

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

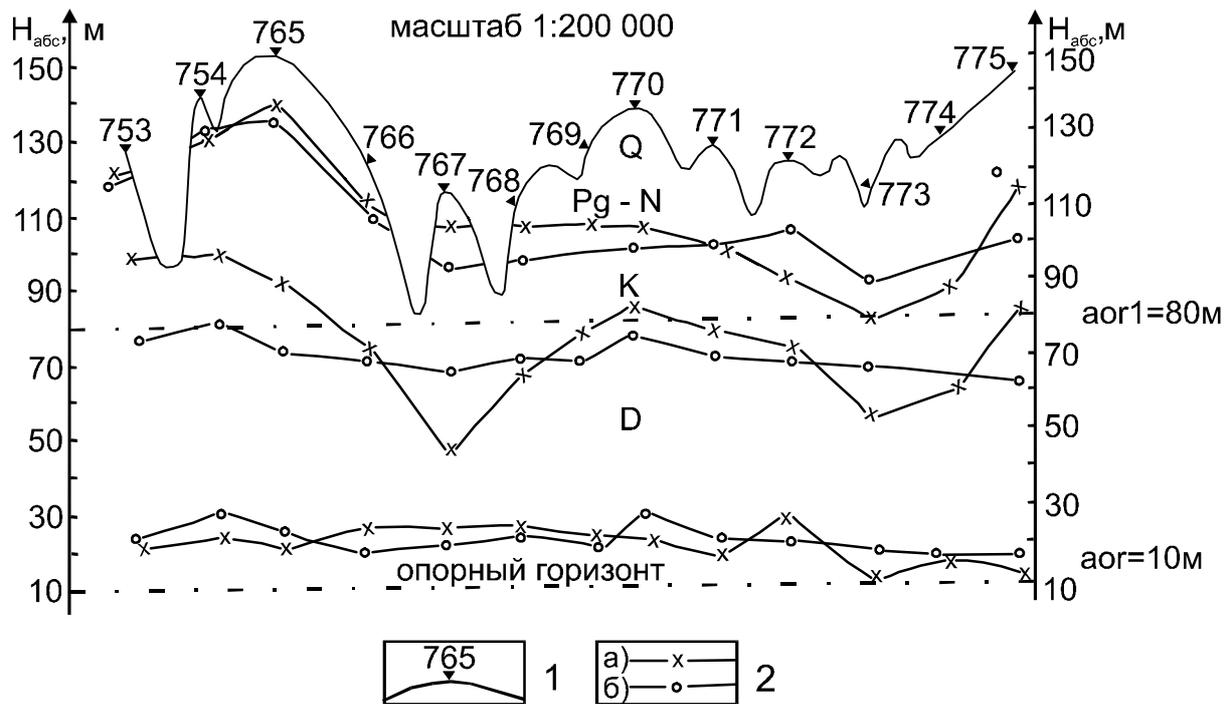


Рис. 1. Сопоставление расчета границ слоев по алгоритмам ЭС и УЭС. Практические ВЭС. Лист М-37-ХІ, профиль 10. ГДП-200, район ВКМ. Вариант сравнения: 1 – точки ВЭС на рельефе, их номера; 2 – границы слоев расчетные: а) по алгоритму ЭС, программа ВЭС 6 – градиент; б) по алгоритму УЭС, программа ВЭС 8 – градиент.

путь оправдал себя ввиду простоты и надежности алгоритма, а главное позволил превратить эквивалентность из основного дестабилизирующего фактора в элемент стабилизации алгоритмов ЭС и УЭС.

2. Важным моментом в этом подходе (в алгоритме ЭС) было то, что генерация квазистатистики расчетных параметров разреза проводилась хотя и в широких ($P/3-P*3$), но ограниченных интервалах, привязанных к конкретным геоэлектрическим условиям работ, где P – задаваемая в автоматическом или полуавтоматическом режиме расчетная или априорная величина искомого параметра. При этом возможная амплитуда изменения расчетных параметров ограничивается интервалом, задаваемым приближенно геофизиком для конкретных условий работ на основе известных ему геолого-геофизических данных.

Обработка получаемой квазистатистики по алгоритму средневзвешенного степенного осреднения [1-3], где вес равен величине, обратной погрешности подбора в степени $N=3$, которая может меняться геофизиком, позволяет получить в автоматизированном режиме на основе сотен-тысяч подборов одно стабилизированное решение со средней относительной погрешностью $\leq \pm 10-20\%$ [1-4] по алгоритму ЭС и средней квадратической погрешности $\leq \pm 5-15\%$ – по алгоритму УЭС, таблица.

3. Хотя сам подход достаточно очевиден и, как позднее выяснилось, издавна применялся в частности в геодезии при методике парных измерений [7], использование его для оценки надежности вычислений параметров геоэлектрического разреза путем математического моделирования, кроме алго-

ритма сравнения, автору пока неизвестно. Кстати, возможен вариант алгоритма многократного сравнения. Более того, детальный анализ работы [4] показал, что алгоритм сравнения дает возможность выявить важное следствие работы алгоритма эквивалентной стабилизации и одну из причин его стабилизирующего фактора. Оказалось, что разброс погрешности оценок расчетных параметров и их устойчивости достаточно близко соответствует кривой интеграла вероятностей нормального распределения [7, 8]. Отклонение от нее реального (наблюдаемого фактически) распределения погрешности расчета параметров не превышает 9%, таблица.

Это означает, что обработка по алгоритму ЭС и тем более УЭС переводит сложную и неустойчивую эквивалентную квазистатистику в условно-нормальную статистику, таблица.

Однако стабилизирующая роль алгоритма ЭС, терпимая для относительно простого разреза, явно недостаточна для сложного геоэлектрического разреза, рис.1. Вероятно в этом случае вместо одного компактного множества [5] расчетных параметров (приближенных решений ОЗ ВЭС) имеем их набор, рис.2, что и дает неустойчивость алгоритма ЭС в этих условиях.

В рамках алгоритма ЭС учитываются все компактные множества (эквивалентные ямы, рис.2). Они объединяются путем средневзвешенного степенного осреднения, в результате чего и получается расчетный параметр разреза. При этом наибольший вес имеют компактные множества решений с минимальной погрешностью подбора, эквивалентные ямы, рис. 2. В алгоритме УЭС для слоев-стабилиза-

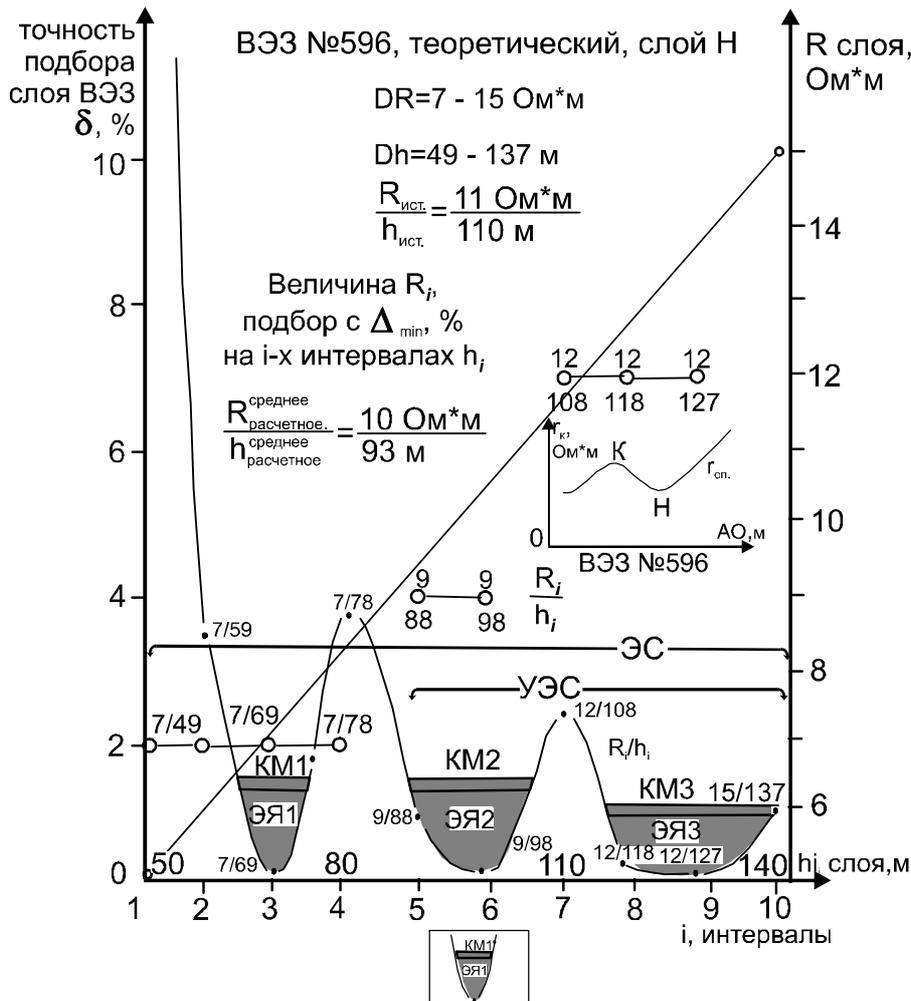


Рис. 2. Характеристика эквивалентного послойного подбора, программа ВЭЗ 5 – градиент [3]. Компактное множество решений, КМ [5] (эквивалентных ям, ЭЯ) подбора слоя ВЭЗ на интервале h_i и R_i с δ_{min} , % на каждом интервале i , практический пример.

торов набор компактных множеств ограничен более узким их пакетом, (рис.2), которые затем дополнительно итерациями и циклами разбиваются на еще более детальные компактные подмножества, рис.3. Их статистическая обработка по методике средневзвешенного степенного осреднения и действие закона больших чисел [8] в конечном счете, улучшают надежность расчета параметров слоев-стабилизаторов и в целом параметров всего разреза, хотя и в меньшей мере, особенно в его верхней части.

Эквивалентная характеристика рис.2 отражает лишь подбор одного слоя ВЭЗ (программа ВЭЗ 5-градиент [3]). Подбор всей многослойной кривой ВЭЗ (как правило, не более 10 слоев) дает, очевидно, более сложную многомерную картину эквива-

лентной характеристики, реальное изображение которой затруднено. Ибо изображение эквивалентной характеристики одного слоя уже является фактически трехмерным, но условно переведено в двухмерное, а многослойного разреза — многомерным. Поэтому рис.2 отражает лишь весьма схематически всю сложность реальной эквивалентной квазистатистики.

4. Особенно ощутимой стала необходимость использования хотя бы частичной программной увязки реальных геологических и геоэлектрических границ при работе по ГДП–200 в сложной геоэлектрической обстановке чехла ВКМ и тысячах точек ВЭЗ на планшетах. Быстрый формальный подбор (≤ 1 мин.) плохо совместим с медленным (10-15 мин.) и неопределенным решением по увязке реальных геоэлектрических и литологических границ, что резко снижает эффективность машинной обработки. Это характерно и для программы IPI [9], работа с которой велась параллельно.

Поэтому автором был разработан алгоритм УЭС, дополняющий алгоритм ЭС, что позволило при наличии в разрезе стабилизирующих параметров в определенной мере (таблица) решить вопрос стабилизации расчетных параметров и их увязки с геолого-геоэлектрическим разрезом. Причем стабилизирующим элементом может быть или сам параметр (для ВЭЗ–сопротивления слоя) или величина, связанная с мощностью надпорного слоя, т.е. абсолютные отметки кровли и подошвы этого слоя. Но при условии, что стабилизирующий параметр слоя-

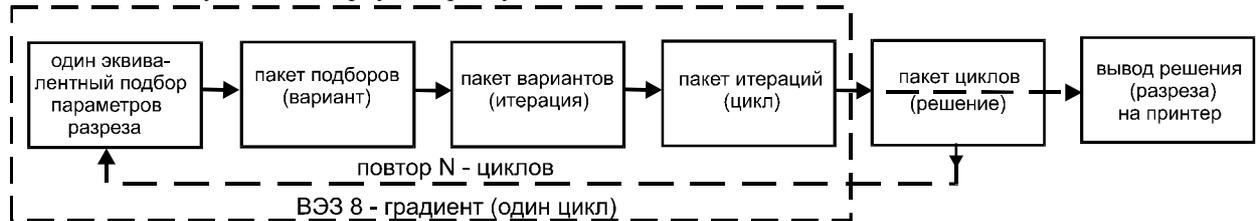
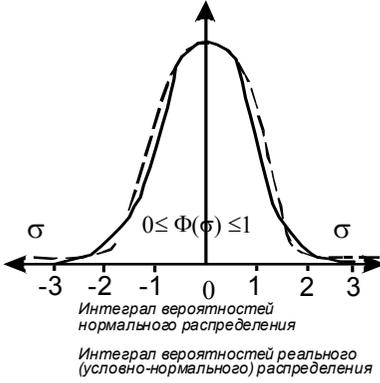


Рис. 3. Блок-схема алгоритма УЭС. Расчет параметров геоэлектрического разреза на точке ВЭЗ.

Таблица

Расчет характеристик реального распределения погрешностей оценок решения ОЗ ВЭЗ по алгоритмам ЭС и УЭС (программы ВЭЗ 6 – ВЭЗ 8 – градиент) и сопоставление их с характеристиками нормального распределения

№ п/п	Наименование параметра	Средне-квадратическая погрешность ±σ, %	Рядовые ВЭЗ, устойчивость оценок параметров			Средне-квадратическая погрешность ±σ, %	Параметрические и теоретические ВЭЗ, погрешность оценок параметров			Вероятности распределений, нормального и реального, по интервалам P _i нормальное			Примечания
			Кол-во расчетов, всего K _Σ	(Kδ ₁ ≤σ)/K _Σ расчетов	(Kδ ₁ ≤σ)/K _Σ относит. ед.		Кол-во расчетов, всего K _Σ	(Kδ ₁ ≤σ)/K _Σ расчетов	(Kδ ₁ ≤σ)/K _Σ относит. ед.	δ ₁ ≤σ P ₁ =0,68	δ ₂ ≤2σ P ₂ =0,95	δ ₃ ≤3σ P ₃ =0,997	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
программа ВЭЗ 6 – градиент													
1	H ^c , глубина подошвы слоев	±17,5	20	14/20	0,70	±18,8	28	18/28	0,64	0,70	0,95	1,0	Устойчивость оценки рядовые ВЭЗ ИЛ 34
2	ρ ^c сопротивление слоев	±19,5	25	18/25	0,72	±13,9	35	23/35	0,66	0,72	0,88	0,94	
3	H _Σ общая мощность слоев	±9,0	5	4/5	0,80	±8,5	7	5/7	0,72	0,80	1,0	1,0	
	Итого		50		0,74		70		0,67	0,74	0,94	0,980	
программа ВЭЗ 8 – градиент													
1	H ^c	±9,8	98	73/98	0,74					0,74	0,91	0,96	рядовые ВЭЗ В 11.104
2	ρ ^c	±11,6	112	81/112	0,72					0,72	0,92	0,96	
3	H _Σ	±2,6	16	12/16	0,75					0,75	0,95	1,0	
	Итого		226		0,74					0,74	0,92	0,974	
	Всего		276							0,74	0,93	0,977	
Среднее отклонение вероятностей ошибок (погрешностей) реального распределения от нормального. Объем выборки = 276 расчетам										9%	-2%	-2%	
1	H ^c					±5,9	28	19/28	0,68	0,68	0,93	1,0	Погрешность оценки теоретические ВЭЗ КМА3.12
2	ρ ^c					±6,3	35	26/35	0,74	0,74	0,89	1,0	
3	H _Σ					±4,3	7	5/7	0,72	0,72	0,87	0,98	
	Итого						70		0,71	0,71	0,89	0,983	
1	H ^c					±9,5	60	37/60	0,62	0,62	0,89	0,94	теоретические ВЭЗ CMIRT2
2	ρ ^c					±9,4	74	47/74	0,64	0,64	0,91	0,93	
3	H _Σ					±4,4	14	12/14	0,86	0,86	0,93	1,0	
	Итого						148		0,71	0,71	0,92	0,926	
1	H ^c					±11,5	44	29/44	0,66	0,66	0,86	1,0	параметрические ВЭЗ PARSS1
2	ρ ^c					±7,7	56	36/56	0,64	0,64	0,84	0,96	
3	H _Σ					±2,7	12	10/12	0,84	0,84	0,92	1,0	
	Итого						112		0,71	0,71	0,87	0,976	
	Всего						330			0,71	0,89	0,962	
Среднее отклонение вероятностей ошибок (погрешностей) реального распределения от нормального. Объем выборки =330 расчетам										4%	-6%	-4%	



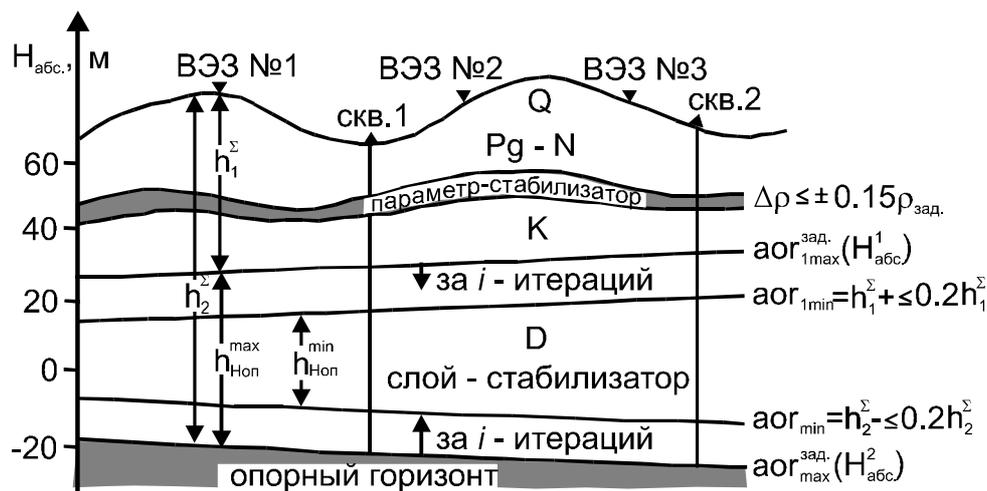


Рис. 4. Схема привязки решения ОЗ ВЭЗ к стабилизирующим слоям и параметрам и динамика изменения параметров.

стабилизатора варьирует в пределах $\leq \pm 10-15\%$ от заданной геофизиком величины. Чем больше эти отклонения, тем меньше стабилизация, тем алгоритм УЭС ближе к алгоритму ЭС.

В каждом регионе могут быть свои стабилизирующие параметры. В районе ВКМ–КМА такими стабилизаторами могут быть относительно выдержанные $H_{абс.}$ кровли и подошвы морских отложений девона (надопорный слой) или, например, низкоомные глины киевского горизонта палеогена. Выбор слоя-стабилизатора и его обоснование — дело геофизика. В качестве стабилизирующего параметра могут быть использованы сопротивления любых слоев, если они варьирует в интервале $\leq \pm 10-15\%$.

Поведение стабилизирующих параметров (кровли и подошвы) морских отложений достаточно надежно прогнозируется по бурению и каротажу скважин и приближенно отслеживаются программой по этим данным в районе ВКМ без особых проблем, рис.4. В целом вероятностный подход, предложенный в алгоритме ЭС, значительно усиливается в алгоритме УЭС: от сотен подборов при ЭС до тысяч — при УЭС на каждую точку ВЭЗ. И что особенно важно, при УЭС интервалы работы статистики становятся более компактными, т.к. привязываются к слоям или параметрам-стабилизаторам, что повышает качество статистики и дает возможность более успешно подавлять случайное и выявлять закономерное, используя соотношения закона больших чисел [8], что, в конечном счете, и улучшает качество решения.

5. Схема привязки решения ОЗ ВЭЗ к стабилизирующим параметрам и слоям, а также динамика их управляемого изменения приведена на рис.4. Алгоритм УЭС (его первая часть) реализован в программе ВЭЗ 8–градиент. Блок-схема его приведена на рис.3. По результатам обработки профиля ВЭЗ на принтере имеем геоэлектрический разрез после корреляции геофизиком границ слоев, рис.1. При наличии группы профилей может быть смонтирована блок-диаграмма профилей для их увязки по площа-

ди. В последующем это может быть выполнено средствами машинной графики [10].

В дальнейшем будет реализована возможность изменения заданных стабилизирующих параметров в более широких и управляемых пределах (по слоям, по циклам, пока N циклов = 1, рис.3). Это улучшит надежность и гибкость алгоритма и его характеристики. Приведенные выше оценки погрешности расчета параметров (таблица) являются предварительными и будут уточняться по мере развития алгоритма УЭС и накопления статистики вычислений с его использованием.

Поскольку ОЗ ВЭЗ является типичной некорректной (неустойчивой) задачей, это дает возможность использовать предлагаемый алгоритм УЭС как один из возможных подходов при решении аналогичных задач этого класса [5] методом подбора, если их неустойчивость обусловлена явлением эквивалентности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятин Н.М. Способ эквивалентной стабилизации при решении обратной задачи ВЭЗ // Геологическое изучение и использование недр. – 1994. – Вып.3–4. – С.52–61.
2. Пятин Н.М. Алгоритм способа эквивалентной стабилизации (применительно к решению обратной задачи ВЭЗ) // Геологическое изучение и использование недр. – 1995. – Вып.2. – С.47–52.
3. Пятин Н.М. Способ эквивалентной стабилизации и его алгоритм // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Тр. междунар. конфер. – Воронеж, 1998. – С.135–143.
4. Пятин Н.М. К вопросу оценки устойчивости и погрешности решения обратной задачи ВЭЗ на ЭВМ (на примере программы ВЭЗ 6–градиент) // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. – 1998. – № 5. – С.198–200.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М., 1986 – 287 с.
6. Рыжов А.А. Программы машинной интерпретации ВЭЗ и ВЭЗ ВП. – М., 1978. – 87 с.

7. Большаков В.Д. Теория ошибок наблюдений. – М., 1983. – 223 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М., 1969. – 576 с.
9. Электрическое зондирование геологической среды / Ред. В.К. Хмельской, В.А. Шевнин. Ч. 2. – М., 1992. – 200 с.
10. Аузин А.А., Глазнев В.В. Разработка трехмерных компьютерных моделей геологических сред // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. – 2000. – № 10. – С. 177-182.

УДК 550.8.13

ОБЪЕМНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДНЫХ ОБЪЕКТОВ

А.А. Аузин, В.В. Глазнев

Воронежский государственный университет

В работе обращается внимание на основные, наиболее важные особенности объемного моделирования рудных объектов и рассматриваются возможные практические подходы к его выполнению. Определены требования к программному обеспечению, направленному на реализацию возможности формирования объемных моделей рудных тел относительно сложной формы. Приводится ряд примеров применения системы компьютерного трехмерного объектно-ориентированного моделирования КОММОДОР для целей геометризации рудных залежей в пределах ряда известных рудных месторождений Кольского полуострова.

В геологии под математической моделью обычно понимают приближенное описание с помощью математических символов какого-либо геологического объекта, явления или процесса, содержащее в себе его свойства, существенные для конкретных целей моделирования, и, в пределах данных целей, способное заменить реальные объекты, явления или процессы при их изучении [1]. Накопленный преимущественно в последние годы опыт моделирования геологических объектов, свидетельствует, что формирование трехмерных компьютерных структурно-геологических моделей позволяет достигнуть максимально полной и адекватной содержанию реализации и последующего хранения привлекаемой для обеспечения моделирования геолого-геофизической информации. К важнейшим преимуществам компьютерных моделей можно также отнести и то, что они, будучи сохраненными в базе данных, могут относительно легко корректироваться по мере получения дополнительной информации или переинтерпретации уже имеющейся. Использование объемных моделей облегчает выявление и анализ пространственной динамики изменения геолого-геофизических или иных параметров исследуемых объектов, упрощает поиск значимых особенностей их геологического строения.

Из числа объемных структурных геолого-математических моделей, в практике геологоразведочных работ применение нашли монолитные, контурные (или оболочечные) и грид-модели.

Монолитные модели представляют собой некоторое виртуальное пространство, заключенное внутри замкнутой сплошной поверхности, адекватное по форме объекту моделирования. Этому ограниченному пространству могут быть приданы соответствующие визуальные свойства - цвет, крап и т.п.

Контурные модели обычно представляют собой рельефные поверхности, отражающие форму объекта моделирования, его оболочку. В ряде случаев вполне адекватное описание обводов объекта возможно набором внешних контуров его сечений (часто - взаимнопараллельных).

Грид-модели, которые можно назвать и трехмерными сеточными, состоят из отдельных (обычно имеющих вид прямоугольных параллелепипедов) ячеек, размеры которых определяются требуемой точностью решения стоящих перед моделированием задач. С целью упрощения моделирования таких геологических структур как наклонные разломы, выклинивающиеся пласты и т.п., могут использоваться трехмерные сетки с непрямоугольными ячейками.

Система компьютерного объектно-ориентированного моделирования КОММОДОР [2,4], предназначенная для геолого-математического моделирования различных геологических сред и явлений, позволяет реализовать возможность формирования объемных моделей месторождений полезных ископаемых не только на любых этапах разведочных работ, в том числе и на начальных стадиях их изучения, но и в процессе их разработки. Практика показывает, что наибольшую прикладную эффективность имеет формирование так называемых "постоянно действующих" структурно-геологических моделей, которые в процессе разведки месторождений не только допускают, но и предполагают последовательную корректировку по мере получения новой информации. В оптимальном варианте, подобная модель не прекращает своего развития с переводом месторождения в режим эксплуатации и служит основой для создания его постоянно действующей геолого-технологической модели, функционирование которой позволяет вести мониторинг процесса