

ГЕОЛОГИЯ, ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ, МИНЕРАГЕНИЯ /
GEOLOGY, PROSPECTING AND EXPLORATION OF SOLID MINERALS, MINERALOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.63>

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КАК МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ХРОМИТОВОГО
ОРУДЕНЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ВОЙКАРО-СЫНЬИНСКОГО МАССИВА

Научная статья

Ткаченко М.А.^{1,*}, Карелина Е.В.²

^{1,2} Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tkachenko-max82[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье описывается применение кластерного анализа при интерпретации данных, полученных с использованием метода литохимических поисков по потокам рассеяния на Войкаро-Сыньинской площади, для выделения наиболее перспективных участков для постановки дальнейших поисковых работ. Методика исследования включает в себя обработку и интерпретацию статистическими методами результатов полуколичественного спектрального анализа литохимических проб. В результате проведенного кластерного анализа, в пределах исследуемой площади выделяется 5 кластеров. Распределение кластеров носит субмеридиальный характер, они пространственно попадают в минерагенические зоны, отвечающие их геохимической специализации. Cr-Ni-Co геохимический кластер располагается в границах Войкарской структурно-формационной зоны, где связан с ультраосновными и основными породами райизско-войкарского и кэршорского комплексов. По результатам исследования в пределах Войкаро-Сыньинского офиолитового массива выделен аномальный участок благоприятный для выявления хромитового оруденения кимперсайского типа.

Ключевые слова: Войкаро-Сыньинский массив, кластерный анализ, потоки рассеяния, офиолиты, хромиты, кимперсайский тип.

A CLUSTER ANALYSIS AS A METHOD OF IDENTIFYING POTENTIAL CHROMITE MINERALISATION
WITHIN THE VOYKAR-SYNYINSKY MASSIF

Research article

Tkachenko M.A.^{1,*}, Karelina Y.V.²

^{1,2} Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (tkachenko-max82[at]yandex.ru)

Abstract

The article describes the application of cluster analysis in the interpretation of data obtained using the method of lithochemical prospecting by scattering streams in the Voykaro-Synyinsky area to identify the most promising areas for staging further prospecting works. The research methodology includes processing and interpretation by statistical methods of the results of semi-quantitative spectral analysis of lithochemical samples. As a result of the cluster analysis, 5 clusters are identified within the studied area. The distribution of clusters is submeridional, they spatially fall into mineralogenic zones corresponding to their geochemical specialization. Cr-Ni-Co geochemical cluster is located within the boundaries of the Voykar structural and formation zone, where it is associated with ultrabasic and basic rocks of the Rayiz-Voykar and Kershore complexes. Based on the results of the study, an anomalous area favourable for the identification of chromite mineralization of the Kimpersai type was identified within the Voykaro-Synyinsky ophiolite massif.

Keywords: Voykaro-Synyinsky massif, cluster analysis, scattering flows, ophiolites, chromites, Kimperian type.

Введение

Райизско-Войкарская минерагеническая зона является одной из наиболее интересных и потенциально перспективных в Полярно-Уральском секторе Уральской складчатой системы в отношении дефицитных полезных ископаемых, таких как Cr, Fe, Cu, Au, Pt, Pd, Os, Ir, Mo. В то же время её изученность на данный момент остается весьма слабой. Фактически достаточно интенсивно проводились только поисковые и поисково-оценочные работы на хромиты в северной части Войкаро-Сыньинского массива. Изученность остальной части площади находится на уровне 60-х начала 70-х годов.

В свете рассмотрения вопроса обеспечения МСБ страны запасами стратегических металлов, вовлечение ресурсной базы Приполярного и Полярного Урала в экономику промышленного Урала позволит решить поставленную задачу.

Целью работы является выделение наиболее перспективных участков на исследуемой площади, по результатам интерпретации данных по литогеохимическому опробованию по потокам рассеяния с применением современных геостатистических комплексов исследования, а также по поисковым критериям и признакам, для постановки дальнейших поисковых работ по выявлению комплексных месторождений хрома с платиноидами кимперсайского типа.

Основные решаемые задачи:

- выявление геохимически однородных площадей, отвечающих минерагеническим зонам;
- определение внутри этих зон аномальных значений элементов;

- выделение участков, характеризующихся аномальными содержаниями элементов, которые потенциально перспективны на промышленное оруденение с применением магматогенных, структурных, формационных и проч. критериев, а также минералогических и проч. прямых и косвенных признаков.

Методы и принципы исследования

Методика исследования включает в себя обработку и интерпретацию статистическими методами данных литохимического опробования по потокам рассеяния, полученных методом полук количественного спектрального анализа (ПКСА) [1, С. 6].

Аналитические исследования. Пробы анализировались методом ПКСА на 31 элемент, включая Au, Pt, Pd. Общее количество проб составило 4 939 штук.

Статистические методы обработки данных. Подобный массив информации характеризует обширную территорию, которая к тому же относится к различным структурно-формационным и минерагеническим зонам, поэтому очень сложен в анализе. Потребовалось объединение содержаний в некоторые группы, которые отражали бы объективную картину поведения элементов, не зависящую от ранее известных минерагенических зон, а также рудных полей, узлов и т.д.

1. На первом этапе исследования была проведена группировка по схожему поведению содержаний химических элементов. Для этих целей был применен кластерный анализ [2, С. 12-43].

Сущность используемого метода заключается в наборе различных алгоритмов классификации, когда необходимо классифицировать «горы» информации к пригодным для дальнейшей обработки группам.

В отличие от многих других статистических процедур, методы кластерного анализа используются в большинстве случаев тогда, когда не имеется каких-либо *априорных* гипотез относительно классов и анализ находится в описательной стадии исследования [3].

Выполнение кластерного анализа позволяет выделить группы, в составе которых некоторые элементы отличаются повышенными средними содержаниями относительно средних по общей выборке. Другие же имеют значения на уровне кларковых;

2. На втором этапе внутри каждого кластера для элементов с высокими средними содержаниями относительно общих средних значений вычисляются минимально аномальные и высоко аномальные значения. За фоновое значение принимается медиана. Минимально аномальное вычисляется по формуле $Ca_1 = Sx + 2\delta$, а высоко аномальное – $Ca_2 = Sx + 3\delta$, где Sx – фоновое значение элемента (медиана), δ – стандартное отклонение [4, С. 8].

Основные результаты

В результате проведенного кластерного анализа, в пределах исследуемой площади, было выделено 5 кластеров (см. табл. 1):

Кластер №1 – Cr-Ni-Co геохимический кластер;

Кластер №2 – Cu-V геохимический кластер;

Кластер №3 – кластер геохимического «шума»;

Кластер №4 – Pb-Au-W геохимический кластер;

Кластер №5 – Mo(Cu)-Zn(Pb)-P геохимический кластер.

Таблица 1 - Средние содержания химических элементов по кластерам

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.63.1>

Хим. эл-т	Вес. ед.	Кл. №1	Кл. №2	Кл. №3	Кл. №4	Кл. №5
		1187	185	1532	1752	283
Cr	10 ⁻³ %	444,1803	55,2108	125,5738	37,0314	48,3781
Mo	10 ⁻⁴ %	0,040438	0,216216	0,503916	0,481164	4,144876
Pb	10 ⁻³ %	0,577928	0,989189	0,757180	1,579338	1,908127
Ag	10 ⁻⁵ %	0,000842	0,124324	0,024151	0,030822	0,837456
Co	10 ⁻⁴ %	120,3370	41,2486	37,2722	23,8476	31,8693
Ni	10 ⁻³ %	205,9124	19,1514	34,2448	11,5331	17,3286
Ba	10 ⁻² %	0,245998	0,956757	1,443211	3,356164	2,791519
Mn	10 ⁻² %	12,81719	12,47027	10,37794	10,19007	33,43463
V	10 ⁻³ %	6,63100	24,22162	14,13708	13,91895	10,37102
Sn	10 ⁻⁴ %	1,790227	2,351351	1,947128	3,295662	2,487633
Cu	10 ⁻³ %	4,24853	19,54054	5,32507	5,12614	6,20495
Zn	10 ⁻² %	0,921651	0,945946	0,596606	0,726598	1,381625
P	10 ⁻¹ %	0,121314	0,913514	0,785901	0,928653	3,113074
W	10 ⁻³ %	0,000000	0,010811	0,000653	0,000000	0,000000
La	10 ⁻³ %	0,379949	0,778378	0,811358	1,744292	1,621908
Ga	10 ⁻³ %	0,074979	0,935135	0,710183	1,081050	0,681979
Zr	10 ⁻³ %	4,41533	8,78919	9,06070	15,95263	11,86572

Sc	10 ⁻⁴ %	5,48526	14,35135	9,65470	9,03311	9,73852
Bi	10 ⁻³ %	0,008425	0,091892	0,121410	0,119863	0,501767
Y	10 ⁻³ %	0,013479	0,372973	0,312010	0,865868	0,759717
Yb	10 ⁻⁴ %	0,091828	0,691892	0,665796	1,249429	1,250883
B	10 ⁻³ %	1,497051	2,140541	2,021540	3,008562	2,469965
Nb	10 ⁻³ %	0,001685	0,016216	0,071802	0,206050	0,116608
Be	10 ⁻⁴ %	0,027801	0,389189	0,405352	1,185502	1,226148

Распределение кластеров в целом носит субмеридианальный характер и прослеживается вдоль простирания основных структур и геологических комплексов этой части Полярного Урала (см. рис. 1). Пространственно, кластеры попадают в минерагенические зоны, отвечающие, в целом, их геохимической специализации.

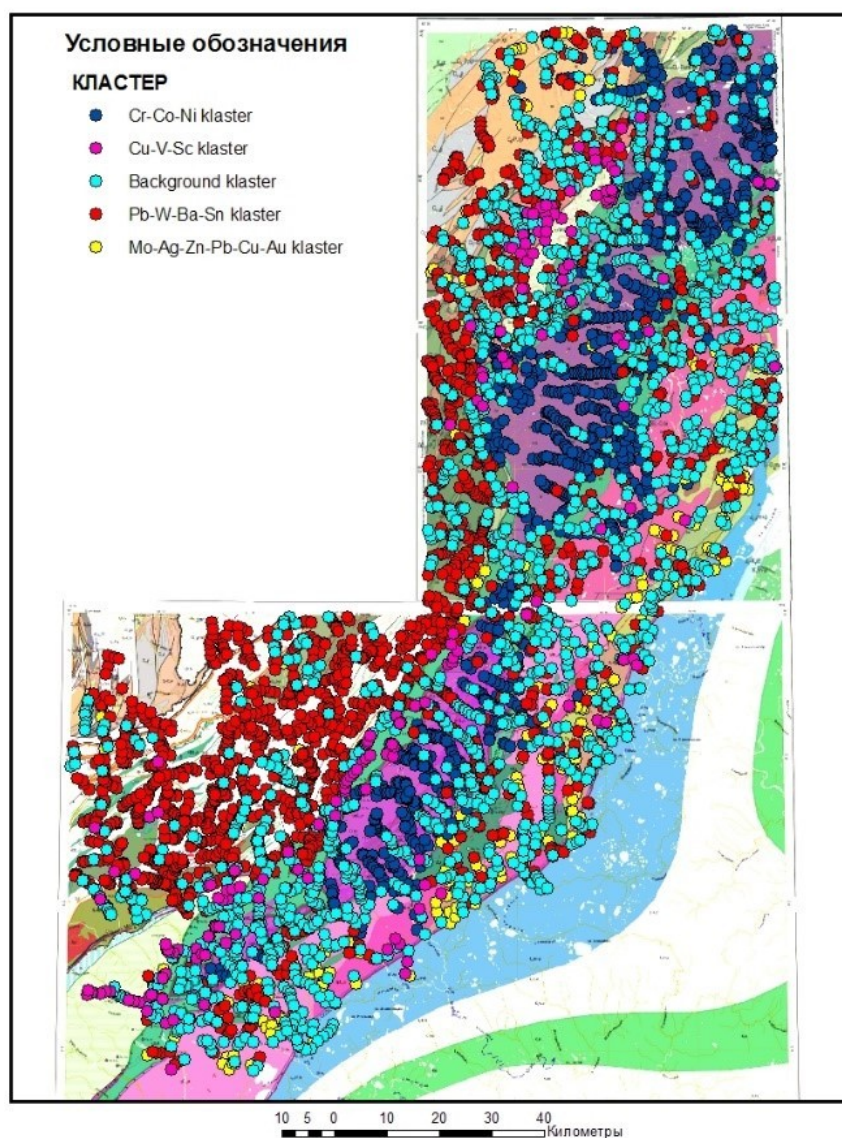


Рисунок 1 - Районирование Войкаро-Сыньинской площади (южная часть Полярного Урала) по результатам кластерного анализа на геологической основе
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.63.2>

Примечание: лист Q-41 ГП-1000/3; Кондайн О. А., 2001

Cr-Ni-Co геохимический кластер (Кластер №1) представлен набором элементов, в котором хром, кобальт и никель имеют средние содержания в 4-5 раз отличающиеся относительно других кластеров, а также высокоаномальными содержаниями Pt и Pd.

Основная выборка проб попадает в границы Войкарской структурно-формационной зоны (СФЗ), а именно в пределы Райизско-Войкарского комплекса альпинотипных ультрабазитов, представленных дунит-гарцбургитовой и гарцбургитовой ассоциацией, и восточную часть Кэршорского дунит-верлит-клинопироксенит-габбрового комплекса (см. рис. 2). Малая часть проб на северо-западе пространственно попадает в пределы Лемвинской СФЗ, а на востоке в пределы Малоуральского вулканоплутонического пояса Войкарской СФЗ [5, С. 23-55]. Это объясняется скорее всего наличием моренных отложений ультраосновного состава, т. к. физико-механический перенос осуществляется в пределах первых километров. Данная часть кластера не рассматривается.

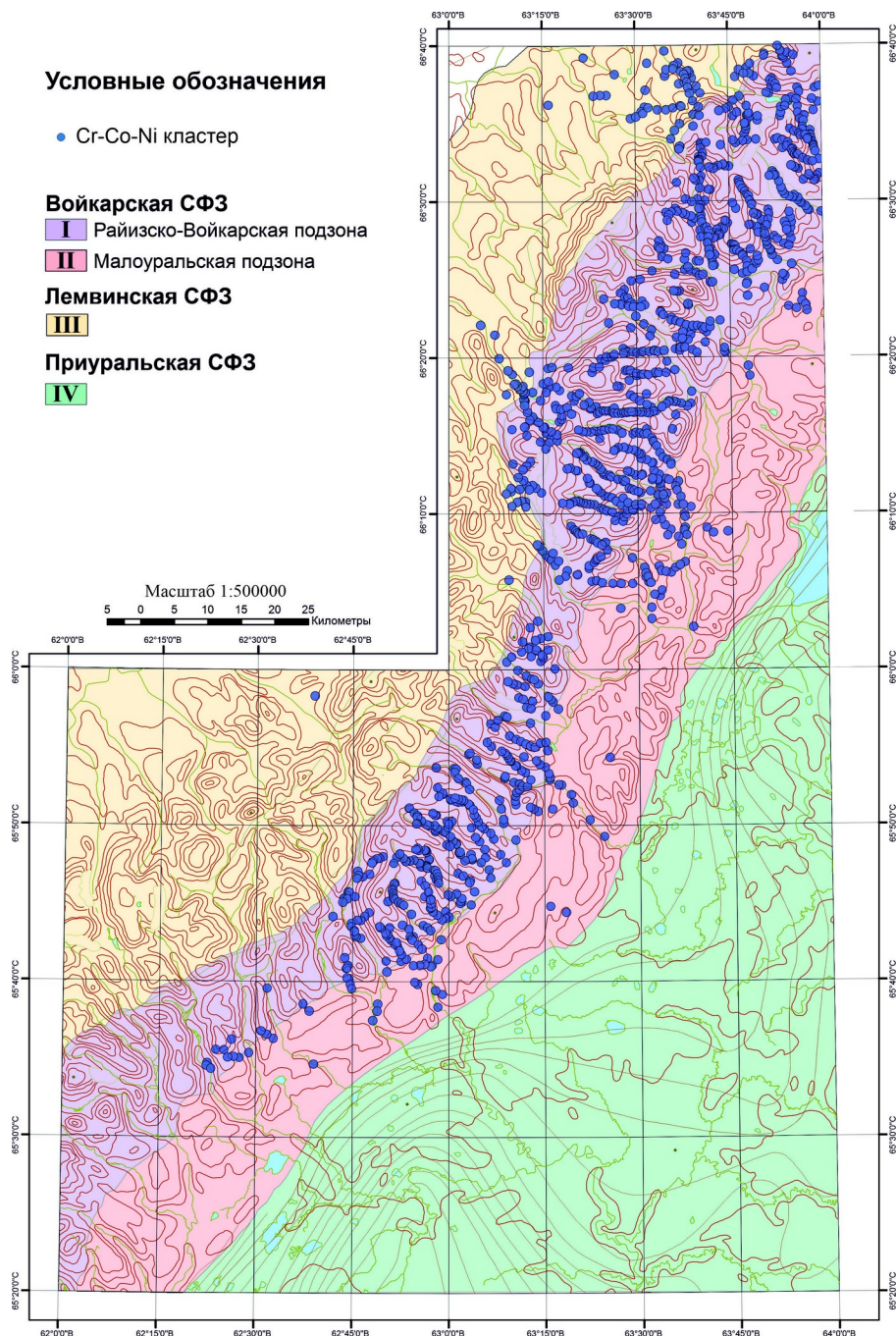


Рисунок 2 - Соотношение Cr-Ni-Co геохимического кластера (Кластер №1) и геологии исследуемого района на упрощенной геологической схеме

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.63.3>

По минерагенической зональности Cr-Co-Ni кластер соответствует Райизско-Войкарской Cr-Cu-Ti минерагенической зоне и объединяет Войкаро-Сыньинский хромитовый рудный район и восточную часть Кэршорской платино-золото-меднорудную рудоносную зону, которые в свою очередь делятся на Хойлинско-Пайерский рудный узел, Погурейский хромитовый рудный узел, Лаптапайский хромитовый рудный узел.

Ультраосновные и основные породы райизско-войкарского и кэршорского комплексов слагают единую крупную и достаточно пологую надвиговую пластину, ширина выхода которой составляет в среднем 18-20 км на севере (хойлинский блок, погурейский блок); 14 км в средней части (лаптапайский блок), сужаясь к югу до 2-4 км. Пластина представляет собой сложную складчато-надвиговую структуру. Ядерная часть складки сложена гарцбургитами и, в меньшей степени, дунитами райизско-войкарского комплекса, тогда как на крыльях последовательно обнажаются пироксениты и габброиды кэршорского комплекса [6]. Падение крыльев на юго-восток, углы падения около 70°. Имеются существенные отличия в составе, строении, степени метаморфизма metabазитов западной полосы (крыльев) «полосчатого» кэршорского комплекса относительно восточных.

Войкаро-Сыньинский массив, протяженностью около 200 км, при ширине от 2 до 18 км сложен гарцбургитами, дунитами и оливин-антигоритовыми породами – войкаритами. Пироксениты, серпентиниты и другие гипербазиты, развитые в краевых зонах массива, встречаются в резко подчиненных количествах [7].

Пространственное размещение хромитов на территории рудного района определяется их генетической связью с альпинотипными ультрабазитами [8], поэтому все известные месторождения и рудопроявления хрома относятся к кимперсайскому типу [9] и локализуются в ультрабазитах.

Большинство известных к настоящему времени рудных объектов выявлены до середины 70-х годов прошлого столетия. Южная часть массива до сих пор практически не охвачена поисковыми работами на хромиты.

При аналитической обработке результатов анализов проб, попавших в Cr-Co-Ni кластер, внимание акцентировалось на конкретные задачи, решение которых могло бы найти практическое применение при дальнейших поисках:

- выявление аномальных полей Cr, которые могли бы вывести на новые объекты хромового оруденения;
- оценка потенциала платиноидов в составе хромовых руд и хромосодержащих пород Войкаро-Сыньинского хромитового рудного района.

Если хромитоносные тела подвергаются дренированию или рудный материал трансформируется физико-механическим путем вниз по склону (до 1-1,5 км и не далее), поступая в пойму ручья, то в аллювии концентрируется Cr, Ni, Co. На отдельных участках с данной ассоциацией оказывается Pt, Au, Pd, Pb, Cu в различных сочетаниях и уровнем концентраций. Если рудопроявления и пункты минерализации хромитов располагаются на водоразделе или на склоне массива, где гидросеть отсутствует или она отстоит более чем на 1-1,5 км, то такие рудные объекты в потоках не проявляются.

В результате статистической обработки данных было получено фоновое значение для Cr равное 0,389%, что в целом соответствует кларковому для гипербазитов [10], а также для Co – 0,066%, Ni – 0,052%.

В потоках рассеяния геохимическая ассоциация химических элементов неизменно представлена Cr, Co, Ni. Верхний предел для Cr равен 1,25% и обусловлен ограничением по определению максимальных содержаний методом ПКСА. Cr, Co, Ni в сочетании с Pt и Pd в потоках характеризуются высокоаномальными значениями.

В пределах кластера наблюдается увеличение концентраций Co в потоках с севера на юг. Ni, в свою очередь, концентрируется в потоках в центральной части Войкарского массива.

Аномальные потоки Pt и Pd фиксируются в приконтактных зонах райизско-войкарского комплекса с кэршорским, как с запада, так и на востоке.

В данном кластере по результатам интерпретации было выявлено несколько аномальных зон. В частности, аномальный участок (см. рис. 3) площадью около 150 км², представляющий первоочередной интерес с точки зрения дальнейших поисков на оруденение промышленного типа.

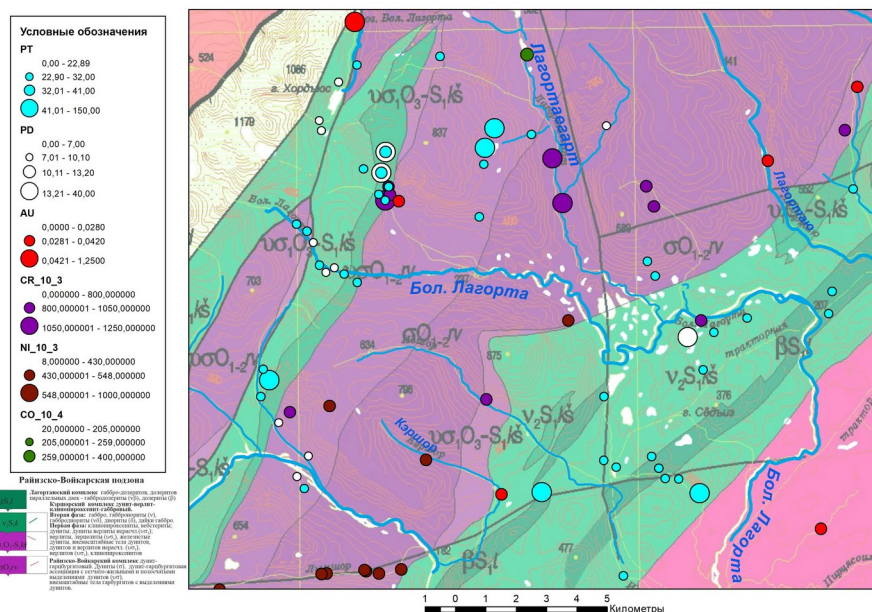


Рисунок 3 - Аномальный участок в пределах Cr-Co-Ni кластера

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.136.63.4>

Аномальный участок расположен в междуречье рр. Лагортагарт и Бол. Лагорта и приурочен к Лагортинскому рудному полю, в составе Хойлинско-Пайерского рудного узла, и характеризуется преимущественно тремя высокоаномальными потоками Cr, Ni и Co в потоках проявлены слабо, потоки Ni фиксируются на юге участка. Au в потоках находится в подчиненном количестве и протяженных потоков не образует. Скорее всего приурочено к хромитоносным дунитовым породам, где обнаруживается в нодулях хромитов.

Кроме того, выявляются контрастные аномальные потоки Pt и Pd, которые образуют аномальные потоки площадью 32 и 10 км² со средним содержанием соответственно 32 и 18 мг/т.

Источником служат породы дунит-гарцбургитовой ассоциации райизского-войкарского комплекса и нижняя часть дунит-верлит-клинопироксенитового кершорского комплекса. Надо отметить, что аномальные потоки Pt и Pd, в целом, приурочены к границам между райизского-войкарским комплексом и кершорским комплексом.

По геохимическим данным хромовые проявления Лагортинского рудного поля можно отнести к Pt-содержащим.

Таким образом, результаты исследований показывают, что в пределах Cr-Co-Ni кластера перспективным участком для постановки дальнейших работ по выявлению комплексных месторождений Cr с платиноидами кимперсайского типа является аномальный участок пределах Лагортинского рудного поля.

Заключение

1. В пределах изучаемой площади по результатам кластерного анализа четко выявляется 4 зоны, отличающихся по своей геохимической специализации, в пределах которых выделяется группа элементов, характеризующаяся повышенными средними содержаниями;

2. Распределение кластеров носит субмеридианальный характер и прослеживается вдоль простираения основных структур и геологических комплексов этой части Полярного Урала. Пространственно кластеры в целом попадают в минерагенические зоны и отвечают их геохимической специализации;

3. Cr-Co-Ni геохимический кластер (Кластер №1) попадает в границы Войкарской СФЗ и объединяет Войкаро-Сыньинский хромитовый рудный район и восточную часть Кэршорской платино-золото-меднорудную рудоносную зону;

4. Выявлен аномальный участок, в пределах Cr-Co-Ni геохимического кластера, площадью около 150 км², представляющий первоочередной интерес для постановки дальнейших работ по выявлению комплексных месторождений хрома с платиноидами кимперсайского типа.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Арнаутов Н.В. Приближенный количественный спектральный анализ природных объектов / Н.В. Арнаутов, Н.М. Глухова, Н.А. Яковлева. — Новосибирск: Наука, 1987. — 107 с.
2. Михалевич И.М. Применение математических методов при анализе геологической информации (с использованием компьютерных технологий) / И.М. Михалевич, С.П. Примина. — Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2006. — 115 с.
3. Двоерядкина Н.Н. Кластерный анализ как инструмент обработки геологических данных / Н.Н. Двоерядкина, Н.А. Чалкина // Вестник АмГУ. — 2017. — № 49. — С. 22-29.
4. Соловов А.П. Геохимические методы поисков рудных месторождений / А.П. Соловов, А.А. Матвеев. — М: Изд-во МГУ, 1985. — 232 с.
5. Душин В.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). Объяснительная записка / В.А. Душин, О.П. Сердюкова, А.А. Малюгин [и др.]. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. — 384 с.
6. Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре / Г.Н. Савельева; Академия наук СССР (АН СССР), Геологический институт (ГИН). — Москва: Наука, 1987. — 246 с.
7. Савельев А.А. Офиолиты Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) / А.А. Савельев, Г.Н. Савельева // Геотектоника. — 1977. — № 6. — С. 46-50.
8. Савельева Г.Н. Альпинотипные гипербазиты Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) / Г.Н. Савельева // Труды ИГиГ УНЦ АН СССР. — 1977. — Вып.127. — С. 3-17.
9. Савельев Д.Е. Морфология и текстурно-структурные особенности хромититовых залежей Главного рудного поля Кемпирсайского массива (Южный Урал, Казахстан) / Д.Е. Савельев, Д.К. Макатов, В.С. Портнов [и др.] // Георесурсы. — 2022. — Т. 24. — № 1. — С. 62-73.
10. Авдонин В.В. Геология полезных ископаемых: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.В. Авдонин, В.И. Старостин. — М.: Издательский центр «Академия», 2010. — 384 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Arnautov N.V. Priblizhennyj kolichestvennyj spektral'nyj analiz prirodnyh ob'ektov [Approximate Quantitative Spectral Analysis of Natural Objects] / N.V. Arnautov, N.M. Gluhova, N.A. Jakovleva. — Novosibirsk: Nauka, 1987. — 107 p. [in Russian]
2. Mihalevich I.M. Primenenie matematicheskikh metodov pri analize geologicheskoy informacii (s ispol'zovaniem komp'yuternyh tehnologij) [Application of Mathematical Methods in the Analysis of Geological Information (Using Computer Technology)] / I.M. Mihalevich, S.P. Primina. — Irkutsk: Irkutsk State University, 2006. — 115 p. [in Russian]
3. Dvoerjadkina N.N. Klasternyj analiz kak instrument obrabotki geologicheskikh dannyh [Cluster Analysis as a Tool for Geological Data Processing] / N.N. Dvoerjadkina, N.A. Chalkina // Vestnik AmGU [Bulletin of AmSU]. — 2017. — № 49. — P. 22-29. [in Russian]
4. Solovov A.P. Geohimicheskie metody poiskov rudnyh mestorozhdenij [Geochemical Methods of Prospecting for Ore Deposits] / A.P. Solovov, A.A. Matveev. — M.: Publishing House of MSU, 1985. — 232 p. [in Russian]
5. Dushin V.A. Gosudarstvennaja geologicheskaja karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1: 200 000. Izdanie vtoroe. Serija Poljarno-Ural'skaja. List Q-42-VII, VIII (Obskoj). Ob'jasnitel'naja zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200 000. Second edition. Polar-Ural series. Sheet Q-42-VII, VIII (Obskaya). Explanatory note] / V.A. Dushin, O.P. Serdjukova, A.A. Maljugin [et al.]. — SPb.: Cartographic factory VSEGEI, 2014. — 384 p. [in Russian]
6. Savel'eva G.N. Gabbro-ul'trabazitovye komplekсы ofiolitov Urala i ih analogi v sovremennoj okeanicheskoy kore [Gabbro-ultrabasite Complexes of the Ural Ophiolites and Their Analogues in the Modern Oceanic Crust] / G.N. Savel'eva; Academy of Sciences of the USSR (AS USSR), Geological Institute (GIN). — Moscow: Nauka, 1987. — 246 p. [in Russian]
7. Savel'ev A.A. Ofiolity Vojkaro-Syn'inskogo massiva (Poljarnyj Ural) [Ophiolites of the Voikaro-Synyinsky Massif (Polar Urals)] / A.A. Savel'ev, G.N. Savel'eva // Geotektonika [Geotectonics]. — 1977. — № 6. — P. 46-50. [in Russian]
8. Savel'eva G.N. Al'pinotipnye giperbazity Vojkaro-Syn'inskogo massiva (Poljarnyj Ural) [Alpinotype Hyperbasites of the Voikaro-Synyinsky Massif (Polar Urals)] / G.N. Savel'eva. — Materials of the Institute of Geology and Geophysics of the USC of the USSR Academy of Sciences. — 1977. — Iss.127. — P. 3-17. [in Russian]
9. Savel'ev D.E. Morfologija i teksturno-strukturnye osobennosti hromititovyh zalezhej Glavnogo rudnogo polja Kempirsajskogo massiva (Juzhnyj Ural, Kazahstan) [Morphology and Textural and Structural Specifics of Chromitite Deposits of the Main Ore Field of the Kempirsay Massif (Southern Urals, Kazakhstan)] / D.E. Savel'ev, D.K. Makatov, V.S. Portnov [et al.] // Georesursy [Georesources]. — 2022. — Vol. 24. — № 1. — P. 62-73. [in Russian]
10. Avdonin V.V. Geologija poleznyh iskopaemyh: uchebnik dlja stud. vyssh. ucheb. zavedenij [Geology of Mineral Resources: textbook for students of universities] / V.V. Avdonin, V.I. Starostin. — M.: Publishing House «Academia», 2010. — 384 p. [in Russian]