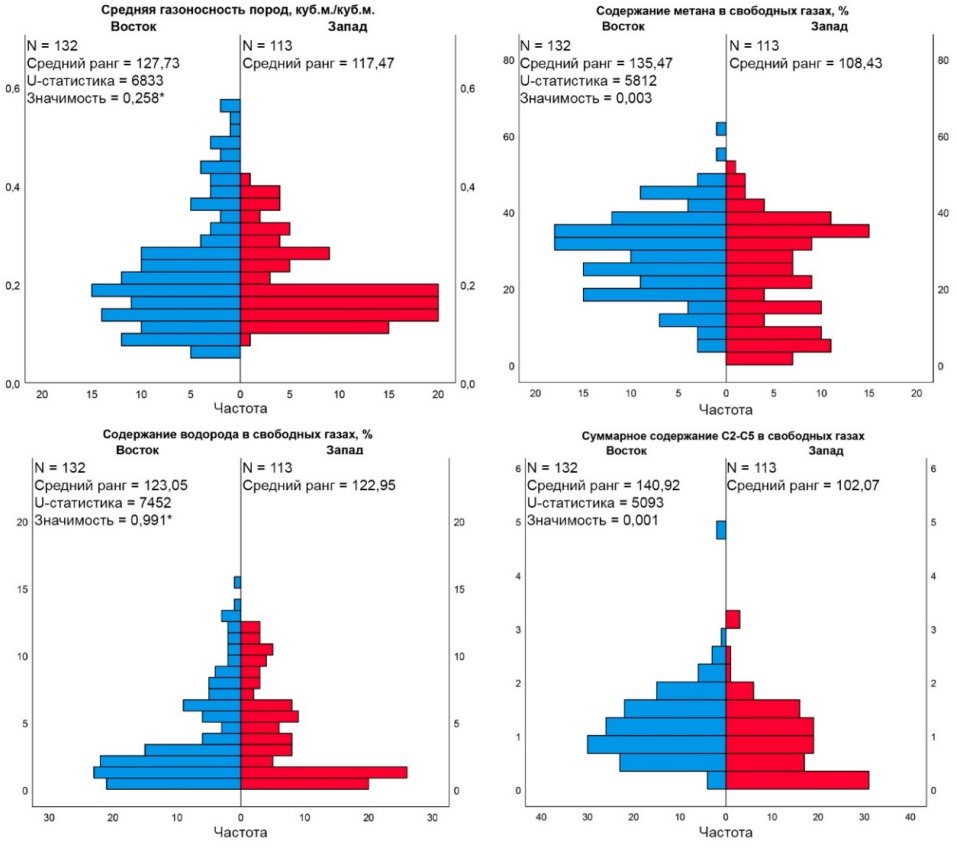
Вывод о статистически значимых различиях между группами делается после сравнения рассчитанного значения *U*-статистики с критическим значением.

Применительно к представленной задаче исследования горно-геологических данных *U*-критерий способен показать отличия в характерах распределения показателей, что, в свою очередь, указывает на различия в протекании геологических процессов, влияющих на сравниваемые горно-геологические характеристики. Следует также отметить, что критерий Манна – Уитни не отражает причин различий между выборками, а лишь подтверждает их значимость. Диаграммы критерия Манна – Уитни для средней газоносности сильвинитовых пород, содержания метана в свободных газах, содержания водорода в свободных газах, а также суммарного содержания тяжелых углеводородов (этан – пентан) в свободных газах представлены на рис. 3, *а*.

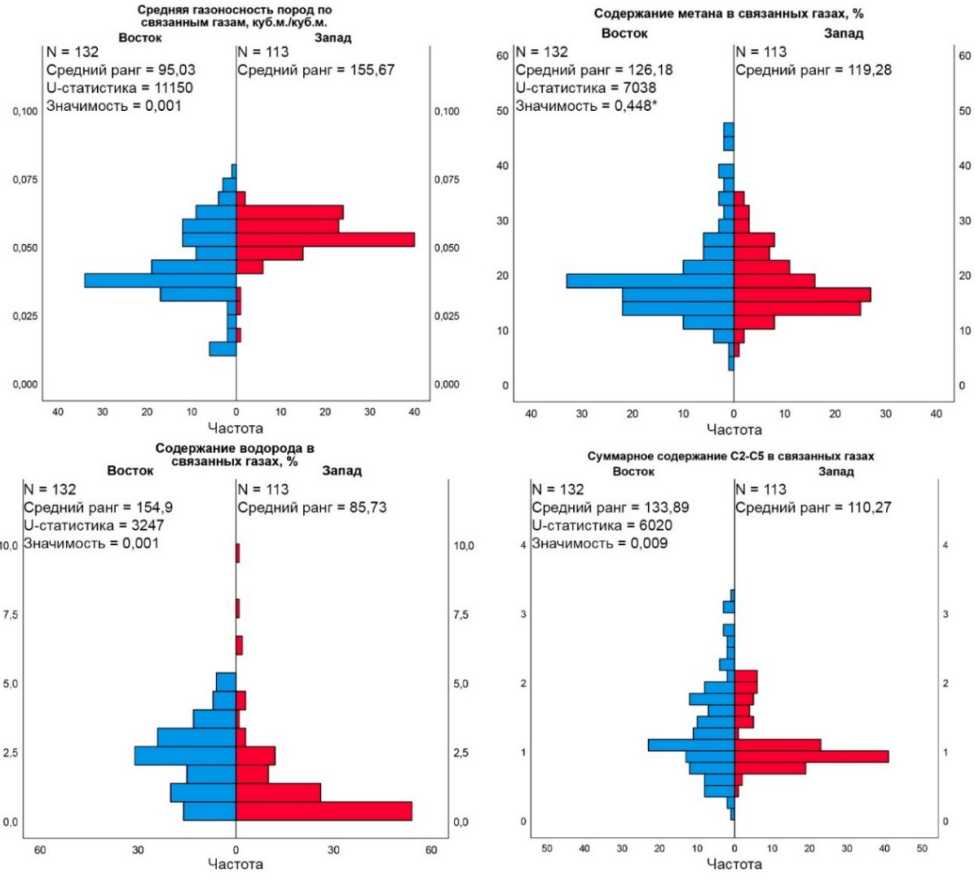
Полученные значения *U*-статистики показали значимые различия в распределениях содержания метана и суммарного содержания тяжелых углеводородов (этан – пентан) в свободных газах. Восточная часть шахтного поля характеризуется явным сдвигом распределения метана и суммарного содержания тяжелых углеводородов в свободных газах в большую сторону. Однако значения критерия для распределений средней газоносности сильвинитовых пород указывают на небольшую схожесть, а для распределений содержания водорода в свободных газах схожесть значительна. Диаграммы критерия Манна – Уитни для средней газоносности сильвинитовых пород по связанным газам, содержанию в них метана, водорода и тяжелых углеводородов (этан – пентан) представлены на рис. 3, *б*.

В данном случае полученные значения статистики указывают на значимые различия в распределениях средней газоносности сильвинитовых пород по связанным газам, содержания водорода в связанных газах и суммарного содержания тяжелых углеводородов (этан – пентан). Западная часть шахтного поля характеризуется явным сдвигом распределения средней газоносности сильвинитовых пород по связанным газам в большую сторону, но по содержанию водорода и тяжелых углеводородов в связанных газах наблюдается сдвиг в меньшую сторону по сравнению с восточной частью шахтного поля. Наблюдается схожесть в распределениях содержаний метана в связанных газах. Диаграммы критерия Манна – Уитни для среднего содержания хлористого калия в сильвинитовых породах, среднего содержания хлорида магния, среднего суммарного содержания сульфата кальция и нерастворимого остатка, а также фактической мощности сильвинитового слоя представлены на рис. 4.

Для геологических характеристик ситуация наиболее показательна – значимые различия наблюдаются по всем представленным показателям. Для западной части шахтного поля наблюдается явный сдвиг распределения среднего содержания хлористого калия и среднего содержания хлорида магния в большую сторону, при этом распределения среднего суммарного содержания сульфата кальция и нерастворимого остатка и фактической мощности сильвинитового слоя смещены в большую сторону в восточной части шахтного поля. В целом, исходя из полученных результатов применения критерия Манна – Уитни, можно сделать вывод о существенных различиях в протекании



а



б

Рис. 3. Диаграммы критерия Манна – Уитни по характеристикам: *а* – свободных газов сильвинитовых пород; *б* – связанных газов сильвинитовых пород

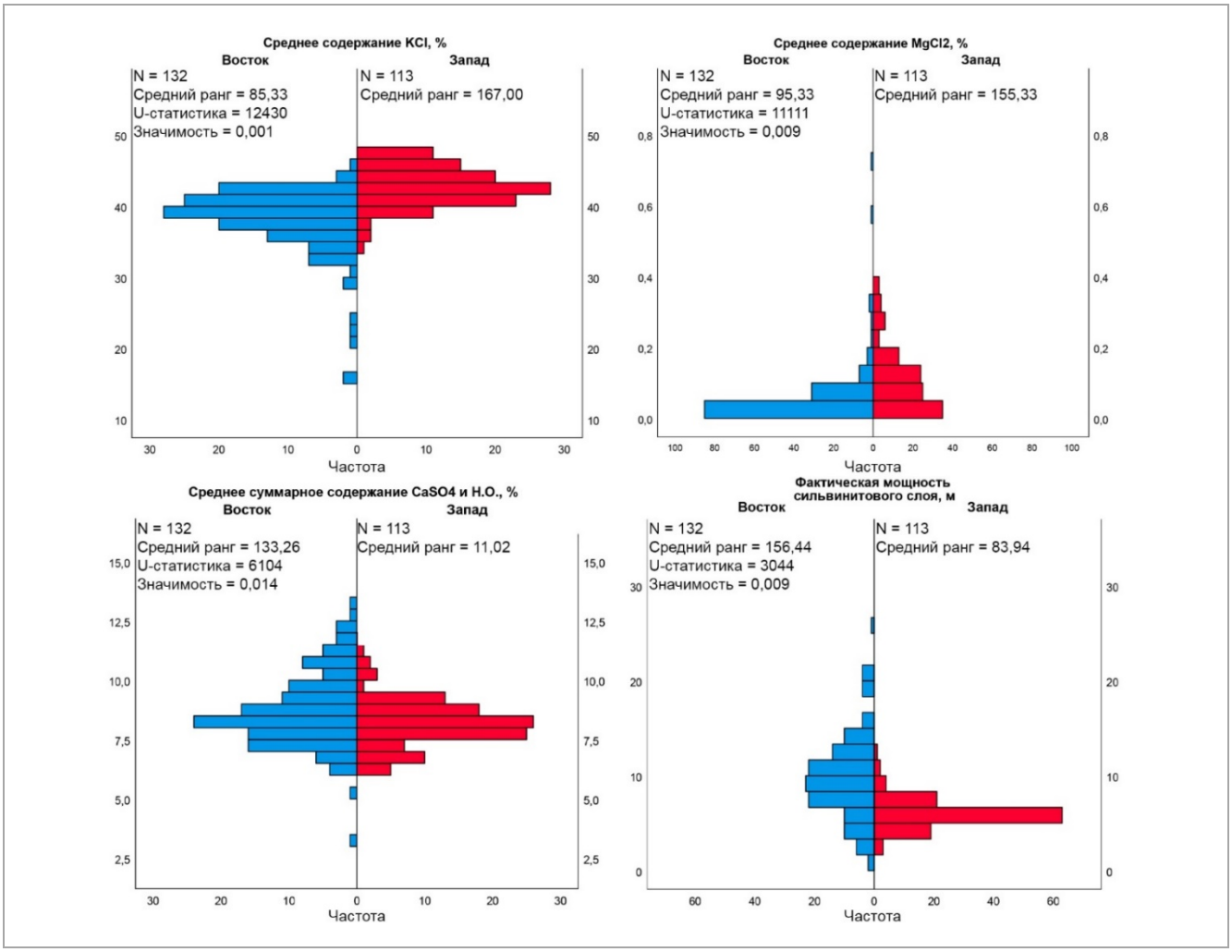


Рис. 4. Диаграммы критерия Манна – Уитни по геологическим характеристикам сильвинитовых пород

влияющих на все представленные данные эпигенетических процессов в западной и восточной частях шахтного поля. Отсюда также следует и гипотеза о пониженной точности моделей локального прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям, в силу искаженной интерполяции данных при применении единой выборки горно-геологических данных без зонального разделения.

Оценка эффективности зонального разделения при решении задачи локального прогнозирования ГДЯ

Для оценки эффективности зонального разделения горно-геологических данных на основе линейного дискриминантного анализа были созданы 3 модели локального прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям, – на основе данных восточной части шахтного поля, западной части шахтного поля и на основе общей выборки данных [39–45]. Эффективность полученных моделей проверялась на соответствующей им части шахтного поля. Важно отметить, что показатели не подвергались факторному анализу с целью оценки важности предикторов (представленных горно-геологических показателей) и полностью принудительно вводились в модель локального прогноза для сравнения их эффективности в явном виде.

Мерой эффективности полученных моделей является правильная классификация фактических мест возникновения газодинамических явлений к классу опасных зон. Краткая сводка по эффективности полученных классификационных моделей локального прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям представлена в табл. 3.

Все полученные модели показали достаточно хорошую точность, однако прогнозная модель, обученная на общей выборке, отнесла 4 места возникновения газодинамических явлений к неопасным зонам, показывая меньшую точность по сравнению с раздельным обучением моделей. Для изучения характера искажений рассмотрим составленные по полученным моделям карты зон, опасных по газодинамическим явлениям, совмещенно представленных на рис. 5.

Из совмещенной карты локальных прогнозов явно видно, как используемые данные в западной части шахтного поля в общей выборке «оттягивают» распределение опасных зон на западную часть, откуда и возникла ошибка классификации места ГДЯ. Также общая модель классифицирует как неопасную большую часть восточного шахтного поля, но в западной части картина противоположная. Для оценки влияния данных на полученные модели также стоит рассмотреть стандартизованные коэффициенты полученных дискриминантных функций, которые представлены на рис. 6. Они позволяют оценить относительный вклад (важность) каждого предиктора в различие двух исследуемых групп.

Исходя из значений стандартизованных коэффициентов дискриминантных функций созданных

Таблица 3

Сводка по эффективности моделей локального прогноза

Выборка	Размер выборки	Мест ГДЯ классифицировано верно	Всего мест ГДЯ
Запад	113	11	14
Восток	132	3	3
Общая	245	13	17

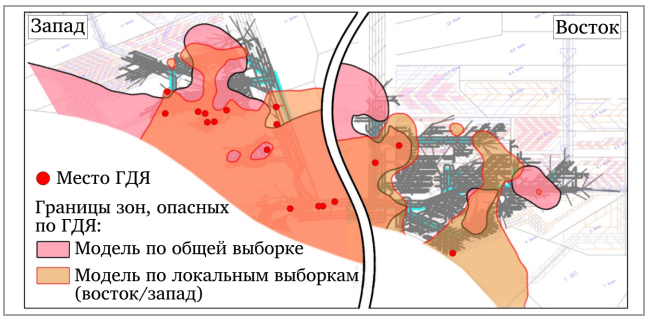


Рис. 5. Совмещенная карта локальных прогнозов зон, опасных по газодинамическим явлениям по созданным моделям

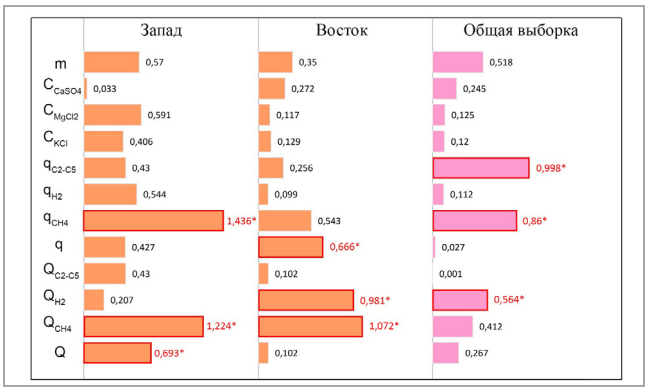


Рис. 6. Гистограммы абсолютных значений стандартизованных коэффициентов дискриминантных функций (* – коэффициенты предикторов, вносящих наибольший вклад в разделение данных на группы)

моделей локального прогноза, можно судить о значимых изменениях в важности предикторов модели при зональной локализации выборки данных. В модели прогноза, построенной по локальным данным, наибольшую роль в отнесении зоны к опасной по газодинамическим явлениям играют содержание метана в свободных и связанных газах, а также средняя газоносность сильвинитовых пород в свободных газах. Модель прогноза, построенная на локальных данных восточной части шахтного поля, показывает наибольшую важность у содержания метана и водорода в свободных газах сильвинитовых пород, а также газоносности пород по связанным газам. В модели прогноза, построенной по общим данным, наиболее важным предиктором стало суммарное содержание тяжелых углеводородов (этан – пентан), что абсолютно не характерно для других моделей, а также содержание водорода в свободных газах и содержание метана в связанных газах сильвинитовых пород. Большая важность суммарного содержания тяжелых углеводородов в модели с большой вероятностью является аномалией, напрямую связанной с использованием общего набора данных, поскольку в моделях, построенных на локальных данных, этот предиктор имеет незначительную важность. Существенная разница в важности предикторов может сыграть большую роль при применении более комплексных методов классификации с отбором признаков, где моделирование на общей выборке приведет к дополнительным искажениям в модели вследствие неправильного выбора признаков.

Заключение

Полученные результаты статистического анализа горно-геологических параметров промышленного сильвинитового пласта показали статистически значимые отклонения в их распределении от нормального, что вполне характерно для подобного рода данных. Проверка соответствия непараметрическому критерию Манна – Уитни выявила значимые различия в распределениях большинства параметров, что указывает на различия в происхождении рассматриваемых показателей. По большей части данные различия могут быть объяснены геологическими особенностями протекания эпигенетических процессов в западной и восточной частях шахтного поля, но степень этой связи подлежит отдельным исследованиям. Однако сам факт наличия различий указывает на необходимость раздельного рассмотрения участков шахтного поля в задачах чувствительного к качеству выборок математического моделирования, в частности, при локальном прогнозировании зон, опасных по газодинамическим явлениям.

Проверка эффективности зонального разделения шахтного поля была выполнена сравнением трех моделей распределения зон, опасных по газодинамическим явлениям, построенных с применением линейного дискриминантного анализа с принудительным включением всех предикторов на локальных данных западной и восточной частей шахтного поля, а также на общей выборке данных. Модели распределения зон, опасных по ГДЯ, построенные на локальных данных, показали большую совокупную эффективность классификации, составившую 82,3 %, по сравнению с моделью, построенной на общей выборке данных, где эффективность классификации составила 76,5 %. Дополнительное сравнение стандартизованных коэффициентов полученных дискриминантных функций также выявило значительные различия в важности предикторов моделей, что также указывает на целесообразность представленного подхода для избегания искажений при локальном прогнозировании.

По мере доразведки центральной части шахтного поля, вероятно, могут быть выявлены математически интерпретируемые зависимости распределения рассматриваемых параметров, которые могут быть интегрированы в единую комплексную модель, однако при подобном характере распределения с большими областями отсутствующих данных более точного результата позволяет добиться именно зонально разделенное локальное прогнозирование, учитывающее особенности конкретной области шахтного поля.

Библиографический список

1. Андрейко, С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление / С.С. Андрейко, П.А. Калугин, В.Я. Щерба. – Минск: Вышейшая школа, 2000. – 335 с.
2. Проскуряков, Н.М. Внезапные выбросы породы и газа в калийных рудниках / Н.М. Проскуряков. – М.: Недра, 1980. – 264 с.
3. Результаты статистического анализа газоносности по связанным газам сильвинитов калийных месторождений / А.С. Папулов, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров, И.И. Чайковский // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 483–492.
4. Экспериментальные исследования газоносности пластов сильвинит-карналлитового состава в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / С.С. Андрейко, И.И. Чайковский, Е.А. Нестеров, А.С. Папулов // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 89–93.
5. Обоснование параметров профилактического дегазационного бурения в юго-восточной части шахтного поля рудника ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат» / Е.А. Нестеров, Д.А. Бобров, А.С. Папулов, В.О. Лядов // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 94–96.
6. Ehgartner, B. Gas releases from salt / B. Ehgartner, J. Neal, T. Hinkebein. – Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 1998. – № SAND-98-1354.
7. Forschungen zum Phänomen der Salz-Gas-Ausbrüche im Werra-Kaligebiet der DDR (Research on the phenomenon of the salt-gas eruptions in the Werra potash area in the GDR) / G. Duchrow, K. Thoma, P. Marggraf, K. Salzer // Neue Bergbautechnik. – 1988. – Heft 18 (7). – P. 241–250.
8. Molinda, G.M. Investigation of Methane Occurrence and Outbursts in the Cote Blanche Domal Salt Mine, Louisiana / G.M. Molinda // U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. RI 9186, No. PB90-270083. – 1988. – P. 1–21.
9. Sieverts, A. Über das Verhalten des festen und flüssigen Kupfers gegen Gase / A. Sieverts, W. Krumbhaar // Zeitschrift für Physikalische Chemie. – 1910. – Vol. 74. – № 1. – P. 277–307.
10. Mahtab, M.A. Geomechanical Aspects of Gas Outbursts in Louisiana Salt Mines / M.A. Mahtab // Bulletin of the Association of Engineering Geologists. – 1982. – Vol. 19, № 4. – P. 389–400.
11. Анализ геологических условий проявления газодинамических явлений в условиях Гремячинского гока / С.С. Андрейко, В.О. Лядов, А.С. Папулов, В.И. Абашин // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 1. – С. 465–474.
12. Андрейко, С.С. Разработка математической модели метода прогнозирования газодинамических явлений по геологическим данным для условий Верхнекамского месторождения калийных солей / С.С. Андрейко // Недропользование. – 2016. – Т. 15, № 21. – С. 345–353.
13. Андрейко, С.С. Природа внезапных разрушений приконтурной части массива при проходке подготовительных выработок в руднике Гремячинского горно-обогатительного комбината / С.С. Андрейко, С.Ю. Нестерова // Недропользование. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 144–150.
14. Саламатина, Н.А. О локальном прогнозе зон, опасных по газодинамическим явлениям, на юго-восточном участке шахтного поля рудника БКПРУ-2 ОАО «Уралкалий» / Н.А. Саламатина // Записки Горного института. – 2006. – Т. 167, № 2. – С. 120–123.
15. Андрейко, С.С. Локальный прогноз зон, опасных по газодинамическим явлениям из почвы горных выработок пласта АБ на южной части шахтного поля БКПРУ-4 Верхнекамского месторождения калийных солей / С.С. Андрейко, Н.А. Литвиновская // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 205–211.
16. Лядов, В.О. Актуализация регионального прогноза зон, опасных по газодинамическим явлениям, в условиях Гремячинского месторождения калийных солей / В.О. Лядов // Горное эхо. – 2024. – № 2 (95). – С. 66–71.
17. Лядов, В.О. Компонентный состав свободных газов в породах пласта калийно-магниевых солей в условиях Гремячинского Гока / В.О. Лядов // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 133–138.
18. Лядов, В.О. Результаты исследований полной газоносности пород продуктивного пласта Гремячинского месторождения калийных солей / В.О. Лядов, А.С. Папулов // Проблемы недропользования. – 2023. – № 2 (37). – С. 99–111.
19. Bostan, P. Basic kriging methods in geostatistics / P. Bostan // Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences. – 2017. – Vol. 27, № 1. – P. 10–20.
20. Kriging, indicators, and nonlinear geostatistics / J. Rivoirard [et al.] // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – Vol. 114, № 3. – P. 245–250.
21. Искусственные нейронные сети и геостатистика в прогнозировании распределения химических элементов на фоновой площадке / А.Г. Буевич, А.П. Сергеев, Д.А. Тарасов [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2017. – № 2. – С. 74–82.
22. Vargas-Guzmán, J.A. Sequential kriging and cokriging: Two powerful geostatistical approaches / J.A. Vargas-Guzmán, T.C. Jim Yeh // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 1999. – Vol. 13. – P. 416–435.
23. Новокрещин, А.В. Проблема пространственной неопределенности в задачах структурных построений / А.В. Новокрещин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2006. – № 10. – С. 68–71.
24. Орлов, А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении / А.И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 31–45.
25. Olea, R.A. Kolmogorov–Smirnov test for spatially correlated data / R.A. Olea, V. Pawlowsky-Glahn // Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. – 2009. – Vol. 23. – P. 749–757.
26. Steinskog, D.J. A cautionary note on the use of the Kolmogorov–Smirnov test for normality / D.J. Steinskog, D.B. Tjøstheim, N.G. Kvamsto // Monthly Weather Review. – 2007. – Vol. 135, № 3. – P. 1151–1157.
27. Reschenhofer, E. Generalization of the Kolmogorov-Smirnov test / E. Reschenhofer // Computational statistics & data analysis. – 1997. – Vol. 24, № 4. – P. 433–441.
28. Massey, Jr F.J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit / Jr F.J. Massey // Journal of the American statistical Association. – 1951. – Vol. 46, № 253. – P. 68–78.
29. Лемешко, Б.Ю. Применение непараметрических критериев согласия при проверке сложных гипотез / Б.Ю. Лемешко, С.Н. Постовалов // Автометрия. – 2001. – Т. 2. – С. 88–102.
30. О применении критериев проверки однородности средних / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, И.В. Веретельникова, А.Ю. Новикова // Вестник СибГУТИ. – 2018. – № 1 (41). – С. 41–55.
31. Sijtsma, K. Nonparametric statistical methods / K. Sijtsma, W.H.M. Emons // International encyclopedia of education. – Elsevier, 2010. – P. 347–353.
32. Nahm, F.S. Nonparametric statistical tests for the continuous data: the basic concept and the practical use / F.S. Nahm // Korean journal of anesthesiology. – 2016. – Vol. 69, № 1. – P. 8–14.
33. Hettmansperger, T.P. Robust nonparametric methods / T.P. Hettmansperger, J.W. McKean, S.J. Sheather // Journal of the American Statistical Association. – 2000. – Vol. 95, № 452. – P. 1308–1312.
34. Mann, H.B. Nonparametric tests against trend / H.B. Mann // Econometrica: Journal of the econometric society. – 1945. – P. 245–259.
35. Siegel, S. Nonparametric statistics / S. Siegel // The American Statistician. – 1957. – Vol. 11, № 3. – P. 13–19.
36. Feltovich, N. Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon–Mann–Whitney and robust rank-order tests / N. Feltovich // Experimental Economics. – 2003. – Vol. 6. – P. 273–297.
37. Корнеев, А.А. Условия применимости критериев Стьюдента и Манна – Уитни / А.А. Корнеев, А.Н. Кричевец // Психологический журнал. – 2011. – Т. 32, № 1. – С. 97–110.
38. Oti, E.U. Statistical analysis of the median test and the Mann-Whitney U test / E.U. Oti, M.O. Olusola, P.A. Esemokumo // International Journal of Advanced Academic Research. – 2021. – Vol. 7, № 9. – P. 44–51.
39. Региональное прогнозирование опасных по газодинамическим явлениям зон в условиях шахтного поля рудника Талицкого ГОКа / О.В. Иванов, С.Ю. Нестерова, В.О. Лядов, Е.В. Лукьянец // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 84–88.
40. Андрейко, С.С. Разработка математической модели метода прогнозирования внезапных разрушений пород почвы горных выработок при очистной выемке карналлитового пласта в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Т.А. Бикмаева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 4. – С. 191–196.
41. Лядов, В.О. Оценка эффективности применения нейронных сетей при региональном прогнозировании зон газодинамической опасности в калийных рудниках / В.О. Лядов // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – Т. 1. – С. 195–197.
42. Кузнецова, Е.А. Использование вероятностно-статистических методов для анализа глубокопогруженных отложений Верхнепечорской впадины / Е.А. Кузнецова, В.И. Галкин // Недропользование. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 11–17.
43. Галкин, В.И. Исследование процесса нефтеизвлечения в коллекторах различного типа пустотности с использованием многомерного статистического анализа / В.И. Галкин, И.Н. Пономарева, В.А. Репина // Недропользование. – 2016. – Т. 15, № 19. – С. 145–154.
44. Klovan, J.E. Classification of geological samples by discriminant-function analysis / J.E. Klovan, G.K. Billings // Bulletin of Canadian Petroleum Geology. – 1967. – Vol. 15, № 3. – P. 313–330.
45. Hannon, J.S. Geochemical relationships in Cretaceous bentonites as inferred from linear discriminant analysis / J.S. Hannon, W.D. Huff, D.M. Sturmer // Sedimentary Geology. – 2019. – Vol. 390. – P. 1–14.

References

1. Andreiko S.S., Kalugin P.A., Shcherba V.Ia. Gazodinamicheskie iavleniia v kaliinykh rudnikakh: Genezis, prognoz i upravlenie [Gas Dynamics in Potash Mines: Genesis, Forecast and Management]. Minsk: Vysheishaia shkola, 2000, 335 p.
2. Proskuriakov N.M. Vnezapnye vybrosy porody i gaza v kaliinykh rudnikakh [Rock and gas outbursts in potash mines]. Moscow: Nedra, 1980, 264 p.
3. Papulov A.S., Ivanov O.V., Nesterov E.A., Chaikovskii I.I. Rezul'taty statisticheskogo analiza gazonosnosti po sviazannym gazam sil'vinitov kaliinykh mestorozhdenii [Results of statistical analysis of gas content for microoccluded gases of sylvinites of potassium fields]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2024, no. 1, pp. 483-492.

4. Andreiko S.S., Chaikovskii I.I., Nesterov E.A., Papulov A.S. Eksperimental'nye issledovaniia gazonosnosti plastov sil'vinit-karnallitovogo sostava v usloviiakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliino-magnievykh solei [Experimental studies of gas content of silvinite-carnallite strata at the Upper Kama potash salt deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 89-93. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.15
5. Nesterov E.A., Bobrov D.A., Papulov A.S., Liadov V.O. Obosnovanie parametrov profilakticheskogo degazatsionnogo bureniia v iugo-vostochnoi chasti shakhtnogo polia rudnika OOO "EvroKhim - Usol'skii kaliinyi kombinat" [Substantiation of preventive degassing drilling parameters in the south east of the mine field of EuroChem Usolsky Potash Plant]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 94-96. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.16
6. Ehgartner B., Neal J., Hinkebein T. Gas releases from salt. Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 1998, no. SAND-98-1354.
7. Duchrow G., Thoma K., Marggraf P., Salzer K. Forschungen zum Phänomen der Salz-Gas-Ausbrüche im Werra-Kaligebiet der DDR (Research on the phenomenon of the salt-gas eruptions in the Werra potash area in the GDR). *Neue Bergbautechnik*, 1988, Heft 18 (7), pp. 241-250.
8. Molinda G.M. Investigation of Methane Occurrence and Outbursts in the Cote Blanche Domal Salt Mine, Louisiana. U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines. RI 9186, no. PB90-270083, 1988, pp. 1-21.
9. Sieverts A., Krumbhaar W. Über das Verhalten des festen und flüssigen Kupfers gegen Gase. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1910, vol. 74, no. 1, pp. 277-307. DOI: 10.1515/zpch-1910-7412
10. Mahtab M.A. Geomechanical Aspects of Gas Outbursts in Louisiana Salt Mines. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 1982, vol. 19, no. 4, pp. 389-400. DOI: 10.2113/gseegeosci.xix.4.389
11. Andreiko S.S., Liadov V.O., Papulov A.S., Abashin V.I. Analiz geologicheskikh uslovii proiavleniia gazodinamicheskikh iavlenii v usloviiakh Gremiachinskogo goka [Analysis of geological conditions of occurrence of gas-dynamic phenomena in conditions of the Gremyachinsky mining complex]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2024, no. 1, pp. 465-474.
12. 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 Verkhnekamskoie potash salt deposit]. *Nedropol'zovanie*, 2016, vol. 15, no. 21, pp. 345-353. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.21.6
13. Andreiko S.S., Nesterova S.Iu. Priroda vnezapnykh razrushenii prikonturnoi chasti massiva pri prokhodke podgotovitel'nykh vyrabotok v rudnike Gremiachinskogo gorno-obogatitel'nogo kombinata [The nature of sudden destruction of the near-contour part of the massif during the driving of development workings in the mine of the Gremyachinsky mining and processing plant]. *Nedropol'zovanie*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 144-150. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.3.6
14. Salamatina N.A. O lokal'nom prognoze zon, opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam, na iugo-vostochnom uchastke shakhtnogo polia rudnika BKPRU-2 OAO "Uralkalii" [About local forecast of the zones dangerous by gas-dynamic phenomena on the south-eastern section of the mine field of the mine BKPRU-2 of OJSC Uralkali]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2006, vol. 167, no. 2, pp. 120-123.
15. Andreiko S.S., Litvinovskaia N.A. Lokal'nyi prognoz zon, opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam iz pochvy gornykh vyrabotok plasta AB na iuzhnoi chasti shakhtnogo polia BKPRU-4 Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Local forecast of gas burst-hazardous zones on the floor of mine workings in stratum AB on the south of BKPRU-4 mine at the Upper Kama potassium salt deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2013, no. 4, pp. 205-211.
16. Liadov V.O. Aktualizatsiia regional'nogo prognoza zon, opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam, v usloviiakh Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Updating the regional forecast of zones dangerous for gas-dynamic phenomena in the conditions of the Gremyachinsky potassium salt deposit]. *Gornoe ekho*, 2024, no. 2 (95), pp. 66-71. DOI: 10.7242/echo.2024.2.12
17. Liadov V.O. Komponentnyi sostav svobodnykh gazov v porodakh plasta kaliino-magnievykh solei v usloviiakh Gremiachinskogo Goka [Component composition of free gases in the rocks of the potassium-magnesium salt formation under the conditions of the Gremyachinsky Mining and Processing Plant]. *Gornoe ekho*, 2023, no. 1 (90), pp. 133-138. DOI: 10.7242/echo.2023.1.18
18. Liadov V.O., Papulov A.S. Rezul'taty issledovanii polnoi gazonosnosti porod produktivnogo plasta Gremiachinskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Results of studies on the full gas content in rocks of the productive formation of the Gremyachinskoye potash salt deposit]. *Problemy nedropol'zovaniia*, 2023, no. 2 (37), pp. 99-111. DOI: 10.25635/2313-1586.2023.02.099
19. Bostan P. Basic kriging methods in geostatistics. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*. 2017, vol. 27, no. 1, pp. 10-20. DOI: 10.29133/yyutbd.305093
20. Rivoirard J. et al. Kriging, indicators, and nonlinear geostatistics. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2014, vol. 114, no. 3, pp. 245-250.
21. Buevich A.G., Sergeev A.P., Tarasov D.A. et al. Iskusstvennye neironnye seti i geostatistika v prognozirovanii raspredeleniia khimicheskikh elementov na fonovoi ploshchadke [Artificial neural networks and geostatistics in forecasting the distribution of chemical elements on a background site]. *Geoekologiia. Inzhenernaia geologiia, gidrogeologiia, geokriologiia*, 2017, no. 2, pp. 74-82.
22. Vargas-Guzmán J.A., Jim Yeh T.C. Sequential kriging and cokriging: Two powerful geostatistical approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1999, vol. 13, pp. 416-435. DOI: 10.1007/s004770050047
23. Novokreshchin A.V. Problema prostranstvennoi neopredelennosti v zadachakh strukturnykh postroenii [The problem of spatial uncertainty in structural construction problems]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2006, no. 10, pp. 68-71.
24. Orlov A.I. Neparametricheskie kriterii soglasiia Kolmogorova, Smirnova, omega-kvadrat i oshibki pri ikh primenenii [Nonparametric goodness-of-fit Kolmogorov, Smirnov, omega-square tests and the errors in their application]. *Politematicheskii setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014. no. 97, pp. 31-45.
25. Olea, R.A., Pawlowsky-Glahn V. Kolmogorov-Smirnov test for spatially correlated data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009, vol. 23, pp. 749-757. DOI: 10.1007/s00477-008-0255-1
26. Steinskog D.J., Tjøstheim D.B., Kvamsto N.G. A cautionary note on the use of the Kolmogorov–Smirnov test for normality. *Monthly Weather Review*, 2007, vol. 135, no. 3, pp. 1151-1157. DOI: 10.1175/MWR3326.1
27. Reschenhofer E. Generalization of the Kolmogorov-Smirnov test. *Computational statistics & data analysis*, 1997, vol. 24, no. 4, pp. 433-441. DOI: 10.1016/S0167-9473(96)00077-1
28. Massey Jr F.J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 1951, vol. 46, no. 253, pp. 68-78. DOI: 10.2307/2280095
29. Lemeshko B.Iu., Postovalov S.N. Primenenie neparametricheskikh kriteriev soglasiia pri proverke slozhnykh gipotez [Application of nonparametric goodness-of-fit tests in testing complex hypotheses]. *Avtometriia*, 2001, vol. 2, pp. 88-102.
30. Lemeshko B.Iu., Lemeshko S.B., Veretel'nikova I.V., Novikova A.Iu. O primenenii kriteriev proverki odnorodnosti srednikh [On the application of checking criteria for homogeneity of means]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikatsii i informatiki*, 2018, no. 1 (41), pp. 41-55.
31. Sijtsma K., Emons W.H.M. Nonparametric statistical methods. *International encyclopedia of education*. Elsevier, 2010, pp. 347-353.
32. Nahm F.S. Nonparametric statistical tests for the continuous data: the basic concept and the practical use. *Korean journal of anesthesiology*, 2016, vol. 69, no. 1, pp. 8-14. DOI: 10.4097/kjae.2016.69.1.8
33. Hettmansperger T.P., McKean J.W., Sheather S.J. Robust nonparametric methods. *Journal of the American Statistical Association*, 2000, vol. 95, no. 452, pp. 1308-1312. DOI: 10.2307/2669777
34. Mann H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 1945, pp. 245-259. DOI: 10.2307/1907187
35. Siegel S. Nonparametric statistics. *The American Statistician*, 1957, vol. 11, no. 3, pp. 13-19.
36. Feltovich N. Nonparametric tests of differences in medians: comparison of the Wilcoxon-Mann-Whitney and robust rank-order tests. *Experimental Economics*, 2003, vol. 6, pp. 273-297. DOI: 10.1023/A:1026273319211
37. Korneev A.A., Krichevets A.N. Usloviia primenimosti kriteriev St"iudenta i Manna – Uitni [Conditions for Sudent T-Test and Mann–Whitney U-Test application]. *Psikhologicheskii zhurnal*, 2011, vol. 32, no. 1, pp. 97-110.
38. Oti E.U., Olusola M.O., Esemokumo P.A. Statistical analysis of the median test and the Mann-Whitney U test. *International Journal of Advanced Academic Research*, 2021, vol. 7, no. 9, pp. 44-51. DOI: 10.46654/IJ.24889849
39. Ivanov O.V., Nesterova S.Iu., Liadov V.O., Luk'ianets E.V. Regional'noe prognozirovanie opasnykh po gazodinamicheskim iavleniiam zon v usloviiakh shakhtnogo polia rudnika Talitskogo GOKa [Regional prediction of hazardous zones of gas-dynamic phenomena in mine field of Talitsa GOK]. *Gornyi zhurnal*, 2023, no. 11, pp. 84-88. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.14
40. Andreiko S.S., Ivanov O.V., Bikmaeva T.A. Razrabotka matematicheskoi modeli metoda prognozirovaniia vnezapnykh razrushenii porod pochvy gornykh vyrabotok pri ochistnoi vyemke karnallitovogo plasta v usloviiakh Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Development of a mathematical model for the method of predicting sudden destruction of rocks and soils of mine workings during the cleaning of a carnallite layer in the conditions of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2010, no. 4, pp. 191-196.
41. Liadov V.O. Otsenka effektivnosti primeneniia neironnykh setei pri regional'nom prognozirovanii zon gazodinamicheskoi opasnosti v kaliinykh rudnikakh [Evaluation of the effectiveness of neural networks in regional forecasting of gas-dynamic hazard zones in potash mines]. *Aktual'nye problemy nedropol'zovaniia: tezisy dokladov uchastnikov XIX Mezhdunarodnogo foruma-konkursa studentov i molodykh uchenykh*, St. Petersburg, 21-27 May 2023. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskii gornyi universitet, 2023, vol. 1, pp. 195-197.
42. Kuznetsova E.A., Galkin V.I. Ispol'zovanie veroiatnostno-statisticheskikh metodov dlia analiza glubokopogruzhennykh otlozhenii Verkhnepechorskoi vpadiny [Use of Probabilistic and Statistical Methods for the Analysis of Deep Deposits of the Upper Pechora Deep]. *Nedropol'zovanie*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 11-17. DOI: 10.15593/2712-8008/2023.1.2
43. 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]. *Nedropol'zovanie*, 2016, vol. 15, no. 19, pp. 145-154. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.19.5
44. Klovan J.E., Billings G.K. Classification of geological samples by discriminant-function analysis. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1967, vol. 15, no. 3, pp. 313-330. DOI: 10.35767/gscpgbull.15.3.313
45. Hannon J.S., Huff W.D., Sturmer D.M. Geochemical relationships in Cretaceous bentonites as inferred from linear discriminant analysis. *Sedimentary Geology*, 2019, vol. 390, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2019.07.001

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.