



УДК 550.84:553.4+552.1:53

К ВОПРОСУ ПЕТРОФИЗИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД (НА ПРИМЕРЕ ВКМ)

Н.С.Афанасьев

Воронежский государственный университет

Петрофизические данные являются базой геологической интерпретации геофизических полей. С этой целью формируются петрофизические образы разноранговых объектов. Особое место в разграничении последних принадлежит адекватной петрофизической классификации. В отличие от известных разработок (статистически-количественных, генетических), в статье предлагается многомерный вариант с соподчиненной иерархией таксонов. Для каждого уровня – типа, класса, группы, ряда, семейства, вида и разновидности определены главные и вспомогательные классификаторы.

Основой разработки теоретического и практического обоснования фиксации временных и пространственных неоднородностей Земли, закономерностей формирования и размещения в ее недрах разнообразных рудных полезных ископаемых является накопление и систематизация разноплановой геолого-геофизической и петрофизической информации. Результативность подобной систематизации требует адекватного уровня упорядочения геофизических, геофизических и петрофизических наблюдений и данных. Следует подчеркнуть, что на сегодня в упомянутом выше ряду информационной базы [1-7], четко обозначилось недостаточность развитости различных сторон петрофизической составляющей, особенно с позиции таксономии, и как следствие устойчивого обоснования сущностного раскрытия многочисленных прикладных задач геологической интерпретации геофизических наблюдений. Нельзя сказать, что вопросы петрофизической классификации совершенно не осуждались. Ее статистически – количественный подход реализован в трудах сотрудников ВСЕГЕИ, Н.Б. Дортман и др. [8], генетически – качественный – на примере гранитоидов УКЩ – в школе КГУ М.И. Толстой и др. [9]. Некоторые аспекты в той или иной мере затрагиваются в исследованиях, посвященных разработке целевых петрофизических и геолого-геофизических задач, что находит отражение в работах – В.И. Старостина [10], М.П. Воларовича [11], Б.П. Беликова [12], Ю.С. Геншафта [13], Л.И. Звягинцева [14], А.А. Прияткина [15], Н.С. Афанасьева [16,17], других исследователей. Определенные стороны петрофизической классификации с позиции изучения состояния признаков в процессе развития рудно-геологических систем отражаются в публикациях, посвя-

щенных рудогенерационным процессам: Л.И. Звягинцев [14], А.И. Кривцов [18], Н.П. Лаверов, В.Л. Барсуков [19], Г.А. Соловьев [20], В.И. Старостин [21], Н.С. Афанасьев [22,23], Ю.Г. Сафонов, А.А. Пэк [24].

Если принять во внимание, что на современном этапе геологического изучения земных недр резко возросла роль геофизических и других дистанционных методов исследования, но сохраняется проблема неоднозначности интерпретации последних, то вполне резонно и обосновано говорить о сопряженном развитии с перечисленными методами соответствующих петрофизических направлений и в первую очередь адекватной уровню развития геолого-геофизических методов петрофизической классификации. В частности, из-за многозначности решения обратных магниторазведочных задач даже комплекс данных не избавляет от противоречивых решений. В зависимости от принятой модели нижняя граница источников региональных магнитных аномалий варьирует от 15-20 до 40 км и более км, ограничиваясь лишь глубиной достижения 580°С. (температуры Кюри магнетита): Г.И. Каратаев, И.К. Пашкевич [25,26]; Л.В. Булина [27]; Г.И. Каратаев, И.К. Пашкевич, [28]; З.А. Крутиховская [29,30]; Д.М. Печерский [31]. В построениях плотностных моделей земной коры и верхов мантии, как и оценках условий изостатического равновесия различных геоструктурных элементов Земли также наблюдается подобная неоднозначность [32-36].

Опыт построения геолого-геофизических карт докембрия в условиях Воронежского кристаллического массива, анализ полученных материалов так же показали, что их структурно-вещественная

насыщенность, объективность разграничения соподчиненных неоднородностей, определяется полнотой и качеством петрофизического обоснования их дискретности, а по существу - описанием в количественных показателях по системе признаков всех интерпретируемых объектов (петрофизических образов последних) [4,36-41]. Этот тезис подтверждается тем обстоятельством, что прекращение в 90 гг. изучения физических свойств горных пород в регионе привело к необоснованному выделению реально несуществующих, или пропуску, или объединению тел различной природы, в том числе геотектонических элементов (геологическая карта ВКМ масштаба 1: 500 000, 2000г.).

В перечисленных опубликованных и фондовых материалах, неоднократных решениях общегеологических, петрографических, тектонических, петрофизических конференций, а также петрофизической комиссии петрокомитета АН СССР и РАН формулируются рекомендации и задачи значительного развития, а не свертывания петрофизической составляющей в ряду геолого-геофизических методов на сегодня ведущего фактора ограничения неопределенности геологической интерпретации геофизических данных. При всей развитости математических разработок интерпретации потенциальных полей [42] почти всегда требуется их согласование с априорными геологическими сведениями на достаточно полно разработанной петрофизической базе [6,8,].

Определяющим звеном собственного становления петрофизики и ее прикладных аспектов следует признать разработку многомерной петрофизической классификации, что далеко не тождественно характеристике определенных классов горных пород набором физических параметров и их статистик. Изучение особенностей распределения признаков, их парной и многомерной взаимокорреляции для целевых, чаще всего оптимально минимизированных рангов объектов (петротипов), разграничение последних методами факторного, дискриминантного анализа и различными графо-аналитическими способами позволяет формировать информативную базу системы признаков для решения разноплановых интерпретационных, прогнозных задач, включая, естественно, таксономию. Анализ различных сторон признакового пространства (состава: минерального и химического; строения, генезиса, процессов, физических характеристик: измеренных и расчетных для горных пород) показывает, что оно (признаковое пространство) отражает геологическую природу объектов в их развитии и взаимодействии [1,3,4,43-47]. Особенности работы отдельных или комплексных признаков - их распределений, различных взаимосвязей, разграничений объектов, а в принципе их информационное содержание и возможности обсуждаются и иллюстрируются в публикациях многих авторов и не только упомянутых в списке литературы статьи. Даже общий обзор этих материалов показывает, что конкретные петрофизи-

ческие признаки или закономерные их сочетания фиксируют природу структурно-вещественных характеристик эволюционирующих объектов. Одни признаки более тесно связаны с петрохимическими характеристиками горных пород, другие - с их особенностями строения, третьи - процессами преобразования и рудогенеза. В результате выявляется достаточно четкая способность определенных групп признаков выразить отличительные черты состава, строения, условий формирования, последующих преобразований объектов, что в итоге позволяет сформировать содержательные факторы разграничения геологических обстановок и информационную базу для разработки резульативной многоуровневой петрофизической классификации. Подобные классификации, помимо решения задач поранговой таксономии объектов, т.е. отнесения их к тем или иным классам, создают возможности в количественных показателях целевых параметров значительно сузить неопределенность интерпретации геофизических данных, зачастую создать прецедент к постановке новых методов получения информации и иных подходов ее обработки, особенно в обстановках слабых геофизических сигналов, но в условиях четко фиксируемых петрофизических неоднородностей (объектов).

Предлагаемый вариант петрофизической классификации, естественно требует обсуждения, доработки или изменения, но в данном исполнении преследует цель не только построения классификационной системы, но что не менее существенно - форму организации знаний о закономерностях развития геологических образований, выраженную в петрофизических показателях. Информационную базу классификации представляют стандартные статистики признаков для петротипов горных пород в ранге видов существующих петрографических классификаций. В признаковое пространство включены физические свойства (плотность- σ , г/см³, магнитная восприимчивость- χ , 10⁻⁵ СИ, остаточной намагниченность- $I_n \cdot 10^{-3}$ А/м, скорость распространения продольных и поперечных волн- V_p , V_s , км/с, вызванная поляризация- η , %, общая пористость- n , %, а также V_p/σ , $\ln(I_i)$, типоморфные, викарирующие, вторичные, рудные минералы (6-8 минералов в зависимости от конкретных условий, наименования петротипов, ранга таксона), петрогенные химические окислы в весовых %, m -средняя атомная масса, полученная из данных силикатных химанализов, m/σ (16 признаков), специальные петрохимические, геохимические коэффициенты, целевая (индикаторная) рудная нагрузка (7-9 характеристик). Всего (по материалам ВКМ) в классификации предполагается задействовать порядка 40 признаков.

Поскольку петрофизическая классификация преследует решение на ее базе многоцелевых вопросов - формирование образов геологических объектов, выявление особенностей их геодинамики становления на различных отрезках пространственно-временной эволюции, закономерностей развития

рудогенерационных процессов, постольку для каждого ее уровня (класса) привлекается целевая система ведущих и вспомогательных классификаторов в количественных (при необходимости в качественных) показателях непосредственно самих признаков, а в основном отношений их различных статистик и факторных нагрузок) С формальных позиций классификация построена на принципе иерархической соподчиненности таксонов: (вид- разновидность)-семейство-ряд-группа-класс-тип, при этом первые два из них можно считать относительно простыми-элементарными. Только заметим, что достаточно широкие вариации значений признаков в пределах видов создает прецедент дополнительного деления последних (особенно в интерпретационном отношении). Такое деление определяется размерностями шага шкал значений конкретных признаков (в основном физических свойств). Например, граниты первично намагниченные при необходимости имеет смысл подразделить на слабомагнитные - $100-500 \cdot 10^{-6}$ СИ, среднемагнитные - $400-2000 \cdot 10^{-6}$ СИ, высокомагнитные-более $2000 \cdot 10^{-6}$ СИ.

Тесная связь дифференциации физических параметров петротипов с наличием и характером различных преобразований горных пород обосновывают отнесение их к семействам как вещественно так структурно измененным или неизменным подразделениям, т. е. те же первично намагниченные граниты могут принадлежать любому из предлагаемых 6-и семейств (таблица).

Анализ и оценки характеристик изменчивости всех измеряемых и расчетных признаков петрофизической системы (дисперсией, параметров распределений, в том числе модальных и медианных величин) тех или иных петротипов горных пород приводит к выводу о необходимости отнесения последних к определенным рядам и группам. В этом отношении вышеупомянутые граниты могут принадлежать к любому из 3-х дисперсионных рядов, а так же одной из и 3-х, с различным распределением признаков, групп (таблица).

Геологические тела формируются и находятся в гетерогенном векторном силовом пространстве, специфическом для различных тектоно-магматических эпох и этапов. Конкретные режимы порообразования устойчиво отражаются в комплексе сопряженных петрофизических параметров. По обстановкам сжатия-растяжения объектов, фиксируемых соответствующими оценками признаков, их взаимокорреляций и соотношений [22] выделяются классы –уплотненный, слабо разуплотненный и разуплотненный (таблица). В практическом плане отнесение идентичных по составу объектов к разным петрофизическим классам нацеливает исследователя на выяснение их геодинамики становления и рудогенеза. В частности, медно-никелевые рудопроявления и месторождения на ВКМ связаны преимущественно с разуплотненными интрузиями мамонского комплекса [23], многочисленные сульфидные рудопроявления золота, платиноидов в пределах Тим-Ястребовской структуры также тяготеют к со струк-

турно разуплотненным объектам обычно с повышенными величинами магнитных свойств, вызванной поляризуемостью.

Кристаллические образования докембрия на всех отрезках его истории испытывали векторные напряжения, о чем свидетельствуют ориентированные структуры горных пород и пространственное положение различных геотектонических элементов ВКМ. По степени выраженности анизотропии самих пород и соответствующих петрофизических показателей в классификации предусматривается выделение 3-х типов - изотропного, субанизотропного и анизотропного. В целом структурный фактор, как результат реакции соподчиненных геологических систем на силовые внешние и внутренние межсистемные геодинамические и другие нагрузки, создает предпосылки к установлению пространственных ориентировок полей напряжения в процессе тех или иных этапов тектогенеза, геоструктурных перестроек в условиях взаимовоздействий петрофизически контрастных геологических тел различных иерархических уровней.

В заключение констатируем, что широкие спектры значений петрофизических характеристик петрографических видов горных пород обязаны влиянию суммы факторов различной природы, действующих на всем отрезке их эволюции. Следует заметить также, что данный вариант классификации нуждается в совершенствовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шолло Л.Е. Использование магнетизма горных пород при решении геологических задач. -Л., 1977. - 183 с.
2. Генштафт Ю.С. Геофизика, геология, петрофизика итоги и перспективы // Вопросы методологии интерпретации геофизических данных: Тр. конфер. -М., 1996. - С. 124-132.
3. Афанасьев Н.С. Корреляция физических свойств, минерального и химического состава в горных породах ВКМ// Вопросы геологии КМА. - Воронеж, 1972. - С.123-141.
4. Афанасьев Н.С. Геофизика-петрофизика-геология как единая исследовательская система изучения структурно-вещественных неоднородностей литосферы Земли //Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тез. докл. междунар. конфер. -Воронеж, 1996. -С. 105-106.
5. Афанасьев Н.С. Петрофизические исследования при крупномасштабном картировании и поисково-разведочных работах // Материалы петрофизического семинара. -Л., 1990. - С.27.
6. Афанасьев Н.С. Петрофизика в системе геолого-геофизических исследований (на примере изучения Воронежского кристаллического массива) // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1997. -№ 4. - С. 21-27.
7. Афанасьев Н.С., Жаворонкин И.А., Кривцов И.И., Филаретов Г.И. Разделение базит-гипербазитовых интрузий юго-востока ВКМ на основе их петрофизической характеристики и данным геофизических методов разведки // Вопросы петрологии, рудоносности основного и ультраосновного магматизма Воронежского кристаллического массива. -Воронеж, 1974. - С.58-68.

Петрофизическая классификация

Петротипы (петровиды или разновидности), их								
Статистические показатели (основные)								
Петрофизические таксоны	Структурно-минералогическая характеристика	Мат. ожидание или сред.зн. (X, ср.)	Дисперсия D	Стандарт отклонение St	Оценка распределения Rs	Мода Мо	Медиана Ме	Асимметрия А
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Физические свойства: $\sigma, n, Vp, In, k, \eta$								
Коэффициенты - отношения физических свойств параметры: $m, m/\sigma, Vp/\sigma$								
Главные минералы								
Характеристики минералов								
Петрохимические окислы								
Петрохимические показатели								
Малые и рудные элементы								
Вариант								
Петрофизические таксоны	Вариации содержания типоморфных, существенных, викарирующих и рудных минералов (статистики)	Содержания ведущих петрогенных химических окислов (статистики)	Значения характерных петрофизических, структурно-вещественных показателей	<u>Граничные значения классификаторов (показателей) для выделяемых таксонов-параметры и их статистики, особенности корреляции свойств-состава-строения (значимости r)</u>				
А. Типы	Основные минералы, их морфология, пространственные группы минералов, определяющие выделение таксона	Кремнекислота и группа фемических окислов, их соотношение с модой (Мо)	Классификационные показатели. Al/Мо, F/М, А/Мо, О/Мо, К/Мо, L ¹ /L ²	$\sigma, \text{г/см}^3$, статистики	n/М, n, статистики	Vp^H/Vp^L , статистики	Vp^Hs/Vs^L , статистики	Vp/Vs
1. Изотропные	Структура массивная, минералы не ориентированы, пространственные группы: ...	SiO ₂ /Мо, Fe ₂ O ₃ /Мо, FeO/Мо, MgO/Мо, CaO/Мо, Na ₂ O/Мо, K ₂ O/Мо близки к 1	Al/Мо, F/М, А/Мо, О/Мо, К/Мо, L ¹ /L ² =1		$n/Мо=1$	$Vp^H/Vp^L=1$	$Vp^Hs/Vs^L=1$	
2. Субанизотропные	Структура субориентированная, пространственные группы минералов: ...	SiO ₂ /Мо, Fe ₂ O ₃ /Мо, FeO/Мо, MgO/Мо, CaO/Мо, Na ₂ O/Мо, K ₂ O/Мо <>1	Al/Мо, F/М, А/Мо, О/Мо, К/Мо, L ¹ /L ² <>1		$n/Мо < 1$	$Vp^H/Vp^L > 1$	$Vp^Hs/Vs^L > 1$	

(на базе данных ВКМ)

петрофизические характеристики и статистики

статистики) для петротипа

Эксцесс Э	Оценка ассимет- рии	Оценка эксцесса	Уравнения регрессий признаков	Коэфф. корр. призн.	Оценки значим.	Факторный анализ			Дисп. анализ	Дискр. анализ
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

классификации

Граничные значения классификаторов (показателей) для выделяемых таксонов-параметры и их статистики, особенности корреляции свойств-состава-строения (значимости r)

V_p/σ	I_n	κ	$Q(I_n/I_i)$	$r/M, r$	$\eta I/\eta II, h$	$C,$ Дж/кгК	$g, \text{Вт/м}^2$	$g, \text{мкр/ч}$	m	$(m/\sigma):(m/\sigma)$ M
	$I_n:I_{ny}:I_{nz}=1$			$r/M=1$	$\eta I/\eta II=1$					
	$I_n:I_{ny}:I_{nz} >> 1$				$\eta I/\eta II >> 1$					

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3. Анизотропные	Структура ориентированная, пространственные группы минералов: ...	SiO ₂ /Mo, Fe ₂ O ₃ /Mo, FeO/Mo, MgO/Mo, CaO/Mo, Na ₂ O/Mo, K ₂ O/Mo >>1	Al/Mo, F/M, A/Mo, O/Mo, K/Mo, L ¹ /L ² >>1		n/Mo<<1	Vp ^{II} /Vp ^I >>1	Vp ^{II} s/Vs ^I >>1	
Б. Классы								
1. Уплотненные	Преобладает первичный минеральный парагенезис, викарирующих и вторичных минералов ед. зерна	Диапазоны вариаций окислов минимальное, H ₂ O+, ппп<<1 %	Минимальное рассеяние признаков, значения близки к средним, X/X _{ср.} +st=>1	σ/σ _{ср.} +σt=1	n<<0,5			
2. Слабо разуплотненные	Викарирующих и вторичных минералов до 5 и более %, часто отмечаются рудные фазы	Разнозначные, относительно средних значений, вариации окислов, H ₂ O+, ппп до 1,5 %	Значения признаков, заметно отклоняются от средних, X/X _{ср.} +st<<1	σ/σ _{ср.} +σt><1	n>0,5 до 1,5			
3. Разуплотненные	Викарирующих, вторичных и рудных минералов 5-7 и более %,	Разнозначные, относительно средних значений, вариации окислов, H ₂ O+, ппп более 1- 1,5 %	Значения признаков, заметно отклоняются от средних, X/X _{ср.} +st<<1	σ/σ _{ср.} +σt><1	n более 1,5%			
В. Группы								
1. Симметрично (нормально) распределенных признаков	X= Mo=Me	X= Mo=Me	X= Mo=Me	X= Mo=Me	X= Mo=Me			
2. Ассиметрично распределенных признаков	X<>Mo<>Me	X<> Mo<>Me	X<>Mo<>Me		X<>Mo<>Me			
3. Сложных в том числе многовершинно распределенных признаков	Ряд X _{ср.} , Mo,Me	Ряд X _{ср.} , Mo,Me	Ряд X _{ср.} , Mo,Me	Ряд X _{ср.} , Mo,Me	Ряд X _{ср.} , Mo,Me			
Г. Ряды (вариации)								
1. Узкодисперсные	D=(+St)-для 95% уровня	D=(+St)-для 95% уровня	D=(+St)-для 95% уровня	D=(+St) уровня	D=(+St) уровня	D=(+St) 95% уровня	D=(+St) 95% уровня	D=(+St) 95% уровня

Продолжение табл.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$In_x:In_y:In_z \gg 1$				$\eta I/\eta II \gg 1$					
	$V_p/\sigma:$ $(V_p/\sigma \pm \sigma_t) > 1$		$Q(In/I_i) < 1$		η низкая				$m/m_{cp.} > 1$	$(m/\sigma):$ $(m/\sigma)_{cp} > 1$
	$V_p/\sigma:$ $(V_p/\sigma \pm \sigma_t) < 1$		$Q(In/I_i) \gg 1$		η пере менная				$m/m_{cp.} < 1$	$(m/\sigma):$ $(m/s)_{cp} < 1$
	$V_p/\sigma:$ $(V_p/\sigma \pm \sigma_t) \ll 1$		$Q(In/I_i) \gg 1$		η чаще высокая				$m/m_{cp.} < 1$	$(m/\sigma):$ $(m/\sigma)_{cp} < 1$
	$X=Mo=Me$	$X=Mo=Me$	$X=Mo=Me$		$X=Mo=Me$					
	$X \diamond Mo \diamond Me$	$X \diamond Mo \diamond Me$	$X \diamond Mo \diamond Me$		$X \diamond Mo \diamond Me$					
	Ряд X_{cp}, Mo, Me	Ряд X_{cp}, Mo, Me	Ряд X_{cp}, Mo, Me		Ряд X_{cp}, Mo, Me					
$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.				$D=(+St)$ 95% ур.	$D=(+St)$ 95% ур.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2. Среднедисперсные	Д=(+2St)-для 95% уровня	Д=(+2St)-для 95% уровня	Д=(+2St)-для 95% уровня	Д=(+2St) 95% ур.	Д=(+2St) 95% ур.	Д=(+2St) 95% ур.	Д=(+2St) 95% ур.	Д=(+2St) 95% ур.
3. Широкодисперсные	Д=(+3St)-для 95% уровня	Д=(+3St)-для 95% уровня	Д=(+3St)-для 95% уровня	Д=(+3St) 95% ур.	Д=(+3St) 95% ур.	Д=(+3St) 95% ур.	Д=(+3St) 95% ур.	Д=(+3St) 95% ур.
Д. Семейства								
1. Вещественно неизменные	Минсостав первичный- $X=X_{cp}$	Признаки стандартные для петротипа- $X=X_{cp}$.	Признаки стандартные для петротипа- $X=X_{cp}$.	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$
2. Вещественно измененные	Широко развиты вторичные м-лы	$X << Mo >> Me$	$X << X_{cp}$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$
3. Структурно неизменные	Пр. группы минералов сближены					$X=X_{cp}$	$X=X_{cp}$	$X=X_{cp}$
4. Структурно измененные	Гетероморфные структуры					$X << X_{cp}$	$X << X_{cp}$	$X << X_{cp}$
5. Вещественно и структурно неизменные	Минсостав первичный- $X=X_{cp}$	Признаки стандартные для петротипа- $X=X_{cp}$.	Признаки стандартные для петротипа- $X=X_{cp}$.	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$	$X=X_{cp}$ $=Mo=Me$
6. Вещественно и структурно измененные	Широко развиты вторичные м-лы, структуры гетероморфные	$X << Mo >> Me$	$X << X_{cp}$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$	$X << Mo >> Me$
Е. Виды								
1. Первично м.м. уплотненные	Первичных высокобарических м-лов более 5%. $Fm/Fm_{cp} > 1$	$SiO_2/SiO_{cp} < 1$, Фм.окислов/ $Фm_{cp} > 1$	$F/F_{cp} > 1$	$\sigma/\sigma_{cp} > 1$				
2. Первично минералогические и по массе разуплотненные	Гетерогенные м-лы, $Fm/Fm_{cp} < 1$	$SiO_2/SiO_{cp} > 1$, Фм.окислов/ $Фm_{cp} < 1$	$F/F_{cp} < 1$	$\sigma < \sigma_{cp} < Mo < Me$				
3. Вторично минералогические и по массе уплотненные	Вторичных высоробарических м-лов более 5%	$SiO_2/SiO_{cp} < 1$, Фм.окислов/ $Фm_{cp} > 1$	$F/F_{cp} > 1$,	$\sigma/\sigma_{cp} > 1$				
4. Вторично минералогические и по массе разуплотненные	Минералогия гетерогенная	$SiO_2/SiO_{cp} > 1$, Фм.окислов/ $Фm_{cp} < 1$	$F/F_{cp} < 1$	$\sigma < \sigma_{cp} > Mo$				
5. Первично структурно уплотненные	$Fm/Fm_{cp} > 1$	Фм.окислов/ $Фm_{cp} > 1$	$MgO/MgO_{cp} > 1$, $r/rM >> 1$	$\sigma/\sigma_{cp} > 1$	$n/nM < 1$			

Продолжение табл.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.				$D=(+2St)$ 95% ур.	$D=(+2St)$ 95% ур.
$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.				$D=(+3St)$ 95% ур.	$D=(+3St)$ 95% ур.
$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}=M_o=M_e$				$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$
$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$				$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$
$X=X_{cp}$	$X=X_{cp}$	$X=X_{cp}$	$X=X_{cp}$							$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$
$X \ll X_{cp}$	$X \ll X_{cp}$	$X \ll X_{cp}$	$X \ll X_{cp}$							$X \ll M_o \gg M_e$
$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}=M_o=M_e$				$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$	$X=X_{cp}$ $=M_o=M_e$
$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$				$X \ll M_o \gg M_e$	$X \ll M_o \gg M_e$
									$M/M_{cp} > 1$	
									$m/m_{cp} < 1$	
									$m/m_{cp} > 1$	
									$m/m_{cp} < 1$	
$V_p/\sigma > 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M > 1$									$m < m_{cp}$	$(m/\sigma):$ $(m/\sigma)M < 1$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6. Первично структурно разуплотненные	Деформации минералов (растяжения)		Кор. Vp-σ слабая незначимая		n/nM>1			
7. Вторично структурно уплотненные	Деформации минералов (сжатия)		Кор. Vp-σ высокая значимая	$\sigma/\sigma_{cp}>1$	n/nM<1			
8. Вторично структурно разуплотненные	Деформации минералов (растяжения)		Кор. Vp-σ слабая незначимая		n/nM>1			
9. Первично намагниченные	Ферромагнетики первичные	Fe/FeM>1	O/OM>1 (O-Fe₂O₃/Fe₂O₃+FeO)					
10. Первично немагнитные	Ферромагнетики отсутствуют	Fe/FeM=<1	O/OM<1					
11. Вторично намагниченные	Ферромагнетики вторичные	Fe/FeM>1	O/OM>1	$\sigma/\sigma_{cp}>1$				
12. Вторично немагнитные	Ферромагнетики окисленные, пирротин замещен пиритом	Fe/FeM<1	O/OM>>1					
13. С высоким отношением In/Ii	Ферромагнетики термо или химически намагниченные (часто высокотемпературные метасотатиты)	Fe/FeM>1	O/OM>1					
14. С низким отношением In/Ii	Ферромагнетики низких температур формирования или преобразованные	Fe/FeM<1	O/OM>1					
15. Первично высокоомные	Электронные и ионные пороводники отсутствуют	Fe/FeM<1, $\frac{SiO_2/SiO_2}{M}>1$	O/OM<1, SO₃/SO₃M<1		n/nM<1			
16. Первично низкоомные	Присутствуют электронные или ионные проводники	Fe/FeM<1	O/OM>1, SO₃/SO₃M>1		n/nM>1			
17. Вторично высокоомные	Гетерогенные м-лы	Fe/FeM<1, $\frac{SiO_2/SiO_2}{M}>1$	O/OM>1, SO₃/SO₃M<1		n/nM<1			
18. Вторично низкоомные	Присутствуют электронные или ионные проводники (постпородообразующие)	Fe/FeM<1	O/OM>1, SO₃/SO₃M>1		n/nM>1			

Продолжение табл.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$V_p/\sigma < 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M < 1$	$I_n/I_nM > 1$		$Q(I_n/I_i)$ $/Q(I_n/I_i)M > 1$							$(m/\sigma):$ $(m/\sigma)M > 1$
$V_p/\sigma > 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M > 1$										$(m/\sigma):$ $(m/\sigma)M < 1$
$V_p/\sigma < 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M \ll 1$										
	$I_n \gg 50$	$c \gg 50$	$Q(I_n/I_i)$ $Q(I_n/I_i)M < 1$							
	$I_n < 50$	$c \ll 50$								
$V_p/\sigma < 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M \ll 1$	$I_n \gg 50$	$c \gg 50$	$Q(I_n/I_i)$ $Q(I_n/I_i)M \gg 1$							
$V_p/\sigma > 2,2;$ $V_p/\sigma/(V_p/\sigma)M > 1$	$I_n < 50$	$c \ll 50$								
			$Q(I_n/I_i)$ $Q(I_n/I_i)M \gg 1$							
			$Q(I_n/I_i)$ $Q(I_n/I_i)M < 1$							
			$Q(I_n/I_i)$ $Q(I_n/I_i)M < 1$	$r \max.$	$\eta/\eta M \ll 1$					
				$r/M < 1$	$\eta/\eta M \gg 1$					
				$r \max.$	$\eta/\eta M \ll 1$					
				$r/M < 1$	$h/\eta M \gg 1$					

1	2	3	4	5	6	7	8	9
19. Первично высокополяризующаяся	Присутствуют электронные или ионные проводники		$O/OM > 1, SO_3/SO_3M > 1$		$n/nM > 1$			
20. Первично низкополяризующаяся	Электронные и ионные пороводники отсутствуют, минералы гетерогенные	$Fe/FeM < 1$ $SiO_2/SiO_2M > 1$	$O/OM < 1, SO_3/SO_3M < 1$		$n/nM < 1$			
21. Вторично высокополяризующаяся	Присутствуют электронные или ионные проводники (постпородообразующие)	$Fe/FeM < 1$ $SiO_2/SiO_2M > 1$	$O/OM > 1, SO_3/SO_3M > 1$		$n > nM$			
22. Вторично низкополяризующаяся	Электронные и ионные проводники отсутствуют, минералы гетерогенные	$Fe/FeM < 1$ $SiO_2/SiO_2M > 1$	$O/OM < 1, SO_3/SO_3M < 1$		$n/nM < 1$			
23....,								
Виды 23... и далее формируются при наличии данных по другим параметрам-тепловым, радиоактивным ит.д.		С, Дж/кгк	g, Вт/м ²	g, мкр/ч				

Ж. Выделение разновидностей определяются целевыми значениями шага дискретности шкал конкретных
Например: гранит А.2, Б2, В1, Г3, Д.1,Еб, намагниченный (1-100-400 , 2-400-1000, 3-1000-4000 ,4 -4000-10000.... гс)

Примечание: L^1, L^2 - Количество пересечений минералов по ориентировке и в крест на единицу длины. X – признаки

- Петрофизика. Справочник в трех книгах / Под ред. Н.Б. Дортман. - М.,1992. Кн.1.- 391 с.- Кн.2.- 256 с. Кн.3.- 286 с.
- Петрофизика характерных гранитоидных комплексов Украинского щита / Ред. М.И. Толстой. -Киев, 1987. - 218 с.
- Старостин В.И. Структурно-петрофизический анализ эндогенных рудных полей. -М., 1984. -240 с.
- Волярович М.П., Баюк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. -М., 1974. - 123 с.
- Беликов Б.П., Александров А.С., Рыжова Т.В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород -М., 1970. -239 с.
- Геншафт Ю.С., Печерский Д.М. Петрологическая и петромагнитная оценка возможных глубинных источников региональных магнитных аномалий // Геофиз. журн. -1986. -Т.8. - С.61-67.
- Звягинцев Л.И. Деформация горных пород и эндогенное рудообразование. -М., 1978. -174 с.
- Прияткина А.А. Использование физических параметров и их анизотропии для петроструктурных целей// Петрофизическая характеристика Советской части Балтийского щита. -Апатиты, 1976. -С. 81-86.
- Афанасьев Н.С. Петрофизическая классификация супракратальных и магматических комплексов докембрия Воронежского кристаллического массива. - Воронеж,1982.-14 с. Деп. ВИНТИ 1477-82.
- Афанасьев Н.С. Петрофизика гранитоидов Воронежского кристаллического массива (ВКМ) // Физика Земли. -1997. -№ 11. - С. 58-68.
- Кривцов А.И., Граков А.Н. О рудооттождении на границах сред с различной проницаемостью // Докл. АН СССР. -1972. -№ 1. -С. 204-206.
- Лаверов Н.П., Барсуков В.Л. Влияние физико-механических свойств горных пород на рудообразование в депрессиях вулканического происхождения // Роль физико-механических свойств горных пород в локализации эндогенных месторождений. -М., 1973. - С.86-95.
- Соловьев Г.А. Петрофизическая характеристика эндогенных месторождений. -М., 1984. -161 с..
- Старостин В.И. Геодинамика и петрофизика рудных полей и месторождений. -М., 1984. -206 с.
- Афанасьев Н.С. Петрофизические особенности гранит-мигматит-гнейсовой ассоциации Воронежского кристаллического массива // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -1996. -№2. -С.164-177.
- Афанасьев Н.С. Петрофизическая оценка рудогенерации мафит-ультрамафитовых интрузий (на примере мамонского комплекса Воронежского кристаллического массива-ВКМ) // Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тр. междунар. конфер. -Воронеж, 1998. -С.264-279.
- Сафонов Ю. Г., Пэк А.А., Лукин Л.И., Малиновский Е.П. Геологическая среда и структурные условия гидротермального рудообразования. -М., 1982. -222 с.
- Каратаев Г.И., Пашкевич И.К. Методика комплексирования гравиметрии, магнитометрии и сейсмометрии при изучении глубинного строения земной коры // Геофиз. журн. -1985. -Т.7. - С.87-95.

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
					$\eta / \eta_M \gg 1$					
					$\eta / \eta_M \ll 1$					
					$\eta \gg \eta_M$					
					$\eta / \eta_M \ll 1$					

признаков.
или гранит А.2, Б2, В1, Г3, Д.1,Е4 (интенсивно разуплотненный)

(свойство, минсостав, химсостав, другие).

26. Каратаев Г.И., Пашкевич И.К. Геолого-математический анализ комплекса геофизических полей. -Киев, 1986. - 168 с.
27. Булина Л.В. Обобщенный разрез магнитной неоднородности земной коры территории СССР // Геофиз. журн. -1986. -Т.8. -С.79-84.
28. Каратаев Г.И., Пашкевич И.К. Геолого-математический анализ комплекса геофизических полей. -Киев, 1986. - 168 с.
29. Крутиховская З.А., Пашкевич И.К. Региональные магнитные аномалии как источник информации о глубинной структуре коры // Геофиз. журн. -1979. -Т. 46. - С.301-317.
30. Крутиховская З.А., Елисева С.В., Негруца В.З. и др. Региональные магнитные аномалии древних щитов и плит - индикаторы рифтогенов раннего докембрия // Докл. АН СССР. -1986. -№ 4. - С.950-954.
31. Печерский Д.М. и др. Магнетизм и условия образования изверженных горных пород. -М., 1975. - 288 с.
32. Беляевский Н.А. Строение земной коры континентов по геолого-геофизическим данным. -М., 1981. - 432 с.
33. Артюшков М.Е. Изостазия территории СССР. -М., 1975. -215 с.
34. Красовский С.С. Гравитационное моделирование глубинных структур земной коры и изостазия. -Киев, 1989. -346 с.
35. Афанасьев Н.С. Методология глубинного изучения земной коры. Сообщение 1. Петрофизические аспекты геолого-геофизического картирования докембрия на примере Воронежского кристаллического массива-ВКМ // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геол. -2000. -№ 9.- С.182-197.
36. Афанасьев Н.С., Надежка Л.И. Роль петрофизики в интерпретации региональных геофизических полей // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Тез. докл. -М., 1997. -С. 10-11.
37. Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тр. междунар. конфер. -Воронеж, 1998. - 348 с.
38. Гравитационная модель земной коры и верхней мантии Земли. -Киев, 1979. - 248 с.
39. Афанасьев Н. С.,Павловский В. И. Физические свойства основных и ультраосновных пород кристаллического фундамента юго-восточной части Воронежской антеклизы // Труды третьего совещания по проблемам изучения Воронежской антеклизы.- Воронеж,1966. - С.337-345.
40. Петрофизическая характеристика пород докембрия Воронежского кристаллического массива и ее использование при составлении геолого-геофизических схем / И.А. Жаворонкин, Р.С. Красовицкая, И.И. Кривцов, Г.И.Филаретов, Н.С. Афанасьев, В.И. Павловский // Петрофизическая характеристика Советской части Балтийского щита. -Апатиты, 1976. - С. 28-29.
41. Расчленение и корреляция дорифейских образований фундамента Восточно-Европейской платформы по петрофизическим данным / Н.С. Афанасьев, С.В. Богданова, Р.С Красовицкая, Т.А. Лапинская, А.С. Петренко, В.А. Пуура // Геология, петрология и металлогения кристаллических образований Восточно-Европейской платформы. -Т.1. -М., 1976. -С. 159-169.
42. Страхов В.Н. Две парадигмы в теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий // Изв. АН СССР. Физика Земли. -1987. -№ 1. - С. 46-61.

43. Белоусов В.В. Эндеогенные режимы материков. -М., 1978. -232 с.
44. Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 28-й сессии международного семинара им. Д.Г. Успенского. -М., 2001. - 144 с.
45. Геншафт Ю.С., Печерский Д.М., Шаронова З.В. и др. Магнитопетрологическое изучение условий формирования недр континентальной земной коры (на примере изучения ксенолитов из кимберлитов Якутии) // Физика Земли. -1995. -№ 3. - С.26-45.
46. Пашкевич И.К., Марковский В.С., Орлюк М.И. и др. Петрологическое истолкование природы региональной компоненты аномального магнитного поля // Геофиз. журн. -1986. -Т.8. - С. 26-36.
47. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. -М., 1973. -286 с.

УДК 550.837

АЛГОРИТМ УПРАВЛЯЕМОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ (УЭС), ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ, ОЗ ВЭЗ

Н.М.Пятин

ФГУГП "Воронежгеология", г. Воронеж

Предлагается алгоритм управляемой эквивалентной стабилизации (УЭС) применительно к решению ОЗ ВЭЗ, основанный на вероятностном подходе. Алгоритм УЭС может быть полезен при решении аналогичных неустойчивых задач методом подбора, неустойчивость которых обусловлена явлением эквивалентности.

Предлагаемый алгоритм УЭС является логическим развитием способа эквивалентной стабилизации (ЭС) и предназначен для повышения надежности решения ОЗ ВЭЗ. Алгоритм ЭС обоснован в работах [1-4] и проверен на значительном теоретическом и практическом материале (2,5- 3 тыс. ВЭЗ) при использовании в производственных условиях программ ряда ВЭЗ 2-ВЭЗ 6-градиент в 1992-2000 г. в районе ВКМ-КМА.

В алгоритмах ЭС и УЭС предлагается новый способ вероятностного подхода к решению неустойчивых (некорректных) задач, обзор которых и известные методы их решения приводятся в работе [5].

Алгоритм УЭС базируется на 5 ключевых моментах с использованием метода подбора на основе численного моделирования.

1. Использование явления эквивалентности как генератора сложной и неустойчивой эквивалентной квазистатистики.

2. Преобразование эквивалентной квазистатистики в условно-нормальную статистику с помощью алгоритмов ЭС и УЭС и стабилизация решения ОЗ ВЭЗ на этой основе.

3. Возможность оперативной оценки устойчивости решения ОЗ ВЭЗ на рядовых точках ВЭЗ и погрешности оценки расчетных параметров геоэлектрического разреза на параметрических и модельных (теоретических) ВЭЗ с помощью алгоритма сравнения [4] в процессе решения ОЗ ВЭЗ.

4. Возможность привязки расчетных параметров в благоприятных условиях с помощью алгоритма УЭС к стабилизирующим геоэлектрическим слоям и границам, а через них и к геологическим

слоям и границам в процессе программной обработки в полуавтоматическом режиме.

5. Применение плавных и управляемых априорных ограничений расчетных параметров геоэлектрического разреза с необходимой степенью детальности для более надежной стабилизации ОЗ ВЭЗ.

Пункты 1, 2, 3 уже реализованы в алгоритме эквивалентной стабилизации, ЭС (программы ВЭЗ 2 - ВЭЗ 6 - градиент), который тоже является частично управляемым. Ибо в алгоритме ЭС, наряду с начальным заданием приближенных и достаточно широких (около 10 раз) интервалов изменения параметров свободного поиска в автоматическом режиме или жесткого закрепления параметров разреза, выбранных геофизиком [6], работает, при свободном поиске незакрепленных параметров, алгоритм расчета ограничения сопротивления слоев и изменения мощности слоев в заданном интервале [1-3].

Это позволило стабилизировать средние относительные погрешности оценок расчетных параметров разреза в полуавтоматическом режиме на уровне $\leq \pm 10\%$ для суммарной глубины и $\leq \pm 20\%$ - для остальных параметров [3, 4].

Применение алгоритма УЭС улучшает эти оценки до $\leq \pm 5\%$ и $\leq \pm 10-15\%$ соответственно.

Рассмотрим приведенные тезисы более детально.

1. Использование явления эквивалентности как генератора квазистатистики путем многократной автоматической передачи расчетных параметров с выхода блока подбора на его вход, в рамках заданных и изменяемых по определенному алгоритму априорных и расчетных ограничений параметров разреза, подробно изложено в работах [1-3]. Этот