

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ МЕТОДА ЕЭП НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ МОДЕЛИ ПРИРОДЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ*

А.Н. Дмитриев

*Институт геологии и геоинформатики Тюменского государственного нефтегазового университета,
625000, Тюмень, ул. Володарского, 56, Россия*

Разработана программа для решения прямых и обратных задач метода естественного электрического поля, обеспечивающая построение модели геоэлектрического разреза одновременно до 29 электростатически поляризованных тел пластовой и призматической форм. Программно-построенные геоэлектрические разрезы для ряда рудных полей подтверждены последующим бурением, а в случаях тестирования алгоритма соответствуют эталонным геологическим разрезам. В настоящее время с помощью метода ЕЭП можно выполнять на более высоком уровне количественную оценку не только промышленно доступных рудных объектов, но также приступить к глобальному изучению естественного потенциала земной коры и мантии.

Метод естественного электрического поля, программное решение обратной задачи метода ЕЭП, программа ОЗ_ЕЭП_СВ, эффективность метода ЕЭП.

FORWARD AND INVERSE SELF-POTENTIAL MODELING: A NEW APPROACH

A.N. Dmitriev

Software has been designed for forward and inverse modeling of natural self-potential (SP) fields which allows simulating the geoelectric patterns simultaneously for up to 29 sheet-like and prismatic electrostatically polarized conductors. The cross sections for a number of ore fields obtained by inversion with the new SPI-SV code (self-potential inversion, Siberian version) have been corroborated by later drilling and are consistent with reference geologic sections used in algorithm testing. SPI-SV simulation can provide high-quality assessment of mineral deposits and, furthermore, allows approaching global-scale investigation into the natural self potential of crust and mantle.

Self-potential surveys, forward and inverse self-potential modeling, SPI-SV code (self-potential inversion, Siberian version), performance of SPI-SV algorithm

РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДА ЕЭП НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДМИТРИЕВА

Исходя из представления, что в природе электронные проводники являются инертными телами и характеризуются только электродными потенциалами [Sato, Mooney, 1960] с наложенными на них геотермоэлектрохимическими потенциалами [Дмитриев, 2007, 2009], появилась возможность использования простых законов электростатики для решения прямых задач метода ЕЭП. В частности, для этих целей реализуется функция Грина $G = 1/r - 1/r$ для пластины (ограниченной плоскости) шириной $2b$ и длиной $2l$, заряженной до потенциала U_0 и размещенной на границе непроводящего полупространства с бесконечным заземленным экраном (задача Дирихле), имитирующим электронный проводник [Миролюбов и др., 1963]. В результате получены выражения потенциала для широкого наклонного пласта (косоугольного параллелепипеда), конечного по падению и бесконечного по простиранию; субгоризонтально залегающей пластины (пласта бесконечного простирания, но с малыми размерами по падению, т.е. $2\delta \ll 2b$); антиклинально и синклиналино сформированных электропроводящих объектов, бесконечных по простиранию [Дмитриев, 1975б, 1976а, 2007]; сочетанию наклонного пласта и пластины (наклонный пласт с переменным углом падения), также бесконечных по простиранию.

Широкий наклонный пласт (косоугольный параллелепипед). Вычисления суммарного потенциала U_M по оси X от граней пласта и его верхней кромки выполняются в интервалах их видимости (рис. 1, а):

$$U_M = \frac{U_0}{\pi} \left[\left(-2 \operatorname{artg} \frac{-x + x_0 - b + \delta_1 \cos \alpha}{h + \delta_1 \sin \alpha} + \operatorname{artg} \frac{-x + x_0 - b + (\delta_1 + \delta_2) \cos \alpha}{h + (\delta_1 + \delta_2) \sin \alpha} + \operatorname{artg} \frac{x_0 - x - b}{h} \right) + \right]$$

* Примечание редколлегии: статья публикуется в порядке дискуссии.

$$\begin{aligned}
& + \left(\operatorname{artg} \frac{x_0 - x + b}{h} - \operatorname{artg} \frac{x_0 - x - b}{h} \right) + \\
& + \left(-2 \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - b - \delta_1 \cos \alpha}{h + \delta_1 \sin \alpha} + \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - b - (\delta_1 + \delta_2) \cos \alpha}{h + (\delta_1 + \delta_2) \sin \alpha} + \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - b}{h} \right), \quad (1)
\end{aligned}$$

где U_0 — собственный электрический потенциал пласта (задается со знаком «-» для отрицательных аномалий); h — глубина до верхней кромки пласта; b — 1/2 горизонтального размера верхней кромки пласта $2b$; x_0 — значение по оси X , соответствующее эпицентру верхней кромки пласта; x — значение по оси X в точке M , для которой рассчитывается потенциал; α — угол наклона пласта; δ_1, δ_2 — длины граней, заряженных соответственно отрицательно и положительно.

Трехгранная призма вершиной вниз. В природе сопоставляется как с ядерной частью синклинальной структуры, так и с выклинивающимся на глубину пластом. Вычисления потенциала U_M по оси X от граней призмы и ее основания выполняются в интервале их видимости (см. рис. 1, б):

$$\begin{aligned}
U_M = \frac{U_0}{\pi} & \left\{ \left[\operatorname{artg} \frac{x_0 - x}{h} - 2 \operatorname{artg} \frac{x_0 - x + \delta_2 \cos(\gamma + \alpha)}{h + \delta_2 \sin(\gamma + \alpha)} + \operatorname{artg} \frac{x_0 - x + (\delta_2 + \delta_4) \cos(\gamma + \alpha)}{h + (\delta_2 + \delta_4) \sin(\gamma + \alpha)} \right] + \right. \\
& + \left[\operatorname{artg} \frac{x_0 - x + \delta_1 \cos \alpha}{h + \delta_1 \sin \alpha} - \operatorname{artg} \frac{x_0 - x}{h} \right] + \left[2 \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - \delta_1 \cos \alpha + \delta_3 \cos(\beta - \alpha)}{h + \delta_1 \sin \alpha + \delta_3 \sin(\beta - \alpha)} - \right. \\
& \left. \left. - \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - \delta_1 \cos \alpha + (\delta_3 + \delta_5) \cos(\beta - \alpha)}{h + \delta_1 \sin \alpha + (\delta_3 + \delta_5) \sin(\beta - \alpha)} - \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - \delta_1 \cos \alpha}{h + \delta_1 \sin \alpha} \right] \right\}, \quad (2)
\end{aligned}$$

где h — глубина до ребра призмы, наиболее приближенного к дневной поверхности; x — значения по оси X в точке M , для которой рассчитывается потенциал; α — угол наклона верхней грани призмы; β, γ — углы между смежными гранями призмы; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$ — длины граней или их интервалов, заряженных соответственно отрицательно и положительно.

Трехгранная призма вершиной вверх. Ее в природе можно аналогизировать как с выклинивающимся вверх пластом, так и с ядерной частью антиклинальной структуры. Вычисления потенциала U_M по оси X от граней призмы и ее основания выполняются в интервале их видимости (см. рис. 1, в):

$$\begin{aligned}
U_M = \frac{U_0}{\pi} & \left\{ \left[\operatorname{artg} \frac{x_0 - x}{h} - 2 \operatorname{artg} \frac{x_0 - x - \delta_1 \cos \beta}{h + \delta_1 \sin \beta} + \operatorname{artg} \frac{x_0 - x - (\delta_1 + \delta_3) \cos \beta}{h + (\delta_1 + \delta_3) \sin \beta} \right] + \right. \\
& \left. + \left[\operatorname{artg} \frac{x - x_0}{h} - 2 \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - \delta_2 \cos \alpha}{h + \delta_2 \sin \alpha} + \operatorname{artg} \frac{x - x_0 - (\delta_2 + \delta_4) \cos \alpha}{h + (\delta_2 + \delta_4) \sin \alpha} \right] \right\}. \quad (3)
\end{aligned}$$

Наклонная пластина. Ее в природе можно сопоставлять с пологозалегающим пластом, верхняя и нижняя грани которого поляризованы зарядами как одинакового знака, так и при достаточной толщине противоположного. Вычисления потенциала U_M по оси X от ее верхней грани выполняются в интервале видимости (см. рис. 1, г):

$$U_M = \frac{U_0}{\pi} \left[\left(\operatorname{artg} \frac{x_0 - x + \delta \cos \alpha}{h + \delta \sin \alpha} - \operatorname{artg} \frac{x_0 - x}{h} \right) + \left(\operatorname{artg} \frac{x_0 - x + \delta' \cos \alpha}{(h + \Delta h) \delta' \sin \alpha} - \operatorname{artg} \frac{x_0 - x}{h + \Delta h} \right) \right]. \quad (4)$$

Если необходимо учитывать влияние нижней грани поляризованной пластины, то в формуле (4) глубина определяется как $h + \Delta h$, где $\Delta h = m / \cos \alpha$. В свою очередь, величина m соответствует истинной мощности пласта.

Наклонный пласт с переменным углом падения (пласт с изломом). В природе такие пласты встречаются часто. Изломы, как правило, обуславливаются резким изменением падения, но без разделения в пространстве на части пласта (см. рис. 1, д). В подобной ситуации вычисляется суммарный потенциал $U_{M_{1,2}} = U_{M_1} + U_{M_2}$, где U_{M_1} соответствует формуле (1), а U_{M_2} — формуле (4).

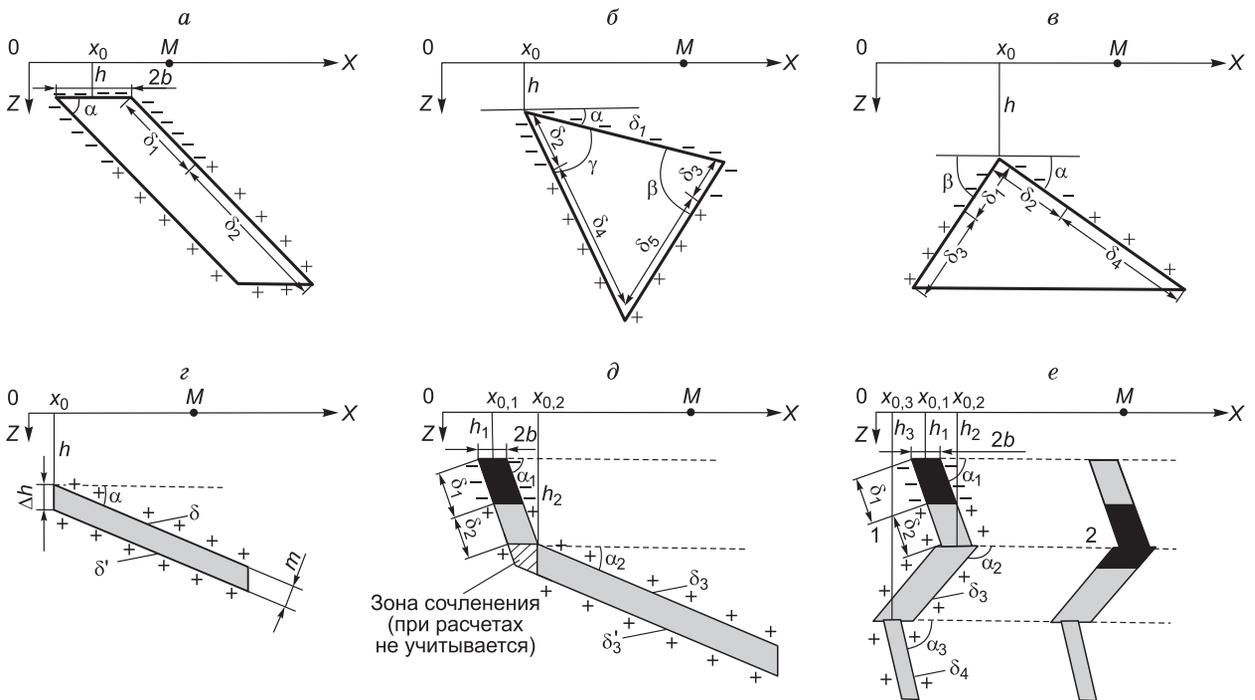


Рис. 1. Расчет естественного электрического потенциала для:

a — наклонного пласта (косоугольного параллелепипеда); *б* — призматического тела бесконечного простираения (призма вершиной вниз); *в* — призматического тела бесконечного простираения (призма вершиной вверх); *г* — пластины бесконечного простираения; *д* — пласта с переменным падением; *е* — сложного тела, контур которого отображается путем набора малых пластов с переменным падением, а отрицательный полюс может быть задан как в верхней части верхнего отрезка тела (1), так и в его любой нижней части любого отрезка тела (2).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДА ЭЭП

На основании формул (1)—(4) создана программа для решения обратной задачи метода ЭЭП — ОЗ_ЭЭП_СВ (обратная задача, метод естественного электрического поля, сибирский вариант). Задача решается путем автоматизированного подбора теоретических значений суммарного потенциала $U_{\Sigma\text{геор.}}$ к наблюдаемым в полевых условиях $U_{\Sigma\text{набл.}}$ над поляризованными электронными проводниками различной конфигурации.

Программа использует эффективный алгоритм случайного поиска с комбинированной тактикой, который обеспечивает подбор теоретической модели разреза как с одним поляризованным телом, так и одновременно не менее чем с 29 поляризованными телами. Автоматический подбор осуществляется одновременно для заданного количества тел по их всем переменным (в назначенных диапазонах) параметрам.

Исследование функционала

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{U_{\Sigma\text{геор.}}^i - U_{\Sigma\text{набл.}}^i}{0.5(U_{\Sigma\text{геор.}}^i + U_{\Sigma\text{набл.}}^i)} \right| \quad (5)$$

показало, что в пространстве параметров модели он представляет собой в целом овражную структуру. Численные эксперименты на модели позволили сделать вывод, что для подобного функционала (5) наиболее оптимальным (по сумме характеристик) алгоритмом минимизации будет метод, использующий случайный поиск [Поляк, 1983].

Всесторонняя проверка алгоритма на базе имеющегося математического обеспечения показала способность программы достаточно реально отображать сложный (многопластовый) геологический разрез. Для подтверждения сказанному приведем один из примеров сопоставления решений прямой и обратной задач для 13 поляризованных тел (рис. 2). Как видно, программа в автоматическом режиме (первый этап интерпретации) достаточно успешно справилась с подбором конфигурации и геометрии

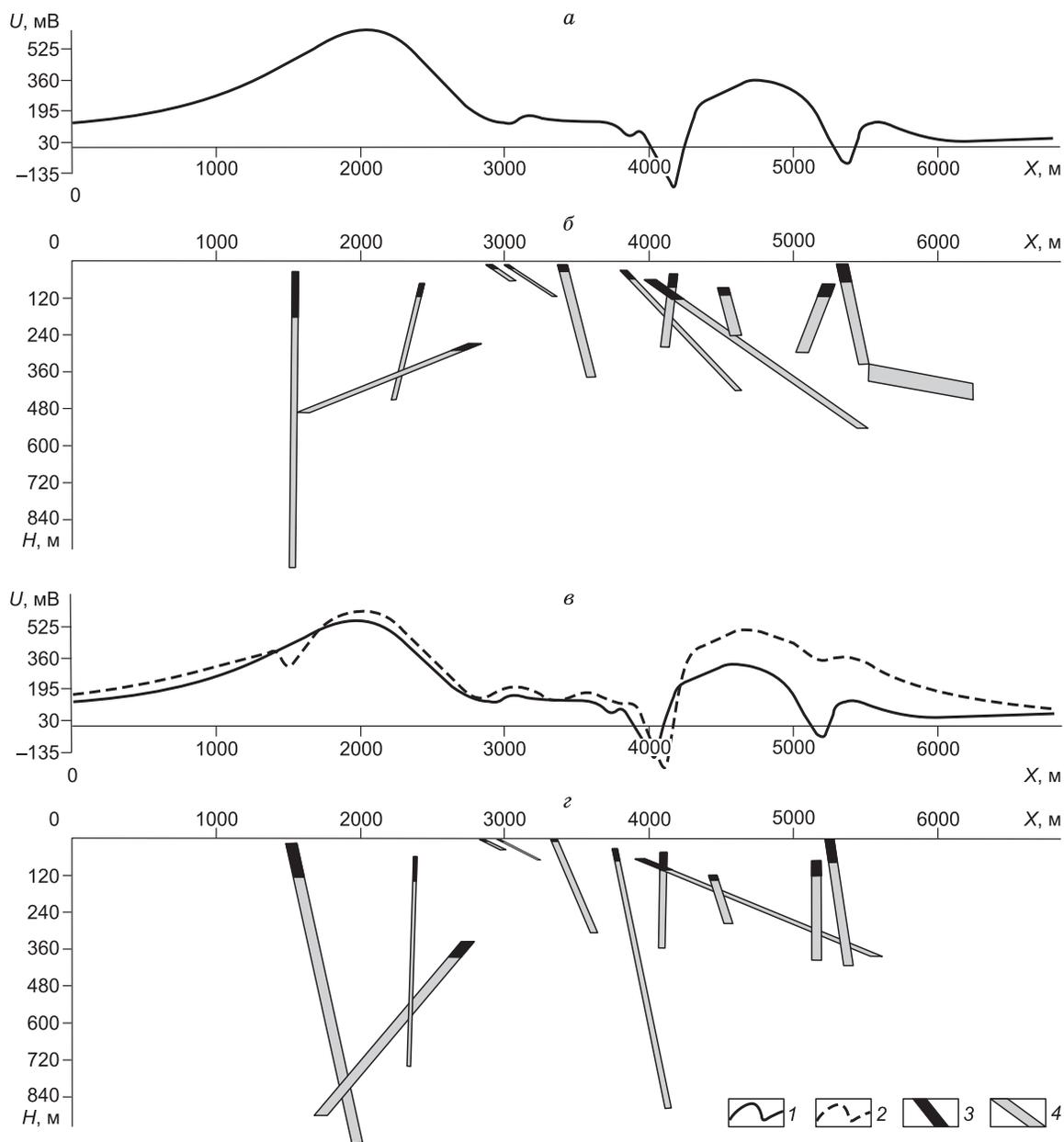


Рис. 2. Проверка корректности решения обратной задачи программой ОЗ_ЕЭП_СВ.

a — теоретический график естественного электрического потенциала, рассчитанный для заданной модели геоэлектрического разреза, прямая задача; *б* — модель геоэлектрического разреза, состоящая из 13 поляризованных тел с преднамеренно заданным сложным взаимоотношением между собой; *в* — сопоставление теоретического графика с подобранным графиком потенциала на первом этапе работы программы ОЗ_ЕЭП_СВ; *г* — подобранный геоэлектрический разрез программой ОЗ_ЕЭП_СВ без участия интерпретатора. 1 — график потенциала $U_{пр}$, отображающий решение прямой задачи; 2 — график потенциала $U_{обр}$, отображающий решение обратной задачи; 3, 4 — отрицательный и положительный полюсы модели пласта соответственно.

поляризованных тел. На втором этапе интерпретации выполняется (в диалоговом режиме) лишь корректировка «отскачивших» параметров того или иного тела (пласта).

Программа ОЗ_ЕЭП_СВ в зависимости от установки ключа в автономном режиме решает либо прямую задачу, либо обратную задачу, или одновременно прямую и обратную задачи, что обеспечивает интерпретатору возможность оперативного и качественного построения как наперед заданной модели, так и прогнозной модели геоэлектрического разреза с количеством поляризованных тел до 29.

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ ОЗ_ЕЭП_СВ

Для тестирования программы ОЗ_ЕЭП_СВ, т.е. оценки ее интерпретационных возможностей, были использованы мониторинговые наблюдения естественного электрического поля на Лазурском полиметаллическом месторождении (Рудный Алтай) [Давыдов, 1961]. Здесь первые наблюдения ЕЭП были выполнены на этапе разведки (рис. 3, а, график 1), затем позднее в период эксплуатации месторождения — после прохождения подземных горных выработок (см. рис. 3, а, график 2). Установленные по данным бурения параметры рудных тел явились достаточным основанием для принятия их за эталонные.

Точность снятия размеров рудных тел, вводимых в программу, определялась масштабом рисунка геологического разреза Лазурского месторождения (см. рис. 3, б). При этом была вынужденно выполнена аппроксимация этих тел моделями пластов постоянной мощности без учета ее небольших изменений по падению. Единственными параметрами, участвующими в подборе, являлись собственные потенциалы пластов $U_{0,1} \dots U_{0,8}$, величины которых отсутствовали в работе А.Я. Давыдова [1961]. Однако рассчитанный график естественного потенциала 1а (см. рис. 3, в) принципиально расходился с наблюдаемым графиком 1 в интервале профиля 200—0 м — имел тенденцию заметного понижения потенциала к началу профиля (0 м) до -40 мВ. Добавленные модели тел 9 и 10 (см. рис. 3, з) улучшили сходимость графиков, но не существенно. И только введение дополнительного тела 3 при его обратном направлении падения и соответствующей длине привели к совпадению графиков 1 и 1а на первом этапе интерпретации со средней относительной погрешностью 9 %. При этом были проверены любые другие разумные варианты самостоятельных тел любой ориентации и даже с их размещением за пределами границ геологического разреза, но погрешность всегда находилась на уровне 50—150 %. В итоге, не преследуя цель 100%-й сходимости графиков 1 и 1а, подобранная модель геоэлектрического разреза из 10 тел (см. рис. 3, з) была принята как достаточно близкая эталонному разрезу (см. рис. 3, ж).

Из анализа геоэлектрического разреза, установленного по отрицательной аномалии естественного потенциала (см. рис. 3, а, график 1), видно:

— модели поляризованных пластов 1, 2 и 4-8 практически совпадают с известными рудными телами, вскрытыми скважинами (см. рис. 3, ж);

— модели пластов 3, 9 и 10 в явном виде не просматриваются на геологическом разрезе. Однако модель пласта 3 имеет шанс к существованию, так как в этой части разреза из-за возникших, скорее всего, проблем бурения для двух скважин в кусте геологами фиксируется осложнение — резкое выклинивание сланцев по мощности и изменение углов падений верхнего и нижнего рудных тел, ориентированных, по существу, в другом, близком к 90°, направлении, в котором можно ожидать не кварцевые порфиры, а переработанную метасоматозом зону сланцев и новое рудное тело.

Выполненный подбор геоэлектрического разреза для графика 2 (см. рис. 3, д) с положительными значениями потенциала показал следующее.

Инверсия знака имеет место только у моделей пласта 1 и 2, причем подбор не осуществляется без модели пласта 3. Кроме того, при подборе была отмечена высокая чувствительность к положению границы смены знака потенциала. Инверсию знака можно объяснить техногенным фактором, связанным с подачей теплого воздуха в выработки и, следовательно, прогревом головной части рудных пластов до температуры не ниже +20 °С.

Сходимость графиков 2 и 2а в эпицентральной зоне резко улучшается при условии, если у модели 1 изменить глубину с 20 до 11 м и переместить ее центр влево на 8 м. Это можно объяснить влиянием техногенного фактора — появившейся металлической конструкции шахты, искусственно уменьшающей глубину модели.

В процессе решения обратной задачи выявлено, что в работе [Давыдов, 1961] исходный график 2 (см. рис. 3, а) имеет некоторую неточность: в интервале профиля 0...100 м знаки потенциала даны положительными (график 2'), тогда как они реально должны быть отрицательными, что с очевидностью следует из зеркальности графика 1 (см. рис. 3, а) и подтверждаемого поведением подобранного графика 2 в том же интервале профиля (см. рис. 3, д).

В итоге из материалов интерпретации данных метода естественного электрического поля Лазурского месторождения следует, что:

— во-первых, подобранная модель геоэлектрического разреза, несмотря на неизбежную погрешность при переносе как исходных графиков, так и координат рудных тел, геометрически уверенно совпадает с эталонным геологическим разрезом (рудными телами) и, даже более, предполагает присутствие дополнительных электронных проводников, возможно, сульфидного типа (тела 3 и 9);

— во-вторых, полученные положительные результаты тестирования на сложнейшем объекте позволяют утверждать, что примененный математический аппарат для решения прямых и обратных задач метода естественного электрического поля достаточно точно описывает происходящие в природе реальные электродные поляризационные процессы как с участием потенциалов и знаков геотемпературного поля, так и без участия омических токов.

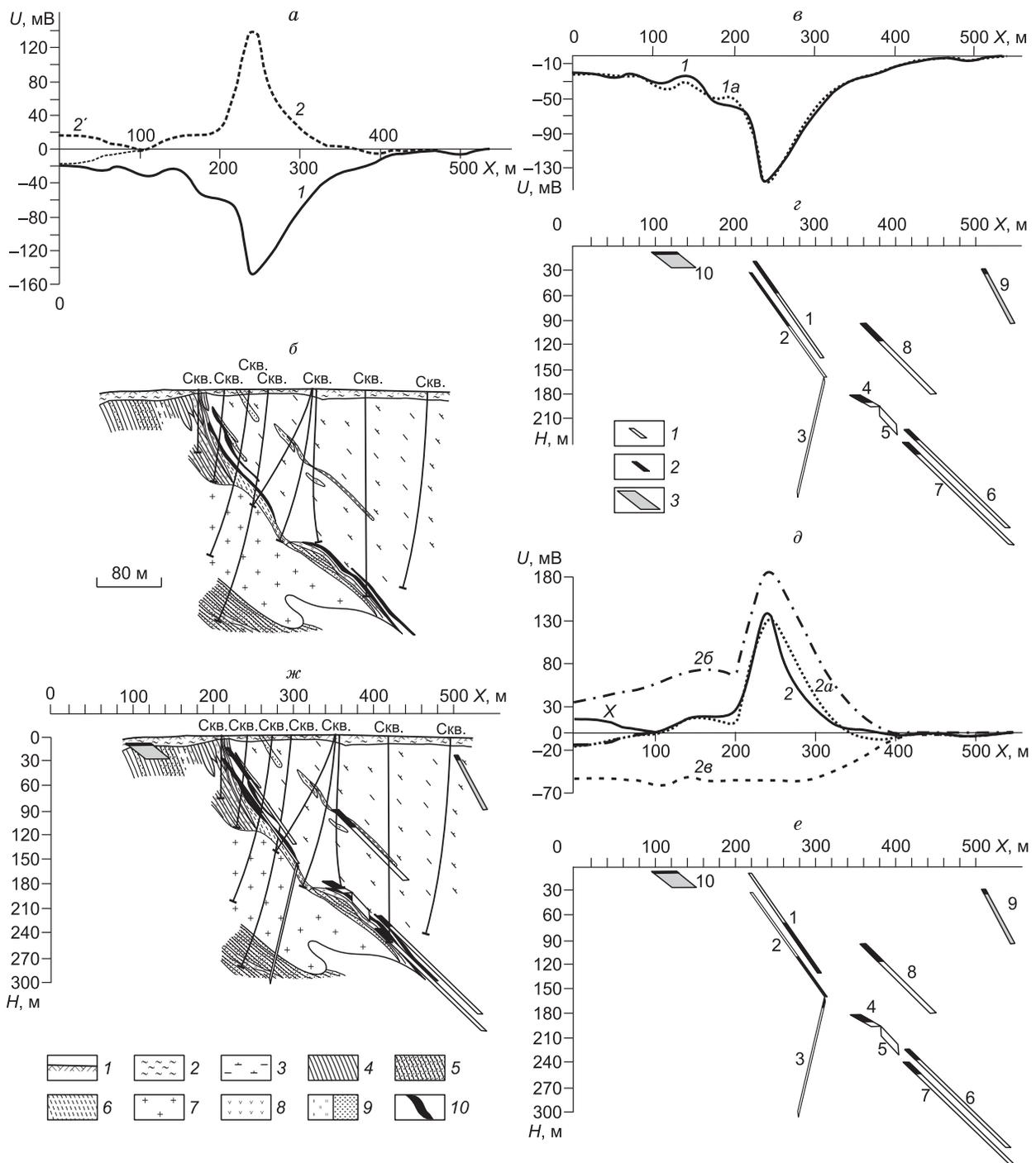


Рис. 3. Естественное электрическое поле Лазурского месторождения (Рудный Алтай).

a — 1 — график ЕЭП до разработки месторождения, наблюдаемый 21 августа 1953 г.; 2 — график ЕЭП после начала разработки месторождения, наблюдаемый 31 августа 1958 г. [Давыдов, 1961]; 2' — рейс с ошибочной, противоположной записью знака потенциала; *б* — геологический разрез Лазурского месторождения: 1 — почвенно-растительный слой, 2 — рыхлые отложения, 3—6 — сланцы различного состава, 7 — кварцевые порфиры, 8 — диабазы и диабазовые порфириты, 9 — вторичные кварциты, 10 — промышленные рудные тела; *в* — графики ЕЭП: 1 — наблюдаемый до разработки месторождения и 1а — подобранный по программе ОЗ_ЕЭП_СВ; *г* — подобранный геоэлектрический разрез поляризованных тел (1—10) Лазурского месторождения: 1—3 — геоэлектрические модели, соответствующие: 1 — положительно заряженным поверхностям поляризованных рудных тел, 2 — отрицательно заряженным поверхностям поляризованных рудных тел, 3 — положительно заряженным поверхностям поляризованных тел неясного состава; *д* — графики ЕЭП: 2 — наблюдаемый после начала разработки месторождения, 2а — подобранный по программе ОЗ_ЕЭП_СВ и состоящий из суммы потенциалов: 2б — для тел 1 и 2 с инверсией знака собственной поляризации и 2в — для тел 4—10 с сохраненным знаком собственной поляризации; график X — соответствует графику 2' на рис. а; *е* — подобранный геоэлектрический разрез поляризованных тел Лазурского месторождения после начала его разработки; *ж* — сопоставление геологического и геоэлектрического разрезов до начала разработки Лазурского месторождения.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДА ЕЭП (SP), ПОЛУЧАЕМЫХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ САТО—МУНИ И ДМИТРИЕВА

Пример 1. В качестве исходных материалов (рис. 4) послужили результаты измерений естественного электрического поля по одному из профилей в районе глубокой скв. КТВ в Баварии (Германия). Авторы работы [Bigalke, Grabner, 1997] выполнили подбор только двух тел, для которых теоретический график очень грубо совпадает с наблюдаемым графиком SP (см. рис. 4, а, б). С их точки зрения эти тела представляют собой графитистые наклонные пласты, но, к сожалению, без указания для них размеров отрицательных полюсов и используемых величин U_0 . Что касается графика SP, наблюдаемого в скважине, то они отмечают его низкое качество из-за неоднократной смены знака потенциала относительно оси, сравнивая со своими расчетами (см. рис. 4, в).

В то же время подбор теоретической кривой потенциала программой ОЗ_ЕЭП_СВ к тому же наблюдаемому графику потенциала вдоль профиля был завершен для модели разреза из 12 тел (см. рис. 4, а, б) при достижении на втором этапе средней относительной погрешности 3.4 %.

Анализ подобранной модели разреза показывает, во-первых, что достаточно четко просматривается антиклинальная структура горных пород с заметно противоположными, но выдержанными с обеих сторон, углами падения ее крыльев. Во-вторых, размеры отрицательных полюсов у каждого пласта различны и располагаются на любых глубинах. В-третьих, отмечаемая на каротажной диаграмме перемежаемость отрицательных и положительных значений потенциала в интервале глубин 0—540 м (рис. 4, в) достаточно четко коррелирует с чередованием интервалов отрицательных и положительных значений потенциала у тел 7, 21, 10, 8 и 5, спроецированных по горизонтали на ось скважины.

Так, например, отрицательно заряженные части пластов 21, 10 и 8 хорошо коррелируются с отрицательными значениями на каротажной диаграмме в интервале 0—280 м, а отрицательный полюс пласта 5, скорее всего, отмечается отрицательными интенсивными значениями потенциала на глубинах 380—460 м. С целью проверки этого качественного истолкования выполнен перерасчет на ось скв. КТВ величин суммарного потенциала от ближних тел в двух вариантах (см. рис. 4, з). Теоретический график (см. рис. 4, з) по изрезанности и амплитуде потенциала далеко не совпадает с теоретически рассчитанным для скважины авторами работы [Bigalke, Grabner, 1997] (см. рис. 4, в), но заметно ближе к наблюдаемому в скважине (см. рис. 4, в).

Следовательно, отмечаемые на каротажной диаграмме (глубина 0—540 м) чередования отрицательных и положительных значений потенциала — это не низкое качество записи или другие причины, о чем сетуют авторы работы [Bigalke, Grabner, 1997], это тот же интервал чередования знака зарядов, но уже преимущественно от боковых пластов, спроецированных на вертикальную плоскость скважины.

Обращает на себя внимание тело 5, расположенное на большой глубине (370 м), собственный поляризационный потенциал которого составляет более -1000 мВ. Такая величина потенциала может быть объяснима только присутствием в земной коре пластов графитизированных пород, распространяющихся на большую глубину, и, как следствие, наиболее вероятным увеличением значений наложенных термо ЭДС. Заметим, что Ю. Бигалке и Е. Грабнер указывают на наличие на площади работ известной разломной зоны Ноттерсдорф.

В итоге, при сопоставлении моделей геоэлектрических разрезов противоречий между ними не установлено, скорее, они совпадают. В то же время модель, рассчитанная по программе ОЗ_ЕЭП_СВ, как следует из рис. 4, более детально и информативна.

Пример 2. На рис. 5, а—в приведены геофизические данные по месторождению Пука Руми (Перу) [Mendonça, 2008].

Для этого случая выполнены решения обратной задачи с помощью программы ОЗ_ЕЭП_СВ в нескольких вариантах. Во-первых, если принять модель А за основу (контур токовых источников), то возможна ее аппроксимация двумя горизонтальными пластинами, залегающими друг под другом. Ограничив нахождение этих пластин в интервале глубин 0—250 м, что следует из модели А, получен оптимально подобранный для конкретных параметров пластин теоретический график SP, в какой-то мере соответствующий наблюдаемому графику (см. рис. 5, з, д). Однако отклонения теоретического графика от наблюдаемого все-таки существенны, что указывает на неприемлемость подобранной модели разреза.

В этой связи программе были заданы те же две пластины, но со свободным подбором характерных точек в границах все того же пространства. В результате получен геоэлектрический разрез из пластин, расположенных ступенеобразно (см. рис. 5, ж). При новых параметрах пластин — глубинах залегания и собственных величинах поляризации — достигнута уже лучшая сходимость теоретического графика к наблюдаемому (см. рис. 5, е). Следует отметить, что пластины располагаются в приповерхностном слое на глубинах 1—16 м. Подобранный геоэлектрический разрез уже приобретает геологический смысл — намечается контакт двух участков (зон) пород с контрастными поляризационными свойствами. Однако

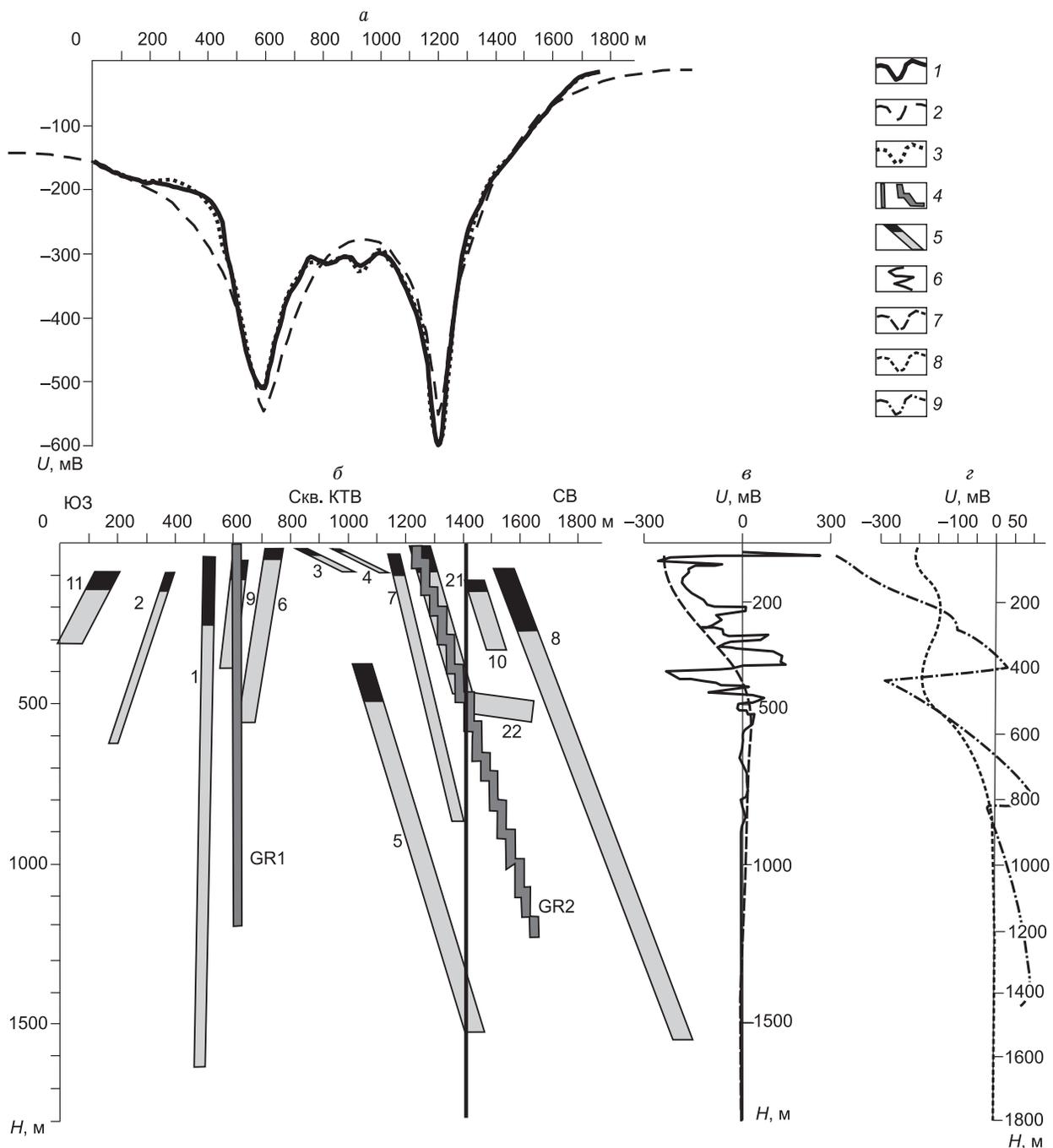


Рис. 4. Пример количественной интерпретации графика естественного электрического потенциала, наблюдаемого в Баварии (Германия) с помощью программы ОЗ_ЕЭП_СВ.

a–г — пояснение см. в тексте.

1 — наблюдаемый график потенциала SP в Баварии в створе глубокой скв. КТВ, по [Bigalke, Grabner, 1997]; *2* — теоретические графики потенциалов SP на дневной поверхности и в скв. КТВ (авторы — Ю. Бигалке, Е. Грабнер); *3* — теоретический график потенциала ЕЭП (автор — А.Н. Дмитриев); *4* — модель разреза, представленного электронными проводниками GR1 и GR2 (графитистыми породами) (авторы — Ю. Бигалке, Е. Грабнер); *5* — модель разреза, представленного электронными проводниками (графитистыми породами) (автор — А.Н. Дмитриев), черный цвет — отрицательный полюс проводника, серый — положительный; *6* — график естественного потенциала, наблюдаемого в скв. КТВ (авторы — Ю. Бигалке, Е. Грабнер); *7* — теоретический график потенциала SP, рассчитанный Ю. Бигалке, Е. Грабнер; *8* — теоретический график потенциала ЕЭП на ось скв. КТВ от боковых отрицательно заряженных пластин тел 5, 7, 21, 10, 8, спроецированный на ось скв. КТВ; *9* — теоретический график потенциала ЕЭП на ось скв. КТВ от боковых отрицательно и положительно заряженных пластин тел 5, 7, 21, 10, 8, спроецированный на ось скв. КТВ.

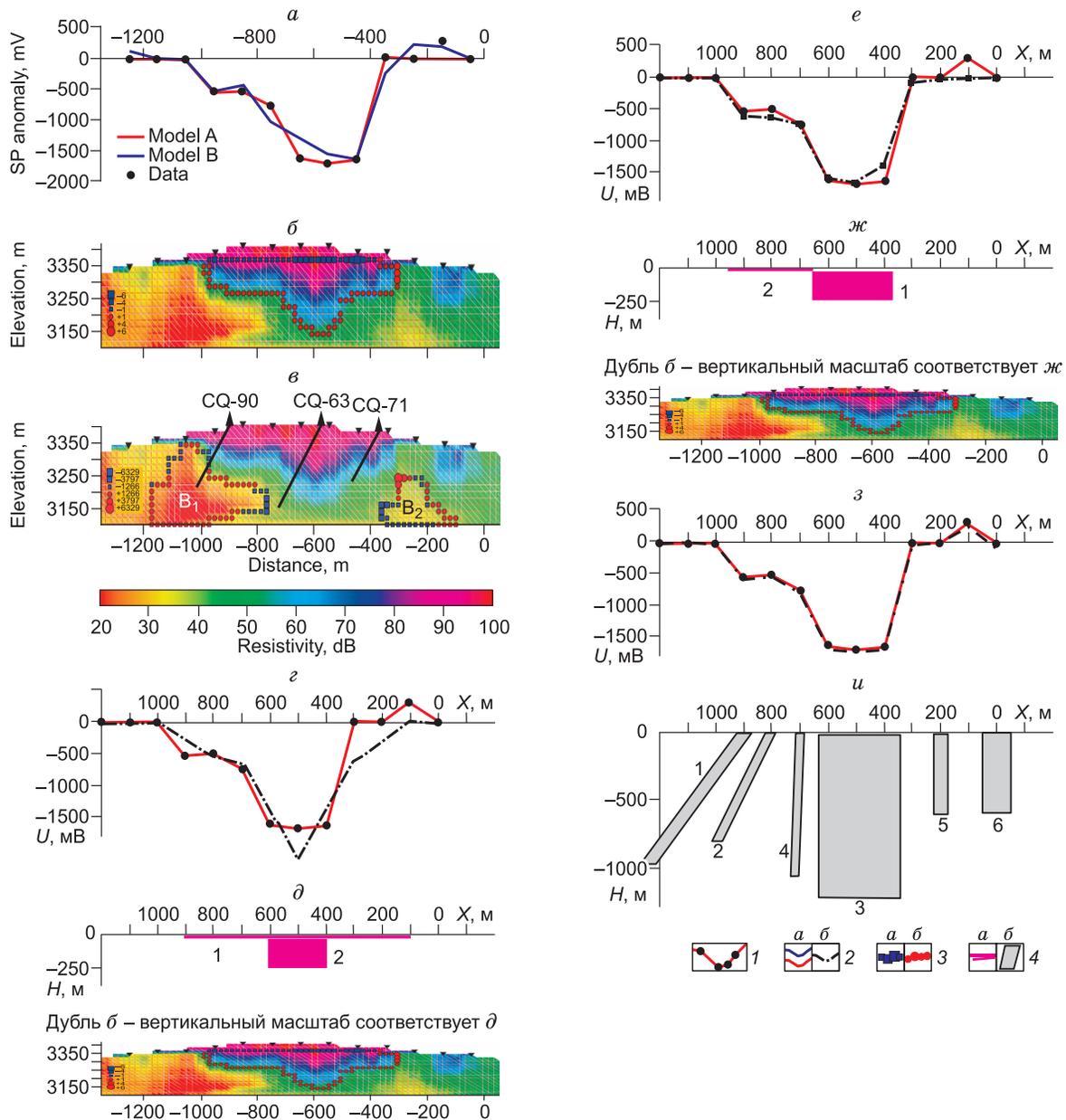


Рис. 5. Сопоставление результатов интерпретации наблюдаемого графика SP над месторождением Пука Руми (Перу), по [Mendonça, 2008] (а—в) и А.Н. Дмитриеву (з—и).

а — графики SP: наблюдаемый и теоретически рассчитанные для двух схем расположения источников тока в геоэлектрическом разрезе; б — схема расположения источников тока в первом варианте (модель А); в — схема расположения источников тока во втором варианте (модель В); г — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для двух поляризованных пластин; д — поляризованные пластины, геометрические параметры которых близки высокоомной зоне геоэлектрического разреза (б): пластина 1 — глубина залегания $H_1 = 5$ м, толщина $m_1 = 5$ м, длина $l_1 = 700$ м, собственный поляризационный потенциал $U_{0,1} = -500$ мВ; пластина 2 — $H_2 = 20$ м, $m_2 = 220$ м, $l_2 = 200$ м, $U_{0,2} = -1500$ мВ; е — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для двух поляризованных пластин; жс — поляризованные пластины, их геометрические параметры: пластина 1 — $H_1 = 16$ м, $m_1 = 229$ м, длина $l_1 = 271$ м, $U_{0,1} = -1800$ мВ; пластина 2 — $H_2 = 1$ м, $m_2 = 11$ м, $l_2 = 297$ м, $U_{0,2} = -600$ мВ; з — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для шести поляризованных пластин; и — поляризованные пластины, их геометрические параметры: пласт 1 — угол падения $\alpha_1 = 130^\circ$, $H_1 = 1$ м, размер верхней кромки $2B_1 = 96$ м, длина отрицательно заряженной части пластины по падению $m^- = 63$ м, длина положительно заряженной части пластины по падению $m^+ = 1269$ м, $U_{0,1} = -611$ мВ; пласт 2 — $\alpha_2 = 120^\circ$, $H_2 = 1$ м, $2B_2 = 50$ м, $m^- = 10$ м, $m^+ = 947$ м, $U_{0,2} = -303$ мВ; пласт 3 — $\alpha_3 = 90^\circ$, $H_3 = 15$ м, $2B_3 = 300$ м, $m^- = 10$ м, $m^+ = 1207$ м, $U_{0,3} = -1533$ мВ; пласт 4 — $\alpha_4 = 92^\circ$, $H_4 = 2$ м, $2B_4 = 26$ м, $m^- = 3$ м, $m^+ = 1169$ м, $U_{0,4} = -551$ мВ; пласт 5 — $\alpha_5 = 90^\circ$, $H_5 = 1$ м, $2B_5 = 55$ м, $m^- = 6$ м, $m^+ = 672$ м, $U_{0,5} = -167$ мВ; пласт 6 — $\alpha_6 = 90^\circ$, $H_6 = 1$ м, $2B_6 = 100$ м, $m^- = 1$ м, $m^+ = 454$ м, $U_{0,6} = -202$ мВ. 1 — наблюдаемый график потенциала SP над месторождением Пука Руми, по [Mendonça, 2008]; 2 — теоретические графики потенциалов SP, рассчитанные по алгоритмам С.А. Мендонча (а) и А.Н. Дмитриева (б); 3 — источники омических токов, несущие отрицательные (а) и положительные (б) заряды, разнонаправленность движения которых формирует знак аномалии SP (модель С.А. Мендонча); 4 — геоэлектрический разрез, представленный моделями электронных проводников (графитистых пород, сульфидных скоплений) в виде пластин (а) и пластов (б) (модель А.Н. Дмитриева).

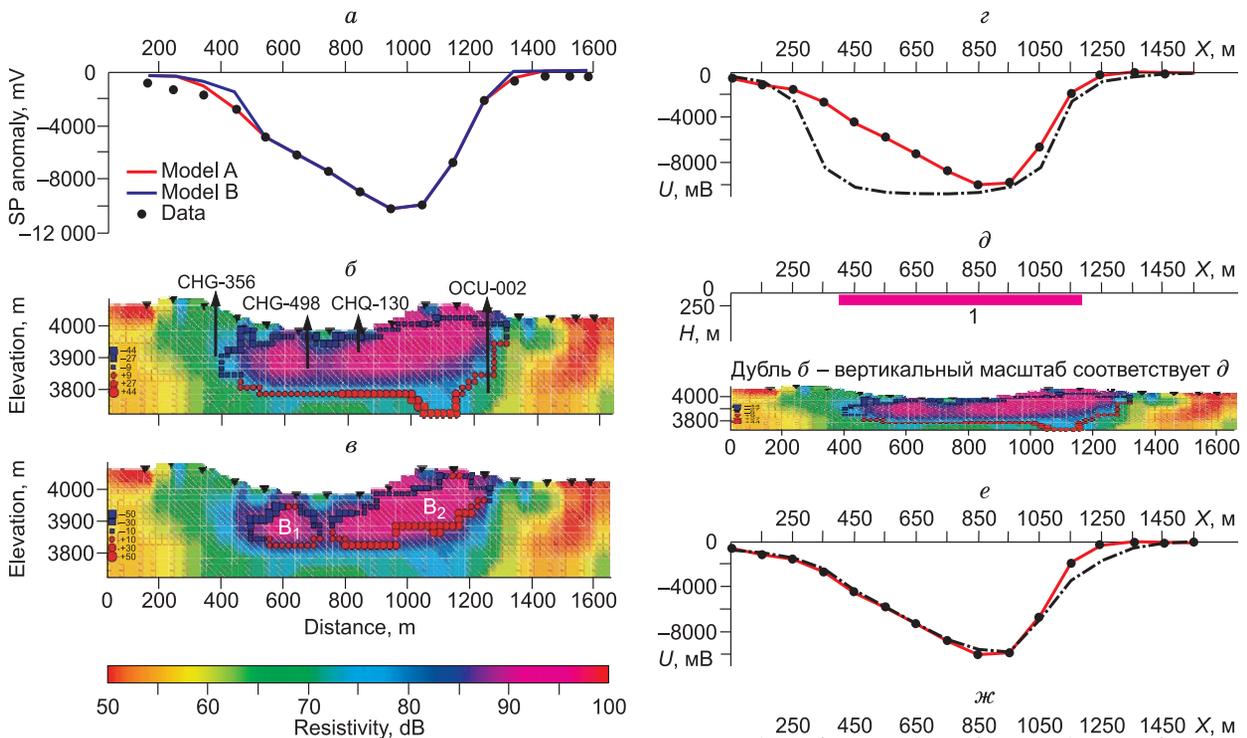


Рис. 6. Сопоставление результатов интерпретации наблюдаемого графика SP над месторождением Чакуикоча (Перу), по [Mendonça, 2008] (а—в) и А.Н. Дмитриеву (z—и).

а—в — см. рис. 5; z — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для поляризованной пластины; д — поляризованная пластина, геометрические параметры которой близки высокоомной зоне геоэлектрического разреза (б), в частности, глубина залегания $H = 50$ м, толщина $m = 200$ м, длина $l = 800$ м, собственный поляризационный потенциал $U_0 = -11800$ мВ; e — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для двух поляризованных пластин; ж — поляризованные пластины, их геометрические параметры: угол падения $\alpha_1 = 179^\circ$, $H_1 = 100$ м, толщина $m_1 = 13$ м, длина $l_1 = 789$ м, собственный поляризационный потенциал $U_{0,1} = -5900$ мВ и $\alpha_2 = 160^\circ$, $H_2 = 28$ м, толщина $m_2 = 45$ м, длина $l_2 = 370$ м, собственный поляризационный потенциал $U_{0,2} = -6900$ мВ; з — сопоставление наблюдаемого графика SP и теоретически рассчитанного для пяти поляризованных слоев; и — поляризованные пластины, их геометрические параметры:

пласт 1 — угол падения $\alpha_1 = 89^\circ$, $H_1 = 91$ м, размер верхней кромки $2B_1 = 334$ м, длина отрицательно заряженной части пласта по падению $m^- = 10$ м, длина положительно заряженной части пласта по падению $m^+ = 1960$ м, собственный поляризационный потенциал $U_{0,1} = -9890$ мВ; пласт 2 — $\alpha_2 = 90^\circ$, $H_2 = 96$ м, $2B_2 = 134$ м, $m^- = 8$ м, $m^+ = 1194$ м, $U_{0,2} = -4200$ мВ; пласт 3 — $\alpha_3 = 90^\circ$, $H_3 = 72$ м, $2B_3 = 150$ м, $m^- = 5$ м, $m^+ = 1820$ м, $U_{0,3} = -2900$ мВ; пласт 4 — $\alpha_4 = 87^\circ$, $H_4 = 72$ м, $2B_4 = 150$ м, $m^- = 5$ м, $m^+ = 1721$ м, $U_{0,4} = -1200$ мВ; пласт 5 — $\alpha_5 = 87^\circ$, $H_5 = 95$ м, $2B_5 = 50$ м, $m^- = 11$ м, $m^+ = 1321$ м, $U_{0,5} = -2000$ мВ. 1 — наблюдаемый график потенциала SP над месторождением Чакуикоча, по [Mendonça, 2008]; 2—4 — см. на рис. 5.

все попытки достичь достаточно полного совпадения графиков безуспешны и остается лишь сделать вывод, что этот разрез также не может являться реальным.

И, наконец, не привязываясь к модели А, т.е. к пространству распространения кварцитового тела, программой ОЗ_ЕЭП_СВ подобран геоэлектрический разрез из шести пластовых тел, обеспечивших высокую сходимость теоретического и наблюдаемого графиков SP (см. рис. 5, з, и).

Полученный разрез близок к следующей геологической ситуации. Все пластины представляют собой глинистые сильнопиритизированные породы в зоне крутопадающего глубинного разлома, являющегося частью активного Андского вулканотектонического пояса, о чем сообщается в работе [Goldie, 2002].

Пласт 3, судя по всему, находится в центральной части зоны разлома и погружается на большую глубину, характеризуется собственным поляризационным потенциалом ниже -1500 мВ, немалую часть величины которого можно отнести на счет термопотенциала. Как видно, потенциал -1500 мВ заметно превышает максимально возможное в электрохимии напряжение 1230 мВ. Последнее достигается только при электрохимическом разложении воды [Свешников, 1967; Левин, 1972].

Пример 3. Особый интерес представляют материалы другого месторождения — Чакуикоча (Перу) [Goldie, 2002], где выполнены съемки методами ВП и SP (ЕЭП). Последним на обширной площади как в границах месторождения, так и вне его зафиксированы аномалии естественного электрического потенциала интенсивностью от -6000 до -10200 мВ (рис. 6, а).

С помощью инверсионного метода С. А. Мендонча, варьируя несимметричной интенсивностью, парностью и полярностью токовых элементов, подбирает две модели А и В (см. рис. 6, б, в). Для модели А токовые элементы были размещены по изолинии кажущихся сопротивлений от 5000 Ом·м ($74 = 20lg_{10}\rho_{ij}$), огибающей зону высоких сопротивлений до $100\,000$ Ом·м ($100 = 20lg_{10}\rho_{ij}$). Этой зоне соответствует также кварцитовое тело, вскрываемое скважинами примерно до глубины 200 м (таблица), ниже подошвы которого, как следует из скв. ОСУ-002, уже картируются гидротермально измененные глинистые породы. Для второй модели В в этой же зоне высокого сопротивления (см. рис. 6, б) были выделены две подзоны высокого сопротивления V_1 и V_2 (см. рис. 6, в). По их периметрам (изолиниям в 10000 Ом·м) вынесены токовые элементы с теми же особенностями, что и для модели А. Как видно из рис. 6, а, теоретические графики SP обеих моделей практически полностью совпадают с наблюдаемым графиком.

Геологическое истолкование модели А, как и в примере 2 (месторождение Пука Руми), С. А. Мендонча сводит к тому, что противоположные знаки зарядов геобатарей распределяются вдоль кровли и подошвы кварцитового тела, но среднее расстояние между ними увеличено в два раза и составляет 200 м. Именно по причине заметного погружения положительных зарядов вглубь, как считает С. А. Мендонча, и можно объяснить сглаженность аномалии SP и ее очень большую амплитуду в -10.2 В.

Применение программы ОЗ_ЕЭП_СВ для решения обратной задачи этого же графика SP, наблюдаемого над месторождением Чакуикоча, показало следующее.

Во-первых, если исходить из геоэлектрического разреза (см. рис. 6, б), то аппроксимация высокоомной зоны, скорее всего, возможна горизонтальной пластиной (см. рис. 6, з, д). Однако конфигурация теоретического графика, далеко не совпадающая с наблюдаемым графиком (рис. 6, з), однозначно указывает на несоответствие подобранного тела природному. Придав некоторую свободу программе при подборе количества пластин и расширив глубину их возможного присутствия до 500 м, получен разрез только из двух пластин, причем пересекающихся между собой. Следует отметить, что глубины расположения пластин превышают первые десятки метров и находятся в интервале $28—100$ м. Но несмотря на достигнутое почти полное совпадение теоретического и наблюдаемого графиков SP, кроме их правых ветвей, этот разрез не может считаться удовлетворительным, так как он не просматривается в геоэлектрическом разрезе ВП.

Далее, не привязываясь к модели А и контуру высокоомной зоны, программой ОЗ_ЕЭП_СВ подобран геоэлектрический разрез для пяти вертикально ориентированных пластовых тел, обеспечивших высокую сходимость теоретического и наблюдаемого графиков SP (см. рис. 6, з, и). Полученный разрез близок к разрезу месторождения Пука Руми (см. рис. 5, и) и совершенно не противоречит геоэлектрическому разрезу ВП (см. рис. 6, в). Из последнего следует, что все изолинии ρ_k в принципе ориентированы вертикально, за исключением локально присутствующей здесь в приповерхностной части горизонтально ориентированной супервысокоомной зоны, отображающей тело кварцитов небольшой толщины. Из рис. 6, и видно, что глубины верхних кромок пластовых тел 1—5 составляют $72—95$ м и косвенно согласуются с возможным присутствием в верхней части разреза неполяризованных пород — кварцитов с неэлектронным типом проводимости. В то же время поляризованные электропроводящие пластообразные тела 1—5 представляют собой породы, заполняющие вертикальные наиболее подвижные текто-

Литологические данные по скважинам [Goldie, 2002]

| Скважина | Интервал, м | Тип пород | Уровни ρ_k , Ом·м |
|----------|-------------|----------------|---------------------------|
| CQ-90 | 0—68 | SM, SV | > 10000 |
| | 68—103 | SC, SA | ≤ 1000 |
| | 103—187 | C, PROP | ≈ 100 |
| CQ-63 | 0—84 | SG | > 10000 |
| | 84—243 | C | ≈ 100 |
| CQ-71 | 0—88 | SM | > 10000 |
| | 88—158 | SA, SC, C | $\approx 100\dots 1000$ |
| CHG-356 | 0—150 | SA | ≈ 1000 |
| CHG-498 | 0—125 | SA, SV, SG, SM | $\approx 1000\dots 10000$ |
| CHQ-130 | 0—60 | SM, SG | > 10000 |
| OCU-002 | 0—63 | SA | $\approx 1000\dots 10000$ |
| | 63—98 | SG | $\approx 1000\dots 10000$ |
| | 98—254 | SA, SC, C | $100\dots 1000$ |

Примечание. SM — массивные кварциты, SV — пористые кварциты, SG — зернистые кварциты, SA — алунитовые кварциты, SC — кварциты глинистые, C — глины, PROP — пропиловитовые породы.

нические блоки (зоны) глубинного разлома низкоомными глинистыми гидротермально преобразованными (пропилитизированными) породами, которые интенсивно пиритизированы [Goldie, 2002] и, надо полагать, графитизированы на всю глубину разлома.

В целом из рассмотренных последних двух примеров следует.

Два решения обратной задачи метода SP, полученные С.А. Мендонча для золоторудных месторождений Пука Руми и Чакуикоча, построенные на распределении разнополярных зарядов по кровле и подошве пластовых кварцитовых тел, даже если эти заряды и действительно расположены в пространстве указанным образом, не несут какой-либо дополнительной и важной геологической информации по сравнению с ранее имеющимися данными метода ВП и бурения. Тем более, что на основе последних и строились решения метода SP.

Объяснение больших аномальных потенциалов над месторождениями как за счет различной удаленности друг от друга отрицательных и положительных зарядов — полюсов геобатарей в теле высокоомных кварцитов [Mendonça, 2008], так и главным образом особо низкой электропроводности непосредственно этих кварцитов, несущих в себе рассеянное золото и пирит [Goldie, 2002], полностью противоречит модели Сато—Муни. Как упоминалось ранее, понятие «геобатарея Сато—Муни» ассоциируется с аномалией отрицательного знака, обусловленной всегда инертным электронным проводником высокой электропроводности, а не низкоэлектропроводящими вмещающими породами неэлектронного типа, например, как кварцитовое тело в данном случае.

Электрические токи противоположно ориентированных и близкорасположенных в проводящем полупространстве диполей без их изоляции друг от друга, как известно, приводят мгновенно к их самоуничтожению и, следовательно, не имеют смысла. Однако С.А. Мендонча игнорирует это свойство токовых цепей при расчетах своих моделей В.

Зарегистрированные на ряде месторождений Перу устойчивые во времени аномалии естественного электрического поля интенсивностью от -1.5 до -10.2 В явно превышают максимально возможный электрический потенциал 1.23 В, возникающий только при электрохимическом разложении воды в случае присутствия источника неэлектрического происхождения.

Но если все-таки исходить из того, что природа бесконечно многообразна, то в границах единичных сульфидных месторождений возможны массоперенос и магнитное поле, обусловленные присутствием обязательных элементов электрохимической ячейки: открытых каналов, заполненных электролитом, анода и катода, электронных перемычек и т.д. [Левин, 1972; Дмитриев, 1981].

Пример 4. В России на базе модели А.С. Семенова [1974] имеются программы решения обратной задачи метода ЕЭП, также построенные на инверсии данных естественного электрического потенциала. Для уменьшения множества решений требуется априорная информация о распределении удельного сопротивления по вертикали и латерали изучаемого разреза. Одной из таких программ является программа А. Каминского ZondSP2D [<http://geophys.geol.msu.ru/index8.htm>]. В данном случае в качестве априорного материала используется геоэлектрический разрез ранее проведенных многоэлектродных зондирований ВЭЗ. На основе этого разреза А. Каминский располагает элементы токовых источников ЕЭП у левой границы вертикального тела (рис. 7, б).

Однако, если рассматривать наблюдаемый график ЕЭП (см. рис. 7, а) с геолого-геофизической позиции, то даже неподготовленному специалисту становится очевидным, что в разрезе присутствует либо два блока пород с различной поляризуемостью, в зоне границы которых возможно приповерхностное локальное тело с более высокой поляризуемостью, либо пласт с выдержанной величиной поляризуемости, но его левая половина погружена на большую глубину по сравнению с правой половиной и тем же присутствием между ними локального тела аномально высокой поляризуемости. В то же время, исходя из накопленного геофизического опыта, трудно объяснить, как весьма локализованная на глубине более 40 м субвертикально ориентированная группа токовых диполей может линейно и практически строго горизонтально отображать два разных уровня поля. Хотя это возможно, если от одной группы диполей считать поле только слева, а от другой группы и другой интенсивности только справа. Не понятно и то, как находящиеся на глубине 40 м источники тока создают очень острую форму аномалии, характерную только для приповерхностных объектов. Также настораживает положительный знак центральной локальной аномалии, никак не комментируемый автором программы. В итоге, даже если игнорировать эти три проблемы, трудно признать, что полученное решение обратной задачи — установление местоположения токовых элементов «геобатарей» в разрезе как-либо существенно дополняет ранее полученную информацию о разрезе по методу ВЭЗ.

Интерпретация этого же графика ЕЭП с помощью программы ОЗ_ЕЭП_СВ дала следующие результаты (см. рис. 7, в). Во-первых, в разрезе выделен пласт 3 повышенной поляризуемости, величина которой для различных субгоризонтально залегающих фрагментов пласта колеблется от -9 до $+5$ мВ. Отмечено, что приближающиеся к дневной поверхности блоки пород этого пласта (правая часть разреза) имеют значения собственного потенциала от -1 до $+5$ мВ, тогда как блокам пород в левой части

разреза при практически той же глубине, что и в правой части, соответствуют значения потенциала более отрицательные и колеблются от -9 до -6 мВ. Во-вторых, пласт 3 повышенной поляризуемости коррелируется с пластом, удельное сопротивление которого на геоэлектрическом разрезе ВЭЗ находится в диапазоне 100 — 500 Ом·м. Для обоих пластов наблюдается примерно одинаковое поведение вдоль профилирования в интервалах их воздымания или понижения.

В-третьих, выделенные два пропластка 1п и 2п соответствуют, скорее всего, сульфидизированным участкам в приконтактной зоне, возможно, с несогласно (субвертикально) залегающими породами — ин-

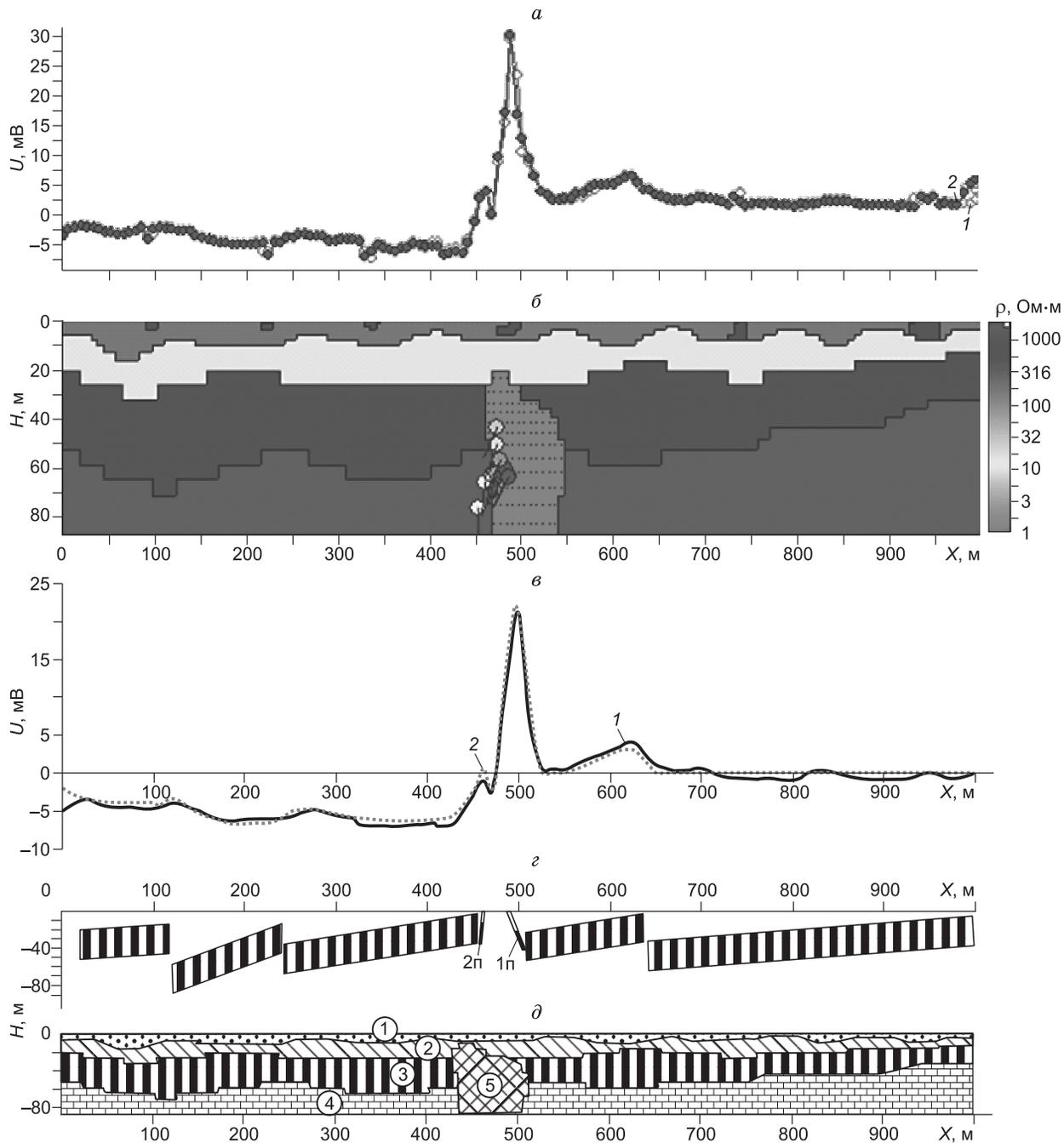


Рис. 7. Сопоставление результатов интерпретации данных метода ЕЭП по программам ZondSP2d (А. Каминский) и ОЗ_ЕЭП_СВ (А.Н. Дмитриев) по профилю р. Карелия, 2003.

a — графики ЕЭП: наблюдаемый (1) и рассчитанный (2); $б$ — геоэлектрический разрез по данным ВЭЗ, на нем кружками показаны источники ЕЭП, заданные А. Каминским [<http://geophys.geol.msu.ru/index8.htm>]; $в$ — графики ЕЭП: 1 — наблюдаемый (значения потенциала сняты сканированием графика 1 (см. часть a) с шагом 12.5 м); 2 — теоретический график ЕЭП, рассчитанный по программе ОЗ_ЕЭП_СВ; $г$ — подобранная модель разреза с пятью поляризованными пластами и двумя пропластками (1п, 2п); $д$ — разрез (б), приведенный к масштабу модели разреза (в), 1—5 соответствуют геоэлектрическим слоям, установленным методом ВЭЗ.

трусией или тектонической зоной разлома. И, в-четвертых, пропластки 1п и 2п имеют положительные собственные потенциалы по двум причинам: их верхние кромки расположены вблизи дневной поверхности до 1—3 м и простирание пропластков в глубину не превышает 24—36 м, что для западной территории России соответствует зоне постоянных годовых температур в единицы градусов. Следовательно, верхние части пропластков прогреты более нижних, поэтому они имеют положительные термопотенциалы.

В итоге, исходя из сопоставления результатов интерпретации одних и тех же данных метода ЭЭП по Карелии, можно предположить, что геологическая информация, полученная на базе модели А.С. Семенова [1974], вряд ли обладает существенной новизной, способной дополнить имеющуюся по данным ВЭЗ. В то же время геологическая информация, полученная на базе модели Дмитриева, дополняет данные ВЭЗ: выделенный пласт 3 по данным ЭЭП не только подтверждает его наличие по ВЭЗ (см. рис. 7, д), но и указывает на повышенную поляризуемость этого пласта относительно смежных пластов. В свою очередь, повышенная поляризуемость может быть связана, в случае осадочного происхождения пород пласта, сингенетичной пиритизацией. Дополнительной информацией также обладают установленные два пропластка, возможно, соответствующие приконтактной минерализованной зоне, тогда как методом ВЭЗ эти пропластки не обнаруживаются.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДА ЭЭП НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДМИТРИЕВА

В 1973 г. были выполнены наблюдения естественного электрического поля (рис. 8) над обнаруженным на Полярном Урале полиметаллическим оруденением, получившим впоследствии известность как Саурейское свинцовое месторождение [Худяков, Маливанчук, 1972]. В тот период была впервые проведена количественная интерпретация этих материалов с помощью программы Потенциал-III-2 на ЭВМ Наира [Дмитриев, 1976,б].

В 2007 г. этот же профиль наблюдаемых значений естественного потенциала над Саурейским месторождением (см. рис. 8, а) был переобработан с помощью программы ОЗ_ЭЭП_СВ. Подбор выполнен для 10 основных тел (см. рис. 8, б). Средняя величина отклонения амплитуд наблюдаемого и теоретического потенциалов не превысила ± 4.5 мВ.

Подобранная модель геоэлектрического разреза (см. рис. 8, б) практически полностью соответствует прежней. Здесь также основным структурным элементом является асимметричная антиклинальная структура, ее сводовая часть располагается в интервале 700—900 м профиля ХПШ. Тип структуры уверенно контролируется электропроводящими породами — маркерами, представленными углисто-графитистыми сланцами. Восточное крыло имеет падение 49° , тогда как западное — 66° . Последнее на глубине немногим более 100 м осложнено, очевидно, тектоническими подвижками и переходит в синклинальную складку, ядерная часть которой разрушена крутопадающей тектонической зоной мощностью около 200 м. В границах этой зоны залегают полиметаллические руды, представленные сближенными крутопадающими пластами под углом 75° и прослеживающи-

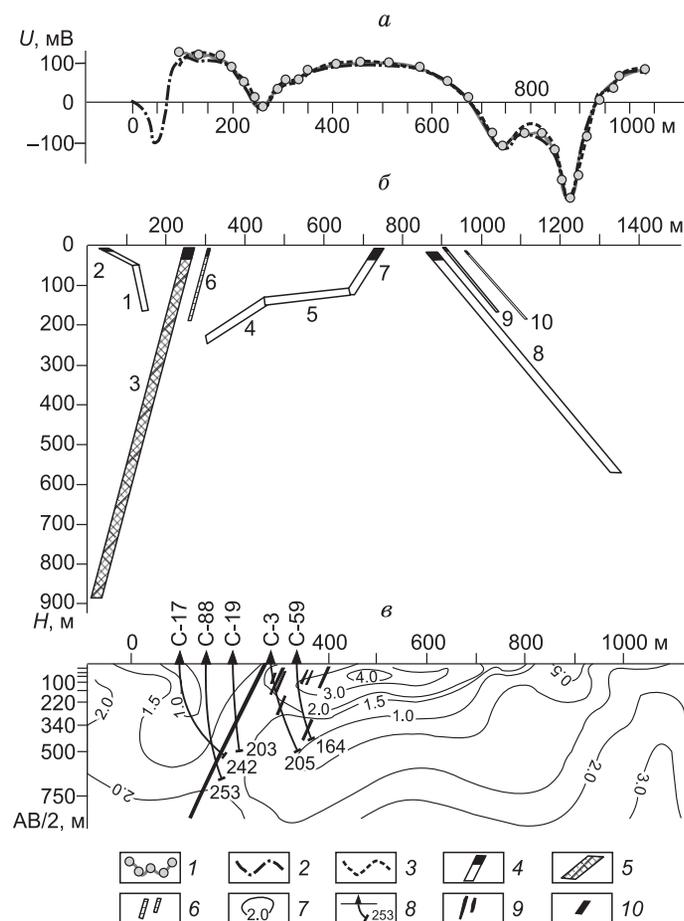


Рис. 8. Количественная интерпретация графика потенциала U , наблюдаемого над Саурейским свинцовым месторождением (Полярный Урал).

а — наблюдаемая (1) и подобранные кривые потенциала в 1973 г. (2) и в 2007 г. (3); б — подобранные контуры тел, соответствующие: углисто-графитистым сланцам (4), рудной зоне (5) и мелким рудным телам (6); в — разрез кажущихся сопротивлений ВЭЗ: 7 — изолинии ρ_k (1000 Ом·м), 8 — проекция ствола скважины на вертикальную плоскость с указанием глубины скважины (м), 9 — рудные тела на разрезе ВЭЗ, 10 — отрицательный полюс поляризованного тела.

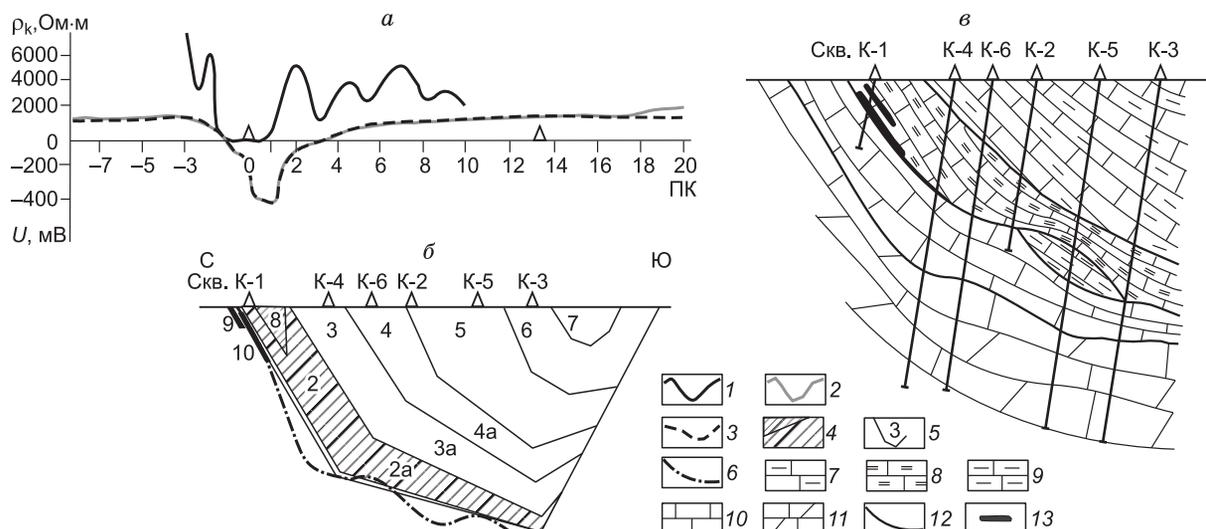


Рис. 9. Количественная интерпретация графика потенциала U , наблюдаемого над бокситовым рудопроявлением (западный склон Полярного Урала).

a — графики ρ_k ДЭП (1) и электрического потенциала U (наблюденная — 2 и теоретическая — 3); *b* — подобранный разрез: 4 — слои пород с различной поляризацией поверхностей (величина собственной поляризации характеризуется интенсивностью штриховки); 5 — порядковый номер слоя или его поверхности; 6 — граница, соответствующая перерыву между светлыми рифогенными и темными углистыми известняками, установлена бурением; 7 — петрофизический разрез: 7 — известняки темно-серого цвета с плотностью образца ($\sigma_{обр}$) от 2.69 до 2.71 г/см³; 8, 9 — известняки углистые, темно-серые до черного цвета: 8 — $\sigma_{обр} < 2.69$ г/см³, 9 — $\sigma_{обр} = 2.69-2.71$ г/см³; 10 — известняки светло-серого цвета, $\sigma_{обр} = 2.69-2.71$ г/см³; 11 — известняки доломитистые до доломитов, $\sigma_{обр} > 2.71$ г/см³; 12 — границы выделяемых горизонтов; 13 — рудное тело бокситов.

мися на глубину в несколько сотен метров. Скважиной 88 руды вскрыты на глубине $AB/2 = 600$ м, тем самым подтверждая, что рассчитанная протяженность тела 3 на глубину до 900 м (см. рис. 8, б) вполне оправданна. Следовательно, метод ЭЭП способен на базе электростатической модели оказывать реальную помощь геологам как при поисках рудных залежей, особенно на закрытых территориях, так и при геокартировании.

Метод ЭЭП активно применялся на Полярном Урале и при поисках бокситов. На рис. 9, *a*, *b* приведены наблюдаемый и теоретический графики естественного потенциала и подобранный геоэлектрический разрез. Основная трудность при решении обратной задачи состояла в построении модели неизвестного геологического разреза. Программой были подобраны чередующиеся пласты 1—8 с различными собственными потенциалами их боковых граней. В то же время рудные тела бокситов не составили проблемы, они легко были подобраны моделями двух небольших по размерам наклонных пластов 9 и 10. Проведенное бурение практически полностью подтвердило результаты машинной интерпретации. Кроме того, геоэлектрический разрез, помимо геологических границ, оказался в хорошем соответствии с петрофизическим разрезом. Бокситовые тела, действительно, оказались незначительными по размерам, не представляя собой промышленного интереса. Однако здесь следует отметить особую роль метода естественного поля в способности достаточно правильного отображения геологического строения исследуемой площади на базе представления этого поля как электростатического.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широко распространенные на геофизическом пространстве представления о природе постоянных электрических полей, обусловленных циркулирующими электрическими токами — модели Семенова и Сато—Муни, на сегодняшний день не имеют эффективного математического аппарата, способного превратить метод ЭЭП в количественный высокоинформативный геофизический инструмент.

В то же время альтернативный математический аппарат, описывающий электростатическое состояние поляризованных природных электронных проводников — модель Дмитриева, позволяет успешно количественно прогнозировать не только простые, но и достаточно сложные геологические разрезы. Этот математический аппарат реализован в программе ОЗ_ЭЭП_СВ, способной в автоматизированном режиме выполнить подбор теоретической модели разреза, состоящей как из 1, так и из 29 естественно поляризованных тел различной конфигурации. Этого количества аномальных тел вполне достаточно, чтобы отобразить не только основной каркас, но и детали геологического разреза.

Результаты работы программы ОЗ_ЕЭП_СВ многократно проверены разведочным бурением и практически во всех случаях подтверждается реальность решения обратной задачи на базе примененного математического аппарата. Реальность решений заключается в том, что они имеют геологический смысл в виде тел с конкретными геометрическими и физическими параметрами, которые всегда можно «пощупать» бурением.

Установлено, что точность подбора модели геоэлектрического разреза — геометрических параметров и собственных поляризованных потенциалов тел — определяется достигнутой величиной погрешности наблюдений и, следовательно, полностью зависит от качества исходного материала.

Появившаяся возможность количественной оценки не единичного аномального объекта, а одновременно их любой группы, создающей информационную целостность геологического разреза, позволяет предположить об открывающихся дополнительных перспективах метода естественного электрического поля не только на этапе поисков и разведки, но и при подсчете прогнозных запасов руды. Ценность этого метода еще более усиливается в связи с тем, что он, как и другие потенциальные методы, обладает большой глубиной исследования геологической среды. В этой связи метод ЕЭП на основе уточненной модели природы поля и разработанного математического обеспечения готов приступить к глобальному изучению качественных и количественных характеристик естественного потенциала земной коры и мантии.

ЛИТЕРАТУРА

Давыдов А.Я. Положительные аномалии естественного электрического поля над сульфидными рудными телами // Советская геология, 1961, № 7, с. 142—144.

Дмитриев А.Н. Метод естественного электрического поля в условиях многолетней мерзлоты Полярного Урала // Разведочная геофизика, 1975а, вып. 68, с. 96—102.

Дмитриев А.Н. Расчет электрического потенциала косоугольного параллелепипеда с помощью функции Грина // Разведочная геофизика, 1975б, вып. 68, с. 103—112.

Дмитриев А.Н., Розенберг А.В. Электрическое поле бесконечного по простиранию косоугольного параллелепипеда // Разведочная геофизика, 1976а, вып. 70, с. 80—85.

Дмитриев А.Н. Результаты машинной интерпретации измерений естественного электрического поля // Разведочная геофизика, 1976б, вып. 73, с. 86—90.

Дмитриев А.Н. Об электрохимических явлениях в процессе минералообразования // Советская геология, 1981, № 6, с. 106—113.

Дмитриев А.Н. Геолого-геофизические основы поисков электрически поляризованных объектов — нефтяных и рудных залежей (на примере Западной Сибири). Тюмень, Изд-во ТГУ, 2007, 226 с.

Дмитриев А.Н. Постоянное естественное электрическое поле Земли — его природа, новые поисковые возможности // Труды Международного форума по проблемам науки, техники и образования / Под ред. В.А. Малинникова, В.В. Вишневецкого. Т. 2. М., 2009, с. 56—64.

Левин А.И. Теоретические основы электрохимии. М., Металлургия, 1972, 543 с.

Миролюбов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. Методы расчета электрических полей. М., Высшая школа, 1963, 415 с.

Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. М., Наука, 1983, 382 с.

Свешников Г.Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л., ЛГУ, 1967, 160 с.

Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Л., Недра, 1974, 392 с.

Худяков А.П., Маливанчук В.В. Саурейское свинцовое месторождение (Полярный Урал) // Геология и полезные ископаемые Приполярного и Полярного Урала. Тюмень, 1972, с. 211—224 (Тр. ЗапСибНИГНИ, вып. 52).

Bigalke J., Grabner E.W. The Geobattery model: a contribution to large scale electrochemistry // *Electrochimica Acta*, 1997, v. 42, № 23—24, p. 3443—3452.

Mendonça C.A. Forward and inverse self-potential modeling in mineral exploration // *Geophysics*, 2008, v. 73, p. F33—F43.

Goldie M. Self-potentials associated with the Yanacocha high-sulfidation gold deposit in Peru // *Geophysics*, 2002, v. 67, p. 684—689.

<http://geophys.geol.msu.ru/index8.htm>.

Sato M., Mooney H.M. The electrochemical mechanism of sulphide self-potentials // *Geophysics*, 1960, v. XXV, № 1, p. 226—249.