

УДК 550.341

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОРУДЕНЕНИЯ В АЛТАЙСКО-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ

© 2024 г. А. И. Горшков\*, О. В. Новикова\*\*, А. И. Ливинский\*\*\*

*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия*

*\*E-mail: gorshkov@mitp.ru*

*\*\*E-mail: onovikov@mitp.ru*

*\*\*\*E-mail: artem@mitp.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

Рассматривается горно-складчатый Алтайско-Саянский пояс с целью (1) выявления особенностей локализации крупномасштабного полиметаллического оруденения в линейно-блоковой структуре региона и (2) определения геофизических и геоморфологических особенностей мест расположения этих месторождений с помощью алгоритма распознавания образов Кора-3. Линейно-блоковая структура региона определена с помощью морфоструктурного районирования. Выявлена пространственная связь месторождений полиметаллов крупных и суперкрупных размеров с морфоструктурными узлами. Основываясь на этой взаимосвязи, решена задача дихотомии, состоящая в разделении всех узлов региона на два класса: рудоносные и нерудоносные. Для этого использован логический алгоритм распознавания с обучением Кора-3, входными данными для которого были геоморфологические и геофизические параметры узлов. Обучающую выборку алгоритма составили узлы, в которых известны крупные и суперкрупные месторождения полиметаллов. На этапе обучения алгоритм определил наборы характерных признаков, которые свойственны каждому классу. По этим признакам все узлы региона и были разделены на рудоносные и нерудоносные. В результате распознавания узлы, в которых известны месторождения рассмотренных типов и размеров, были классифицированы как рудоносные, а также дополнительно к ним определено 11 узлов, которые отвечают найденным в работе признакам и могут рассматриваться потенциально рудоносными.

*Ключевые слова:* месторождения полиметаллических руд, алгоритм распознавания Кора-3, рудоносные узлы.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0002333724050049>, **EDN:** EJZTVN

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Целью исследования является выявление особенностей положения крупных и суперкрупных месторождений полиметаллических руд в линейно-блоковой структуре Алтайско-Саянского региона и определение гравимагнитных и геоморфологических особенностей мест локализации этих месторождений с помощью алгоритма распознавания образов Кора-3. Структурную основу исследования составляет схема морфоструктурного районирования (МСР) Алтайско-Саянского региона, опубликованная в работе [Gorshkov, Soloviev, 2021]. МСР региона было проведено по методике, разработанной в работе [Ранцман,

1979]. Связь месторождений металлов с узлами пересечения морфоструктурных линейно-блоковых элементов была отмечена ранее в работах [Гвишиани, Горшков, 1989; Гвишиани и др., 1988]. Впоследствии на основе схем МСР горных поясов Средиземноморья алгоритмы распознавания образов были использованы для идентификации рудоносных узлов, контролирующего расположение крупных и суперкрупных месторождений металлов [Горшков, Соловьев, 2004; 2006].

Морфоструктурный анализ давно является эффективным инструментом в прогнозных металлогенических исследованиях. С его помощью, в частности, выявлена важная роль

линеаментов в структурном контроле крупных и суперкрупных месторождений [Фаворская и др., 1974; Волчанская и др., 1975; 1990; Скублова, 1987; Сквозные..., 1989]. Во многих работах как на глобальном, так и на региональном уровнях отмечена устойчивая связь оруденения с участками пересечения линеаментов, дешифрируемых на космоснимках земной поверхности (см., например, работы [Лопатин, 2002; Перцев и др., 2002]).

В металлогеническом прогнозировании алгоритм распознавания Кора-3 применялся американскими исследователями для распознавания месторождений урана на западе США по комплексу геолого-геофизических параметров: около 85% месторождений урана, разрабатываемых в изучавшемся районе, были правильно распознаны как рудоносные [Briggs, Press, 1977]. Кроме того, алгоритм Кора-3 был применен для прогнозирования скоплений углеводородов в передовых прогибах Анд Южной Америки на основе схемы МСР этого региона [Губерман и др., 1986]. Прогноз оказался успешным, в течение последующих 30 лет в этом регионе были открыты шесть гигантских нефтегазовых месторождений, которые расположены в потенциальных узлах, распознанных в 1986 г. [Guberman, Pikovskiy, 2018]. Этот результат указывает на перспективность подхода, основанного на применении алгоритмов распознавания образов к морфоструктурным данным для решения задач прогнозирования полезных ископаемых.

Алтайско-Саянский сегмент является частью Центрально-Азиатского металлогенического пояса и характеризуется преобладанием полиметаллического оруденения, представленного рядом месторождений, имеющих экономическое значение [Геологическое..., 1988]. В работе рассматриваются месторождения полиметаллических руд крупного и суперкрупного размера. Информация о таких месторождениях в Алтайско-Саянском регионе была взята из глобальных электронных баз данных по месторождениям полезных ископаемых [Рундквист и др., 2004; Mineral..., 2000].

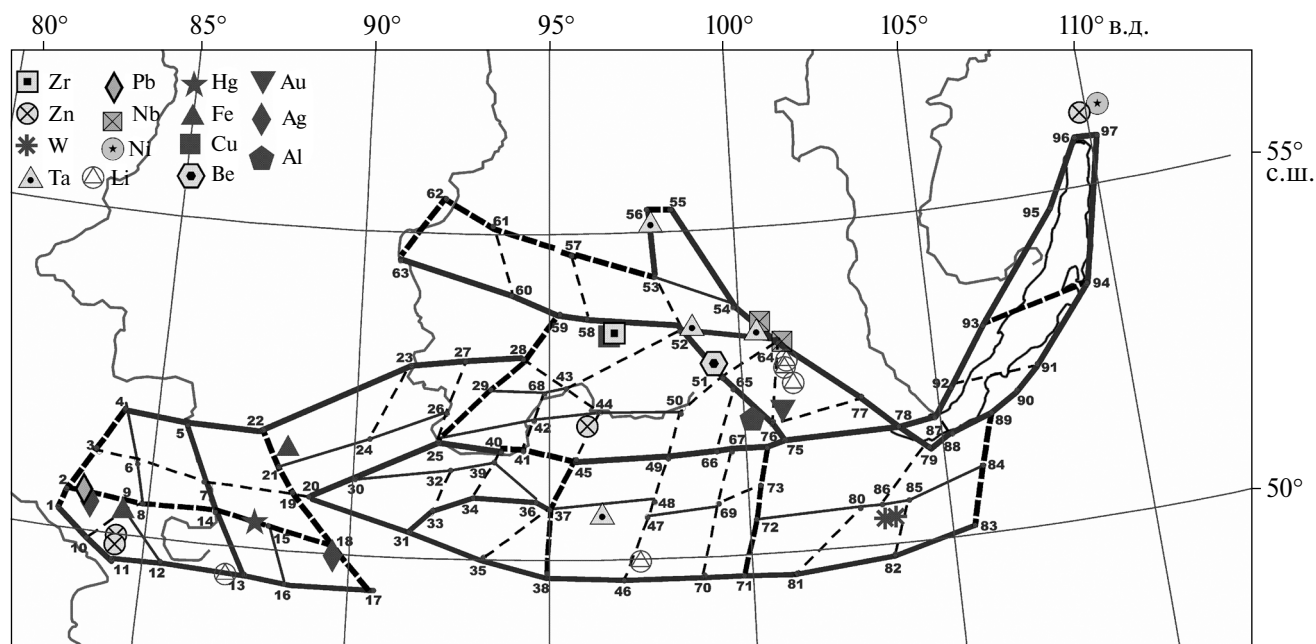
## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Методический подход, использованный в работе, основан на применении алгоритма распознавания образов Кора-3 к морфоструктурным узлам, определенным в результате МСР (рис. 1).

### 2.1. Морфоструктурное районирование Алтайско-Саянского региона

Тектонические структуры Алтая и Саян сформировались в результате герцинской и каледонской складчатости [Дергунов, 1989; Буслов и др., 2013]. В тектоническом строении региона важную роль играют палеозойские и мезозойские разломы, обновленные в кайнозойское время [Дергунов, 1989]. Образование современного рельефа происходило в позднем кайнозое в олигоцен-четвертичное время в результате дифференцированного перемещения отдельных блоков по многочисленным разломам. Эти разломы обуславливают блоковое строение фундамента, которое четко проявляется в современной морфоструктуре [Новиков, 2004].

Задача МСР состоит в определении иерархической линеаментно-блоковой структуры региона [Ранцман, 1979; Горшков, 2010]. В работе используется схема МСР Алтайско-Саянского региона (рис. 1), подробно описанная в работе [Gorshkov, Soloviev, 2021]. На схеме выделено три иерархических уровня морфологически однородных блоков и их границ, а также узлы пересечения линеаментов, ограничивающих блоки. Блоки характеризуются близкими значениями количественных показателей рельефа (уровень высот, ориентация линейных форм рельефа). Границы блоков проведены там, где резко и существенно меняется значение хотя бы одного показателя. Блокам и их границам присвоен третий, низший в иерархии, ранг. Блоки объединены в мегаблоки, в пределах которых значения количественных показателей от одного блока к другому изменяются согласно определенной последовательности; границы мегаблоков проведены в местах нарушения этой последовательности. Мегаблокам и их границам присвоен второй ранг. Самая крупная единица районирования – горная страна – территория единого облика рельефа, созданного единым процессом горообразования. Горной стране и ее границам присваивается первый ранг. Морфоструктурные линеаменты разделены на продольные и поперечные. Продольные линеаменты близпараллельны простираению крупных элементов рельефа и включают зоны известных глубинных разломов. Поперечные линеаменты пересекают крупные элементы рельефа и проходят по местам резких и существенных изменений значений количественных показателей крупных элементов рельефа.



**Рис. 1.** Схема МСР Алтайско-Саянского региона и положение крупных и суперкрупных месторождений металлов. Линиями показаны морфоструктурные линеаменты: толстые, средние и тонкие линии – линеаменты первого, второго и третьего рангов соответственно; сплошные линии – продольные линеаменты, прерывистые – поперечные.

Для целей данного исследования важно, что морфоструктурные линеаменты, выделенные на основе анализа рельефа, соответствуют зонам глубинных разломов, которые являются основными рудовмещающими структурами в Алтайско-Саянском регионе [Геологическое строение..., 1988]. В частности, линеамент 1-11 (рис. 1) включает зону Чарышского разлома, линеамент 17-22 соответствует Телецкому и Курайскому разломам, линеамент первого ранга 20-75 совпадает с зонами Окинско-Жомболокского и Тункинского разломов, линеамент 71-74 трассирован по зоне Хубсугульского разлома, линеамент 55-78 соответствует Восточно-Саянскому глубинному разлому, линеамент 20-83 соответствует Болнийскому и Хангайскому разломам. Таким образом, схема МСР (рис. 1) является адекватной структурной основой для изучения особенностей пространственного размещения крупномасштабного полиметаллического оруденения.

В результате МСР установлено 97 морфоструктурных узлов (рис. 1), которые составили множество объектов распознавания в задаче идентификации рудоносных узлов. В анализ включены также узлы, определенные в районе Байкала (рис. 1).

## 2.2. Постановка задачи распознавания рудоносных узлов

Задача распознавания рудоносных узлов формулируется следующим образом. Известные месторождения рассматриваемых размеров ассоциируются с некоторыми узлами Алтайско-Саянского региона. Возникает вопрос: есть ли в регионе другие узлы, которые по своим геоморфологическим и геофизическим признакам сходны с теми, в которых уже известны месторождения металлов рассматриваемых размеров. Иными словами, необходимо решить задачу дихотомии, состоящую в разделении всех узлов региона на два класса:

- класс Р, рудоносные узлы, которые могут вмещать месторождения полиметаллов рассматриваемых размеров;
- класс НР, нерудоносные узлы, в которых наличие таких месторождений маловероятно.

Для решения задачи использован алгоритм распознавания Кора-3 логического типа с обучением [Бонгард, 1967; Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1988]. Объектами распознавания являются 97 узлов, установленных в результате МСР (рис. 1). Для применения алгоритма составляются обучающие выборки каждого класса, которые не должны пересекаться. Для

класса Р обучающая выборка  $P_0$  содержит узлы, где известны месторождения, которые рассматриваются в задаче. Для класса НР обучающая выборка  $NR_0$  включает узлы, в которых неизвестны на сегодняшний день рассматриваемые месторождения. Алгоритм распознавания применяется к векторам, где компоненты каждого вектора — значения параметров, характеризующие объекты распознавания.

В ходе обучения в пространстве используемых параметров алгоритм отбирает характерные признаки узлов класса Р и узлов класса НР. Для каждого объекта распознавания Кора-3 определяет число признаков классов Р и НР, которыми обладает данный объект. Принадлежность каждого объекта к тому или другому классу определяется процедурой голосования, в ходе которой алгоритм подсчитывает для каждого объекта число характерных признаков, которыми данный объект обладает. Если объект имеет больше признаков класса Р, чем признаков класса НР, то он относится к классу Р, и наоборот.

### 2.3. Месторождения полиметаллов в Алтайско-Саянском регионе

Алтайско-Саянский металлогенический пояс относится к структурам сложного гетерогенного строения, длительного и поэтапного формирования и развития структур, магматизма, метаморфизма и рудообразования. Он формировался на протяжении трех тектономагматических циклов: байкальского, каледонского и герцинского. Большинство месторождений сформировалось в среднепалеозойское время [Геологическое..., 1989].

Для изучения связи рассматриваемых месторождений с морфоструктурными узлами использована схема МСР изучаемого региона (рис. 1). Узел формально определен как окружность радиусом 25 км вокруг точек пересечения линеаментов. Данные о месторождениях, представленных в табл. 1, взяты из работ [Рундквист и др., 2003; Mineral..., 2000], а их местоположение показано на рис. 1.

Анализ расположения месторождений из табл. 1 относительно узлов пересечения линеаментов показывает, что большинство из них расположено вблизи морфоструктурных узлов. Не связано с узлами месторождение тантала, расположенное посередине между узлами 37 и 48 (рис. 1). В целом, расстояния до месторождений от точек пересечения линеаментов (центров узлов) не превышает 25 км, за исключением месторождений лития в районе узла 64.

Отметим, что абсолютное большинство рассматриваемых месторождений приурочены к линеаментам первого и второго рангов, которые соответствуют региональным глубинным разломам [Gorshkov, Soloviev, 2021].

### 2.4. Параметры, использованные для распознавания рудоносных узлов в Алтайско-Саянском регионе

Алгоритм распознавания Кора-3 применяется к векторам, компонентами которых являются значения геоморфологических и гравимагнитных параметров (табл. 2), которые характеризуют:

- контрастность и интенсивность тектонических движений на основе данных о высотах рельефа, сочетаниях типов рельефа, площади четвертичных рыхлых отложений в в узлах;

- геометрию и иерархию блоковой структуры. К таким показателям относятся число и ранг линеаментов, формирующих узел, расстояние от узла до линеаментов высших рангов. Эти параметры определяются непосредственно по карте МСР (рис. 1).

- наличие глубинных неоднородностей в узлах по данным гравиметрических и геомагнитных аномалий. Эти параметры определены по данным глобальных электронных баз геоданных с помощью ГИС-технологий.

Перечень рассмотренных параметров приведен в табл. 2. Их значения измерялись в пределах кругов радиусом 25 км вокруг точек пересечения линеаментов. Подчеркнем, что использованные параметры характеризуют не само месторождение, а некоторые особенности среды в пределах всех узлов, в том числе и тех, где расположены рассматриваемые месторождения.

Поскольку алгоритм Кора-3 оперирует с бинарными векторами, перед его применением выполнены процедуры дискретизации параметров и кодировки их физических значений в форму бинарных векторов. Эти процедуры подробно описаны в работах [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010]. Отметим, что за счет дискретизации повышается устойчивость результатов распознавания относительно возможных ошибок в определении значений параметров. Найденные пороги дискретизации приведены в табл. 2. Два порога дискретизации указывают на то, при дискретизации данного параметра весь ряд его значений был разделен на три интервала: “большие”, “средние” и “малые” значения. Один порог дискретизации указан для тех параметров, весь ряд значений которых был разбит на два интервала: “большие” и “малые”.

**Таблица 1.** Крупные и сверхкрупные месторождения металлов Алтайско-Саянского региона по работам [Рундквист и др., 2004; Mineral..., 2000]

Название месторождения	Главные компоненты	Размер*	Возраст
Тишинское	Pb, Zn, Ag	3	D <sub>2</sub>
Малеевское	Zn, Pb, Cu, Ag, Au	3	D–K <sub>1</sub>
Чайское	Ni	3	PR <sub>3</sub>
Ридер-Сокольное	Ag, Pb, Zn, Cu	3	S <sub>2</sub> –D <sub>2</sub>
Алахское	Li	3	T <sub>3</sub> и D <sub>3</sub>
Улуг-Танзекское	Ta	4	C <sub>3</sub>
Арысканское	Zr	3	Є <sub>2</sub> –C <sub>3</sub>
Аксугское	Cu, Mo	3	D <sub>2</sub>
Урикское	Li	3	PR <sub>3</sub>
Снежное	Be	3	C <sub>3</sub>
Зашихинское	Ta	4	T <sub>1</sub>
Вишняковское	Ta	3	PR <sub>1</sub>
Тастыгское	Li	3	PR <sub>3</sub>
Белозименское	Nb	3	PR <sub>3</sub> , P–N
Холоднинское	Zn, Pb	4	PR
Мало-Ойногорское	W	3	Є–O
Джидинское	W	3	Є–O
Голтсовое	Li	3	PR <sub>2</sub>
Большетагнинское	Nb	3	PR <sub>3</sub>
Холзунское	Fe	3	D <sub>2</sub>
Среднезименское	Ta	3	–
Белореченское	Li	3	T
Асгатское	Ag	3	–
Зыряновское	Zn	3	C–D <sub>3</sub>
Волковское	Fe	3	–
Зун-Холбинское	Au	3	PR, C–D
Кизил-Акшинское	Zn	3	–
Акташское	Hg	3	Є
Боксонское	Al	3	PR <sub>3</sub>

Примечание: \* размер 3 – крупные месторождения; размер 4 – сверхкрупные месторождения.

**Таблица 2.** Параметры узлов, использованные для распознавания рудоносных узлов

Параметры	Пороги дискретизации параметров
<i>а) Морфометрические параметры</i>	
Максимальная высота рельефа, м ( $H_{\max}$ )	1740; 2372
Минимальная высота рельефа, м ( $H_{\min}$ )	509; 916
Размах высот, м ( $\Delta H$ ) ( $H_{\max} - H_{\min}$ )	1099; 1496
Расстояние между $H_{\max}$ и $H_{\min}$ , км ( $L$ )	38
Градиент рельефа, ( $\Delta H/L$ )	28; 51
<i>а) Геологические параметры</i>	
Площадь рыхлых четвертичных пород, % ( $Q$ )	10; 30
<i>в) Параметры линейно-блокового строения</i>	
Высший ранг линейно-блокового строения, ( $HR$ )	1
Число линейно-блоковых элементов в пересечении, ( $NL$ )	2
Расстояние до ближайшего линейно-блокового элемента 1-го ранга, км, ( $R1$ )	0
То же до линейно-блокового элемента 2-го ранга, км, ( $R2$ )	83
То же до ближайшего пересечения, км, ( $R_{int}$ )	64
Число линейно-блоковых элементов в круге радиусом 30 км.	3
<i>г) Сочетания типов рельефа (<math>T_{op}</math>)</i> г/пр – сочетание гор с предгорьями	2 (г/пр)
<i>д) Гравиметрические параметры</i>	
Максимальное значение аномалии Буге, ( $B_{\max}$ ), мГал	-144
Минимальное значение аномалии Буге, ( $B_{\min}$ ), мГал	-225; -182
Градиент аномалии Буге, ( $\Delta B = B_{\max} - B_{\min}$ ) мГал	55
<i>е) Параметры литосферных магнитных аномалий</i>	
Максимальное значение аномалии ( $M_{\max}$ ), нТл	118
Максимальное значение аномалии ( $M_{\min}$ ), нТл	-123
Градиент аномалии ( $\Delta M = M_{\max} - M_{\min}$ ), нТл	200; 332

### 3. РАСПОЗНАВАНИЕ РУДОНОСНЫХ УЗЛОВ В АЛТАЙСКО-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ

Основываясь на пространственной корреляции между морфоструктурными узлами и крупными и сверхкрупными месторождениями металлов (рис. 1), алгоритм Кора-3 был использован для поиска характерных геоморфологических и гравимагнитных признаков узлов, вмещающих рассматриваемые месторождения. Поиск характерных признаков велся в пространстве параметров, представленных в табл. 2. На основе таких признаков необходимо разделить все множество объектов распознавания, состоящее из 97-ми узлов, определенных в результате МСР на два класса: рудоносный (Р) и нерудоносный (НР).

#### 3.1. Материал обучения

Обучающую выборку  $P_0$  класса Р составил 21 узел, в которых локализованы крупные (размер 3) и/или суперкрупные (размер 4) месторождения металлов из табл. 1. В нее вошли узлы 2, 9, 11, 13, 15, 18, 21, 44, 46, 51, 52, 54, 56, 58, 64, 75, 76, 85, 86, 96, 97 (см. рис. 1). Для класса НР в обучающую выборку  $HR_0$  были включены 70 узлов, которые находятся на наибольшем удалении от рассматриваемых месторождений. Было сформировано также множество экзамена X. В него вошли узлы 1, 8, 22, 57, 60, 65, 74, в 50-км радиусе от которых есть

рассматриваемые месторождения. Эти узлы не были включены в обучение, но учтены при распознавании.

#### 3.2. Результат распознавания

В результате распознавания алгоритмом Кора-3 были определены 10 признаков, которые характерны для узлов класса Р. Признак называется характерным признаком класса Р, если число объектов из обучающей выборки  $P_0$ , которыми он обладает не меньше чем порог  $k_p$ , а число объектов из обучающей выборки  $H_0$ , которыми он обладает не больше чем порог  $\check{k}_p$ . Соответственно, признак называется характерным признаком класса Н, если число объектов из обучающей выборки  $H_0$ , которыми он обладает, не меньше чем порог  $k_{HR}$ , а число объектов из обучающей выборки  $V_0$ , которыми он обладает, не больше чем порог  $\check{k}_{HR}$ . Пороги  $k_p$ ,  $\check{k}_p$ ,  $k_{HR}$  и  $\check{k}_{HR}$  являются свободными параметрами алгоритма, а их значения задаются в ходе его применения [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010]. Основной вариант распознавания получен при следующих значениях этих порогов  $k_p = 5$ ,  $\check{k}_p = 18$ ,  $k_{HR} = 5$  и  $\check{k}_{HR} = 0$ . Найденные признаки представлены в табл. 3, в которой каждая строка является отдельным признаком. На их основе с помощью процедуры голосования проведено разделение всех 97 узлов на классы Р и НР, которое представлено в табл. 4. Порог голосования ( $\Delta$ ) был выбран равным 1. Число признаков, которыми обладает каждый узел показано в табл. 4.

Таблица 3. Характерные признаки рудоносных узлов

Параметры узлов (обозначения см. табл. 2)													
№	$H_{max}$ , м	$H_{min}$ , м	$\Delta H$ , м	$M_{op}$	NL	NLC	$R_{int}$ , км	R1, км	R2, км	$B_{min}$ , мГал	$\Delta B$ , мГал	$M_{max}$ , нТл	$M_{min}$ , нТл
Характерные признаки рудоносного класса Р													
1			$\leq 1099$									$\leq 118$	$\leq -123$
2	$> 2372$						$\leq 64$						$\leq -123$
3		$> 916$			2								$\leq -123$
4		$> 916$									$> 56$	$\leq 118$	
5	$> 2372$							0			$> 56$		
6			$> 1496$		2						$\leq -225$		
7						$\leq 3$		0	$\leq 83$				
8			$> 1496$			$\leq 3$	$\leq 64$						
9	$> 2372$		$> 1496$			$\leq 3$							
10			$\leq 1099$	$> 2$			$\leq 64$						

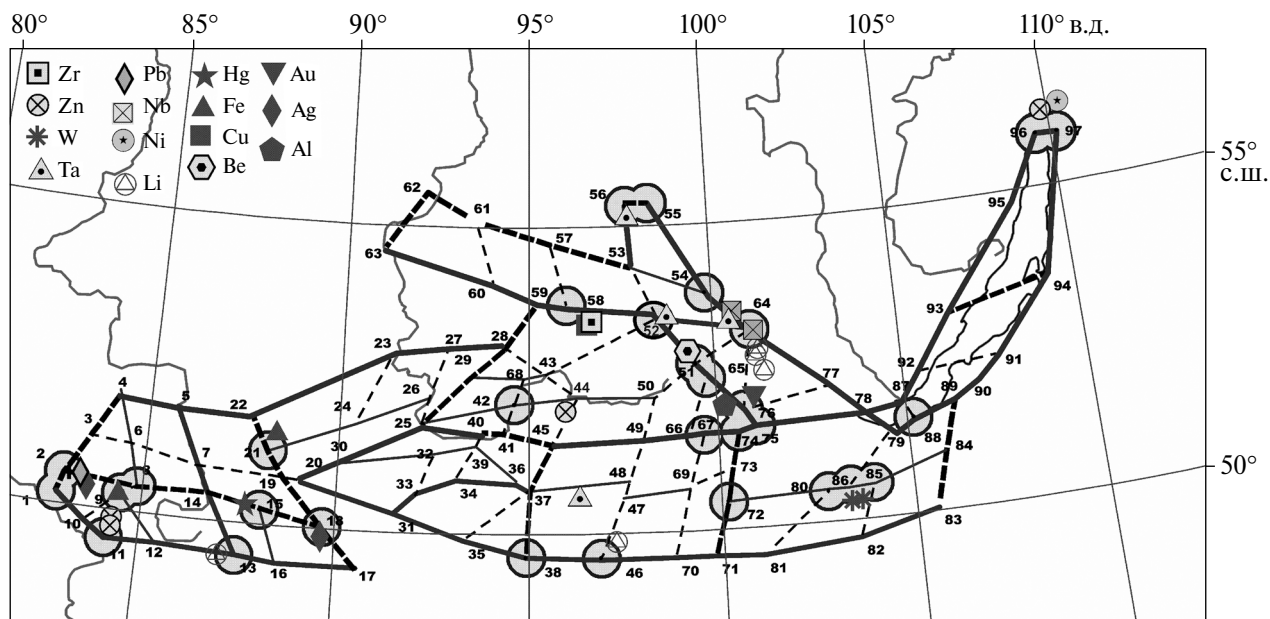


Рис. 2. Рудоносные узлы, распознанные в Алтайско-Саянском регионе. Линии те же, что на рис. 1. Кругами показаны узлы, распознанные как рудоносные.

Из 97-ми узлов к классу Р был отнесен 31 узел, что составляет 32% от общего числа узлов. К нерудоносным отнесено 66 узлов (68% от общего числа). На рис. 2 узлы Р отмечены кругами радиусом 25 км в масштабе карты.

Из обучающей выборки  $P_0$  не распознается как Р узел 44, с которым связано месторождение тантала. Остальные узлы из этого множества распознаны как рудоносные. Четыре узла из материала экзамена (1, 8, 65, 74) распознаны как Р. Из обучения нерудоносного класса  $NP_0$  перешли в класс Р узлы 19, 42, 49, 53, 55, 67 и 72.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что схема МСР, составленная путем анализа современного рельефа, может служить адекватной основой для изучения особенностей пространственной локализации полиметаллического оруденения древнего происхождения, поскольку рудовмещающие разломы в Алтайско-Саянском регионе четко выражены в современной морфоструктуре региона и определяют современный рельеф этой территории [Новиков, 2004]. Рассмотренные крупноразмерные месторождения полиметаллов пространственно приурочены к морфоструктурным узлам, определенным в результате МСР. Единственное исключение

связано с месторождением тантала, которое расположено на линементе 3-го ранга между узлами 37 и 47 (рис. 1). Остальные месторождения из табл. 1 расположены в узлах, образованных пересечением линементов высших рангов, первого и второго. Такие линементы соответствуют зонам крупных глубинных разломов древнего заложения. Таким образом, наше исследование показывает, что морфоструктурные узлы играют определяющую роль в контроле пространственного размещения крупномасштабных месторождений полиметаллов в Алтайско-Саянском регионе.

В результате распознавания все узлы, вмещающие месторождения из табл. 1, распознаны корректно, за исключением узла 44 (рис. 1). При этом число узлов, распознанных как потенциально рудоносные невелико, что представляется адекватным результатом с учетом хорошей изученности региона в металлогеническом отношении. В работе [Плюшев и др., 2007] в пределах Алтайско-Саянской области выделены металлогенические зоны, благоприятные для формирования крупных и сверхкрупных месторождений. Сопоставление распознанных рудоносных узлов с этими металлогеническими зонами показывает, что все установленные нами рудоносные узлы расположены в их пределах.



Таблица 4. Классификация узлов алгоритмом Кора-3 на рудоносные и нерудоносные

Номер узла	Число признаков		Номер узла	Число признаков	
	класса Р	класса НР		класса Р	класса НР
Узлы множества $P_0$					
2+	2	0	54+	1	0
9+	2	0	56+	2	0
11+	2	0	58+	4	0
13+	1	0	64+	1	0
15+	3	0	75+	6	0
18+	5	0	76+	5	0
21+	5	0	85+	2	0
44	0	0	86+	3	0
46+	1	0	96+	1	0
51+	4	0	97+	5	0
52+	2	0			
Узлы множества $PH_0$					
3	0	2	48	0	1
4	0	5	49	1	1
5	0	5	50	1	1
6	0	6	53	0	0
7	0	3	55+	2	0
10	0	2	59	0	0
12	1	6	61	1	2
14	0	2	62	0	2
16	0	1	63	0	5
17	1	1	66	0	2
19	1	1	67+	3	0
20	1	1	68	0	0
23	0	5	69	1	1
24	0	5	70+	1	0
25	0	1	71	0	0
26	1	1	72+	4	0
27	0	5	73	0	1
28	0	5	77	0	6
29	0	2	78	0	3
30	1	6	79	1	1
31	1	1	80+	3	0
32	2	2	81	0	4
33	0	3	82	0	3
34	1	1	83	1	2
35	0	5	84	0	2
36	0	1	87	0	3
37	0	1	88+	2	0
38+	1	0	89	0	2
39	0	2	90	0	0
40	0	4	91	0	0
41	0	3	92	0	4
42+	1	0	93	1	5
43	0	4	94	0	1
45	0	4	95	0	5
47	1	1			
Узлы экзамена					
1+	2	1	60	0	2
8+	2	0	65+	4	0
22	0	2	74+	6	0
57	0	2			

Характерные признаки рудоносных узлов, представленные в табл. 1, позволяют судить о некоторых особенностях таких узлов. В рельефе Алтайско-Саянского региона рудоносные узлы занимают повышенное гипсометрическое положение, на что указывают “большие” значения максимальных высот ( $H_{\max} > 2372$  м) в сочетании с “большими” значениями минимальной высоты ( $H_{\min} > 916$  м). Одновременно в несколько признаков входят “большие” значения параметра размах высот ( $\Delta H > 1496$  м), что свидетельствует о сильной расчлененности рельефа в узлах. Это согласуется с выводами автора работы [Томсон, 1988], отмечавшего повышенную расчлененность современного рельефа в местах локализации рудных месторождений. Для рудоносных узлов оказались также характерны “большие” значения градиента аномалии Буге ( $\Delta B > 56$  мГл), которые маркируют ступени в гравитационном поле в пределах узлов. Для Алтайско-Саянского региона связь эндогенных месторождений с уступами гравитационного поля отмечалась в работе [Volchanskaya et al., 1983]. Важными для идентификации рудоносных узлов стали также “малые” значения максимального и минимального значений магнитного поля ( $M_{\max} \leq 118$  нТл и  $M_{\min} \leq -123$  нТл, соответственно). Отметим, что данные о гравитационных и магнитных аномалиях давно используются в прогнозных металлогенических исследованиях [Фарфель, 1988]. Таким образом, найденные в работе характерные признаки рудоносных узлов основаны на данных, которые широко используются в практике минерагенического прогнозирования.

Практическое применение предложенного подхода для идентификации рудоносных морфоструктурных узлов может позволить ограничить размеры изучаемых площадей при проведении прогнозных металлогенических исследований. Характерные признаки рудоносных узлов Алтайско-Саянского региона, представленные характерными интервалами численных значений морфометрических, гравиметрических, геомагнитных параметров, могут применяться для идентификации рудоносных узлов в других горно-складчатых поясах Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука. 1967. 320 с.

Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В. и др. Тектоника и геодинамика горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1600–1627.

Волчанская И.К., Сапожникова Е.Н. Анализ рельефа при поисках месторождений полезных ископаемых. М.: Недра. 1990. 159 с.

Волчанская И.К., Кочнева Н.Т., Сапожникова Е.Н. Морфоструктурный анализ при геологических и металлогенических исследованиях. М.: Наука. 1975. 323 с.

Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД. 2010. 472 с.

Дергунов А.Б. Каледониды Центральной Азии. М.: Наука. 1989. 191 с.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Василевский А.Н. и др. Эволюция кайнозойского рельефа юго-восточной части Горного Алтая и ее отображение в структурах геоэлектрического и гравитационного полей // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 11. С. 1937–1948.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука. 1988. 176 с.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И. О связи эндогенного оруднения с результатами распознавания сейсмоопасных пересечений линейментов // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307. № 2. С. 328–332.

Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. и др. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы). Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука. 1976. С. 3–91.

Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых / Гл. ред. Е.А. Козловский. Т. 7. Алтай, Саяны, Енисейский кряж / П.С. Матросов, Г.Н. Шапошников, А.П. Щеглов и др. (ред.). Л.: Недра. 1988. 300 с.

Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 10. Геологическое строение и минерагения СССР. Кн. 2. Закономерности размещения полезных ископаемых СССР / Г.А. Габриэлянц, А.И. Кривцов, В.М. Терентьев (ред.). Л.: Недра. 1989. 619 с.

Горшков А.И., Соловьев А.А. Определение характеристик рудоносных узлов методами распознавания образов. Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН. 2004. С. 381–390.

Горшков А.И., Соловьев А.А. Распознавание облика рудных месторождений в поясе Тетис. Крупные и суперкрупные месторождения рудных полезных ископаемых. В трех томах. Т. 1. Глобальные закономерности размещения / Д.В. Рундквист (ред.). М.: ИГЕМ РАН. 2006. С. 361–374.

- Губерман Ш.А., Жидков М.П., Пиковский Ю.И., Раницман Е.Я. О некоторых критериях нефтегазоносности морфоструктурных узлов (Анды Южной Америки) // Докл. АН СССР. 1986. Т. 291. № 6. С. 1436–1440.
- Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. XV. Металлогения Сибири. М.: Наука. 1988. 270 с.
- Лопатин Д.В. Линеаментная тектоника и месторождения – гиганты Северной Евразии // Исследования Земли из космоса. 2002. № 2. С. 77–91.
- Новиков И.С. Морфотектоника Алтая. Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал “Гео”. 2004. 313 с.
- Перцов А.В., Антипов В.С., Гальперов Г.В., Турченко С.И. Линеаментная сеть, контролирующая размещение суперкрупных месторождений России // Докл. РАН. 2002. Т. 383. № 1. С. 87–89.
- Плющев Е.В., Кашин С.В., Метик В.Н., Васильев К.Б. Прогноз рудных узлов на выявление особо крупных месторождений // Региональная геология и металлогения. 2007. № 30–31. С. 93–112.
- Раницман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука. 1979. 170 с.
- Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В. и др. База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов. Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. М.: ИГЕМ РАН. 2004. С. 391–422.
- Скублова Н.В. Структурно-геоморфологические методы в прогнозно-металлогенических исследованиях. Л.: Недра. 1987. 177 с.
- Томсон И.Н. Металлогения рудных районов. М.: Недра. 1988. 215 с.
- Фаворская М.А., Томсон И.Н. и др. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений. М.: Недра. 1974. 236 с.
- Сквозные рудоконцентрирующие системы / Томсон И.Н., Фаворская М.А. (ред.). М.: Наука. 1989. 225 с.
- Фарфель Л.С. Прогнозирование рудных месторождений. М.: Недра. 1988. 151 с.
- Briggs B., Press F. Pattern recognition applied to uranium prospecting // Nature. 1977. V. 268. P. 125–127. <https://doi.org/10.1038/268125a0>
- Gorshkov A.I., Soloviev A.A. Recognition of earthquake-prone areas in the Altai-Sayan-Baikal region based on the morphostructural zoning // Russ. J. Earth. Sci. 2021. V. 21. ES1005. DOI:10.2205/2020ES000751
- Guberman S., Pikovskiy Y. The field test confirms the prognosis of the location of giant oil and gas fields in the Andes of South America made in 1986 // J. Petrol. Explor. Prod. Technol. 2018. V. 9. P. 849–854. <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0553-1>
- Mineral atlas of the world. Geological survey of Norway. 2000. 400 p.
- Volchanskaya I.K., Sapozhnikova E.N., Baskina V.A. Morphostructural regularities in the distribution of endogeneous mineralization in Mongolia // Global Neotectonics and Metallogeny. 1983. V. 2. № 1/2. P. 95–110.

## Application of Pattern Recognition Methods to Study Spatial Localization of Polymetallic Mineralization in the Altai–Sayan Region

A. I. Gorshkov<sup>a, \*</sup>, O. V. Novikova<sup>a, \*\*</sup>, and A. I. Livinskii<sup>a, \*\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

\**e-mail: gorshkov@mitp.ru*

\*\**e-mail: onovikov@mitp.ru*

\*\*\**e-mail: artem@mitp.ru*

Received February 15, 2024

revised March 18, 2024

accepted April 27, 2024

**Abstract** – The Altai–Sayan mountain-folded belt is analyzed with the purpose of (1) revealing peculiarities of localization of large-scale polymetallic mineralization in the lineament-block structure of the region and (2) determining the geophysical and geomorphic peculiarities of the locations of these deposits using the Cora-3 pattern recognition algorithm. The lineament-block structure of the region is determined using morphostructural zoning. A spatial correlation between large and superlarge polymetallic deposits and morphostructural nodes is revealed. Based on this correlation, a dichotomy problem is solved, which is to divide the entire set of nodes in the region into two classes—ore-bearing and non-ore bearing. For

this purpose, we used the Cora-3 logical recognition algorithm with training, for which the input data are geomorphological and geophysical parameters of the nodes. The training set of the algorithm was composed of the nodes where large and superlarge polymetal deposits are known. At the training stage, the algorithm identified the sets of the characteristic features that are peculiar to each class. Based on these features, all the nodes in the region were divided into ore-bearing and non-ore-bearing ones. As a result of recognition, the nodes in which deposits of the considered types and sizes are known were classified as ore-bearing, and, in addition to them, another 11 nodes were identified that meet the features determined in the work and can be considered potentially ore-bearing.

*Keywords:* polymetallic ore deposits, Cora-3 recognition algorithm, ore-bearing nodes