

УДК 550.837.3

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ
ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
СО СЛОЖНЫМИ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ**

И. Ю. Рассказов¹, Г. Н. Шкабарня², Н. Г. Шкабарня¹

¹*Институт горного дела ДВО РАН,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия,*
²*Дальневосточный федеральный университет,
ул. Суханова 8, 690950, г. Владивосток, Россия*

Рассмотрены возможности метода электрической томографии при исследовании сложно-построенных геологических разрезов угольных месторождений на основе математического моделирования электрических полей в неоднородных средах. Анализ результатов моделирования позволил определить закономерности распределения полей, которые используются при интерпретации натурных материалов с целью формирования фоновых моделей для установления формы, размеров, условий залегания и физических свойств изучаемых объектов в слабо-дифференцированных средах. В качестве примера приведены результаты экспериментальных исследований на буроугольном месторождении.

Электрическая томография, метод сопротивлений, математическое моделирование, геоэлектрические разрезы, буроугольное месторождение

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Методы электрических сопротивлений и вызванной поляризации, основанные на различии электрических свойств горных пород, широко применяются при решении разнообразных горно-геологических задач в модификациях электрических зондирований или профилирований. Однако на современном этапе происходит увеличение объемов исследования месторождений со сложными горно-геологическими условиями и высокой степенью неоднородности физических свойств горных пород. Применение модификаций электрического зондирования, а тем более электропрофилирования в таких условиях не обеспечивает получения необходимой детальности изучения геологических разрезов. К недостаткам электрических зондирований относится технология полевых работ с подвижными источниками и приемниками, которая имеет редкую сеть измеренных параметров поля как по разносам, так и по профилю. Величины разносов изменяются, как правило, в геометрической прогрессии со знаменателем больше $\sqrt{2}$, а шаг по профилю определяется стадией геологоразведочных работ. Такая методика с редкой сетью измеряемых параметров не позволяет детально проследить особенности поля и получить в результате интерпретации достоверный геоэлектрический разрез при изучении сложнопостроенных сред.

Решение горно-геологических задач в таких условиях, особенно при экономии средств на дорогостоящее бурение скважин, может осуществляться только при внедрении новых геофизических технологий. В последнее десятилетие в методе сопротивлений и вызванной поляризации широкое развитие получило направление электрической томографии (Electrical resistivity tomography) с применением многоканальной аппаратуры, характеризующейся высокой производительностью, при размещении большого количества электродов (до нескольких сотен) на дневной поверхности [1–3]. Новые многоэлектродные системы наблюдений, управляемые полевым компьютером, позволили перейти от редких электрических зондирований к плотным системам наблюдений с многократным использованием каждого электрода в процессе измерений, что в свою очередь дало возможность отслеживать и уменьшать влияние геологических (приповерхностных) помех.

В результате измерений при одной расстановке электродов на профиле получаем полевую матрицу, где значения ρ_k по строкам отражают изменения электрических параметров среды при фиксированном разnose (функция электропрофилирования), а значения по столбцам — изменения параметров при разном разnose установки (функция электрического зондирования). Данная методика позволяет получать в процессе интерпретации матриц двумерные геоэлектрические разрезы.

Заметим, что при работе со 100-электродной системой наблюдений, выбором единичной установки Венера и расстоянием между электродами a получаем 97 значений ρ_k в первой строке матрицы, при выборе расстояния $2a$ — 94 значения ρ_k во второй строке и так далее до одного значения ρ_k при последней возможной длине между электродами в установке, равной $33a$. Итого матрица состоит из 33 строк и 1613 значений ρ_k . При работе по методике электрических зондирований с таким максимальным разansom и стандартным шагом получали кривую зондирования с 11 значениями ρ_k .

Несмотря на интегральную природу полей кажущихся сопротивлений и поляризуемостей, плотная информация томографических систем наблюдений с учетом разных позиций расположения источников и приемников на поверхности сложнопостроенных сред не является избыточной и позволяет детально исследовать строение и физические свойства горных пород на глубинах 70–100 м (в зависимости от свойств разреза). С большей глубиной ввиду интегральности метода высокая плотность системы наблюдений незначительно увеличивает детальность изучения разреза по сравнению с традиционным вертикальным электрическим зондированием (ВЭЗ) с более редкой сетью измерений. Эти положения, а также разрешающая способность модификации, закономерности распределения полей и критерии выделения элементов сложнопостроенных сред, рациональная методика полевых работ обоснованы на основе моделирования электрических полей.

ОСОБЕННОСТИ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ТЕРРИТОРИИ ПРИМОРЬЯ

Сложное геологическое строение и широкое развитие опасных геологических процессов на территории Приморского края связано в первую очередь с расположением региона в зоне сочленения Азиатского континента с жестким кристаллическим основанием и Тихоокеанского подвижного пояса с активными тектоническими и вулканическими процессами [4]. На протяжении 250 км с северо-запада на юго-восток установлено последовательное омоложение возраста гео-

логических образований от верхнеархейских и раннепротерозойских Ханкайского срединного массива к верхнепалеозойским Арсеньевского прогиба и мезозойским Сихотэ-Алинской системы до мезозойско-кайнозойского Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса.

Горно-геологические условия угольных месторождений края характеризуются многочисленными маломощными угольными пластами, которые ограничены метрами и редко первыми десятками метров. Пласты объединяются в группы, количество которых в разрезе достигает десяти и более. Группы пластов залегают моноклинально только на отдельных участках и осложнены большим количеством разрывных нарушений типа сбросов и взбросов с амплитудами от метров до десятков метров. На площади месторождений обычно выделяется несколько тектонических блоков. Иногда геологические разрезы усложняются наличием слабосекущих жил изверженных пород, пересекающих угольные пласты и метаморфизирующих уголь. Кроме того, при разработке угольных месторождений края открытым способом на бортах разрезов повсеместно развиваются оползневые процессы.

Таким образом, в разрезах месторождений присутствуют различно ориентированные границы, разделяющие литологические разности. Электрические свойства горных пород изменяются в широком диапазоне. Угольные пласты по электрическим свойствам слабо выделяются среди вмещающих пород.

В Приморском крае наблюдается большое разнообразие опасных геологических процессов, многие из которых характеризуются максимальной интенсивностью [5, 6]. Тектонические нарушения проявляются в образовании разрывных структур, которые не являются быстросдвигающимися, однако медленные (до сантиметров в год) перемещения блоков по разломам вызывают значительные трудности при разработке месторождений полезных ископаемых и строительстве различных объектов. Экзогенные процессы представлены оползнями, обвалами, осыпями, различными видами эрозии, карстовыми явлениями, криогенными процессами и просадками грунтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Развитие метода электрической томографии в условиях сложных горизонтально-неоднородных сред связано с получением и обработкой большого объема измерений, созданием вначале фоновой, а затем геоэлектрической модели и построением окончательного геолого-геофизического разреза. При интерпретации материалов электрической томографии ключевым этапом является формирование фоновой геоэлектрической модели [7]. При таком подходе учитывается априорная геолого-геофизическая информация, оценивается степень неоднородности среды, выбираются обобщенные параметры разреза и вырабатывается стратегия решения прямых и обратных задач. Методы решения прямых задач в электроразведке постоянным током представлены двумя подходами: аналитическим и численным. Аналитические решения получены лишь для ограниченного класса моделей. Главная их ценность состоит в возможности выделения основных закономерностей поведения поля, которые используются при формировании фоновой модели.

Для методических исследований выбраны модели [8], которые включают полупространства с горизонтальными, наклонными и вертикальными границами, а также локальными объектами в виде сфероида вращения. Эти модели, в первом приближении, отражают фрагменты сложно-построенных сред.

Вначале для моделей и томографических систем наблюдений были разработаны алгоритмы и программное обеспечение расчета полей с источниками только на поверхности. Но в дальнейшем, после анализа результатов моделирования, задача была усложнена для расположения

источников и приемников на поверхности и внутри среды (скважина) с тем, чтобы определить эффективность электрической томографии для системы “скважина – поверхность”. При решении задачи для среды с горизонтальными и вертикальными границами использовался только аналитический подход, а для среды со сфероидом и наклонными границами — аналитические и численные методы.

Например, в случае слоистых сред для решения использована цилиндрическая система координат, ось Z которой проходит через источник тока I перпендикулярно плоскостям раздела слоев с параметрами $\sigma_1, h_1, \sigma_2, h_2, \dots, \sigma_n, h_n$, где σ_i, h_i — проводимости и мощности слоев соответственно. Без ограничения общности источник тока располагаем на одной из границ раздела. Случай, когда источник находится внутри слоя, сводился к введению фиктивной границы, разделяющей два слоя с одинаковой проводимостью. Пусть плоскости раздела слоев имеют уравнение $z = z_i; r = 0$. Тогда электрический потенциал U должен удовлетворять внутри каждого слоя уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0,$$

граничным условиям

$$[U(z, r)] = 0 \quad \text{при } z = z_k, \quad k = 1, \dots, n,$$

$$\sigma_1 \frac{\partial U(z, r)}{\partial z} = \begin{cases} 0 & \text{при } z = z_0, \quad l \neq 0, \\ -I\delta(r)/2\pi r & \text{при } z = z_0, \quad l = 0, \end{cases}$$

$$\left[\sigma \frac{\partial U(z, r)}{\partial z} \right] = \begin{cases} 0 & \text{при } z = z_k, \quad k \neq l, \\ -I\delta(r)/2\pi r & \text{при } z = z_l \end{cases}$$

и условию затухания на бесконечности. Здесь квадратные скобки означают скачок заключенной в них величины, а $\delta(r)$ — дельта-функция Дирака.

В процессе определения потенциала в произвольных точках полупространства исходный интеграл Ханкеля путем замены переменных преобразовывался в интеграл свертки, который после дискретизации приводился к виду линейного фильтра. Алгоритм линейной фильтрации — наиболее эффективный аппарат при вычислении потенциала в силу быстроты и точности расчета.

В случае однородного полупространства с проводимостью σ_1 , имеющего включения в виде сфероидов с проводимостью σ_2 , требовалось найти решение уравнения

$$\nabla^2 U(x) = \frac{I}{\sigma_1} \delta(x - x_0), \quad x \in V_1 \cup V_2,$$

удовлетворяющее граничным условиям

$$\left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{x \in S_1} = 0, \quad U(x) \rightarrow 0 \quad \text{при } x \rightarrow \infty$$

и условиям сопряжения на границе сфероидов (поверхность разрыва распределения проводимости)

$$[U(x)]_{S_2} = 0, \quad \left[\sigma \frac{\partial U}{\partial n} \right]_{S_2} = 0,$$

где V_1, V_2 — подобласти полупространства с проводимостью σ_1 и σ_2 соответственно; S_1 — граница полупространства (дневная поверхность); S_2 — общая граница областей V_1 и V_2 (граница сфероида); $x = (x^1, x^2, x^3)$ — координаты произвольной точки полупространства; $x_0 = (x_0^1, x_0^2, x_0^3)$ — координаты точечного источника постоянного тока; $\delta(x)$ — дельта-функция Дирака, а квадратные скобки означают скачок заключенной в них функции при переходе через поверхность.

Представленная модель является квазитрехмерной, что обусловлено осевой симметрией области решения задачи. Для решения подобных задач наиболее эффективен метод интегральных уравнений, позволяющий свести задачу к решению системы несвязанных одномерных интегральных уравнений. С этой целью введена вспомогательная функция Грина, удовлетворяющая уравнению

$$\nabla_x^2 G(x, y) = -4\pi\delta(x - y), \quad x, y \in V_1 \cup V_2 \cup S_2$$

и краевым условиям

$$\left. \frac{\partial G(x, y)}{\partial n_x} \right|_{x \in S_1} = 0, \quad y \in V, \quad G(x, y) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad \|x\| \rightarrow \infty, \quad y \in V.$$

С помощью преобразований и свойств двойного слоя производится вывод интегрального уравнения, а используя численные методы, — редукция к системе одномерных интегральных уравнений. В процессе доказаны теоремы единственности решения краевой задачи, разработаны новые алгоритмы вычисления функций Лежандра и определена система линейных алгебраических уравнений относительно значений искомой потенциальной функции в узлах разностной сетки. Процесс суммирования продолжается до тех пор, пока абсолютное значение последнего члена ряда не станет меньше наперед заданной погрешности.

Выше показан новый подход к решению прямых задач с произвольным расположением источников и приемников на поверхности и внутри неоднородных сред. Подробное изложение выводов формул потенциала в поле точечного источника не имеет смысла. Окончательные формулы расчета слишком громоздки и получены впервые. Аналогичным образом решены прямые задачи для сред с вертикальными и наклонными границами.

На основе вычисления потенциалов при опросе любой установки кажущиеся сопротивления томографической матрицы определялись по формуле

$$\rho_k = \frac{4\pi}{\left(\frac{1}{R_{AM}} + \frac{1}{R_{\bar{A}M}} - \frac{1}{R_{\bar{A}N}} - \frac{1}{R_{AN}} - \frac{1}{R_{BM}} - \frac{1}{R_{\bar{B}M}} + \frac{1}{R_{BN}} + \frac{1}{R_{\bar{B}N}} \right)} \frac{(U_M - U_N)}{I},$$

где \bar{A} и \bar{B} — точки, зеркально симметричные точкам A и B относительно дневной поверхности; R_{AM} — расстояние между соответствующими электродами; U_M и U_N — потенциалы приемных электродов M и N . При моделировании требовалось многократно находить и сохранять распределения потенциала при различных положениях питающих электродов. Это позволило существенно сократить время счета на ПЭВМ.

В ходе дальнейшего анализа математического моделирования полей для выбранных моделей и томографических систем установлены критерии выделения и прослеживания границ, слоев и локальных объектов на основе закономерностей аномальных областей поля. Наряду с анализом разрезов кажущихся сопротивлений и поляризуемостей, полученных в результате первичной обработки, рассматривались закономерности кривых электрического зондирования,

которое можно легко получать из цифровых матриц. Закономерности поля установлены для различных вариантов соотношения геометрических и электрических параметров моделей, а также расположения многоэлектродной системы относительно выхода границ на поверхность и особых точек локального объекта. Выполненные исследования являются основой для развития метода электрической томографии.

Рассмотрим некоторые закономерности поля, которые представляют наибольший интерес при анализе полевых материалов. При расположении системы наблюдений на поверхности среды с пологими границами анализ матриц ничего существенного к известным закономерностям поля [9] не добавляет. Однако при интерпретации полевых материалов плотная информация позволяет точнее определять локальные участки подъема и опускания границ по сгущению изолиний поля.

Для модели с выходом наклонных границ на поверхность выявлены следующие закономерности:

— начальные значения на малых разносах (начальная асимптота кривых) определяются удельным сопротивлением той среды, на поверхности которой находится центр установки, конечные значения — асимптотическими формулами для соответствующих установок;

— если установка не пересекает линию контакта сред на поверхности, то значения поля изменяются монотонно, как и в случае слоистых сред; на поверхности с острыми углами ($\alpha < 30^\circ$) кривые зондирования по форме приближаются к двухслойным либо трехслойным, на поверхности среды с тупыми углами ($\alpha > 150^\circ$) — к начальной асимптоте; расхождения значений ρ_k и η_k при переходе на большую приемную линию не превосходят 8 % для стандартных соотношений MN / AB ;

— если установка пересекает линию контакта, то форма кривых характеризуется изломами при переходе линии питающим электродом, а после излома наблюдаются прямолинейные отрезки, на которых значения ρ_k и η_k определяются асимптотическими формулами; с уменьшением угла наклона аномальные особенности проявляются более ярко; значительные расхождения (до 100 %) установлены при проходе приемного электрода через линию контакта.

Для обнаружения и прослеживания локальных объектов необходимо учитывать следующие особенности:

— начальные значения (начальные асимптоты кривых) определяются удельным сопротивлением и поляризуемостью вмещающей среды, конечные асимптоты характеризуются асимптотическими формулами либо электрическими свойствами вмещающей среды; между асимптотами кривые монотонно изменяются, как и в случае слоистых сред, за исключением среды с вертикально-протяженным сфероидом (“веретенном”), тогда наблюдается излом на кривых зондирования при переходе питающего электрода через эпицентр объекта;

— при расположении центра установки над горизонтально-протяженным сфероидом (“диском”) начальные фрагменты кривых имеют вид двухслойных, а за пределами сфероида — трехслойных; расхождения на перекрытиях приемных линий достигают 50 %;

— вертикально-протяженный сфероид повышенного сопротивления практически не выделяется в поле кажущихся сопротивлений, а в поле поляризуемостей не выделяются любые объекты, если они имеют высокие сопротивления и низкие поляризуемости.

При исследовании горизонтально-неоднородных сред наиболее эффективно применять комбинированные установки, причем наибольшие возможности имеет трехэлектродная установка, питающий электрод которой переходит линию выхода границ на поверхности или эпи-

центр локального объекта. Основными характерными особенностями кривых зондирования являются изломы, расхождения значений ρ_k и η_k на перекрытиях приемных линий, углы наклона восходящих и нисходящих ветвей, поведение конечных асимптот, законы обращения кривых встречных трехэлектродных установок, смещения аномальных участков кривых по оси разносов в разных точках зондирования на профиле.

Установленные закономерности поля широко применялись в практике для формирования фоновой геоэлектрической модели [10]. Это сложный многостадийный процесс, который, кроме выделения и идентификации однотипных блоков, предусматривал изучение априорной геолого-геофизической информации и определение приближенных геометрических и физических параметров разреза. В процессе формирования фоновой модели старались уменьшить число определяемых параметров и оставляли только параметры доминирующих объектов. Использование таких моделей на этапе количественной интерпретации данных позволило существенно повысить устойчивость решения обратной задачи. Для количественной оценки параметров среды и построения окончательных геоэлектрических моделей выполнялась инверсия результатов наблюдений с помощью программы Res2dinv с минимизацией модельной невязки практической и теоретической матриц [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К настоящему времени накоплен достаточный опыт по изучению сложных горно-геологических условий на месторождениях угля при выделении угольных пластов и исследовании оползневых склонов на бортах разрезов.

В качестве примера рассмотрим результаты полевых работ, полученных методом электрической томографии на Бикинском буроугольном месторождении (участок “Центральный”), при выделении и прослеживании выходов угольных пластов под четвертичные отложения.

В геологическом строении депрессии, в пределах которой расположено месторождение, принимают участие палеозойские и мезозойские отложения фундамента и кайнозойские породы, образующие чехол структуры. Фундамент представлен преимущественно песчаниками и кремнисто-глинистыми сланцами триасового и юрского возрастов. Осадочные отложения кайнозойского возраста залегают с резким угловым несогласием на образованиях фундамента. Мощность кайнозойских отложений в пределах участка работ не превышает 150 м.

Особенно интенсивно дислоцирован палеозойский фундамент. Вертикальные амплитуды сбросов меняются в пределах от 18 до 300 м. Активизация разломов фундамента повлекла образование многочисленных разрывных нарушений в породах кайнозойского чехла. Они также имеют преимущественно сбросовый характер, значительно усложняя строение угленосных толщ и выходов пластов угля под четвертичные отложения.

На основании предшествующих геологоразведочных работ установлено, что промышленная угленосность участка приурочена к отложениям нижней угленосной толщи (угловская свита), вмещающей три группы пластов. В зоне выходов до глубин 30–40 м угольные пласты залегают под крутыми углами, а на больших глубинах углы падения выполаживаются и составляют 5–10°. Структура пластов осложнена флексурообразными перегибами и разрывными нарушениями сбросово- и сбросово-сдвигового характера. Местами мощность углей увеличивается до 25–30 м. Вмещающие отложения — алевролиты, аргиллиты, песчаники и углистые породы — повторяют условия залегания угольных пластов.

Четвертичные отложения развиты повсеместно. Они представлены глинами, суглинками, илами, песками с подчиненным количеством грубозернистых и щебнистых пород. Местами в древних руслах и поймах рек встречаются галечники и пески с гравием. Водотоки на участке сформировали сложную и пеструю карту четвертичных размывов в верхних горизонтах угловской свиты. В результате обработки данных каротажа скважин получены средние значения кажущихся сопротивлений для разреза участка (Ом·м): четвертичные глины (15–20), аргиллиты (17–22), алевролиты (20–45), углистые аргиллиты (25), уголь бурый (32–55), песчаник (50–100), галечник (110–150). Как видно, по этим свойствам бурый уголь занимает промежуточное положение и незначительно отличается от вмещающих пород. Поэтому решение задачи по выделению выходов угольных пластов электрической томографией является сложным и требует особого подхода при интерпретации полевого материала.

На данном участке выполнено четыре профиля электрической томографии: магистральный, проведенный вдоль зоны наибольшего подъема угольного горизонта к поверхности (около 20–40 м) и три профиля (№ 1–3) вкрест магистральному по падению угольного пласта. Профиль магистральный пройден с шагом 4 м между электродами, включал 100 электродов, его длина составила 396 м, остальные профили проходились с шагом 4.5 м, включали 100 (профиль № 2) и 75 (профиль № 1 и № 3) электродов, их длина составила 445.5 м (профиль № 2) и 333 м (профиль № 1 и № 3).

На основании анализа исходных данных вначале построены разрезы кажущихся сопротивлений, давшие общее представление об изменениях электрических свойств по профилям и на глубину. Использование закономерностей электрического поля при анализе полевых томографических матриц и представлений о фоновой модели по профилям позволило сузить объем эквивалентных моделей при количественной интерпретации и определить мощности и истинные удельные сопротивления отдельных слоев в разрезе.

Установлено, что бурые угли, выходящие под четвертичные отложения на данном участке, имеют удельные сопротивления 55–65 Ом·м. Повышенными сопротивлениями характеризуются конгломераты, песчаники, пески и галечники (70–220 Ом·м), а низкими — алевролиты, аргиллиты, глины и углистые аргиллиты (20–50 Ом·м).

В результате построены геоэлектрические модели, а после их геологического истолкования получены окончательные геолого-геофизические разрезы, на которых видна закономерность изменения удельных сопротивлений на глубину до 60 м. С учетом данных об удельных сопротивлениях бурых углей и результатов интерпретации кривых зондирования на разрезах выделены геоэлектрические горизонты, отождествляемые с выходами угольных пластов. На рис. 1 и 2 приведены геолого-геофизические разрезы для двух профилей. Представление разрезов в усеченно-треугольной форме обусловлено конфигурацией исходных томографических матриц.

На магистральном профиле (рис. 1) геоэлектрические горизонты с диапазоном сопротивления 55–65 Ом·м, отождествляемые с угольными пластами, выделяются на интервале ПК 40–ПК 150 при глубине залегания кровли 8–28 м и средней мощности горизонта 7 м, а также на интервале ПК 186–ПК 330 при глубине залегания кровли 10–55 м, при наибольшей мощности угольного горизонта 16 м. Наименьшие глубины залегания кровли пласта соответствуют повышению его сопротивления до 65 Ом·м, что свидетельствует об увеличении его зольности. В центральной части профиля условия залегания пластов угля сложные, а сам интервал между угольными пластами связан с тектоническим нарушением. Вмещающими породами являются низкоомные алевролиты и аргиллиты и высокоомные песчаники. Наиболее высокоомные отложения (пески, галечники) выделены у поверхности в районе ПК 15–ПК 65, ПК 185–ПК 210.

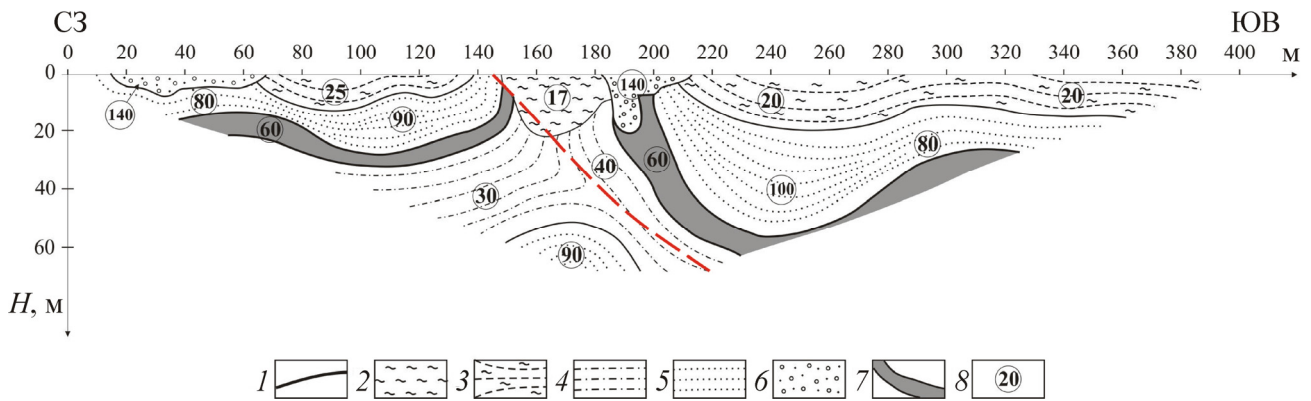


Рис. 1. Геолого-геофизический разрез по магистральному профилю: 1 — границы геоэлектрических горизонтов (литологических разностей по данным электрической томографии); 2 — глины; 3 — аргиллиты; 4 — алевролиты; 5 — песчаники; 6 — гравийно-галечные отложения; 7 — угольный пласт; 8 — удельные электрические сопротивления

На профиле № 2 (рис. 2) представлен угольный горизонт с сопротивлением 55–60 Ом·м, который выделяется на интервале ПК 90–ПК 380 при глубине залегания кровли от 8 до 31 м и средней мощности около 7 м. Положение его кровли на ПК 94 коррелирует с угольным горизонтом, отмеченном на ПК 200 магистрального профиля.

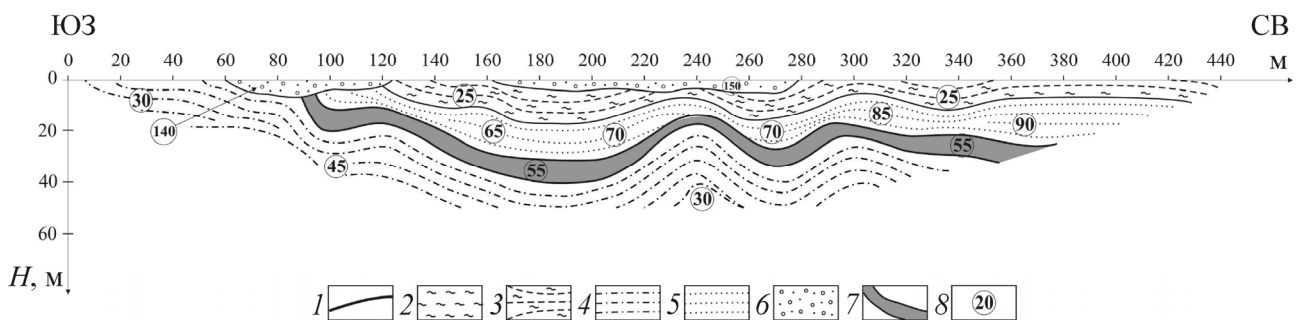


Рис. 2. Геолого-геофизический разрез по профилю № 2 (усл. обозн. см. на рис. 1)

Структура пласта осложнена флексуобразными перегибами. Подстилающими пласт породами являются алевролиты и аргиллиты, над угольным пластом выделены песчаники, еще выше — аргиллиты, у дневной поверхности в районе ПК 60–ПК 120 и ПК 160–ПК 280 отмечаются галечники и пески.

ВЫВОДЫ

Результаты исследований на Бикинском бурогольном месторождении показали, что применение метода электрической томографии позволяет изучать разрез даже при незначительной дифференциации пород по сопротивлениям и выделять зоны выхода бурых углей среди вмещающих пород, представленных аргиллитами, алевролитами и песчаниками. Поставленная задача решена благодаря плотной системе наблюдений, использованию закономерностей электрического поля при формировании фоновой модели, применению современного программного обеспечения для получения геоэлектрических моделей и геологического истолкования моделей с построением окончательных геолого-геофизических разрезов.

При исследовании сложнопостроенных горно-геологических сред угольных месторождений на первом этапе необходимо максимально использовать метод электрической томографии

в комплексе с единичными параметрическими скважинами. Для этого площадь исследования покрывается густой сетью профилей с расстоянием между электродами не более 5 м.

Основное назначение такой технологии — практически “непрерывное” определение электрических параметров по трем координатам геологической среды, а при мониторинговых наблюдениях — по четырем (x, y, z, t). Фоновые геоэлектрические модели на участках исследования месторождений, составленные на основе априорной геолого-геофизической информации и анализа результатов математического моделирования с критериями выделения угольных пластов, позволяют устранить эквивалентные решения при количественной интерпретации и формировать окончательные геолого-геофизические разрезы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Griffiths D. H., Barker R. D.** Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology, *J. Appl. Geophysics*, 1993, Vol. 29.
2. **Kenma A., Binley A., Ramirez A. and Daily W.** Complex resistivity tomography for environmental applications, *Chemical Engineering Journal*, 2000, Vol. 77.
3. **Dahlin T.** The development of DC resistivity imaging techniques, *Computers & Geosciences*, 2001, Vol. 27.
4. **Седых А. К.** Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья. — Владивосток: Дальнаука, 2008.
5. **Мясник В. Ч., Калинин И. В., Шкабарня Н. Г., Шкабарня Г. Н.** Изучение структурно-тектонического строения угольных разрезов методом электрической томографии // *Горн. журн.* — 2006. — № 12.
6. **Шкабарня Н. Г., Агошков А. И., Шкабарня Г. Н., Мясник В. Ч., Калинин И. В.** Возможности методов электроразведки для оценки техногенных оползневых явлений на угольных разрезах // *ГИАБ.* — 2007. — Отд. вып. № 9.
7. **Светов Б. С., Бердичевский М. Н.** Электроразведка на современном этапе // *Геофизика.* — М.: Герс, 1998. — № 2.
8. **Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г.** Обоснование новой технологии электрической томографии для разведки угольных месторождений // *ГИАБ.* — 2007. — Отд. вып. № 9.
9. **Электроразведка: справочник геофизика.** В 2 кн. / под ред. В. К. Хмелевского и В. М. Бондаренко. Кн. первая. — М.: Недр, 1989.
10. **Шкабарня Г. Н., Шкабарня Н. Г.** Оценка структурной модели оползневых откосов угольных разрезов с помощью электрической томографии // *ГИАБ.* — 2009. — Отд. вып. № 4.
11. **Loke M. H., Acworth I. and Dahlin T.** A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys., *Exploration Geophysics*, 2003, Vol. 34.

Поступила в редакцию 30/1 2013