

Код МРНТИ 38.49.17

Е. Т. Бекишев¹, *М. Е. Рахымбердина¹, Е. Levin², А. К. Капасов¹¹«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КЕАҚ (Өскемен қ., Қазақстан),²Мехарри атындағы қолданбалы есептеу ғылымдары мектебі (Нешвилл қ., АҚШ)

АСУБҰЛАҚ КЕН ӨРІСІНІҢ ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ДЕРЕКТЕРІН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІМЕН ТАЛДАУ

Аннотация. Бұл зерттеуде Қалба-Нарын кен белдеуіндегі Асубұлақ кен өрісінің тарихи геологиялық деректері (геологиялық, геофизикалық және геохимиялық карталар) цифрлық форматқа ауыстырылып, тұрақты нүктелер негізінде деректер жиынтығы құрылды. Машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы кеңістік-корреляциялық және геостатистикалық талдаулар жүргізілді. Зерттеудің мақсаты – геологиялық нысандар мен олардың әртүрлі көрсеткіштері арасындағы геокеңістіктік байланыстарды анықтау. Геохимиялық деректер Пирсон корреляциясы мен k-орташа кластерлік талдау арқылы бағаланды. Нәтижесінде Be–Nb және Li–Cs элементтері арасында айқын сызықтық байланыс анықталды. Геофизикалық және геологиялық карталар IDW (Inverse Distance Weighted) әдісімен интерполяцияланып, геостатистикалық талдау жасалды.

Түйінді сөздер: Асубұлақ кен өрісі, сирек металдар, машиналық оқыту, кластерлеу, геоақпараттық жүйелер, басты компоненттер талдауы, геостатистикалық талдау.

Analysis of geological data of the Asubulak deposit by machine learning methods

Abstract. In this study, historical geological data of the Asubulak ore field within the Kalba-Naryn metallogenic belt (geological, geophysical, and geochemical maps) were digitized, and a dataset was created based on reference points. Spatial-correlation and geostatistical analyses were carried out using machine learning methods. The aim of the study was to identify geospatial relationships between geological objects and their various indicators. Geochemical data were evaluated using Pearson correlation and k-means cluster analysis. As a result, clear linear relationships were identified between Be–Nb and Li–Cs elements. Geophysical and geological maps were interpolated using the IDW (Inverse Distance Weighted) method, followed by geostatistical analysis.

Key words: geoinformation systems, remote sensing, rare metals, database, geological maps, geoportal.

Анализ геологических данных месторождения Асубулақ методами машинного обучения

Аннотация. В данном исследовании исторические геологические данные рудного поля Асубулақ Калба-Нарымского рудного пояса (геологические, геофизические и геохимические карты) были переведены в цифровой формат, а на основе опорных точек сформирован набор данных. С применением методов машинного обучения проведены пространственно-корреляционный и геостатистический анализы. Целью исследования являлось выявление геопространственных связей между геологическими объектами и их различными показателями. Геохимические данные оценивались с использованием корреляции Пирсона и кластерного анализа k-средних. В результате выявлены выраженные линейные связи между элементами Be–Nb и Li–Cs. Геофизические и геологические карты были интерполированы методом IDW (обратновзвешенных расстояний), после чего выполнен геостатистический анализ.

Ключевые слова: геоинформационные системы, дистанционное зондирование, редкие металлы, база данных, геологические карты, геоportal.

Кіріспе

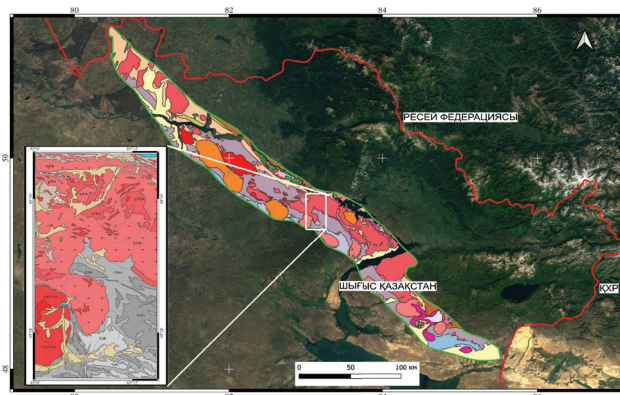
Геология және тау-кен ісі саласында машиналық оқыту және статистикалық өңдеу мысалдары жеткілікті. Мысалы, Zuo және Carranza [1] өз жұмыстарында кездейсоқ орман (random forest), конволюциялық нейрондық желі (convolutional neural network) пайдалы қазбаларды барлау мақсатында карталарды құруды көрсетеді. Регрессиялық талдау әдісін қолдана отырып, Chen және Wu [2] геологиялық, металлогениялық және статистикалық талдау негіздерінде полиметалл кен орындарының перспективалық картасын жасады.

Машиналық оқытудың көптеген әдістерінің бірі және осы ғылыми мақалада қолданылған әдіс – кластерлеу. Деректерді кластерлеу – атрибутивті мәліметтері ұқсас нүктелерді, бақылаусыз оқыту негізінде, топтау әдісі [3]. Аталған әдіс геологиялық мәліметтерді өңдеуде кең таралған: геохимиялық мәліметтердің литологиялық вариация мен гидротермальді өзгерулермен байланысын анықтау [4]; геологиялық ауыспалылар негізінде кен орындарының ұқсастықтарын табу [5]; геологиялық, геофизикалық және геохимиялық мағлұматтар арқылы мыс кен орындарының карталарын жасау [6].

Осы ғылыми мақала барысында машиналық оқыту, оның ішінде кластерлеу және геостатистика әдістері негізінде векторизацияланған тарихи геологиялық, геохимиялық және геофизикалық (гравиметриялық және магниттік) карталардан алынған мәліметтер өңделінді. Зерттеу аймағы ретінде Қалба-Нарын кен белдеуінің ішіне кіретін сирек металды Асубұлақ кен өрісі алынды.

Бастапқы мәліметтер және зерттеу әдістері

Зерттеу аймағы. Зерттеу аймағы ретінде Шығыс Қазақстан облысы территориясында орналасқан Қалба-Нарын кен белдеуінің ортаңғы бөлігі ретінде саналатын, Асубұлақ кен өрісі қабылданды. Қалба-Нарын кен белдеуі Кенді Алтаймен, Жарма-Сауыр және Батыс-Қалба кен аймақтарымен бірге Үлкен Алтайдың құрамына кіреді [7]. Аталған белдеу солтүстік-батыс бағытында Қытайдан бастап Ресейге дейін 500 км созылып жатыр (сурет 1).



Сурет 1. Қалба-Нарын кен белдеуі және оның құрамдас бөлігі Асубұлақ кен өрісі.

Figure 1. Kalba-Naryn ore belt and its component Asubulak ore field.

Рис. 1. Калба-Нарымский рудный пояс и его составляющая месторождение Асубулақ.

Асубұлақ кен өрісі, кейде Асубұлақ пегматит өрісі, кен белдеуінің орталық бөлігінде орналасқан. Пегматит өрісі 3 жарылудың қиылысында орналасқан және Пермь периодының Қалба комплексінің граниттік интрузиясынан тұрады. Аталған кен аймағы сирек кездесетін металл аймағы ретінде сипатталады (*Ta, Nb, Be, Li, Cs, Sn*).

Бастапқы мәліметтер. Бастапқы мәліметтер ретінде зерттеу аймағының тарихи (мұрағаттық) карталары алынды: геологиялық, гравиметриялық (аномальды магнит өрісі), гравиметриялық (қалдық Δg ауытқулар) және геохимиялық (екінші шашырау ореолы) карталары. Карталар М-45-95 А және В беттерін қамтитын 1: 50 000 масштабтарында құрылған.

Зерттеу барысында «Тұрақты нүктелер» атты функциясы арқылы кездейсоқ түрде нүктелер салынды. Нүктелердің саны 1100 – 1 км² ауданға 1 нүкте сәйкес келеді. Кездейсоқ нүктелер *shp* форматында құрылып, олардың геологиялық карталарға сәйкес келген жеріндегі мәні атрибутивтік кестеге жазылды.

Корреляциялық талдау. Геохимиялық мәліметтерге, яғни сирек металдардың екінші шашырау ореолдарына (өлшем бірліктері – сынамадағы мөлшер*10⁻³%) іргетасты статистикалық әдіс – Пирсон корреляциясы жасалынды.

Геостатистикалық талдау. Түрлі деректердің (бағаналардың) өзара байланысын кеңістіктік қатынаста анықтау үшін және көруге ыңғайлы түрде көрсету үшін геостатистикалық талдау жасалады. Талдау барысында магниттік карта мен гравиметриялық карталар және геологиялық карта мен гравиметриялық карта сынарларына қолданылды.

Кластерлеу. *Басты компоненттерді талдау.* Басты компоненттер талдауы (БКТ) кластерлеудің дәстүрлі және кең тараған түрлерінің бірі болып келеді. БКТ – көпөлшемді деректерді өлшемін азайту үшін қолданылатын статистикалық әдіс [8]. БКТ-ға сирек металдардың екінші шашырау ореолдары қатысады.

Кластерлеу. k-орташа әдісі. k-орташа (k-means) – деректерді k топқа (кластерге) бөлетін кең таралған кластерлеу алгоритмі [9]. Аталған әдіс БКТ нәтижелерінің деректер топтамасына қолданылды.

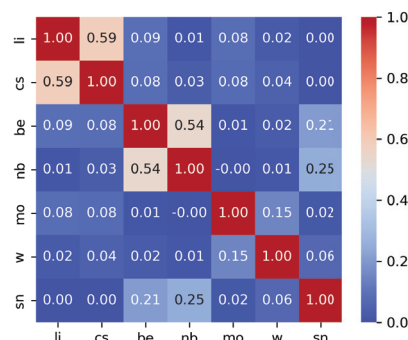
Нәтижелер

Асубұлақ пегматит алаңындағы сирек металдардың шашырау деректеріне қатысты корреляциялық талдау жасалды. Корреляциялық матрица сурет 2 көрсетілген.

Талдау нәтижелері бойынша сирек металдардың екінші шашырауы бойынша сызықтық байланыс деңгейі жоғары дәрежеде емес екенін көруге болады. Айтарлықтай, орташадан жоғары сызықтық байланысты *Be* және *Nb* арасында көруге болады (Пирсон коэффициенті – 0,54), сонымен қатар *Li* мен *Cs* арасындағы корреляция, салыстырмалы түрде, жоғары (0,59).

IDW әдісі бойынша гравиметриялық және магниттік аномалиялардың көрсеткіштері, сонымен қатар геологиялық карта араларындағы кеңістіктік байланыстар құрылды (сурет 3). Қалдық Δg ауытқулардың қарқындылығы мен аномальды магнит өрісінің қарқындылығы арасындағы интерполяция нәтижелерін салыстыру барысында ұқсастық және байланыс бар екені көзге түседі. Сонымен қатар, гравиметриялық карта мен тау жыныс-

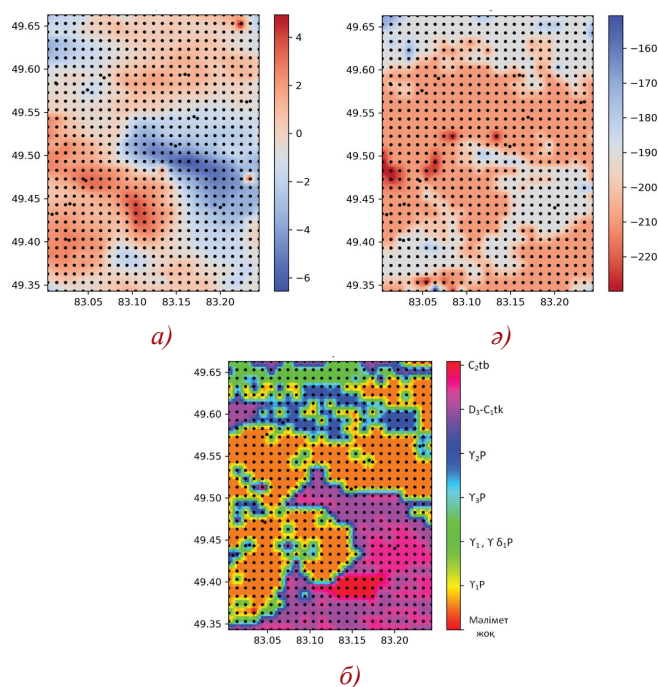
тарының түрлері арасындағы байланысты көруге болады (сурет 3 а, ә, б).



Сурет 2. Сирек металдардың корреляциялық матрицасы.

Figure 2. Correlation matrix of rare metals.

Рис. 2. Корреляционная матрица редких металлов.



Сурет 3. Геостатикалық талдау нәтижелері: а) қалдық Δg ауытқулардың қарқындылығы, мГл; ә) аномальды магнит өрісінің қарқындылығы $\Delta Ta, \Delta Z, nT$; б) тау жыныстары.

Координаттар жүйесі – WGS-84/ UTM 44N.

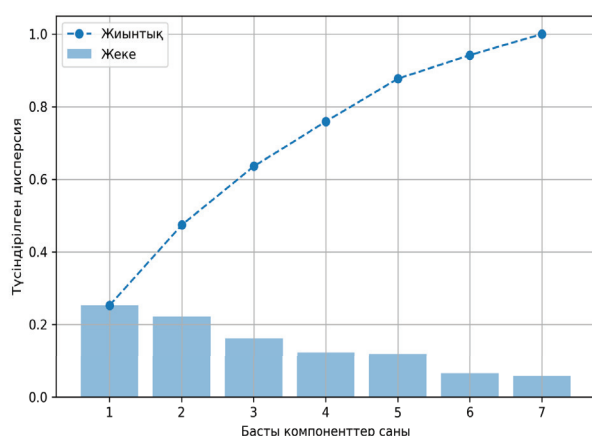
Figure 3. Geostatic analysis results: a) the intensity of fluctuations in residual Δg , mgal; ә) the intensity of the anomalous magnetic field $\Delta Ta, \Delta Z, nT$; б) rocks. Coordinate system – WGS-84/ UTM 44N.

Рис. 3. Результаты геостатического анализа: а) остаточная Δg интенсивность колебаний, мГл; ә) интенсивность аномального магнитного поля $\Delta Ta, \Delta Z, nT$; б) горные породы. Система координат – WGS-84/ UTM 44N.

Тау жыныстарының түрлерін «тұрақты нүктелер» бойынша құрылған картограммаға (сурет 4 б) түсініктеме беретін болса: мәлімет жоқ – көлдер, су қоймалары; $\gamma_1 P$ – Қалба

кешенінің 1 фаза граниттері; γ_1 , $\gamma_{\delta 1}P$ – Қалба кешенінің 1 фаза гранодиориттері мен меланократты граниттері; γ_2P – Қалба кешенінің 2 фазаның биотитті граниттері; γ_3P – Қалба кешенінің 3 фазасының пегматизацияланған лейкократ граниттері; D_3-C_{1tk} – Тақыр тастопшасының алевролиттері мен құмдақтары; C_{2tb} – Тауба тастопшасының әктасты құмдақтар конкрециясы бар түйіршікті құмдақтар.

Құрылған деректер жиынтығы бойынша сирек металдардың кеңістіктік таралуын топтастыру мақсатында k-means кластерлік талдауы қолданылды. Кластерлеу алдында деректер құрылымын оңтайландыру және айнымалылар арасындағы өзара байланысты азайту үшін басты компоненттерді талдау жүргізілді. БКТ нәтижесінде компоненттер саны, түсіндірілетін дисперсия үлесі (сурет 4) және айнымалылардың жүктеулері (кесте 1) анықталып, кластерлік талдауға ең маңызды белгілер іріктелді.



Сурет 4. Басты компоненттер талдауының түсіндірілген дисперсиясы.

Figure 4. Explained variance of the principal component analysis.

Рис. 4. Объясненная дисперсия анализа главных компонент.

Түсіндірілген дисперсия графигі сурет 4-те көрсетілген: бағандар – әрбір жеке компоненттің үлесі; қисық сызық (кумулятивті үлес) – компоненттердің жиынтық үлесін көрсетеді. Компоненттер санын анықтауда, әдетте, 75–90% түсіндірілген дисперсияны қамтамасыз ететін басты компоненттер (БК) санын қабылдайды. Нақты осы жағдайда төрт басты компонент 75–77% дисперсияны түсіндіреді, яғни келесі есептеулер үшін алғашқы төрт басты компонент қолданылатын болады.

Келесі кезекте әр БК-ке әр жеке айнымалылардың (бағандардың) қосатын үлестері және олардың таңбалары анықталады. Егер таңба «+» болса және бағанның мәні басқаларынан салыстырмалы түрде жоғары болса, онда сол баған БК-ке көп үлес қосады, ал егер «-» болса, онда сәйкесінше теріс үлес қосады (кесте 1).

Кесте 1 әр бағанның (металдың) компоненттерге түсірегін үлесін көрсетеді. Бірінші БК-те ең көп үлесті оң таңбамен бериллий (0,54) және ниобий (0,51) қосады, сәйкесінше, БК осінің жоғары бөлігінде осы металдарға бай нүктелер орналасатын болады. Екінші БК-те *Be* (-0,32) және *Nb* (-0,40) теріс үлес қосады, ал *Li* (0,56) мен *Cs*

(0,56) оң таңбамен жүктейді, яғни компонент осі бойынша жоғарылаған сайын литий мен цезий шамасы көп нүктелер орналасады, ал төменгі бөлігінде бериллий мен ниобий шамасы көп нүктелер жайғасады. Үшінші компонент вольфрам (0,71) мен молибден (0,65) еншісінде, ал БК-4 теріс таңбамен қалайы (-0,58) мен вольфрам (-0,42) және оң таңбамен молибден (0,61) үлес қосады.

Кесте 1

Компоненттердің жүктеуі

Table 1

Component loading

Таблица 1

Загрузка компонентов

	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5	БК-6	БК-7
<i>Be</i>	0,54	-0,32	-0,09	0,24	-0,24	-0,66	-0,20
<i>Nb</i>	0,51	-0,40	-0,07	0,19	-0,16	0,68	0,21
<i>Sn</i>	0,32	-0,28	0,14	-0,58	0,67	-0,06	-0,03
<i>W</i>	0,11	0,05	0,71	-0,42	-0,54	0,01	0,04
<i>Mo</i>	0,12	0,16	0,65	0,61	0,41	0,01	-0,02
<i>Li</i>	0,39	0,56	-0,15	-0,07	0,03	-0,17	0,68
<i>Cs</i>	0,41	0,56	-0,14	-0,09	-0,01	0,24	-0,66

Келесі кезекте БКТ нәтижесінде алынған жаңа деректер жиынтығына k-орташа әдісі бойынша кластерлік талдау жүргізілді. k-орташа алгоритмін қолданғанда кластер саны (k) алдын-ала белгісіз болады, сол үшін Elbow Method және Silhouette (Силуэт) әдістері k-ның оңтайлы мәнін табу үшін қолданылады. Elbow Method (Шынтақ әдісі) – әдіс кластерлер санын анықтау үшін k-орташаның кластер ішіндегі дисперсиясын (inertia) талдайды, ал Silhouette коэффициенті кластерлердің сапасын бағалайды. Ол әрбір нүктенің кластер ішіндегі тығыздығы мен басқа кластерлерден алшақтығын өлшейді [10].

Шынтақ әдісі бойынша кластер ішіндегі квадраттардың қосындылары (WSFC) кластердің саны 3-ке келгенде құлдырайды. Силуэт талдауы бойынша силуэт ұпайы 9 кластерде максималды мәнге жетеді, бірақ алғашқы 4 компонент жеткілікті дисперсия көрсететіндіктен (77%), 3 кластер алынады. Алғашқы 4 компонент ішінде силуэт ұпайы 3-ші кластерде ең көп мәнге ие. Демек екі әдісті қолдана отырып, алдын-ала кластерлер саны анықталды. Ол 3-ке тең деп қабылданды.

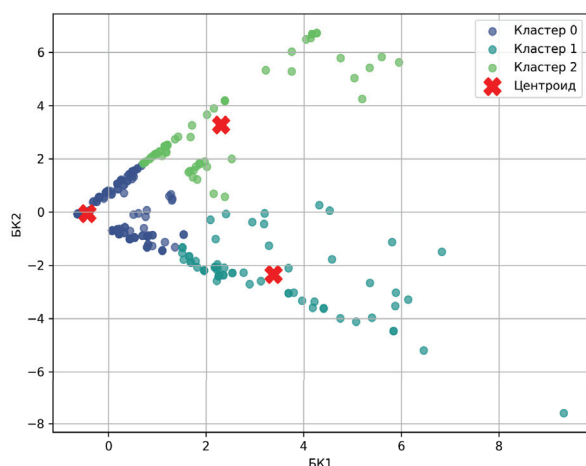
Кластерлер саны анықталғаннан кейін (3), k-орташа әдісі БКТ дерекқорына қолданылды. Әдіс берілген кластерлер санына сәйкес, нүктелерді басты компоненттер координаттар жүйесінде орнатты (сурет 5).

Сурет 5 элементтеріне түсіндірме: кластерлер – түрлі түстерде көрсетілген, сипаттамалары бір-біріне жақын нүктелердің топтары; центроид – кластердің орталығы. Басты компоненттердің өстерінің шамалары нақты жергілікті жердегі, физикалық мағынаға ие емес шама, олар компоненттер талдауы алдында құрылған, масштабтау функциясының мәндері.

Нәтижелерді талқылау

Корреляциялық талдау нәтижесінде кейбір элементтер арасында байланыс анықтауға болады. *Be* мен *Nb* ара-

сындағы байланыс коэффициенті 0,54, ал *Li* мен *Cs* арасындағы корреляция коэффициенті 0,59 тең. Корреляция коэффициентінің шамасы байланыс күштерін көрсетеді. Чеддок шкаласы бойынша 0,5–0,7 арасындағы шаманы «көрнекті» деп бағалайды. Басқа сирек металдардың сызықтық байланысы төмен болып келеді. Сонымен қатар, корреляциялық матрица теріс таңбалы байланыстарды да көрсетпеді (сурет 3).



Сурет 5. БКТ мәндерінің k-орташа әдісі бойынша кластерлеу нәтижелерінің БК-1 және БК-2 координаттар жүйесінде орналасуы.

Figure 5. The location of the clustering results according to the k-mean PCA method of PC-1 and PC-2 values in the coordinate system.

Рис. 5. Расположение результатов кластеризации по k-среднему методу АК значений ГК-1 и ГК-2 в системе координат.

Алынған нәтижелердің статистикалық сенімділігін бағалау мақсатында корреляция коэффициенттерінің мәнділік матрицасы қосымша есептелді. Нәтижесінде *Be–Nb* және *Li–Cs* элементтері арасындағы байланыстардың *r*-мәндері 0,01-ден төмен екені анықталды, яғни бұл корреляциялар кездейсоқ емес және статистикалық тұрғыдан мәнді болып табылады. Осылайша, анықталған оң байланыстар тек коэффициент шамасымен ғана емес, олардың статистикалық сенімділігімен де расталды (сурет 6).

Геостатистикалық талдау нәтижесінде геофизикалық карталардың өзара және геологиялық картамен байланыстары анықталды. Гравиметриялық көрсеткіштер магниттік көрсеткіштермен тура пропорционалды байланысты көрсетеді. Гравиметриялық ауытқудың мәндері неғұрлым жоғары болса соғұрлым магнит өрісінің қарқындылығы өседі. Оны, карталардың ортаңғы бөлігіндегі Белогор интрузивті массиві (қою қызыл түспен) және Тақыр тастопшасының шөгінді жыныстары (ашық түс), арасында байқауға болады (сурет 3, а, ә).

Гравиметриялық ауытқуды тау жыныстарының түрлерімен байланыс сурет 3, а, б көрсетілген. Қалдық Δg ауытқулардың қарқындылығы төмен және теріс мәндерде шөгінді жыныстарға сай келеді: $C_{\text{тб}} - 2$ мгл көрсетеді, ал $D_3 - C_{\text{тк}} - 6$ мгл шамасына дейін түседі. Керісінше, интрузивті тау жыныста-

ры оң таңбамен болып келеді, әсіресе $\gamma P + 4$ мгл шамасынан да жоғары мәндерге ие.

	li	cs	be	nb	mo	w	sn
li	-	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p > 0.05$	$p < 0.05$	$p > 0.05$	$p > 0.05$
cs	$p < 0.01$	-	$p < 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.05$	$p > 0.05$	$p > 0.05$
be	$p < 0.01$	$p < 0.05$	-	$p < 0.01$	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.01$
nb	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.01$	-	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.01$
mo	$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p > 0.05$	$p > 0.05$	-	$p < 0.01$	$p > 0.05$
w	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.01$	-	$p > 0.05$
sn	$p > 0.05$	$p > 0.05$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p > 0.05$	$p > 0.05$	-

Сурет 6. Статистикалық мәнділік матрицасы.

Figure 6. Statistical significance matrix.

Рис. 6. Матрица статистической значимости.

БКТ нәтижелеріне *k*-орташа әдісі бойынша, сирек металдардың геохимиялық көрсеткіштеріне кластеризация жасалды. Кластеризация нәтижелерін сурет 5 көруге болады. Суретте кластер 0 БК-2 өсі бойынша ортаңғы бөлікте, БК-1 өсі бойынша төмен мәндерге ие болды. Кластер 1 БК-1 өсі бойынша созылыңқы орналасқан, ал БК-2 бойынша төмен мәндерде. Қалыптасқан 3 кластердің орташа мәндерін 2-ші кестеде көруге болады (мәндердің өлшем бірлігі – сынамадағы мөлшер $\cdot 10^{-3}\%$).

Кластер (топ) 0 – барлық элементтердің (сирек металдардың) мәндері төмен және аралас нүктелер тобы. Кластер 1-де *Be* (орта мәні 0,91) және *Nb* (орта мәні 1,08) элементтері шоғырланған нүктелер. Бұл кластерде *Sn* (0,74) мен *Li* (1,41) ескеруге болар еді, бірақ олардың максималды мәндері 5 және 25 сәйкесінше. Демек бұл топта (кластер 1) *Be* мен *Nb* жоғары мәндері, ал *Sn* мен *Li* төмен мәндері орналасқан. Соңғы кластерді (кластер 2) *Li* мен *Cs* тобы деп, шартты түрде атауға болады. Осылайша, *k*-орташа әдісі сирек металдарды, екінші шашырау ореолдарындағы сынамадағы мөлшерлеріне байланысты, 3 топқа бөлді: 1) төмен мәндердегі аралас; 2) жоғары мәндердегі *Be–Nb*; 3) жоғары мәндердегі *Li–Cs*.

Кесте 2

Кластерлердің орташа мәндері

Таблица 2

Средние значения кластеров

Table 2

Average values of clusters

Кластер	<i>Be</i>	<i>Nb</i>	<i>Sn</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Li</i>	<i>Cs</i>
0	0,01	0,01	0,11	0,03	0,01	0,29	0,06
1	0,91	1,08	0,74	0,07	0,01	1,41	0,21
2	0,07	0,04	0,21	0,14	0,08	11,38	2,79

Қорытынды

Асуұлақ кен өрісінің картографиялық мәліметтеріне машиналық оқыту негізінде статистикалық талдаулар жасалды. Датасетке корреляциялық талдау жасау нәтижесінде **Be** мен **Nb** және **Li** мен **Cs** араларында өзара көрнекті сызықтық байланыс бар екендігі анықталды. Геостатистикалық талдау нәтижесінде, қалдық Δg ауытқулардың қарқындылығы мен аномальды магнит өрісінің қарқындылығы арасында әлсіз байланыс орнатылды. Сонымен қатар, геологиялық тау жыныстарының гравиметриялық көрсеткіштері анықталды. Қалба кешенінің бірінші фаза граниттерінің гравиметриялық ауытқу мәні ең жоғары, ал Тақыр тастопшасының шөгінді жыныстары ең төменгі бо-

лып келеді. Кластерлеу әдісі геохимиялық картаға жасалды. Талдау нәтижесінде элементтер (металдар) 3 топқа бөлінді: аралас, **Be-Nb** және **Li-Cs** жұптарының жоғары мәндері. Осы тақырыпты келесі зерттеулерде машиналық оқытудың басқа да әдіс-тәсілдері негізінде дамытуға болады.

Алғыс

Зерттеу BR24992854 «Шығыс Қазақстан облысының тау-кен металлургия өнеркәсібінің тұрақты дамуын қамтамасыз ету үшін бәсекеге қабілетті ғылыми негізделген технологияларды әзірлеу және енгізу» бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру (ҚР ҒҖЖБМ) шеңберінде орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Zuo R., Carranza E. J. M. Пайдалы қазбаларды барлауға арналған машиналық оқытуға негізделген картаға түсіру // *Mathematical Geosciences*. – 2023. – Т. 55. – № 7. – Б. 891–895 (ағылшын тілінде)
2. Chen Y., Wu W. Экстремалды оқыту машинасының регрессиясын пайдалана отырып пайдалы қазбалардың перспективтілігін картаға түсіру // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Т. 80. – Б. 200–213 (ағылшын тілде)
3. Singh H. V., Girdhar A., Dahiya S. DBSCAN алгоритмдеріне негізделген әдебиеттерге шолу // Интеллектуалды есептеу жүйелері мен басқару жүйелері бойынша 6-шы халықаралық конференция материалдары (ICICCS). – Мадурай, Үндістан: IEEE, 2022. – Б. 751–758 (ағылшын тілінде)
4. Негізгі компоненттерді талдау мен кластерлік талдауды пайдалы қазбаларды барлау мен кен геологиясында қолдану / M. F. Gazley [және т. б.] // *AusIMM Жаңа Зеландия бөлімшесінің жыл сайынғы конференциясының материалдары*. – Дунедин, Жаңа Зеландия, 2015. – Б. 131–139 (ағылшын тілінде)
5. Collyer P. L., Merriam D. F. Пайдалы қазбаларды барлау кезінде кластерлік талдауды қолдану // *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. – 1973. – Т. 5. – № 3. – Б. 213–223 (ағылшын тілінде)
6. Abedi M., Norouzi G. H., Torabi S. A. Мыс кен орындарын барлауда бақыланбайтын жіктеу тәсілі ретінде пайдалы қазбалардың перспективтілік аймақтарын кластерлеу // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2013. – Т. 6. – № 10. – Б. 3601–3613 (ағылшын тілінде)
7. Шығыс Қазақстанның тектоникасы және металлогениясы / B. Dyachkov [және т. б.] // *Tectonics – Problems of Regional Settings*. – Лондон: IntechOpen, 2018. – 5-тауар. – Б. 69–102 (ағылшын тілінде)
8. Негізгі компоненттерді талдау / M. Greenacre [және т. б.] // *Nature Reviews Methods Primers*. – 2022. – Т. 2. – № 1. – 100 (ағылшын тілінде)
9. Shobha N., Asha T. Метеорологиялық деректерге негізделген ауа райын мониторингілеу: талдаудың кластерлік тәсілі // Өнеркәсіптік қолданбаларға арналған инновациялық механизмдер бойынша халықаралық конференция материалдары (ICIMIA). – Бангалор, Үндістан: IEEE, 2017. – Б. 75–81 (ағылшын тілінде)
10. Әр түрлі түсті модельдердегі кескіндер бойынша оңтайлы k-орташа кластерлеуді анықтауға арналған силуэт индексі / A. R. Mamat [және т. б.] // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Т. 7. – № 2.14. – Б. 105–109 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Zuo R., Carranza E. J. M. Machine Learning-Based Mapping for Mineral Exploration // *Math. Geosci.* – 2023. – Vol. 55. – No. 7. – P. 891–895 (in English)
2. Chen Y., Wu W. Mapping Mineral Prospectivity Using an Extreme Learning Machine Regression // *Ore Geol. Rev.* – 2017. – Vol. 80. – P. 200–213 (in English)
3. Singh H. V., Girdhar A., Dahiya S. A Literature Survey Based on DBSCAN Algorithms // 2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS). – Madurai, India: IEEE, 2022. – P. 751–758 (in English)
4. Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology / M. F. Gazley et al. // *Proceedings of the AusIMM New Zealand Branch Annual Conference*. – Dunedin, New Zealand, 2015. – P. 131–139 (in English)
5. Collyer P. L., Merriam D. F. An application of cluster analysis in mineral exploration // *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. – 1973. – No. 5. – P. 213–223 (in English)
6. Clustering of Mineral Prospectivity Area as an Unsupervised Classification Approach to Explore Copper Deposit / M. Abedi et al. // *Arab. J. Geosci.* – 2013. – Vol. 6. – No. 10. – P. 3601–3613 (in English)
7. Tectonics and Metallogeny of East Kazakhstan / Dyachkov B. et al. // *Tectonics – Problems of Regional Settings*. – London: IntechOpen, 2018. – Ch. 5. – P. 69–102 (in English)
8. Principal Component Analysis / M. Greenacre et al. // *Nat. Rev. Methods Primers*. – 2022. – Vol. 2. – No. 1. – Article 100 (in English)

9. Shobha N., Asha T. Monitoring Weather Based Meteorological Data: Clustering Approach for Analysis // *Proceedings of the 2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*. – Bengaluru, India: IEEE, 2017. – P. 75–81 (in English)
10. Silhouette index for determining optimal k-means clustering on images in different color models / A. R. Mamat et al. // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 7. – No. 2.14. – P. 105–109 (in English)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zuo R., Carranza E. J. M. Картографирование месторождений полезных ископаемых на основе машинного обучения // *Mathematical Geosciences*. – 2023. – Т. 55. – № 7. – С. 891–895 (на английском языке)
2. Chen Y., Wu W. Составление карт перспективности полезных ископаемых с использованием метода регрессии экстремального обучения // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – Т. 80. – С. 200–213 (на английском языке)
3. Singh H. V., Girdhar A., Dahiya S. Обзор литературы по алгоритмам DBSCAN // *Труды 6-й Международной конференции по интеллектуальным вычислительным системам и системам управления (ICICCS)*. – Мадурай, Индия: IEEE, 2022. – С. 751–758 (на английском языке)
4. Применение анализа главных компонент и кластерного анализа к разведке полезных ископаемых и горной геологии / M. F. Gazley [и др.] // *Труды ежегодной конференции Новозеландского отделения Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM)*. – Данидин, Новая Зеландия, 2015. – С. 131–139 (на английском языке)
5. Collyer P. L., Merriam D. F. Пайдалы қазбаларды барлауда кластерлік талдауды қолдану // *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. – 1973. – № 5. – С. 213–223 (ағылшын тілінде)
6. Abedi M., Norouzi G. H., Torabi S. A. Кластеризация районов перспективности полезных ископаемых как неконтролируемый классификационный подход к разведке медных месторождений // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2013. – Т. 6. – № 10. – С. 3601–3613 (на английском языке)
7. Тектоника и металлогения Восточного Казахстана / B. Dyachkov [и др.] // *Tectonics – Problems of Regional Settings*. – Лондон: IntechOpen, 2018. – Гл. 5. – С. 73–102 (на английском языке)
8. Анализ главных компонент / M. Greenacre [и др.] // *Nature Reviews Methods Primers*. – 2022. – Т. 2. – Ст. 100 (на английском языке).
9. Shobha N., Asha T. Мониторинг метеорологических данных о погоде: кластерный подход к анализу // *Труды Международной конференции по инновационным механизмам промышленного применения (ICIMIA)*. – Бангалор, Индия: IEEE, 2017. – С. 75–81 (на английском языке)
10. Индекс силуэта для определения оптимальной кластеризации k-средних по изображениям в различных цветовых моделях / A. R. Mamat [и др.] // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2018. – Т. 7. – № 2.14. – С. 105–109 (на английском языке)

Авторлар туралы мәліметтер:

Бекишев Е. Т., докторант, 8D07201 – Геология және пайдалы қазба кен орнын барлау білім беру бағдарламасы бойынша докторант, Жер туралы ғылымдар мектебі (Өскемен қ., Қазақстан), YBekishev@edu.ektu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-6608-193X>

Рахымбердина М. Е., Ph.D докторы, қауымдастырылған профессор, Жер туралы ғылымдар мектебінің деканы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан), MRahymberdina@edu.ektu.kz; <https://orcid.org/0000-0002-2196-6512>

Levin E., Ph.D докторы, Мехарри атындағы қолданбалы есептеу ғылымдары мектебі (Нэшвилл қ., АҚШ), elevin@mtu.edu; <https://orcid.org/0000-0002-8127-3208>

Капасов А. К., техника ғылымдар магистрі, Жер туралы ғылымдар мектебінің оқытушысы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті (Өскемен қ., Қазақстан), AKapasov@edu.ektu.kz; <https://orcid.org/0000-0001-7996-8804>

Information about the authors:

Bekishev Ye. T., doctoral student in the educational program 8D07201 – Geology and Exploration of Mineral Deposits at the School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Rakhymberdina M. Ye., Ph.D, Dean of School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Levin E., Ph.D, Professor of Meharry School of Applied Computational Sciences (Nashville, USA)

Kapasov A. K., Master of Technical Sciences, Lecturer, School of Earth Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan)

Сведения об авторах:

Бекишев Е. Т., докторант по образовательной программе 8D07201 – Геология и разведка месторождений полезных ископаемых, Школа наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

Рахымбердина М. Е., доктор Ph.D, ассоциированный профессор, декан школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)

Levin E., доктор PhD, профессор Школы прикладных вычислительных наук им. Мехарри (г. Нэшвилл, США)

Капасов А. К., магистр технических наук, преподаватель Школы наук о Земле, ВКТУ им. Д. Серикбаева (г. Усть-Каменогорск, Казахстан)