Записки Ленинградского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. LXI, вып. 2, 1971 г.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ СХОДСТВА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

И. Г Клушин, Л. А. Ривош

Оценка степени сходства или различия геологических структур всегда интересовала исследователей, так как из нее вытекают практические следствия: вопросы генезиса структур и прогнозы распределения месторождений полезных ископаемых в значительной мере решаются с учетом возможных аналогий. Сложность этой оценки усугубляется тем, что объекты природы, в отличие от продуктов технологической деятельности человека, в отдельных чертах обязательно неповторимы. Даже в наиболее простых случаях можно заранее ожидать некоторое различие рядом расположенных структур, имеющих одинаковое происхождение. Значительную трудность представляет отбор тех показателей (признаков), по которым оценивается степень близости сопоставляемых геологических структур. Подчеркнутый интерес к отдельным аспектам (генезис, рудоносность, метаморфизм и т. п.) может проявляться в том, что одни признаки в сравнении с другими субъективно получат большее значение, тогда как некоторые будут совсем выпущены из анализа.

Сопоставление структур на основе большой совокупности признаков, которые оцениваются одинаково, также представляется не вполне оправданным упрощением, поскольку в силу причинных и ассоциативных связей учитываемых признаков они имеют разное значение.

В настоящей статье сделана попытка решить сформулированную задачу в общем виде. Решение иллюстрируется примером сопоставления пяти крупных структурных зон: Печенгской, Имандра-Варзугской и Шомбозерской в восточной части Балтийского кристаллического щита, зоны Кивино в центральной части Северо-Американской платформы и структурной зоны Оуэн-Велли в складчатой области Бассейнов и Хребтов на западе Северо-Американского континента.

Печенгская структурная зона (рис. 1, *а*) располагается в северо-западной части Кольского полуострова и представляет собой односторонний синклинорий, выполненный среднепротерозойскими осадочно-эффузивными образованиями общей мощностью приблизительно 7 *км* [1, 2, 3]. В юго-западной части структура ограничена крупным разломом. В толще пород, выполняющих структуру, доминируют эффузивные образования, чередующиеся с прослоями осадочных и метаморфических пород. Интрузивные образования представлены основными и ультраосновными породами. С последними связаны крупные месторождения сульфидных медно-никелевых руд.

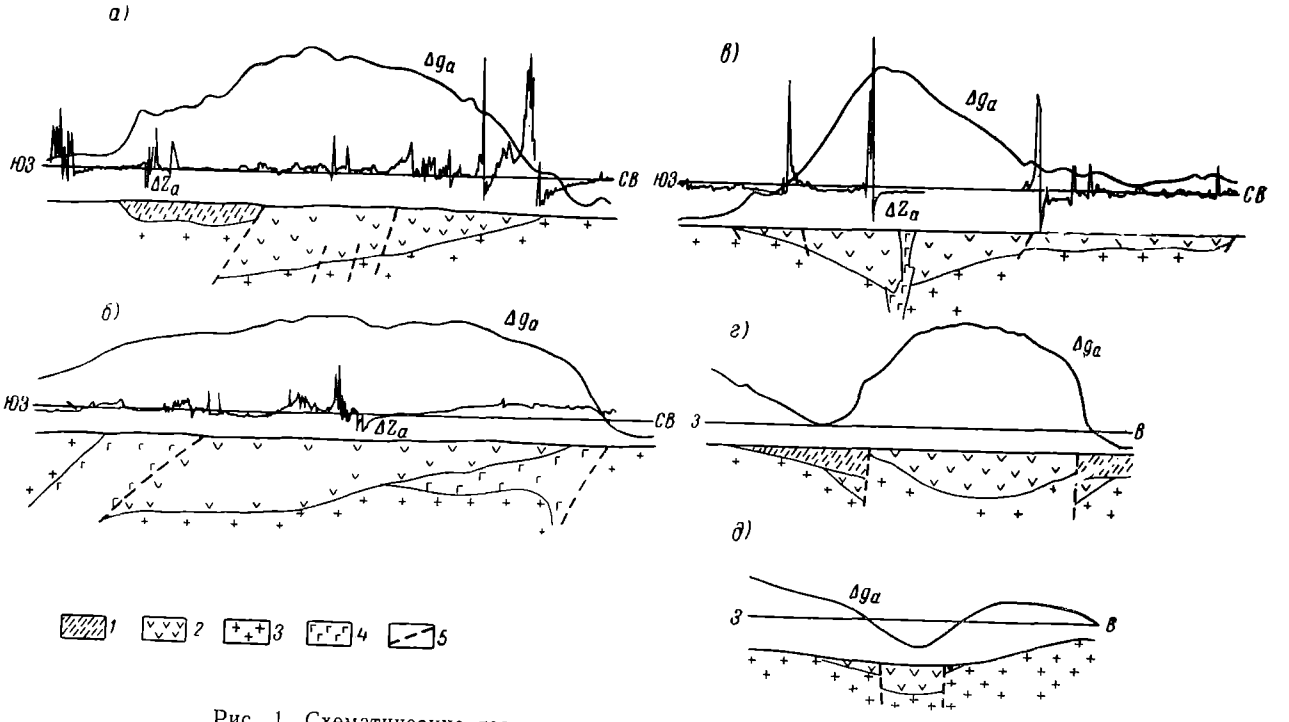


Рис. 1 Схематические геологические разрезы через структурные зоны:

а — Печенгскую (по Цирульниковой, Шустовой, Поротовой, 1966); *б* — Имандра-Варзугскую (по Поротовой, Цирульниковой, 1966); *в* — Шомбозерскую (по Левину, Суханову, 1965); *г* — Кивино (по Креддоку и др., 1963); *д* Оуэн-Велли (по Пакисеру и др., 1964);

— метаморфич ие породы; *2* — осадочно-эффузивные образования; кристаллические породы гранито-
4 — интрузивные породы основного состава; ны тектонических нарушений

Имандра-Варзугская структурная зона (рис. 1, *б*) находится в центральной части Кольского полуострова и также представляет собой крупный односторонний синклинорий, в краевых частях которого располагаются тектонические нарушения [2, 3, 4, 5]. Мощность отложений, выполняющих синклинорий, приблизительно 11 *км*. По составу и возрасту они аналогичны отложениям в Печенгской структурной зоне. Среди интрузивных пород преобладают основные разности, образующие местами довольно крупные тела. В целом для структуры характерны повышенные концентрации никеля, меди и ряда других элементов, однако значительные месторождения этих металлов неизвестны.

Шомбозерская структурная зона (рис. 1, *в*) размещается в центральной части Карело-Кольского региона. Ее главный элемент — асимметричный синклинорий, выполненный эффузивно-осадочными породами среднего протерозоя общей мощностью приблизительно 5 *км* [3]. Вдоль восточного и западного его бортов расположены крупные разрывы. Среди массивов изверженных пород преобладают тела основного состава, с которыми генетически связана повышенная меденосность и никеленосность структуры в целом.

Структурная зона Кивино (рис. 1, *г*) протягивается от о. Верхнего в юго-западном направлении, пересекая Мидконтинент, и заканчивается на широте Канзаса. В пределах зоны выделяются три кулисообразно расположенных относительно изолированных блока. Центральный имеет наибольшие размеры и выражен особенно ярко. Он и принят для дальнейшего анализа и сопоставления. По геологическим и геофизическим данным структурная зона Кивино является крупным почти симметричным грабеном, который выполнен мощной (10—12 *км*) толщей древних осадочных и эффузивных пород [26, 27, 30]. В строении палеозойского платформенного чехла грабен проявляется слабо. Крупные массивы изверженных пород основного состава достоверно установлены лишь в северной, обнаженной части зоны.

Структурная зона Оуэн-Велли (рис. 1, *д*) располагается в пределах молодой складчатой области, на восточном фланге хребта Сьерра-Невада. Она представляет собой узкий симметричный грабен, простирающийся в северо-северо-восточном направлении почти на 200 *км* [6, 29]. Грабен выполнен кайнозойскими осадочно-вулканогенными образованиями, среди которых эффузивы имеют подчиненное значение. Мощность кайнозойских пород составляет 2,5 *км*. С интрузивными породами гранитоидного состава генетически связаны крупные месторождения вольфрамовых руд.

Для объективного сопоставления структур принято 30 признаков, которые в совокупности характеризуют их наиболее полно и разносторонне (таблица). По своему содержанию признаки подразделяются на пять крупных групп.

Группа общегеологических признаков (восемь) учитывает тип структуры, состав и возраст слагающих ее пород, интенсивность регионального метаморфизма, наличие маркирующих горизонтов, характер контактов структуры с вмещающими породами, рельеф дневной поверхности, а также возраст вмещающих пород.

Геометрические признаки (шесть) учитывают длину, ширину и мощность структуры, направление ее простирания, а также такие параметры глубинного строения земной коры, как среднее значение глубины залегания границ Конрада и Мохоровичича.

Группа магматических признаков (шесть) предусматривает сопоставление структур по распространенности * в их пределах эффузивных и ин-

* Распространенность определяется для интрузивных тел как отношение площади выходов изверженных пород к общей площади структуры и для эффузивных образований как отношение вертикальной мощности этих пород к общей мощности всей толщи.

Признаки структурных зон

Характеристика признака *	Структурная зона				
	Печенгская	Имандра-Варзугская	Шомбозерская	Кивино	Оуэн-Велли
Тип структуры	Односторонний синклинорий (0,70)	Односторонний синклинорий (0,70)	Асимметричный синклинорий (0,85)	Симметричный синклинорий (1,00)	Симметричный синклинорий (1,00)
2. Возраст пород, слагающих структуру	Средний протерозой (0,50)	Средний протерозой (0,50)	Средний протерозой (0,50)	Средний протерозой (0,50)	Кайнозой (0,01)
3. Состав пород, слагающих структуру	Осадочно-эффузивные: осадочные — 20%, эффузивные — 80% (0,80)	Осадочно-эффузивные: осадочные — 25%, эффузивные — 75% (0,75)	Осадочно-эффузивные: осадочные — 30%, эффузивные — 70% (0,70)	Осадочно-эффузивные: осадочные — 25%, эффузивные — 75% (0,75)	Осадочно-эффузивные осадочные — 70%, эффузивные —30% (0,30)
4. Интенсивность регионального метаморфизма	От зеленосланцевой до амфиболитовой фации (0,50)	От зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фации (0,35)	От зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фации (0,35)	От зеленосланцевой до эпидот-амфиболитовой фации (0,35)	Региональный метаморфизм отсутствует (0)
5. Наличие маркирующего горизонта	Вдоль всей структуры (1,0)	В центральной наиболее протяженной части структуры (0,8)	Вдоль всей структуры (1,0)	—	—
6. Контакт с вмещающими породами	Тектонический вдоль южной части структуры, стратиграфический — вдоль северной (0,7)	Тектонический (1,0)	Тектонический (1,0)	Тектонический (1,0)	Тектонический (1,0)
7. Абсолютная отметка над уровнем моря, *м*	350 (0,23)	150 (0,10)	150 (0,10)	350 (0,23)	1500 (1,00)
8. Возраст вмещающих пород	Нижний протерозой — верхний архей (0,65)	Нижний протерозой — верхний архей (0,65)	Нижний протерозой — верхний архей (0,65)	Нижний протерозой — верхний архей (0,65)	Мезозой (0,04)
9. Длина, *км*	80 (0,16)	340 (0,68)	100 (0,20)	500 (1,00)	180 (0,36)
10. Ширина, *км*	35 (0,39)	40 (0,45)	85 (0,39)	90 (1,00)	10 (0,11)
Мощность, *км*	7 (0,64)	11 (1,00)	5 (0,45)	11 (1,00)	2,5 (0,23)
12. Глубина поверхности Конрада, *км*	8 (0,44)	12 (0,66)	12 (0,66)		18 (1,00)
13. Глубина поверхности Мохоровичича, *км*	41 (0,89)	38 (0,83)	37 (0,80)	45 (0,98)	46 (1,00)
14. Направление простирания	Северо-западное — 55° (0,39)	Запад-северо — западное — 67° (0,25)	Северо-северо-западное — 30° (0,67)	Северо-восточное — 45° (0,50)	Северо-северо-западное — 14° (0,84)
15. Распространенность эффузивных пород	0,80 (0,80)	0,75 (0,75)	0,70 (0,70)	0,75 (0,75)	0,30 (0,30)
16. Количество эффузивных вулканических циклов	5 (0,83)	6 (1,00)	4 (0,67)		3 (0,50)
17. Состав эффузивных пород	Преимущественно основные (0,3)	Преимущественно основные (0,3)	Преимущественно-основные (0,3)	Преимущественно основные (0,3)	Основные — 50%, средние — 50% (0,5)
18. Распространенность интрузивных пород	0,02 (0,02)	0,05 (0,05)	0,03 (0,03)	0,03 (0,03)	0,01 (0,01
19. Форма интрузий	Согласные тела (0)	Согласные тела (0)	Согласные тела (0)	Частично согласные тела (0,5)	
20. Состав интрузивных пород	Основные — 40%, ультраосновные — 60% (0,12)	Основные — 90%, ультраосновные 10% (0,27)	Основные—30%, ультраосновные 20% (0,14)	Основные (0,30)	Кислые (1,0)
21. Группа металлов	Цветные (0,25)	Цветные (0,25)	Цветные (0,25)	Цветные (0,25)	Редкие (0,75)

* В скобках указана нормированная характеристика.

Продолжение

Характеристика признака *	Структурная зона				
	Печенгск	Имандра-Варзугская	Шомбозерск	Кивино	Оуэн-Велли
22. Размер рудных месторождений		Промышленные месторождения отсутствуют (0)	Промышленные месторождения отсутствуют (0)	Средние (0,6)	Крупны (1,0)
23. Тип рудных месторождений	Эндогенный (1,0)	Не учтен	Не учтен	Эндогенный (1,0)	Эндогенный (1,0)
24. Группа металлических руд	Руды присутствуют (1,0)	Руды присутствуют (1,0)	Руды присутствуют (1,0)	Руды присутствуют (1,0)	Руды присутствуют (1,0)
25. Группа неметаллических руд	Руды отсутствуют (0)	Руды отсутствуют (0)	Руды отсутствуют (0)	Руды отсутствуют (0)	Руды отсутствуют (0)
26. Среднее значение плотности пород, слагающих структуру, *г/см³*	2,97 (1,00)	2,88 (0,98)	2,85 (0,96)	2,90 (0,98)	2,30 (0,7
27. Среднее значение избыточной плотности, *г/см³*	0,25 (0,93)	0,18 (0,83)	0,17 (9,82)	0,30 (1,00)	—0,40 (0)
28. Среднее значение максимума гравитационной аномалии, *мгл* **	42 (0,54)	60 (0,67)		110 (1,00)	—40 (0)
29. Среднее значение максимума магнитной аномалии	Близкое к нулю (0)	Близкое к нулю (0)	Близкое к нулю (0)	Близкое к нулю (0)	Близкое к нулю (0)
30. Распространенность локальных магнитных аномалий	0,10 (0,10)		0,22 (0,22)		

* В скобках указана нормированная характеристика.
Указана интенсивность остаточных (локальных) аномалий.

трузивных пород, составу изверженных пород (отдельно эффузивных и интрузивных), по числу вулканических циклов и форме интрузивных тел.

Признаки, определяющие металлогению структурных зон (пять), включают группу металлов, размер и тип месторождений и типы руд.

Геофизические признаки (пять) образуют самостоятельную группу и учитывают различие структур по среднему значению плотности слагающих пород, среднему значению избыточной плотности, средним значениям максимума гравитационной и магнитной аномалии, а также по распространенности в пределах структуры локальных магнитных аномалий.

В общем случае группы анализируемых признаков могут быть расширены, например, за счет более подробного учета разрывных нарушений, петрохимической и петрофизической характеристики и т. п. Однако в статье использованы конкретные сведения о пяти сопоставляемых структурных зонах, поэтому авторы ограничились приведенным набором признаков.

Принятые для сопоставления признаки, строго говоря, не могут рассматриваться как независимые и равноценные, поскольку существуют связи как внутри групп, так и между группами. Чтобы учесть неодинаковое значение разных признаков, целесообразно хотя бы приближенно определить эти связи.

Силу связи переменных величин принято характеризовать коэффициентом корреляции, который по своему абсолютному значению изменяется

от 0 до 1. По существу, взаимозависимость двух сопоставляемых величин определяется не каким-либо одним значением, а распределением возможных значений коэффициента корреляции в некотором интервале [7], ширина которого определяется надежностью и полнотой исходных данных.

Эмпирическое определение матрицы коэффициентов корреляции совокупности признаков в настоящее время невозможно и представляется делом отдаленного будущего. Поэтому силу и надежность взаимной связи отдельных признаков целесообразно оценить иначе, исходя из хорошо известных геологических закономерностей и фактов [8, 9, 10, 11, 12, 13].

В настоящей статье условно принято, что сильные и очевидные взаимные связи характеризуются коэффициентом 1, менее достоверные и значительные связи — 1/2; слабые и сомнительные — коэффициентом, равным нулю. Взаимные связи между различными признаками по своему характеру могут быть либо причинно-следственными, либо ассоциативными. Как правило, характер связи не вызывает сомнения, хотя в некоторых случаях может быть предметом дискуссии. Наличие связей приводит к тому, что значение различных признаков при сопоставлении структур становится неодинаковым, т. е. признаки приобретают разный «вес». В зависимости от характера связей способы определения веса признаков, очевидно, должны быть различны.

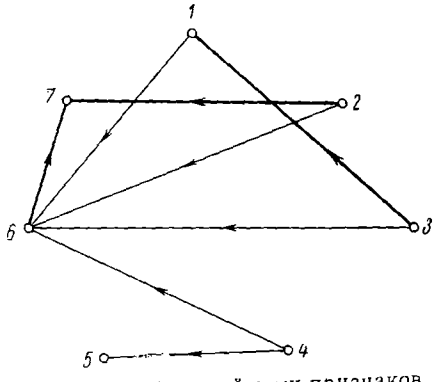


Рис. 2. Граф связей семи признаков

В случае, когда между признаками существуют причинно-следственные связи, наглядное представление о взаимосвязи этих признаков и возможном перераспределении их веса можно получить с помощью матричного и графического представления [14]. Однако граф, показывающий взаимные связи всех признаков, представляет собой громоздкий и неудобный для демонстрации чертеж, так как общее число связей для принятого числа признаков очень велико (870). Число только значимых причинных связей составляет 33. Поэтому целесообразно рассмотреть упрощенный пример с небольшим числом признаков и связей.

Граф взаимных связей семи признаков (рис. 2) включает: *1* — состав пород, слагающих структуру; *2* — мощность; *3* — распространенность интрузивных пород; *4* — состав интрузивных пород; *5* — группу металлов; *6* — среднюю плотность пород, слагающих структуру; *7* — среднее значение максимума гравитационной аномалии.

Состав пород, участвующих в строении структуры, очень зависит от распространенности интрузивных пород и, в свою очередь, влияет на среднее значение плотности пород, слагающих структуру. Мощность пород определяет величину гравитационной аномалии; от нее в некоторой степени зависит средняя плотность пород, слагающих структуру. Распространенность интрузивных пород влияет не только на состав пород, слагающих структуру, но и на среднее значение их плотности. От состава интрузивных пород зависят группа металлов и средняя плотность пород, слагающих структуру. Средняя плотность зависит от 4 из 7 признаков (общий состав пород и их мощность, состав и распространенность интрузивных образований) и воздействует только на величину гравитационной аномалии. Среднее значение максимума гравитационной силы зависит от мощности и средней плотности пород; на другие же признаки причинно не влияет.

Таким образом, можно указать некоторую последовательность признаков по степени доминирования. Первое место занимает такой признак, который определяет другие, но сам ни от одного из них не зависит. Последнее место принадлежит признаку, который зависит от многих, но никакие другие не определяет. Промежуточное положение занимают признаки, которые одновременно зависят от одних и влияют на другие.

Следуя А. Кофману и Г Дебазею [15], будем называть в зависимости от направления причинной связи признаки влияющие *предками*, а зависящие— *потомками*. В большинстве случаев каждый признак является и потомком и предком, но по отношению к разным признакам. Направление причинной связи на графе (рис. 2) показано стрелками, сила связи отражена толщиной линий, связи с коэффициентом 1/2 показаны тонкими линиями, с коэффициентом 1 — толстыми.

Переход к подсчету весов полезно начать с простых рассуждений. Положим, что имеется всего два признака, один из которых полностью зависит от второго. Вес каждого до учета связи принят равным 1. Очевидно, что с учетом связи следует признаку-потомку придать нулевой вес, а признаку-предку двойной.

Сохраняя число признаков 2, но изменяя коэффициент их связи с 1 на 1/2, получим после учета связи вес первого признака 1/2 и второго 3/2.

Если имеется m признаков-потомков и лишь один признак-предок, вес последнего после учета связей (при коэффициенте 1/2) равен $1 + \frac{m}{2}$ вес каждого признака-потомка 1/2. Противоположный случай (m признаков-предков и один признак-потомок) приводит к весу $1 + \frac{1}{2m}$ у предка и 1/2 у потомка. При большом числе признаков, в равной степени зависящих друг от друга, учет связей не изменяет исходный вес. Равным образом не изменяют первоначальный вес признаков связи, образующие замкнутое кольцо (при одинаковых коэффициентах). Связи, по которым к признаку «приходит» дополнительный вес, будем называть приходящими; связи, по которым признак «отдает» свой вес — уходящими.

Матрица признаков и их связей

Признаки-предки	Признаки-потомки 2	3	4	5	6	7	Число приходящих связей
1					1/2		1
2					1/2		2
3					1/2		2
4				1/2	1/2		2
5							0
6							1
7							0
Число уходящих связей	1	0	0	0	4	2	Итого 8

Расчеты изменения Δp_{ji} веса p j-го признака-предка за счет i-го признака-потомка выполнены по следующей формуле:

при коэффициенте связи 1/2

$$\Delta p_{ji} = \frac{1}{2m}, \qquad (1)$$

Матрица расчета изменения веса признака-предка за счет признака-потомка

Признаки-предки	Признаки-потомки							Исходный вес	Прирост в	Уменьшение веса	Общее изменени веса	Вес после учета причинных связей]
		2			5							
						1/8			0,2	—1,0	—0,8	0,2
2						/8	/2		0,6		0,6	1,6
3						1/8						2,1
4					1/2	1/8			0,6		0,6	,6
5				—1/2						—0,5	—0,5	0,.
6	—1/8	—1/8	—1/8	—1/8			1/2		0,5	—0,5	0,0	1,0
7		—1/2				—1/2				—1,0	—1,0	0,0
								Σ = 7	Σ = 3	Σ = 3		Σ = 7

при коэффициенте связи 1

$$\Delta p_{ji} = \frac{1}{m},$$

где m — число признаков-предков у i-го признака-потомка (т. е. общее число уходящих связей).

Чтобы определить, насколько существенно сказываются на оценке веса признаков ошибки в определении силы и надежности их взаимной связи, были рассчитаны веса для основного варианта причинных связей и следующих дополнительных вариантов: а) слабые связи (с коэффициентом 1/2) исключены, сильные (с коэффициентом 1) сохранены; б) слабые связи исключены, сильные заменены слабыми; в) все связи приняты слабыми; г) все связи приняты сильными.

Эти подсчеты, проведенные на примере всей совокупности 30 признаков, показали, что различные вариации в оценке величины связи приводят к изменению веса признака преимущественно в пределах ± 20 — 30%. Поэтому оценка веса признаков может быть практически устойчивой.

Из 870 возможных связей в матрице сохранено лишь 33. Это ограничение вызвано прежде всего тем, что при наличии большого числа разноориентированных слабых связей их суммарное влияние на вес признака несущественно. Отсутствие сколько-нибудь значительной связи во многих случаях очевидно, например, между составом интрузивных пород и направлением простирания структуры. В некоторых случаях целесообразно пренебречь менее слабой, но недостаточно очевидной связью, например, между рельефом местности и распространенностью интрузивных пород.

Матрица причинно-следственных связей между признаками

Признаки-предки	Признаки-потомки: 4	19	21	23	24	25	26	27	28	29	30	Число приходящих связей
1		/2										
2	/2											
3					/2	1/2	1/2					3
4							1/2					1
10									1/2			1
11							/2		1			2
12									1/2			1
13									1/2			1
14										1/2		1
15	1/2						1/2			1/2	/2	4
17							1/2			1/2		2
18	1/2 1/2						1/2			1/2	1/2	5
20		1/2	1/2				1/2			1/2		4
24				/2								1
25				/2								1
26												1
27												
Число уходящих связей	2 2	2	2	2								Итого 33

* Для уменьшения размеров в нее не включены признаки, которые не имеют приходящих или уходящих связей. Нумерация признаков и последовательность их в группах та же, что в таблице.

К умеренным по силе и надежности связям принадлежат такие, как связь формы интрузий и их состава [8], плотности пород, слагающих структуру, с интенсивностью регионального метаморфизма и другие. Таких связей большинство (30 из 33). К сильным связям относятся такие очевидные, как зависимость величины гравитационной аномалии от избыточной плотности и мощности пород, слагающих структуру.

В матрице признаки с 1-го по 8-й входят в группу общегеологических; с 9-го по 14-й — геометрических; с 15-го по 20-й — магматических; с 21-го по 25-й — металлогенических и с 26-го по 30-й — геофизических.

Группы признаков характеризуются небольшим числом внутренних причинных связей (по две в общегеологической, металлогенической и геофизической и одна в магматической). Число внешних причинных связей варьируется в значительно больших пределах: общегеологическая группа имеет 4 связи с магматической, 3 с металлогенической и 2 с геофизической; геометрическая — 6 связей с геофизической; магматическая — 4 связи с общегеологической, 1 с металлогенической и 10 с геофизической; металлогеническая — 3 связи с общегеологической группой и 1 — с магматической; геофизическая — 2 связи с общегеологической, 6 с геометрической и 10 с магматической (признаки этой группы в наибольшей степени зависят от других определяющих признаков).

В тех случаях, когда связи между признаками характеризуются как ассоциативные, описанный выше способ определения веса признаков применить нельзя, так как направление связи неопределенно. Однако обычно известно, сопровождается ли возрастание значений одного признака уве-

личением или уменьшением значений других, этим и определяется знак ассоциативной связи.

Матрица ассоциативных связей

	7	12	13	
12	—1/2			
13	—1/2	1/2		
15	1/2	—1/2	—1/2	
18	—1/2	1/2	1/2	—1/2

Имея матрицу связей в виде совокупности положительных и отрицательных коэффициентов корреляции между признаками, можно перейти от системы взаимно коррелированных признаков к новой системе признаков, которые взаимно некоррелированы. Существует несколько способов такого перехода, их обоснование дается в работах по компонентному и факторному анализу [16, 17]. Наибольший интерес представляют приемы факторного анализа, однако из-за специфики они мало известны неспециалистам в области математической статистики. Поэтому в работе использовался более традиционный метод главных компонент. Результаты, полученные по этому методу (в той его форме, которая описана в монографии В. С. Пугачева [17]), в некоторой степени зависят от первоначального расположения признаков. Было определено несколько вариантов перераспределения веса. В итоге после осреднения по нескольким вариантам приняты следующие приращения весов для ассоциативно связанных признаков:

Номер признака	1	12	13	15	18
Приращение веса	0	0,2 —0,4	—0,1	—0,2	—0,5

После учета причинных и ассоциативных связей (43) первоначально одинаковые (единичные) веса признаков перераспределялись следующим образом:

Номер и признака	
Общегеологическая группа	
1. Тип структуры	1,3
2. Возраст пород, слагающих структуру	2,0
3. Состав пород, слагающих структуру .	1,1
4. Интенсивность регионального метаморфизма	0,6
5. Наличие маркирующего горизонта	1,0
6. Контакт с вмещающими породами	1,0
7. Рельеф дневной поверхности	0,7
8. Возраст вмещающих пород	1,0
	$\Sigma = 8{,}7$
Геометрическая группа	
9. Длина	1,0
10. Ширина	1,1
11. Мощность .	1,3
12. Глубина до поверхности Конрада	0,7
13. » » Мохоровичича	1,0
14. Направление простирания	1,1
	Σ 6,2
Магматическая группа	
15. Распространенность эффузивных пород .	1,7
16. Количество эффузивных (вулканических) циклов	1,0

17. Состав эффузивных пород	1,2
18. Распространенность интрузивных пород	2,4
19. Форма интрузий	0,5
20. Состав интрузивных пород	
	8,5

Металлогеническая группа

21. Группа металлов	0,5
22. Размер рудных месторождений	1,0
23. Тип рудных месторождений	0,5
24. Группа металлических руд	0,8
25. Группа неметаллических руд	0,8
	$\Sigma = 3,6$

Геофизическая группа

26. Среднее значение плотности пород, слагающих структуру	1,5
27 Среднее значение избыточной плотности	0,2
28. Среднее значение максимума гравитационной аномалии	0,3
29. Среднее значение максимума магнитной аномалии	0,5
30. Распространенность локальных магнитных аномалий	0,5
	$\Sigma = 3,0$

Отсюда видно, что *после учета всех связей наибольший вес приобрели признаки, характеризующие распространенность и состав магматических пород, возраст и мощность пород, слагающих структуру, и тип структуры, т. е. главные признаки, определяющие магматизм, стратиграфию и тектонику сравниваемых областей.*

Уменьшение значимости геофизических признаков логически вытекает из того, что признаки этой группы связаны наибольшим числом (18) уходящих связей с признаками других групп. В то же время приходящие связи признаков полностью замыкаются внутри самой группы. Геофизические признаки легко измеримы, их количественная характеристика вполне объективна, поэтому они имеют весьма важное значение при изучении главных геологических особенностей любых структурных зон. Однако после того, как геофизические данные получили геологическое истолкование и передали свое содержание геологическим характеристикам, самостоятельное значение геофизических признаков невелико.

Количественное сопоставление структур по совокупности разнородных показателей невозможно провести, если пользоваться обычной характеристикой признаков. Диапазоны изменения разных признаков очень отличаются, некоторые признаки имеют количественное выражение, тогда как другие определены только качественно соответствующими геологическими терминами. Вследствие этого необходимо унифицировать все признаки на интервале от 0 до 1 для последующей их количественной характеристики.

Легко измеримые геофизические, геометрические, петрохимические и некоторые другие признаки могут быть нормированы обычным способом: значение признака, максимальное для данного множества структур, принимается равным 1, а значение этого признака остальных структур получается делением на максимальное значение.

Примером такого нормирования является шкала для признаков «состав эффузивных пород» и «состав интрузивных пород» [18]:

Значение признака	Типы пород	Содержание SiO_2,
0	Ультраосновные	40
0,3	Основные	50
0,5	Щелочные	55
0,7	Средние	60
1	Кислые	70

Такой способ нормировки пригоден для всех признаков, имеющих физическую размерность (*км*, *г/см*^{3} и т. п.) и положительное значение (ширина структуры, скорость распространения упругих колебаний и т. п.). В тех случаях, когда признаки имеют физическую размерность, но диапазон их изменения включает и отрицательные значения, нормирование производится иначе: максимальное (положительное) значение принимается за 1, минимальное (отрицательное) значение сопоставляется с 0. Для оценки промежуточных значений используется интерполяция.*

Признаки, обычная характеристика которых сразу выражена в относительных единицах (распространенность изверженных пород, локальных геофизических аномалий и т. п.), не нуждаются в дополнительной нормировке.

Сложнее выразить количественно большинство общегеологических, магматических и металлогенических признаков. Однако принятая в геологии довольно четкая упорядоченность качественных определений признаков позволяет и в этом случае перейти к нормированной их характеристике на интервале от 0 до 1. Для этого общий диапазон изменения данного признака, равный 1, подразделяется на примерно равные отрезки, число которых зависит от числа качественных градаций. При таком подходе к нормированию получили следующие шкалы для количественного выражения качественных показателей:

Нормированное значение	Обычная характеристика приз
	Тип структуры
0	Симметричный антиклинорий
0,15	Асимметричный
0,30	Односторонний
0,50	Моноклиналь
0,70	Односторонний синклинорий
0,85	Асимметричный »
1	Симметричный »
	Состав пород, слагающих структуру
0	Осадочные
1	Магматические
	Интенсивность регионального метаморфизма [11]
0	Метаморфизм отсутствует
0,20	Зеленосланцевая фация
0,50	Эпидот-амфиболитовая фация
0,75	Амфиболитовая фация
1	Гранулитовая фация
	Наличие маркирующего горизонта
0	Маркирующий горизонт полностью отсутствует
	Маркирующий горизонт наблюдается непрерывно вдоль всей структуры
	Контакт с вмещающими породами
0	Стратиграфический
1	Тектонический
	Направление простирания
0	Широтное
0,5	Диагональное
1	Меридиональное

* Ввиду простоты построения таких шкал они в работе не приводятся.

Форма интрузий [8]

0	Согласные
0,5	Частично согласные
1	Секущие

Группа металлов [18, 12]

0	Черные
0,25	Цветные
0,50	Благородные
0,75	Редкие
1	Радиоактивные, рассеянные и редкоземельные

Размер рудных месторождений [18]

0	Отсутствие промышленных месторождений
0,3	Мелкие
0,6	Средние
1	Крупные

Тип рудных месторождений [13]

0	Экзогенные
0,5	Метаморфогенные
1	Эндогенные

Группы металлических и неметаллических руд [18]

0	Отсутствие руд данной группы
1	Наличие руд данной группы

Несомненно, что при использовании других признаков, не учтенных в статье, или при увеличении числа градаций рассмотренных признаков может возникнуть необходимость в некотором видоизменении шкал при сохранении принятого подхода. Что касается нормировки простых количественных признаков, то при наличии данных, существенно отличающихся друг от друга точностью, может потребоваться учет величины ошибок, с которыми измерены те или иные признаки.

Признаки сопоставляемых структурных зон в обычной и нормированной характеристике сведены в таблицу. Некоторые признаки не учтены ввиду отсутствия тех объектов, которые могли бы их охарактеризовать. Структурные зоны Кивино и Оуэн-Велли охарактеризованы менее подробно, чем зоны Балтийского кристаллического щита: по структурной зоне Кивино нет сведений о 4 признаках, по зоне Оуэн-Велли о 3 признаках из 30.

Близость друг к другу сопоставляемых структур прямо зависит от того, насколько отличаются значения x_i сопоставляемых признаков ($i = 1, 2, 3, \ldots 30$) [19, 20]. По каждому отдельно взятому i-му признаку близость структуры 1 к структуре 2 определяется расстоянием $|x_{i1} - x_{i2}|$, где $0 \leqslant x_i \leqslant 1$. Принимая все признаки как равнозначные и независимые, в качестве меры близости получим расстояние

$$\Delta_{12} = \sqrt{\sum_i (x_{i1} - x_{i2})^2} \qquad (2)$$

После учета взаимных связей признаки можно считать независимыми, но нельзя считать равнозначными. С учетом неодинакового веса i-го признака получаем уточненное выражение меры близости

$$\Delta_{12} = \sqrt{\sum p_i^2 (x_{i1} - x_{i2})^2} \qquad (3)$$

Расстояние Δ_{12} желательно нормировать так, чтобы оно не зависело от числа признаков. При этом его максимальное значение, равное 1, должно соответствовать случаю предельно возможного различия, а минимальное (нулевое)—случаю полной идентичности. При таком требовании к расстоянию по мере близости получаем

$$\Delta_{12}^{1} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{30} p_i^2 (x_{i1} - x_{i2})^2}{\sum_{i=1}^{30} p_i^2} \right]^{1/} \qquad 0 \leqslant \Delta_{12} \leqslant 1. \tag{4}$$

Формула (4) подобна формуле для оценки среднеквадратичного отклонения.

Чтобы значения меры близости изменялись подобно коэффициенту корреляции, Дж. Хэрбо (1964 г.) и его последователи рекомендуют от величины Δ' перейти к величине

$$1 - \Delta_{12}, \tag{5}$$

так что полному различию сопоставляемых структур соответствует r 0, а полной идентичности $r = 1$.

При использовании формул (4) и (5) на величину r_{12} особенно существенно влияет небольшое число тех признаков, которые обладают максимальным весом и по которым сопоставляемые структуры наименее схожи. При этом малые различия основной массы признаков почти не сказываются на величине r_{12}. Небольшие, но многократно повторяющиеся различия приобретают более существенное значение, если в качестве меры близости использовать показатель соответствия, основанный на учете взвешенного нормированного расстояния,

$$r_{12} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{30} p_i \mid x_{i1} - x_{i2} \mid}{\sum_{i=1}^{30} p_i} \tag{6}$$

Дополнительным критерием степени близости структур может служить показатель тесноты связи Дональда Гуда (1964 г.). Применение его наиболее эффективно в тех случаях, когда сравниваются эмпирические и теоретически вычисленные значения. В частности, этот показатель успешно применяется для оценки качества аппроксимации геологических поверхностей геометрическими, имеющими заданное аналитическое выражение, что важно при решении проблем палеотектоники [21]. По существу, применение показателя Д. Гуда ограничено случаями, когда сопоставляемые объекты априори в какой-то мере близки друг к другу, причем один из объектов принимается за эталонный.

Формула Д. Гуда имеет вид

$$r = \left[1 - \frac{\sum_{i} (z_i - z_i')}{\sum_{i} (z_i - \bar{z})^2} \right]^{1/2} \qquad 0 \qquad \leqslant 1, \tag{7}$$

где r — показатель тесноты связи; z_i — фактические значения признаков; z_i' — теоретические значения признаков; $\bar{z}$ — среднее арифметическое фактических значений.

В приложении к оценке близости структур формула (7) несколько преобразуется

$$r_{12} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{30} p_i^2 \left(x_{i1} - x_{i2}\right)^2}{\sum_{i=1}^{30} p_i^2 \left(x_{i1} - \bar{x}_1\right)^2} \right]^{1/2} \qquad (8)$$

где x_{i1}, x_{i2} — значения признаков, соответственно, сопоставляемой и эталонной структур; $\bar{x}_1$ — среднее арифметическое нормированных значений признаков сопоставляемой структуры.

При сопоставлении двух структур r_{12}, определяемая равенством (8), в некоторой степени зависит от того, какая структура принята за эталонную особенно при большом различии между структурами.

В петрохимических, палеонтологических и других исследованиях для оценки сходства отдельных групп успешно применяется таксонометрическое расстояние или дистанционный коэффициент, а также другие меры близости [20, 22, 23, 24, 25, 28]. В приложении к рассматриваемой задаче их использование по ряду причин затруднено (малое число сопоставляемых структур и т. д.).

В заключение отметим, что, наряду с оценкой близости, основанной на учете всей совокупности признаков, может представлять интерес оценка сходства структур по какой-либо одной группе признаков (общегеологической, магматической и т. д.). Для такой оценки следует применять формулы, аналогичные формулам (4), (6) и (8); число суммируемых членов равно числу принятых для анализа признаков. Соответственно, веса p_i признаков определяются с учетом только тех связей, которые действуют в пределах частного множества признаков.

Признаки структурных зон, суммированные в таблице, были обработаны с помощью формулы (5). Результаты расчетов, показывающие относительную близость друг к другу пяти структурных зон, сведены в матрицу коэффициентов *

	Ш	И	К	О
П	0,80	0,78	0,74	0,58
Ш		0,83	0,73	0,60
И			0,80	0,53
К				0,51

Число 0,78 на пересечении граф П и И означает, что показатель соответствия r, вычисленный на основе нормированного среднеквадратичного отклонения, в случае сравнения Печенгской и Имандра-Варзугской зон равен 0,78. Как следует из приведенной матрицы, наиболее близки друг другу Имандра-Варзугская и Шомбозерская зоны. Более всего различаются по своим признакам зоны Кивино и Оуэн-Велли.

Точно такая же ранжировка структур по их относительной близости получается при использовании формулы (6), что видно из попарного сопоставления Печенгской структурной зоны со всеми остальными

	Ш	И	К	О
П	0,90	0,87	0,82	0,66

* Здесь и ниже использованы сокращенные обозначения структурных зон: П — Печенгская, И — Имандра-Варзугская, Ш — Шомбозерская, К — Кивино, О — Оуэн-Велли.

Показатель Д. Гуда вычислен при условии, что в качестве эталонной принята Печенгская структурная зона, которая изучена более полно, чем другие:

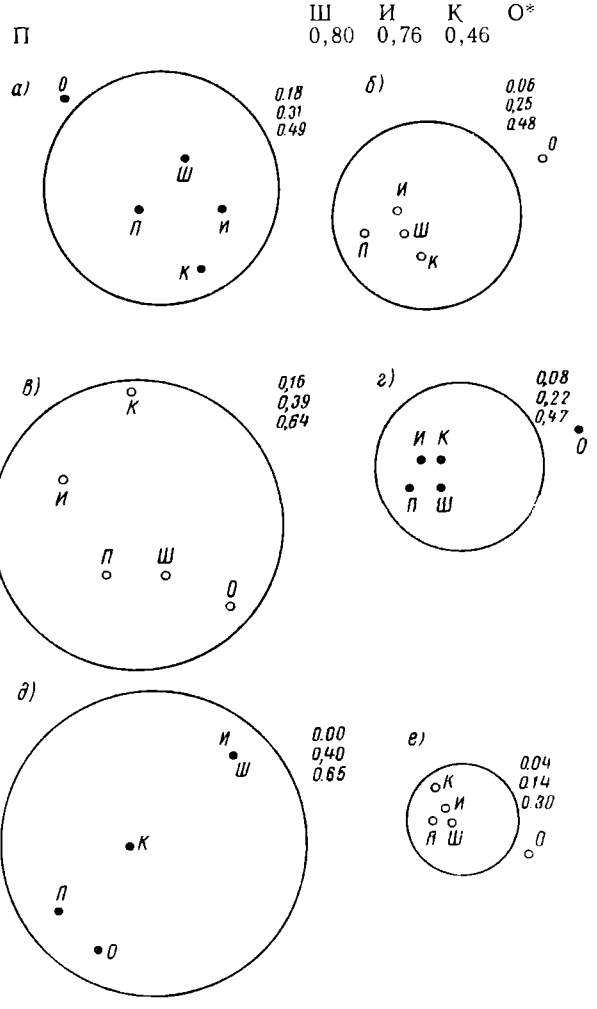


Рис. 3. Близость структурных зон по совокупности всех признаков *а* и по группам признаков: общегеологических *б*, геометрических *в*, магматических *г*, металлогенических *д* и геофизических *е*. Радиус окружности — $\Delta'_{ср}$

Приведенные здесь результаты расчета r по формуле (8) также отличаются от полученных с помощью формул (5) и (6), однако ранжировка близости сохраняется: по совокупности показателей наиболее близка к Печенгской зоне Шомбозерская зона, далее следуют (в порядке уменьшения сходства) зоны Имандра-Варзугская, Кивино, Оуэн-Велли.

Нормированное расстояние между признаками структурных зон, определяемое по формуле (4), позволяет представить совокупность структур в виде точек на плоскости, размещенных таким образом, чтобы геометриче-

---

Для пары П—О получен близкий к нулю мнимый коэффициент.

ское расстояние между любой парой точек в избранном масштабе примерно соответствовало расстоянию Δ'_{12} (рис. 3).

Кроме точек, полученных при расчетах по всем признакам, на рис. 3 нанесены точки, отдельно показывающие близость структурных зон по общегеологическим, геометрическим, магматическим, металлогеническим и геофизическим признакам. Для каждой из этих групп признаков была определена самостоятельная матрица расстояний Δ' Числами на рис. 3 указаны минимальное, среднее и максимальное расстояния. Центр тяжести каждой группы точек совмещен с центром окружности, радиус которой равен среднему значению Δ'

Радиус окружности характеризует среднюю степень сходства структур по данной группе признаков.

Наименьшим средним радиусом отмечается группа геофизических признаков ($\Delta'_{ср} = 0{,}14$), далее следуют группы магматических (0,22), общегеологических (0,25), геометрических (0,39), металлогенических (0,40). По большинству признаков Оуэн-Велли резко выделяется из всей совокупности структурных зон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жданов В. В. История тектоно-магматического развития Печенгской осадочно-эффузивной серии. В сб. «Вопросы сравнительной тектоники древних платформ». Наука, 1964.

2. Литвиненко И. В. О некоторых результатах изучения глубинных разрезов земной коры различных структурно-фациальных зон Кольского полуострова и Карелии. В сб. «Геология и глубинное строение восточной части Балтийского щита». Наука, 1968.

3. Харитонов Л. Я. Структура и стратиграфия карелид восточной части Балтийского щита. Недра, 1966.

4. Поротова Г А., Цирульникова Р. Я. Геофизические методы при геологическом картировании докембрийских образований Балтийского кристаллического щита. В сб. «Вопросы геологии и закономерности размещения полезных ископаемых в Карелии». Карельское книжн. изд-во, 1966.

5. Симон А. К. Геологическое строение и история развития докембрийского прогиба Имандра—Варзуга—Сосновка (Кольский п-в). Автореферат диссерт. на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук. Изд. МГУ, 1967.

6. Ирдли А. Структурная геология Северной Америки. ИЛ, 1954.

7. Браунли К. А. Статистические исследования в производстве. ИЛ, 1949.

8. Белоусов В. В. Структурная геология. Изд. МГУ, 1961.

9. Белоусов В. В. Основные вопросы тектоники. Госгеолтехиздат, 1962.

10. Билибин Ю. А. Металлогенические провинции и металлогенические эпохи. Госгеолтехиздат, 1965.

11. Елисеев Н. А. Метаморфизм. Изд. ЛГУ, 1959.

12. Магакьян И. Г. Рудные месторождения. Госгеолтехиздат, 1955.

13. Смирнов В. И. Геология полезных ископаемых. Недра, 1965.

14. Оре О. Графы и их применение. Мир, 1965.

15. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. Прогресс, 1968.

16. Лоули Л. Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. Мир, 1967.

17. Пугачев В. С. Теория случайных функций. Физматгиз, 1960.

18. Красулин В. С. Справочник техника-геолога. Недра, 1967.

19. Бонгард М. М. и др. Опыт использования обучающейся программы для выявления нефтеносных пластов. Материалы семинаров ИАТ, вып. 5, 1964.

20. Демина М. Е., Калинин О. М. О происхождении обломочных минеральных ассоциаций в апт-сеноманских отложениях юго-западного Приуралья и Примугоджарья. В сб. «Вопросы математической геологии». Наука, 1968.

21. Белонин М. Д. Особенности эволюции и строения локальных платформенных поднятий. Автореферат диссерт. на соискание ученой степени кандидата геол.-мин. наук. Л., 1967.

22. Вистелиус А. Б. Основные типы математических решений задач современной геологии. «Разведка и охрана недр», 1964, № 6.

23. Евдокимов Ю. Д., Изотова Е. Б., Ломтадзе В. В. Применение ЭЦВМ в рудной геофизике. В сб. «Методы рудной геофизики». ВИРГ, 1968.
24. Уилкс С. Математическая статистика. Наука, 1967.
25. Шоу Д. М. О делении данных в аналитической геохимии на две группы с помощью дистанционного коэффициента. В сб. «Вопросы математической геологии». Наука, 1968.
26. Coons R. L. Woolard G. P Hershey G. Amer. Assoc. Petroleum Geologists Bull., v. 51, N 12, 1967.
27. Craddock C., Thiel E. C. Gross B. Journal of Geophysical Research, v. 68, N 21, 1963.
28. Matusita K. Ann. of Inst. Statist. Math., v. XVI, N 3. Tokyo, 1964.
29. Pakiser L. C. Kane M. F. Jackson W H. Geol. Survey Prof. Paper, 438, 1964.
30. White W. S. Geol. Survey Prof. Paper, 524—E, 1966.