

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексование геофизических методов: учебник для вузов. – Тверь: ГЕРС, 2004. – 294 с.
2. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2 / пер. с англ. и ред. Ю.Н. Артеменко. – 3-е изд. – СПб.: Диалектика, 2020. – 846 с.: ил., табл.
3. Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. Машинное обучение. – СПб.: Питер, 2017. – 336 с.

УДК 550.83.017+550.837

DOI:10.7242/echo.2021.3.11

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

А.А. Тайницкий

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Решение обратной задачи ВЭЗ связано с поиском глобального минимума функции невязки, наиболее часто выраженной среднеквадратическим расхождением экспериментальных и теоретических значений кажущихся электрических сопротивлений кривых зондирования. Функция невязки сложным образом зависит от большого количества параметров, поэтому одной из проблем поиска минимума является ее сложный многоэкстремальный «овражный» характер, что может приводить к попаданию в локальный минимум. В рамках данной статьи рассмотрена возможность решения одномерной обратной задачи ВЭЗ стохастическим методом глобальной оптимизации широко известный как метод дифференциальной эволюции.

**Ключевые слова:** электроразведка, вертикальное электрическое зондирование, обратная задача, стохастические методы, метод дифференциальной эволюции.

### Введение

Решение обратной задачи ВЭЗ связано с определением параметров геоэлектрического разреза по существующему распределению значений физического поля, в данном случае кажущегося сопротивления. Для решения данной задачи наибольшее распространение получили методы подбора, основанные на сравнении наблюдаемой и теоретической кривой зондирования, рассчитанной для заданных значений параметров разреза [1]. В качестве минимизируемой (целевой) функции в большинстве случаев выступает среднеквадратическое расхождение экспериментальных  $\rho_k^{\text{э}}$  и теоретических  $\rho_k^T$  значений кажущихся электрических сопротивлений кривых зондирования на всех  $M$  разносах линии  $AB$ . Поиск минимума целевой функции выполняется с помощью алгоритмов многомерной оптимизации, среди которых наиболее популярны различные модификации метода наискорейшего спуска и метод Ньютона [2]. Сущность методов заключается в последовательном уточнении начального приближения к вектору параметров  $w = \{ \rho_1, \dots, \rho_N, h_1, \dots, h_N \}$  геоэлектрического разреза, обеспечивающего минимум целевой функции  $f$  при движении в направлении, определяемом антиградиентом функции  $f$ :

$$f = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left( 1 - \frac{\rho_{kj}^T}{\rho_{kj}^{\text{э}}} \right)^2, \quad (1)$$

Следует отметить, что минимизируемая функция  $f$  сложным образом зависит от большого количества параметров, поэтому одной из проблем является сложный многоэкстремальный «овражный» характер целевой функции, что может приводить к попаданию в локальный минимум, далекий от искомого решения. [1]

### Метод дифференциальной эволюции

В качестве альтернативы для поиска глобального минимума возможно применение метода дифференциальной эволюции. Работы, посвященные этому методу, впервые были опубликованы Рейнером Сторном и Кеннетом Прайсом в 1995 году. Данный метод относится к стохастическим методам многомерной оптимизации, использующим некоторые идеи генетических алгоритмов. Достоинством метода является его простота, так как для его реализации необходимо только прямое вычисление целевой функции. Иными словами, минимизируемая функция может быть нелинейной, не дифференцируемой, многоэкстремальной и с большим количеством переменных [6].

Основная идея метода заключается в формировании случайным образом конечного набора векторов на множестве допустимых решений, называемого начальной популяцией, с дальнейшим циклическим процессом замены текущей популяции новой. Для формирования новой популяции последовательно выбирается каждый элемент текущей популяции (вектор-мишень), и на основании заданного критерия отбора принимается решение, остается ли он в новой популяции или его заменяет сгенерированный специальным образом вектор-образец (триал вектор, пробный вектор). Итерационный процесс повторяется до момента достижения заданного значения функции цели или количества итераций [2, 3].

Алгоритм метода применительно к обратной задаче ВЭЗ реализован практически в исходном виде, как в [2, 3, 5].

Для формирования начальной популяции генерируется конечный набор  $NP$  случайных векторов параметров геоэлектрического разреза  $w = \{ \rho_1, \dots, \rho_N, h_1, \dots, h_N \}$  на множестве допустимых решений  $D$ . Следует отметить, что количество векторов  $NP$  является одним из параметров метода и остается неизменным на всем протяжении работы алгоритма. Для каждого вектора рассчитывается прямая задача и значение целевой функции (невязки).

Для формирования новой популяции выбирается вектор из текущего поколения (вектор-мишень,  $w_i$ ) из числа оставшихся членов популяции выбирается три произвольных вектора  $w_a, w_b, w_c$ , кроме самого вектора-мишени и рассчитывается мутантный вектор:

$$v = w_a + F \cdot (w_b - w_c), \quad (2)$$

где  $F$  – весовой коэффициент, контролирующий усиление дифференциальной вариации. Данный коэффициент является параметром настройки алгоритма, представлен действительным положительным числом ( $0 < F \leq 1$ ). Кроме того, следует отметить, что после выполнения процедуры проверяется принадлежность полученного вектора области допустимых решений  $D$ . Иначе говоря, параметры мутантного вектора сравниваются с граничными значениями области поиска решения  $\{ \rho_i^{min} \leq \rho_i \leq \rho_i^{max}, h_i^{min} \leq h_i \leq h_i^{max} \}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Если условие не выполняется, то параметры модели, выходящие за пределы допустимых, заменяются соответствующими граничными значениями.

Далее мутантный вектор подвергается процедуре «скрещивания» (кроссовер), которая заключается в замене некоторых координат (параметров) мутантного вектора соответствующими координатами из базового вектора, с определенной вероятностью. В данном конкретном случае для выбора соответствующего параметра от одного из векторов используется параметр скрещивания  $CR$  ( $0 \leq CR < 1$ ), который сравнивается со случайно сгенерированным числом  $0 \leq x_{rand} < 1$ , если  $CR \leq x_{rand}$ , то наследуется признак мутантного вектора, в противном случае – вектора-мишени ( $w_i$ ).

Полученный в результате «мутации» и «скрещивания» вектор называется пробным ( $v_{trial}$ ). Для параметров пробного вектора рассчитывается прямая задача и значение целевой функции (невязки), значение которой сравнивается с величиной невязки для вектора-мишени. Если значение целевой функции для  $v_{trial}$  меньше, чем для  $w_i$ , то в новом поколении вектор-мишень заменяется пробным, в противном случае – остается текущий  $w_i$ . После формирования новой популяции процесс повторяется с пункта 2. Критерием останова в данном случае является исчерпание числа итераций. [2, 3, 5]

### Результаты решения обратной задачи электроразведки

Для проверки эффективности альтернативного подхода к решению обратной задачи ВЭЗ выбрана модельная кривая, представленная 5-слойным геоэлектрическим разрезом, параметры модели представлены на рисунке 1.

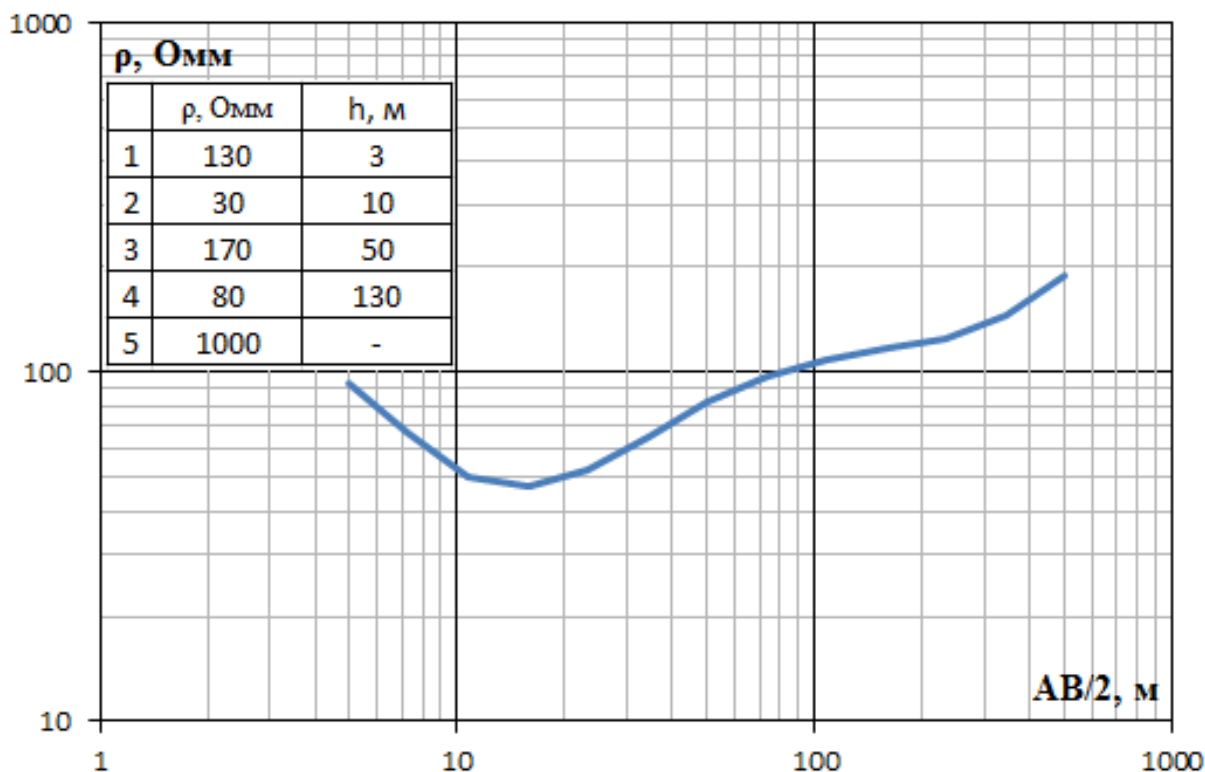


Рис. 1. Модельная кривая ВЭЗ и параметры геоэлектрической модели

Границы интервалов области допустимых решений для сопротивлений взяты 1-1000 Ом·м, а для мощности рассчитаны из условия, что минимальные значения составляют 50% от истинных, а максимальные – 300%, численные значения представлены в колонках 2 и 3 таблицы 1.

Таблица 1

	модель	мин.	макс.	МДЭ	$\Delta$ , %
	1	2	3	4	5
$\rho_1$	130	1	1000	143.9	10.7
$\rho_2$	30	1	1000	36.8	22.6
$\rho_3$	170	1	1000	213.8	25.7
$\rho_4$	80	1	1000	89.9	12.4
$\rho_5$	1000	1	1000	996.3	0.37
$h_1$	3	1.5	9	2.5	16.2
$h_2$	10	5	30	13.7	37.3
$h_3$	50	25	150	30.1	39.8
$h_4$	130	65	390	157.6	21.2
невязка $f$ , %	-	-	-	0.32	-

В ходе вычислений использованы следующие параметры алгоритма: количество особей (векторов) в популяции  $NP = 70$ , параметр усиления дифференциальной вариации  $F = 0.7$ , параметр скрещивания  $CR = 0.7$ , количество итераций  $n = 10^4$ . В колонке 4 таблицы 1 приведен результат решения обратной задачи ВЭЗ методом дифференциальной эволюции. На рисунке 2 представлен график изменения значения невязки в ходе итерационного процесса.

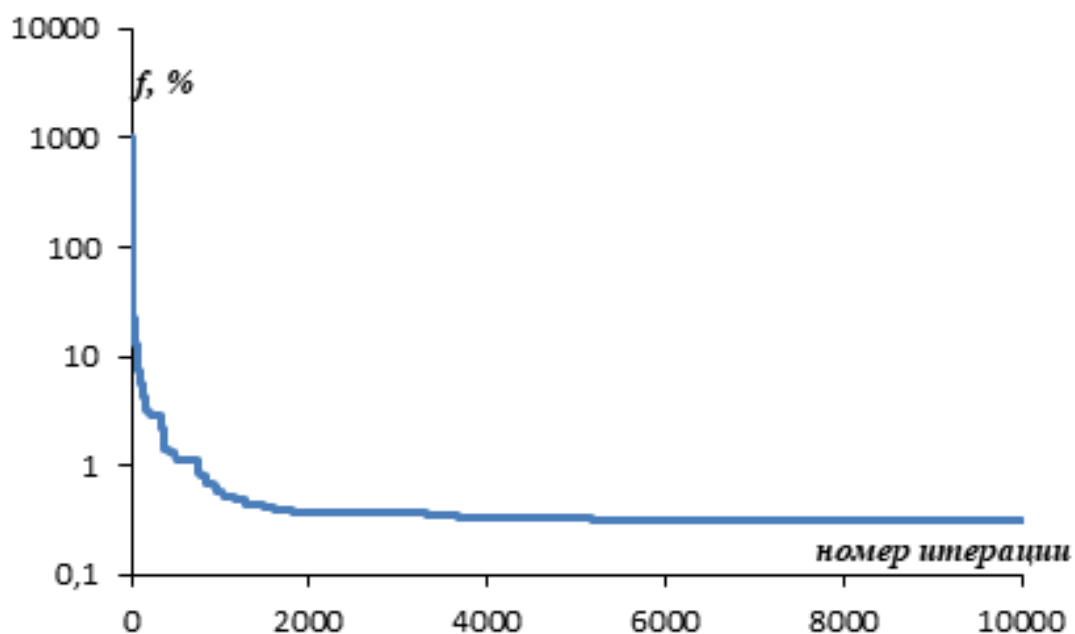


Рис. 2. График изменения значения невязки при решении обратной задачи методом ДЭ

Как видно из графика, процесс достаточно быстро сходится на начальных итерациях и за 100-200 итерации достигает невязки менее 5%, а за 700-800 итераций менее 1%.

В колонке 4 таблицы 1 приведен результат решения обратной задачи ВЭЗ методом дифференциальной эволюции. В колонке 5 рассчитаны относительные отклонения полученных параметров разреза, от модельных. Как видно из числовых характеристик, решение имеет значения сопоставимые с истинными величинами при поиске решения в достаточно широком диапазоне возможных значений параметров разреза.

### Выводы

В заключение следует отметить, что в данном примере алгоритм решения обратной задачи реализован простейшим способом. Однако метод дифференциальной эволюции имеет более широкие возможности, благодаря простоте реализации и простому требованию к функции цели – это возможность ее прямого вычисления. Например, значения векторов популяции могут быть заданы не величинами  $w = \{ \rho_1, \dots, \rho_N, h_1, \dots, h_N \}$ , а любыми характеристиками описывающими искомое решение, которые либо связаны с параметрами разреза, либо вычисляются на их основе. В качестве функции цели может выступать не только невязка кривых (которая, кстати, может быть вообще одной из координат вектора), а какие либо априорные представления о конечном результате, выраженные в численной форме.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / ГИ УрО РАН. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
2. Пантелеев А.В., Дмитраков И.Ф. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем // Труды МАИ. – 2010. – № 37. – С. 7.
3. Пантелеев А.В. Метаэвристические алгоритмы поиска глобального экстремума. – М.: МАИ-Принт, 2009. – 160 с.
4. Электроразведка методом сопротивлений / под ред. В.К. Хмелевского, В.А. Шевнина. – М.; Изд-во МГУ, 1994. – 160 с.
5. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal of Global Optimization. – 1997. – V. 11, № 4. – P. 341 - 359. – DOI: 10.1023/A:1008202821328.
6. neuronus.com. Портал знаний об искусственном интеллекте. – Текст электронный. – URL: <https://neuronus.com/> (Дата обращения 23.08.2021).

УДК 550.8.056

DOI:10.7242/echo.2021.3.12

## ВЕРИФИКАЦИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ROCK PHYSICS ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОД В ЗАДАЧЕ ОДНОМЕРНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Б. Трапезникова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация.** Выполнена верификация эмпирических уравнений Faust L.Y. и Н.З. Заляева для формирования петрофизической основы в задаче одномерного сейсмоакустического моделирования. Представлен процесс синтезирования акустического каротажа и анализ полученных результатов для разреза кунгурских отложений северо-западного борта Прикаспийской впадины (Приволжской моноклинали).

**Ключевые слова:** акустический каротаж, скорость продольной волны, уравнение Faust L.Y., уравнение Н.З. Заляева, одномерное моделирование волнового поля, Rock Physics.