

УДК 550.837

## СПОСОБ РЕШЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ ЗАДАЧ (НА ПРИМЕРЕ ОЗ ВЭЗ)

Н.М. Пятин

ФГУГП “Воронежгеология”

Предлагаемый способ является дальнейшим развитием алгоритма управляемой эквивалентной стабилизации (УЭС), обоснование которого приведено в работе [1]. Дополнительные исследования 2001–2003 гг. подтвердили реальность и надёжность алгоритма УЭС, а также значительный потенциал расширения его возможностей, реализованных в алгоритме УЭС1, улучшенном варианте алгоритма УЭС (рисунок).

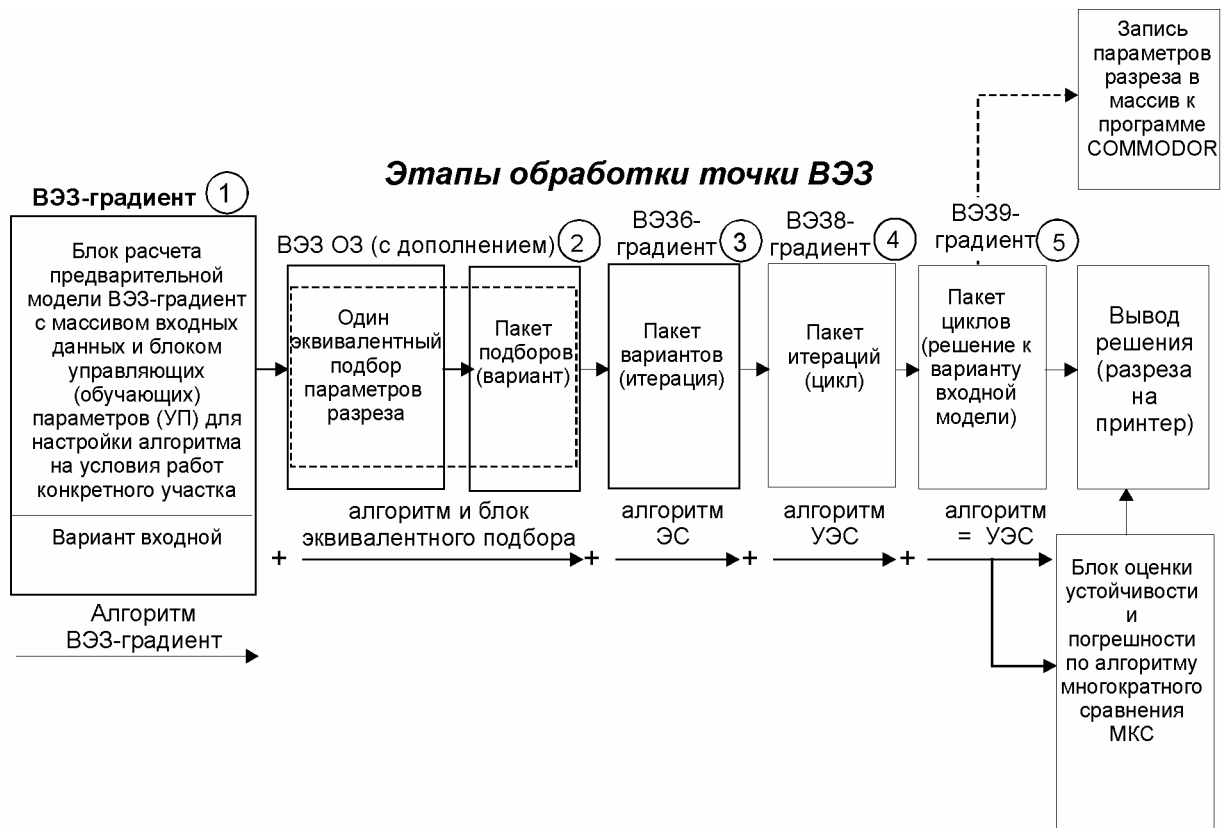
Задача исследований заключалась в том, чтобы алгоритм УЭС1 был устойчив к более широкому интервалу неустойчивости параметров реальных геоэлектрических разрезов, чем алгоритм УЭС, что весьма важно для практики. Необходимо было также разработать новый вариант алгоритма оперативной оценки устойчивости решений обратной задачи ВЭЗ (ОЗ ВЭЗ), без дополнительных затрат времени геофизика. Вероятностный подход к решению об-

ратной задачи ВЭЗ, применённый в алгоритме ЭС УЭС, был сохранён и усилен в алгоритме УЭС1.

Изложенные в работе [1] пять ключевых моментов (КМ) алгоритма УЭС, остались и в алгоритме УЭС1. Некоторые из них расширены (КМ3, 5) или существенно видоизменены (КМ4), о чём речь пойдет ниже в более детальном виде, но в том же порядке, как эти ключевые моменты были изложены в работе [1].

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

Остался качественно без изменений. Но количество подборов на точке ВЭЗ может быть увеличено до сотен тысяч и более. Это обусловлено необходимостью улучшения детальности исследования разреза, что конкретно определяется и задается геофизиком.



Блок-схема алгоритма УЭС1.

**КМ 2.** Преобразование эквивалентности квазистатистики в условно-нормальную статистику с помощью алгоритмов ЭС, УЭС.

Дополнено в алгоритме УЭС 1 возможностью использования многоциклового режима, повышающего качество решения в условиях неустойчивости параметров в более широком интервале (до  $\pm 20\%$  –  $\pm 30\%$ ) за счет увеличения детальности расчётов и улучшения стабильности.

**КМ 3.** Возможность оперативной оценки устойчивости решения ОЗ ВЭЗ на рядовых точках ВЭЗ и погрешности расчетных параметров геоэлектрического разреза на параметрических и модельных (теоретических) ВЭЗ.

Кардинально улучшена, так как вместо алгоритма однократного сравнения (ОС) [2] разработан и реализован алгоритм многократного сравнения (МКС).

Алгоритм МКС не требует дополнительной затраты времени геофизика на контроль параметров и слоистостью разреза, что было необходимо в алгоритме ОС особенно при слабодифференцированных разрезах.

В алгоритме МКС это происходит автоматически через использование генератора дестабилизации, близкого по значению генератору случайных ошибок, о чём речь пойдет ниже. Характеристики генератора дестабилизации параметров входного разреза, его детальность задаются геофизиком через управляющие параметры (УП) массива входных данных перед началом расчета (рисунк).

Автоматизация оценок устойчивости и погрешности в алгоритме МКС позволяет и делает целесообразным режим сплошных, а не выборочных, как в алгоритме ОС, оценок всех необходимых параметров в процессе расчета на каждой точке ВЭЗ. При этом затраты машинного времени по сравнению с режимом без оценки увеличиваются на более чем в два раза, что несущественно уже на ПК серии 486 и выше.

Алгоритм МКС базируется на многократном сравнении на каждой обрабатываемой точке ВЭЗ двух расчётных разрезов: основного разреза, который условно принимается за истинный (для рядовых точек ВЭЗ) или является таковым для модельных (частично параметрических) точек ВЭЗ и контрольного расчётного разреза. Тот и другой расчётные разрезы выполняются и сравниваются программно, без вмешательства геофизика с выдачей результатов сравнения на принтер и монитор как по каждому слою точки ВЭЗ, и в целом по точке ВЭЗ, так и по их совокупности, то есть профилю, маршруту.

Отличие алгоритма МКС от алгоритма ОС [2] в том, что при контрольном вычислении за основу входных параметров разреза принимаются расчётные параметры основного разреза, изменяемые по заданному алгоритму дестабилизации, а не геофизиком, как зачастую в ОС. Вид этого алгоритма или их набор можно в дальнейшем менять в зависимости от специфики задачи. Но пока используется алгоритм

“пилы” с переменной и нарастающей амплитудой от  $+d_i$  до  $-d_i$  для всех параметров разреза одновременно. Амплитуда отклонения дестабилизации  $A_{it}$  определяется по формуле

$$A_{it} = \frac{d_i}{k_i} \cdot it \quad (1),$$

где  $k_i$  – количество итераций;  $it$  – текущая итерация, причём  $it$  чётные программно определяются со знаком минус,  $it$  нечётные – со знаком плюс;  $d_i$  – максимальная амплитуда отклонения, в относительных единицах;  $A_{it}$  – коэффициент дестабилизации параметров при текущей итерации  $it$ , в относительных единицах;  $k_i, d_i$  – задаются геофизиком через управляющие параметры (УП) во входном массиве (файле) данных.

Причём размах амплитуды  $d_i$  может регулироваться геофизиком. Количество сравнений также задаётся геофизиком через управляющие параметры (количество итераций), хотя в дальнейшем эта процедура может быть ограничена амплитудой  $\pm 50\%$ , что соответствует полному размаху изменений входных параметров до  $100\%$ .

**КМ 4.** Возможность привязки расчётных 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.

В алгоритме УЭС эта возможность существенно улучшена. Благоприятные условия для алгоритма УЭС (слои-стабилизаторы) существуют, в основном, для нижних, более глубоких слоёв разреза, обычно морских отложений, абсолютные отметки кровли и подошвы которых более устойчивы по сравнению с верхней частью разреза, где такая устойчивость не правило, а исключение.

Надежда на параметр-стабилизатор для верхней части разреза [1] в полной мере не оправдалась, так как стабильность сопротивления даже выдержанных по этому параметру слоёв невелика (как правило не лучше  $\pm 20\%$ ). Поэтому пришлось ввести интерпретацию ВЭЗ по частям: сначала верхней части ВЭЗ с управляемым закреплением не только сопротивления слоев Н, К и первого слоя, но и абсолютной отметки одной из поверхностей (кровли или подошвы), то есть ввести поверхность-стабилизатор.

При этом

$$\rho_{\text{слоя}} = \rho_{\text{слоя}}^{\text{зад}} \pm \delta_{\rho} \rho_{\text{слоя}}^{\text{зад}} \quad (2);$$

$$H_{\text{пов}}^{\text{абс}} = H_{\text{зад}}^{\text{абс}} \pm \delta_H H_{\text{зад}}^{\text{абс}} \quad (3).$$

Сопротивление слоя-стабилизатора, его стабилизирующая поверхность (кровля и подошва), величина интервала изменения и детальность изменения параметров  $\delta_{\rho}$  и  $\delta_H$  задаётся геофизиком. Знак изменения определяется программно в зависимости от типа слоя.

Это существенно улучшило стабилизацию верхней части разреза в среднем на уровне  $\leq (\pm 10\%)$ ,

то есть на том же уровне, что и в нижней части разреза [1], хотя приведённые данные являются предварительными и требуют уточнения.

В дальнейшем на втором этапе предполагается все расчётные сопротивления слоёв верхней части разреза жестко закреплять и производить подбор всей кривой ВЭЗ с управляемым закреплением кровли и подошвы слоя-стабилизатора в нижней части разреза с его  $aoг_1$  – абсолютной отметкой кровли и  $aoг$  – абсолютной отметкой подошвы. При этом

$$\begin{aligned} H_{\text{кров.}}^{\text{абс.}} &= aoг_1 + \Delta h_{\text{отн.}} aoг_1 & (4), \\ H_{\text{под.}}^{\text{абс.}} &= aoг - \Delta h_{\text{отн.}} aoг & ). \end{aligned}$$

Причём,  $aoг$ ,  $aoг_1$ ,  $\Delta h_{\text{отн.}}$  задаются, а детальность их изменения регулируется геофизиком через управляющие параметры (рисунок) при настройке программы на конкретный участок работ. Остальные процедуры предполагается выполнять программно, не требуя дополнительных затрат времени геофизика. Эта проблема чисто технологическая и вполне решаемая. Поэтому алгоритм УЭС1 позволяет успешно работать как в верхней (от первых метров – до десятков метров), так и в нижней части разреза (от десятков до сотен метров). Возможная глубинность расчетов ограничивается лишь полученной полевой или модельной кривой ВЭЗ.

При отсутствии слоя-стабилизатора весь разрез можно обрабатывать по одноэтапному верхнему варианту.

**КМ5. Применение плавных и управляемых ограничений расчетных параметров разреза с необходимой степенью детальности для надежной стабилизации ОЗ ВЭЗ.**

Дополнительно в алгоритме УЭС1 введён многоциклового режим вычислений (МЦВ), хотя возможен и одноциклового (ОЦВ), как в алгоритме УЭС (рисунок), что определяется геофизиком.

Режим МЦВ позволяет работать примерно с такой же эффективностью, как и ОЦВ, но в условиях более широкого интервала неустойчивости (до  $\pm 20\%$  –  $\pm 30\%$ ), и естественно требует увеличения затрат машинного времени, но несущественных.

Применение интервальных плавных и управляемых ограничений с квантованием их с любой необходимой степенью детальности, позволяет получать оценки погрешности и устойчивости параметров геоэлектрического разреза на приемлемом уровне (в среднем  $\leq \pm 10\%$ ).

На основе полученных расчетов в дальнейшем предполагается формирование числовой трехмерной матрицы для программы COMMODOR [3], рисунок.

Алгоритм УЭС1 и его предыдущие этапы ЭС, УЭС [1, 4, 5] были разработаны применительно к ОЗ ВЭЗ, которая является типичной неустойчивой (некорректной) задачей. Неустойчивость её определяется явлением эквивалентности, то есть неопределенности и проявляется обычно в сложных задачах поиска неизвестной причины по известному следствию,

что имеет место в обратных задачах геофизики, радиофизики и т.д. [7].

А раз так, то алгоритм УЭС1, точнее его ключевые моменты могут быть использованы как основа для разработки аналогичных по своему вероятностному подходу, на основе математического моделирования, подобных же алгоритмов для других конкретных задач этого класса. До сих пор здесь преобладает детерминистский подход [7].

Преимущество вероятностного подхода (алгоритм УЭС1) определяется тем, что в нём в качестве исходного элемента алгоритма любой неустойчивой задачи, используется уже известное эквивалентное (неустойчивое) её решение, то есть блок эквивалентного подбора (см. рисунок). Этот блок подбора встраивается в систему связей, ограничений и взаимодействия алгоритма УЭС1 и всех его предыдущих этапов (ВЭЗ-градиент, ЭС, УЭС).

Автором по аналогичной схеме был использован блок эквивалентного решения с дополнительной эквивалентной оптимизацией обратной задачи ВЭЗ (ВЭЗ ОЗ) Рыжова А.А. [8, 9], обработанного на ЭВМ СМ-1 Капраловым В.А.

При этом система связей блока ВЭЗ ОЗ была известна автору лишь схематически. Этот блок ВЭЗ ОЗ и стал первой программной оболочкой будущего пакета. Но вначале автором был разработан блок расчёта предварительной модели геоэлектрического разреза ВЭЗ-градиент в режиме автомата-полуавтомата на основе способа особых точек (алгоритм ВЭЗ-градиент) [10, 11]. Блок ВЭЗ-градиент (см. рисунок) может работать и автономно. По объёму он превышает блок ВЭЗ ОЗ и практически является управляющим блоком всей системы. Затем блок подбора и блок ВЭЗ-градиент встраивались в оболочку эквивалентной стабилизации (ЭС) с весьма основательным дополнением в подпрограмму эквивалентной оптимизации “ОРТ” (системы ограничений параметров режиме автомата-полуавтомата с увеличением объёма в подпрограмме “ОРТ” в 1,5 раза). Другая подпрограмма “ТЕКСТ”, была увеличена по объёму в 3,5 раза и т.д.

Разработанные программы предыдущих этапов: эквивалентной стабилизации, ЭС (ВЭЗ 2, 4, 6-градиент) встраивались в оболочку алгоритма управляемой эквивалентной стабилизации УЭС (программа ВЭЗ8-градиент [1]), а затем, последовательно в оболочку связей алгоритма УЭС1 (ВЭЗ9-градиент). В итоге имеем единую систему-программу ВЭЗ9-градиент с достаточно простой математикой, но сложной логикой, надёжно и устойчиво работающей как на теоретическом, так и на практическом материале при средней погрешности оценок расчёта параметров геоэлектрического разреза на уровне  $\leq \pm 5\%$  для глубин и  $\leq \pm 10\%$  для мощностей и сопротивлений. Поэтому способ, основанный на алгоритме УЭС1, и называется способом устойчивого решения неустойчивых задач, с оперативной оценкой устойчивости и погрешности реше-

ния. Это можно в значительной мере отнести и к его предыдущему варианту [1].

Не видно оснований, чтобы не рассматривать предлагаемый способ УЭС (для краткости). Как один из возможных путей решения аналогичных неустойчивых задач, именно как один из возможных вариантов их решения с естественной доработкой и видоизменением алгоритма УЭС1 к реальной ситуации конкретной задачи.

Следует отметить, что получаемый вариант решения отвечает реальной входной модели (для метода ВЭЗ – тип разреза), вид которой контролируется геофизиком и геологом. Другой входной модели может соответствовать несколько иной вариант решения. Выбор приемлемого варианта решения из пакетов соответствующих входных моделей является прерогативой – в случае метода ВЭЗ – геолога и геофизика, поскольку должен учитываться в том числе и неформальным знанием геолога и геофизика, как результат накопленного ими опыта.

Таким образом, неопределённость сохраняется. Но на качественно ином, геологическом уровне. И это естественный путь последовательного решения сложных практических задач.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пятин Н.М. Алгоритм управления эквивалентной стабилизации (УЭС), применительно к решению обратной задачи ВЭЗ, ОЗ ВЭЗ // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. – 2001. – №12. – С. 172–177.
2. Пятин Н.М. К вопросу оценки устойчивости и погрешности решения обратной задачи ВЭЗ на ЭВМ (на примере программы ВЭЗ6-градиент) // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. – 1998. – №5. – С. 198–200.
3. Аузин А.А., Глазнев В.В. Разработка трёхмерных компьютерных моделей геологических сред // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. геологическая. – 2000. – №10. – С. 177–182.
4. Пятин Н.М. Способ эквивалентной стабилизации при решении обратной задачи ВЭЗ // Геологическое изучение и использование недр. –1999. – Вып. 3–4. – С. 52–61.
5. Пятин Н.М. Алгоритм способа эквивалентной стабилизации (применительно к решению обратной задачи ВЭЗ) // Геологическое изучение и использование недр. –1995. – Вып. 2. – С.47–52.
6. 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.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М., 1986. – 287 с.
8. Рыжов А.А., Гудзь В.И. Программы машинной интерпретации данных ВЭЗ и ВЭЗ ВП. – М., 1978. – 87 с.
9. Рыжов А.А., Каринская И.Д. Программы решения прямой и обратной задачи ВЭЗ и ВЭЗ ВП для ЭВМ ЕС. – М., 1982. – 133 с.
10. Пятин Н.М. Алгоритм приближённого решения обратной задачи ВЭЗ // Методика и результаты геофизических исследований Воронежского кристаллического массива. –Воронеж, 1985. – С. 103–110.
11. Пятин Н.М. Программы обработки ВЭЗ, ВЭЗ ВП на СМ ЭВМ // Передовой научно-производственный опыт: Информационный сборник. – М., 1989. -№15. - С.16–24.