

УДК 553.45 : 681.142

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ,  
ВЛИЯЮЩИХ НА МАСШТАБЫ ОРУДЕНЕНИЯ**  
(на примере месторождений касситерит-сульфидной формации)

*Р. М. КОНСТАНТИНОВ, А. Н. ДМИТРИЕВ*

Методами дискретного анализа устанавливаются информационные веса геологических признаков для образования крупных касситерит-сульфидных месторождений. Поскольку сумма этих информационных весов оказывается в тесном соответствии с запасами месторождений, полученные результаты могут быть использованы для некоторых теоретических выводов и при предварительной оценке месторождений.

Исследование математическими методами геологических факторов, определяющих появление месторождений одной какой-либо рудной формации, является значительно более сложной задачей, чем, например, определение их типичного минерального состава. Трудности здесь связаны как с многообразием факторов, так и с тем, что они имеют чисто качественные описательные характеристики. Кроме того, значительные осложнения вызываются и малым количеством хорошо изученных объектов — месторождений одной какой-либо рудной формации.

Следует отметить, что в практику геологических исследований вводятся все более разнообразные математические методы. Известные работы А. Б. Вистелиуса, Д. А. Родионова, Ю. А. Воронина являются хорошим основанием для дальнейшего использования математики в геологии на существенно статистической основе. Однако многообразие геологических задач в ряде случаев вводит исследователя в область, где статистические методы не дают удовлетворительного решения. Задачи, лежащие в такой области, обладают слабой структурой, как правило, связаны с изучением уникальных явлений, с необходимостью работать с неоднозначно формулируемыми признаками, неполными характеристиками объектов, разнообразной природой сообщений (карты, схемы, описания и т. д.). В этих случаях применяются новые подходы и меры оценок, например, информационные меры, дву- и многозначные логики, теория графов и др.

Некоторые геологические задачи, в том числе и рассматриваемая, обладают такой сложностью постановки и разнообразной природой сообщений, что приходится применять несколько приемов, относящихся к различным разделам математики.

Анализ геологических факторов, влияющих на масштабы оруденения, выполнен по такой общей схеме:

а) производится профессиональный отбор материала исследования, общая мобилизация сообщений по затрагиваемому вопросу и отработывается шкала признаков, существенных для исследуемых объектов. При этом для сбора сведений с успехом могут быть использованы перфокарты (Константинов, 1966).

б) осуществляется, где это возможно, статистическая обработка и группировка материала (Константинов, Бунич, 1967; Константинов и др., 1968).

в) с учетом а и б производится окончательная формулировка и решение задачи логико-дискретным методом (Дмитриев и др., 1968) с помощью средств логического контроля.

Остановимся на более подробном изложении результатов третьего этапа решения (в). Точность решения определяется обычными факторами для всех известных процедур задач в пространстве качественно формулируемых признаков, т. е. зависит от постановки задачи и полноты учтенной информации.

Выбор логико-дискретного анализа как основного решающего средства вызван следующими причинами.

1. Применение логико-дискретного анализа в задачах подобного сорта уже дало положительные практические и теоретические результаты.

2. На наш взгляд, результаты, получаемые данным путем, более легко и широко интерпретируются с профессиональной точки зрения, так как логические процедуры счета сохраняют логику геологов при описании наблюдаемых объектов и явлений.

Для выявления геологических признаков, характеризующих крупные объекты — месторождения в пределах выделенной предыдущими статистическими исследованиями минеральной группы, отвечающей по вещественному составу касситерит-сульфидной формации, были выбраны наиболее интересные и хорошо изученные месторождения Тихоокеанского рудного пояса. Логические операции по определению степени характерности различных признаков проводились над статистически обработанным и сгруппированным материалом.

Методы подготовки и последующей обработки различной геологической информации изложены в специальной литературе (Дмитриев и др., 1968), поэтому ограничимся лишь перечнем последовательных операций, производимых при решении задачи.

1. Прежде всего, должна быть четко сформулирована цель исследования (в нашем случае выявление признаков крупных месторождений, входящих в статистическую минеральную группу, отвечающую касситерит-сульфидной формации).

2. Производится выбор эталонов — хорошо исследованных объектов, относящихся к соответствующей группе и находящихся на одном уровне изученности.

3. Выполняется отбор геологических признаков для исследования.

При этом сначала составляется список всех признаков, влияние которых на образование месторождений можно предполагать. Затем эти признаки критически анализируются и оставляются лишь такие, которые отражают определенные факты, а не выводы или мнения. При вырабтке шкалы признаков следует придерживаться единого подхода к уровню изученности материала. Допустим, приходится одновременно рассматривать месторождения, одни из которых известны только по литературным данным, а другие — по литературе и по личным наблюдениям исследователя. Естественно, что в этом случае приходится за основу принимать наименее детальные литературные описания, так как в противном случае присутствие многих признаков останется неясным. То же самое и в том случае, если в качестве эталонных исследуются месторождения, на которых только начата разведка, и те, где уже ведется эксплуатация. И в этом случае приходится принимать за основу минимальный уровень изученности, т. е. уровень изученности, существующий в начале разведки месторождений. Наконец, в списке признаков оставляются лишь такие, которые отмечаются хотя бы на одном из рассматриваемых объектов.

Информационные веса признаков для касситерит-сульфидных месторождений

№№ п/п	Признаки	Тихоок. пояс		Приморье	
		инф. вес.	%	инф. вес.	%
<b>I. Региональные геологические структуры</b>					
1.	Терригенные геосинклинали	163	2,13	439	3,31
2.	Срединные массивы, поднятия внутри антиклинориев	163	2,13	439	3,31
3.	Синклинории	163	2,13	439	3,31
4.	Глубинные разломы, в том числе скрытые разломы фундамента	128	1,67	154	1,16
5.	Пересечения скрытых разломов	194	2,53	215	1,62
		811		1248	
<b>II. Локальные рудовмещающие структуры</b>					
6.	Линейные складки	172	2,24	439	3,31
7.	Поперечные перегибы складок, флексуриобразные изгибы			305	2,29
8.	Ядра и шарниры антиклиналей	156	2,04	371	2,80
9.	Крылья антиклиналей			154	1,16
10.	Крылья синклиналей			211	1,59
11.	Трещины отрыва			182	1,37
12.	Трещины односистемного скола и субпараллельные нарушения неясного генезиса	310	4,05	193	1,45
13.	Трещины двухсистемного скола и пересекающиеся трещины неясного генезиса	207	2,70	211	1,59
14.	Зоны расщепления и трещиноватости	265	3,46	188	1,42
		1110		1838	
<b>III. Морфология рудных тел</b>					
15.	Штокверки			220	1,66
16.	Отдельные жилы			193	1,45
17.	Жильные зоны, преимущественно выполнение открытых трещин	147	1,92	154	1,16
18.	Зоны дробления и минерализации (полностью или частично метасоматические)	163	2,13	211	1,59
<b>IIIa. Особенности залегания рудных тел</b>					
19.	Угол падения до 50°	172	2,24		
20.	Угол падения от 50 до 75°	352	4,60	158	1,19
21.	Угол падения свыше 75°	415	5,42	371	2,80
		1249		1307	
<b>IV. Особенности размещения оруденения</b>					
22.	Ртутные проявления на флангах	157	2,05	177	1,33
23.	Свинцово-цинковые проявления	196	2,56	220	1,66
24.	Наличие прожилков аксиита			220	1,66
25.	Рудный интервал больше 200 м	147	1,92		
26.	Зональность внутри рудных тел	170	2,22	154	1,16
27.	Зональность внутри рудного поля	130	1,70	220	1,66
28.	Столбовое распределение минерализации			169	1,2
29.	Равномерное распределение			371	2,80
		800		1531	

№№ п/п	Признаки	Тихоок. пояс		Приморье	
		инф. вес.	%	инф. вес.	%
V. Магматические породы, ассоциированные с оруденением					
30.	Граниты под рудными телами	172	2,24		
31.	Гранодиориты и кварцевые диориты в удалении до 3-х км	154	2,01	188	1,42
32.	Гранодиориты и кварцевые диориты под рудными телами			235	1,77
33.	Кислые субвулканические тела, вмещающие оруденение и в удалении до 3-х км	415	5,42	340	2,56
34.	Основные и средние субвулканические тела, вмещающие оруденение и в удалении до 3-х км			220	1,66
35.	Отдельные дайки порфиров, гранодиорит- порфиров, андезито-базальтов, спессартитов, диоритовых порфиров, андезитов, диоба- зовых порфиров	266	3,47	215	1,62
36.	Дайковые поля порфиров	211	2,75	221	1,67
37.	Отдельные дайки кварцевых порфиров, гранит-порфиров, фельзитов, липаритов	155	2,02	215	1,62
38.	Дайковые поля кварцевых порфиров	210	2,74	340	2,56
39.	Внутрирудные порфириты			305	2,29
40.	Внутрирудные кварцевые порфиры			220	1,66
41.	Лавобрекчии и эффузивы порфиров, анде- зитов вблизи от рудных тел			340	2,56
		1584		2641	
VI. Вмещающие породы					
42.	Песчаники	209	2,73	439	3,31
43.	Сланцы углистые и глинистые алевролиты	208	2,72	439	3,31
44.	Переслаивание песчаников и углисто-глини- стых сланцев	139	1,81	188	1,42
45.	Переслаивание песчаников и сланцев в тек- тонической зоне «тектониты»			177	1,33
46.	Прослой конгломератов и граувакк в песчано- сланцевой толще	237	3,10		
47.	Биотитовые и другие роговики	163	2,13		
48.	Средние и основные эффузивы, туфы			218	1,64
		956		1461	
VII. Околорудные изменения					
49.	Грейзенизация	223	2,91		
50.	Серцитизация	415	5,42	211	1,59
51.	Окварцевание	193	2,52	439	3,31
52.	Турмалинизация	170	2,22	125	0,94
53.	Карбонатизация (сидеритизация, кальцитизация)			56	0,42
54.	Биотитизация			196	1,48
55.	Сульфидизация			439	3,31
56.	Хлоритизация	134	1,75	387	2,92
57.	Каолинизация			220	1,66
		1135		2073	
VIII. Возрастные отношения					
58.	Стадий минерализации больше 3-х	Не опр.		439	3,31
59.	Стадий минерализации три и менее			115	0,87
				554	

Примечание. В графе, где значение информационного веса признака не указано, оно меньше ста и мало влияет на суммарный информационный вес месторождения.

В результате такого анализа нами из более чем двухсот различных геологических признаков касситерит-сульфидных месторождений, расположенных в пределах Тихоокеанского рудного пояса, было отобрано для последующего изучения около семидесяти. Среди них: группа региональных геологических структур (7 признаков): локальных рудовмещающих структур (12); морфологии рудных тел (8); факторы магматического контроля (12); вмещающие породы (11); околорудные изменения (11), прочие факторы (10).

4. Вся имеющаяся информация сводится в таблицу, в которой строки соответствуют эталонам (крупным месторождениям), а столбцы признакам. Эта таблица подвергается дополнительной специальной обработке (из нее удаляются признаки, отсутствующие или присутствующие во всех эталонах и т. д.).

5. Таблица исследуется затем на ЭВМ с целью получения информационных весов признаков, т. е. производится выявление признаков, существенных для характеристики определенных объектов, в нашем случае — относительно больших по масштабам касситерит-сульфидных месторождений. Получаются информационные веса признаков — мера, определяющая степень характерности каждого признака для этих месторождений. Следует отметить, что подобное исследование таблиц — чрезвычайно трудоемкая задача даже для ЭВМ.

Характерными для касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского рудного пояса оказались тридцать семь признаков, показанных в таблице. Среди них нет ни одного такого, который бы не мог установить геолог средней квалификации на стадии предварительного геологического изучения месторождения (детальной геологической съемки и поисков, или предварительной разведки). Привлечение в качестве эталонов хорошо изученных объектов необходимо для гарантии того, что ни один из признаков не пропущен, а не из-за использования признаков, выявление которых возможно только при детальной разведке или эксплуатации.

6. На основании информационных весов признаков подсчитываем затем информационные веса строк таблицы, т. е. получаем суммы информационных весов признаков, присущих каждому объекту-эталону (касситерит-сульфидному месторождению).

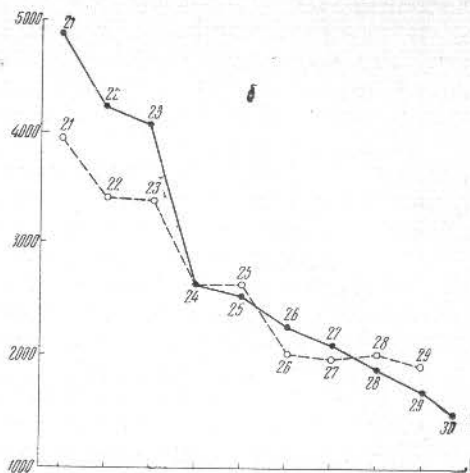
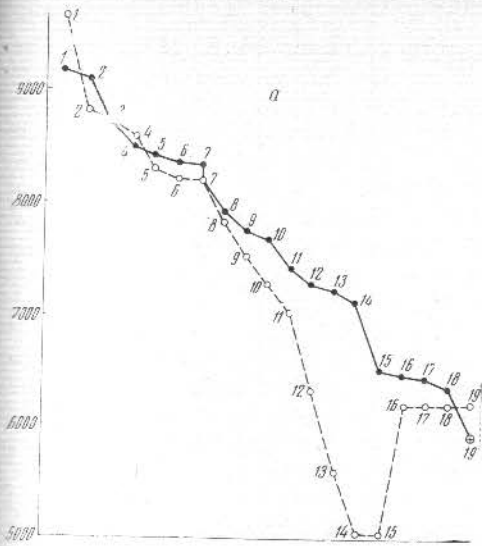
В результате всех этих операций удается выявить систему признаков, особенно характерных для взятых в качестве эталонов месторождений. Сумма информационных весов этих признаков оказывается в прямом соответствии с относительными масштабами месторождений. В достаточно отчетливой форме это соответствие установлено и в нашем случае для касситерит-сульфидных месторождений (фиг. а).

Полученные по 10 крупным эталонным месторождениям Тихоокеанского рудного пояса информационные веса признаков в сумме дали информационные веса месторождений, отвечающие относительным масштабам последних с высокой степенью точности. Такое же соответствие было получено и на выбранных для проверки метода пятнадцати относительно меньших по масштабам объектов (нижняя часть кривых на фиг. а).

Интересно, что при этой проверке наибольшие отклонения информационных весов от масштабов получились для месторождений 13—16, разведка и эксплуатация которых велась во время войны и в первые послевоенные годы, когда внимание обращалось главным образом на руды с высоким содержанием. Можно предполагать, что поэтому размеры месторождений были оценены не вполне точно.

Таким образом, данные о характерности различных геологических признаков для наиболее интересных касситерит-сульфидных месторождений могут быть уже сейчас использованы как для предварительной оценки отдельных относящихся к этой группе месторождений, так и для





Соотношения между информационными весами и относительными масштабами для касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского рудного пояса (а) и Приморья (б). По вертикали отложены информационные веса месторождений (черные кружки) и их относительные масштабы в условных единицах (светлые кружки). Номера месторождений (1—30) в порядке убывания их информационных весов

выбора правильного направления исследований на мало изученных объектах. Становится ясным, на какие признаки надо обратить особое внимание при исследовании касситерит-сульфидных месторождений, в результате труд геологов-поисковиков может стать значительно более эффективным.

Несколько замечаний по существу полученных данных о геологических факторах, влияющих на образование крупных касситерит-сульфидных месторождений.

Интересно по суммам информационных весов отдельных признаков сравнить характерность для отдельных крупных касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского рудного пояса различных групп геологических факторов.

На первом месте здесь оказываются факторы магматического контроля (1584), на втором (1249) морфология рудных тел, на третьем — локальные рудовмещающие структуры и окolorудные изменения (1110 и 1135), на четвертом — вмещающие породы (956), на пятом — региональные геологические структуры (811), на шестом — прочие факторы (800) — зональность оруденения, наличие оруденения иных типов в пределах рудного поля и т. п.

Среди факторов магматического контроля наибольшее влияние оказывают кислые субвулканические тела типа некков, непосредственно вмещающих оруденение или тесно с ним пространственно ассоциирующих. Этот вывод как будто находится в согласии с установленным в последнее время фактом повышенной рудоносности некоторых субвулканических комплексов.

Из других факторов этой группы бросается в глаза значительная роль ассоциированных с оруденением даек порфириров и кварцевых порфириров. Это обстоятельство также неоднократно ранее отмечалось многими геологами.

Среди особенностей залегания рудных тел неожиданно большое значение для крупных касситерит-сульфидных месторождений приобретают углы падения рудных тел. Наиболее характерными для установления различия между месторождениями являются углы падения от 50 до 90°. Этот факт, по-видимому, требует специального исследования с позиций

структурной геологии, а также динамики и физико-химических особенностей подземных гидротерм.

В качестве наиболее существенных локальных рудовмещающих структур выявились трещины односистемного скола и зоны рассланцевания, трещины двухсистемного скола, а из пликативных форм — линейные складки, ядра и шарширы антиклиналей.

Из околорудных изменений наибольшее значение принадлежит серицитизации, следом за ней, совершенно для нас неожиданно — грейзенизации, и лишь затем окварцеванию, сопровождающемуся в большинстве случаев турмалинизацией и хлоритизацией.

Роль грейзенизации, по-видимому, свидетельствует о значительном периоде развития гидротермальных процессов. При этом имело место образование минерализации иного типа, чем касситерит-сульфидная. На подобного рода наложение минерализации различного типа, ведущее в конечном счете к образованию месторождений сложных рудных формаций, нередко отличающихся значительными масштабами, указывалось ранее (Константинов, 1965).

При анализе руды вмещающих пород некоторые выводы оказались неожиданными. Здесь, как и предполагалось, характерными явились песчаники, углисто-глинистые сланцы, и толщи, где эти породы переслаиваются между собой. Но установленная большая различающая роль в этих толщах прослоев конгломератов и граувакк может быть в настоящее время объяснена лишь гипотетически. Вероятно, в связи с их значительной пористостью они могли вызывать в одних случаях разгрузку гидротермальных растворов, а в других — способствовать циркуляции этих растворов по направлению к рудовмещающим трещинам. В этой связи возникает вопрос: а не могут ли сами пласты конгломератов и граувакк содержать концентрации олова, достаточные для промышленного извлечения. Насколько нам известно, специально этот вопрос никем не исследовался, но на одном из оловорудных месторождений Омсукчанского рудного района Магаданской области известен пласт конгломератов мощностью свыше 20 м со значительным содержанием олова.

Региональные геологические структуры, занимающие по своему значению пятое место, определяют, по-видимому, масштабы рудных районов и узлов, и лишь в меньшей мере — отдельных касситерит-сульфидных месторождений. Наибольшее значение, оказалось, имеют здесь пересечения скрытых разломов фундамента.

Представляло интерес сравнить данные, полученные для касситерит-сульфидных месторождений Тихоокеанского пояса с характеристиками признаков месторождений одной, входящей в этот пояс металлогенической провинции. С этой точки зрения были рассмотрены девять касситерит-сульфидных месторождений Приморья.

Полученные в результате последующей математической обработки информационные веса признаков этих месторождений приведены в таблице. Как и для месторождений Тихоокеанского пояса, критерием правильного выбора системы признаков является соответствие информационных весов месторождений и их масштабов. То, что признаки, учтенные для Приморских месторождений, в значительной мере отражают геологические факторы, влияющие на рудообразование, подтверждается хорошим совпадением кривой информационных весов месторождений и кривой, отражающей их относительные масштабы (фиг. б).

Как и в первом случае, вероятно, можно было выбрать несколько иную систему признаков, и возможно она дала бы после соответствующей обработки еще более точные соотношения с масштабами оруденения, но, очевидно, это дело будущих исследований.

Сравнивая информационные веса признаков, полученные для касситерит-сульфидных месторождений Приморья и всего Тихоокеанского

рудного пояса, можно установить между ними как значительное сходство, так и некоторые различия. Так же, как и для месторождений пояса, здесь главную роль играют факторы магматического контроля (2641), но второе место принадлежит окolorудным изменениям (2073), а не морфологии рудных тел. Третье место по сумме информационных весов признаков имеют локальные рудовмещающие структуры (1883); затем особенности размещения оруденения (1531), вмещающие породы (1461): морфологические особенности рудных тел (1307) оказываются лишь на шестом месте и, наконец, идут региональные геологические факторы (1248) и стадийность минерализации (554).

Несомненно, что на изменение в порядке различных групп признаков оказала влияние не только металлогеническая специфика Приморья, но и несколько большая изученность месторождений, позволившая более полно отразить особенности окolorудных изменений и особенности размещения оруденения внутри рудных полей (прочие признаки).

Следует отметить, что полученные данные свидетельствуют об относительно малом влиянии факторов регионального геологического контроля на масштабы отдельных месторождений, но не на их распространенность. Как это и предполагалось ранее (Константинов, 1965), большое количество стадий минерализации (свыше трех) также является характерным признаком более крупных месторождений. Касаясь изменений роли отдельных признаков, отметим возросшую роль ассоциирующих с оруденением основных и средних субвулканических тел, дайковых полей кварцевых порфиров, наличия внутрирудных даек, ассоциацию с лавобрекчиями и другими эффузивными андезитами, фигурирующими как в роли сопутствующих оруденению магматических пород, так и в роли пород, вмещающих рудные тела.

Заметно усиливается в пределах отдельных рудных полей значение проявлений ртутной и свинцово-цинковой минерализации, прожилков, выполненных аксинитом, а также зональности в размещении оруденения внутри рудных полей. Среди морфологических типов рудных тел, наряду с прочими, характерными оказываются штокверки и отдельные жилы выполнения.

Большинство из перечисленных особенностей касситерит-сульфидных месторождений Приморья в той или иной степени отмечались Е. А. Радкевич (1958), а позднее и другими исследователями. Но в полной мере выявить эти признаки и дать количественную оценку их характерности удастся лишь с помощью математической обработки геологических данных.

Следует указать, что наиболее близкие к действительности результаты, полученные при проверке метода, были установлены для месторождений, имеющих весьма близкий минеральный состав. Сходство минерального состава проверялось с помощью ранее предложенных способов (Константинов, Бунич, 1967; Константинов и др., 1968), и было установлено, что попытка применить указанный метод обработки геологических данных к гидротермальным оловянным месторождениям, имеющим малые корреляции по минеральному составу и относящимся к разным рудным формациям, результатов не дает. Поэтому перед применением метода необходимо предварительно убедиться в том, что руды выбранных для исследования объектов достаточно близки по своему минеральному составу.

### Выводы

1. Применение дискретного анализа позволило на основании геологических данных о немногих объектах-эталонах получить количественную характеристику благоприятности геологических признаков для образования оловорудных месторождений касситерит-сульфидной формации. Эти результаты могут быть использованы при предварительной



оценке месторождений, находящихся в начальной стадии геологического изучения.

2. Установлено, что кривая информационных весов месторождений находится в значительном соответствии с кривой, отражающей относительные масштабы этих месторождений. Кроме того, установлена роль различных геологических признаков месторождений и дана ее количественная оценка. Наибольшая связь масштабов касситерит-сульфидной минерализации устанавливается с ассоциированными магматическими проявлениями. Для месторождений всего Тихоокеанского пояса большое значение имеет появление в пределах рудных полей кислых субвулканических тел, а для Приморья, кроме того, и наличие основных и средних субвулканических тел, дайковых полей кварцевых порфиров.

Несколько уступают по своему значению для масштабов оруденения признаки, характеризующие морфологию рудных тел, локальные рудовмещающие структуры и околорудные изменения.

В качестве наиболее значительных локальных рудовмещающих структур наметились трещины односистемного и двухсистемного скола, зоны рассланцевания, линейные складки, ядра и шарниры антиклиналей. Из околорудных изменений — серицитизация и грейзенизация.

3. Особенностью примененного метода является не только возможность дать количественное определение роли качественных геологических признаков при рудообразовании, но и поставить перед геологами вопросы для дальнейшего исследования. В рассмотренных касситерит-сульфидных месторождениях такого исследования заслуживает влияние на рудообразование прослоев конгломератов в толщах песчано-сланцевых пород, роль углов падения рудных тел и т. д.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Дмитриев А. Н., Журавлев Ю. И., Кренделев Ф. Л. Об одном принципе классификации и прогноза геологических объектов и явлений. Геол. и геофизика, № 5, 1968.
- Константинов Р. М. Изучение эндогенных рудных месторождений различных рудных формаций при крупномасштабных металлогенических исследованиях. В кн. Изучение закономерностей размещения минерализации при металлогенических исследованиях рудных районов. «Недра», 1965.
- Константинов Р. М. О применении перфокарт при изучении эндогенных рудных месторождений. Геол. рудн. месторожд., № 2, 1966.
- Константинов Р. М., Бунич А. Л. Простые методы подсчета корреляций минерального состава рудных месторождений. Изв. АН СССР. Сер. геол., № 7, 1967.
- Константинов Р. М., Джабар-Заде Р. М., Сиротинская С. В. О применении электронно-вычислительных машин для классификации рудных месторождений по минеральному составу. Изв. АН СССР. Сер. геол., № 9, 1968.
- Радкевич Е. А. Металлогения Южного Приморья. Тр. ИГЕМ АН СССР, в. 19, 1958.

Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии  
и геохимии АН СССР  
Москва

Поступила  
31.1.1969