

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 550.837.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ОТКОСОВ УГОЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

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

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

Рассмотрены условия и факторы, влияющие на устойчивость бортов карьеров и угольных разрезов, и обосновано применение метода электрической томографии для их изучения. Приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств горных пород, слагающих борта разреза Бикинского бурогоугольного месторождения. Предложена методика изучения ослабленных слоев и линз в геологическом разрезе с использованием средств электрической томографии.

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

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для изучения условий и факторов, влияющих на устойчивость бортов разрезов, выполняются геологические и геофизические исследования по определению инженерно-геологических и гидрогеологических условий отработки. Из геофизических методов на современном этапе наибольшими преимуществами обладает электрическая томография [1, 2]. Это связано с тем, что объем получаемой информации о геологической среде при использовании этой модификации метода сопротивлений дает возможность выявлять и проследивать маломощные ослабленные слои и линзы в разрезах оползневых массивов.

Создание многоканальной аппаратуры в конце прошлого столетия привело к широкому распространению метода сопротивлений при размещении большого количества электродов (до нескольких сотен) на дневной поверхности. Электрическая томография применяется для решения разнообразных задач рудной и инженерной геологии, геоэкологии и гидрогеологии. Среди задач преобладают исследования для инженерно-геологических изысканий, геологического картирования, выделения и прослеживания рудных объектов, оценки условий залегания подземных вод, выделения ореолов загрязнения вод.

В Приморском крае изучение оползневых массивов весьма актуально для угольных разрезов, расположенных в пределах крупного Бикинского бурогоугольного месторождения. На протяжении всего периода строительства и эксплуатации разрезов месторождения наблюдались

оползни откосов, которые сильно осложняли проведение добычных работ. Для оценки структурно-тектонического строения оползневых массивов и изучения ослабленных слоев проведены опытно-методические исследования с помощью электрической томографии.

Известно, что важнейшим фактором оползневых массивов является наличие ослабленных слоев и поверхностей скольжения, поскольку именно здесь естественная структура пород претерпевает наибольшие изменения. Эти изменения находят отражение во всех петрофизических параметрах ослабленных слоев и пропластков. В каждом конкретном случае оползневые процессы имеют свои особенности, которые необходимо детально исследовать. Эти задачи требуют изучения геомеханических свойств грунтов на месторождении и теоретических разработок для многоэлектродных систем наблюдений, связанных с формированием фоновых геоэлектрических моделей и математическим моделированием электрических полей в неоднородных средах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ НА ПЛОЩАДИ БИКИНСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Бикинское бурогольное месторождение, расположенное на севере Приморского края, приурочено к приразломной депрессии, которая по генезису относится к типу наложенно-унаследованных приразломных впадин. В геологическом строении депрессии принимают участие палеозойские и мезозойские отложения фундамента и кайнозойские породы, образующие чехол структуры.

На размытой поверхности палеозой-мезозойских пород, представленных песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами с угловым и стратиграфическим несогласием, залегают угленосные толщи палеогена и неогена, которые перекрываются четвертичными отложениями. Угленосная толща содержит до 18 групп угольных пластов, а вмещающими породами являются алевролиты, аргиллиты, тонко- и мелкозернистые песчаники (рис. 1). Четвертичные отложения выполнены глинами, суглинками, супесями, в основании которых часто прослеживаются песчано-галечниковые и гравийно-галечниковые породы. Мощность пород четвертичного возраста колеблется от 5 до 40 м.

Аргиллиты представляют собой однородные неслоистые глинистые породы с различно ориентированной трещиноватостью. Угол их внутреннего трения (φ) колеблется в диапазоне $19-25^\circ$, а сцепление (C) изменяется от 8.5 до 10 кПа. Породы склонны к разуплотнению, которое начинает проявляться при нормальных напряжениях, меньших 0.6 МПа. Анализ результатов испытаний показывает, что контакты, выполненные аргиллитами, имеют низкую сопротивляемость сдвигу и существенного увеличения прочностных свойств контактов с глубиной не наблюдается.

Углистые аргиллиты, залегающие в кровле и почве угольных пластов, по свойствам практически не отличаются от аргиллитов. При разгрузке и подпитывании водой они также склонны к разуплотнению. Более прочные и устойчивые к разуплотнению — алевролиты продуктивной толщи. Однако при длительном нахождении в разгруженном состоянии и дополнительном увлажнении они набухают и разуплотняются благодаря присутствию в них глинистого и пылеватого материала. Для них характерны следующие параметры: $\varphi = 25-28^\circ$, $C = 10$ кПа.

Залегающие выше продуктивной толщи маломощные неогеновые глины характеризуются как сильнонабухающие, содержание тонкодисперсных частиц в них составляет 37 %, природная влажность достигает 108.3 %, коэффициент пористости — 2.9. После уплотнения глин

природная влажность составила 35.4 %, коэффициент пористости уменьшился до 1.03. В этом состоянии при испытании образца на сдвиг угол внутреннего трения составил 12° , а удельное сцепление — 1.1 кПа.

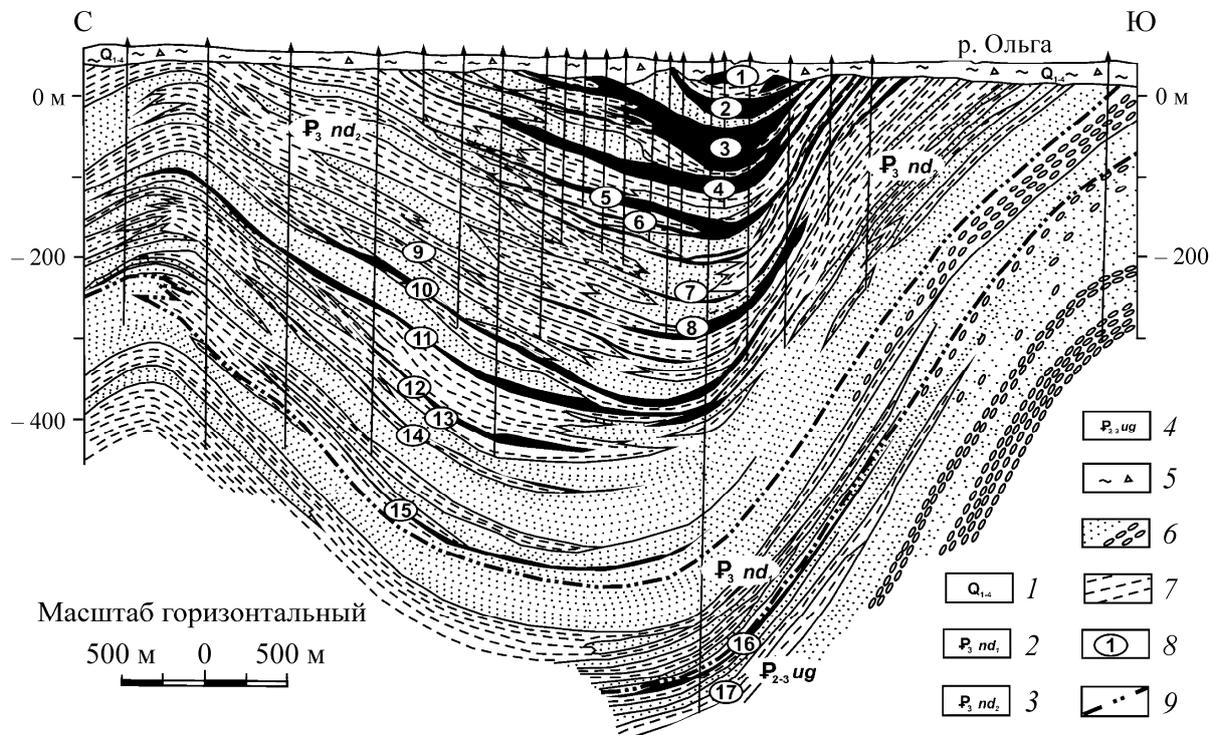


Рис. 1. Схематический литологический разрез Бикинского бурогольного месторождения (составлен по материалам Ш. Г. Ульмясбаева, Г. П. Кукаренко и др., 1971). 1–4 — стратиграфические подразделения: 1 — нерасчлененные четвертичные отложения; 2–3 — непродуктивная (2) и верхняя угленосная (3) подсвиты надежденской свиты; 4 — угловская угленосная свита; 5–7 — литологические типы отложений: 5 — рыхлые четвертичные; 6 — руслово-пойменные, 7 — озеро-болотные; 8 — название группы слоев; 9 — границы свит

Четвертичные отложения обычно сложены тугопластичными глинами и суглинками, переходящими с глубиной в полутвердые суглинки, а также русловые гравийно-галечниковые образования. Для глин угол внутреннего трения колеблется в диапазоне $17–19^\circ$, а удельное сцепление составляет 1.9–2.5 кПа. Однако отдельные разности этих глин, характеризующиеся особым минеральным составом и текстурой, при увлажнении легко переходят в вязкопластическое состояние. Кроме того, литологический состав пород верхней части геологической среды характеризуется частыми фаціальными замещениями и выклиниваниями, породы слаблитифицированы — песчаники по свойствам близки к пескам, а алевролиты и аргиллиты — к супесям и глинам.

В пределах месторождения слоистая структура угленосной депрессии осложнена разрывными нарушениями типа сбросов и сбросо-сдвигов [3], особенно интенсивно проявленных в фундаменте. Нарушения разбивают поле разреза на ряд тектонических блоков, которые во многом определяют инженерно-геологические условия и особенности оползневых процессов. Согласно классификации оползневых массивов [4], оползни в пределах блоков относятся к самой неблагоприятной второй группе. Модели этой группы включают наклонно-слоистые и мультислойные среды, поверхности скольжения в глинистых отложениях полностью или частично совпадают с границами ослабленных слоев.

В результате исследований деформации бортов на участке установлено [5], что основными факторами, отрицательно влияющими на устойчивость откосов, являются:

— наличие в кровле и почве угольных пластов пластичных пропластков глин и аргиллитов, а также ослабленных слоев в верхней части разреза с низкими характеристиками сопротивляемости сдвигов;

— падение слоев пород и угольных пластов в сторону выработанного пространства под углами от 12 до 25°;

— наличие напорных вод из нижележащих невоскрывших групп угольных пластов.

ФОРМИРОВАНИЕ ФОНОВЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОПОЛЗНЕВЫХ МАССИВОВ

Основной причиной образования пластичных и ослабленных слоев на Бикинском месторождении является склонность глинистых пород к разуплотнению под действием повышенного увлажнения. Даже плотные тугопластичные глины имеют высокую чувствительность перехода в вязкопластическое состояние. Эта чувствительность обусловлена минеральным составом, текстурой и структурой глин. В процессе обводнения разрыхленные и насыщенные водой глинистые породы набухают до текучего состояния и сползают в основание откоса.

Подземные воды на площади оползневого массива по своему составу характеризуются как гидрокарбонатно-натриевые с низким содержанием сульфатов, хлоридов и кальция. Для них сухой остаток увеличивается с глубиной и достигает 1.2 г/л. Состав вод в основании оползневого склона характеризуется как сульфатно-кальциево-натриевый и сухой остаток для них составляет 2.9 г/л. С учетом известных зависимостей наименьшие значения удельных сопротивлений воды определены равными 8.6 Ом·м, а соответственно сопротивления ослабленных глин, песчано-глинистых и даже песчано-гравийных отложений могут уменьшаться до 7.0 Ом·м.

Такое уменьшение удельных сопротивлений ослабленных слоев связано с гидратацией глинистых минералов, чему способствует перетиравание и интенсивное механическое разрушение пород. Причем наиболее существенно возрастает электропроводность пород со сравнительно жесткой связью, например песчано-глинистых и песчано-гравийных отложений. В меньшей степени такие изменения происходят с однородными глинами, если они характеризуются высокими показателями пластичности. Таким образом, электрические параметры оползневых массивов трансформируются в пределах склона, и эта закономерность использовалась при расчетах поля, а также детально изучалась в процессе экспериментальных работ.

На основании анализа инженерно-геологических условий и электропроводности пород сформированы четыре геоэлектрические модели с параметрами доминирующих комплексов горных пород. Эти модели стали основой для расчета теоретических матриц, установления закономерностей аномального поля и определения критериев выделения ослабленных слоев.

Первая модель расположена за пределами оползневого массива, характеризуется отсутствием ослабленных слоев и приведена для сопоставления. Удельные сопротивления верхнего почвенно-растительного слоя, местами насыпного грунта изменяются в диапазоне 14–80 Ом·м. Глины и суглинки средней части имеют сопротивления 12–40 Ом·м. Подстилающими являются палеоген-неогеновые алевролиты и аргиллиты, сопротивления которых меняются от 10 до 30 Ом·м. Модель в большинстве случаев представлена типом Н ($\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$), хотя встречаются и другие типы трехслойного разреза Q ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$), К ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$), А ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$).

Вторая модель ориентирована вдоль бровки борта и включает на глубине 25–30 м сильно-набухающие неогеновые глины мягкопластичной консистенции с сопротивлением 7–12 Ом·м. Сверху этот слой перекрывается комплексом аллювиальных глин и суглинков с прослоями и

линзами песков, песчано-глинистого и песчано-гравийного материала. Эти глины в естественном залегании имеют тугопластичную консистенцию (14–40 Ом·м), которая при увлажнении местами переходит в мягкопластичную (10–15 Ом·м), образуя новый ослабленный слой. На поверхности разреза — насыпной грунт (24–100 Ом·м). Геоэлектрическая модель представлена типами QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$), KH ($\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$).

Третья модель наблюдается на склоне, ближе к бровке, имеет резкопересеченный рельеф местности с уступами. Ослабленный слой в средней части представлен четвертичными песчано-глинистыми либо песчано-гравийными отложениями (8–14 Ом·м), которые частично вскрыты в процессе вскрышных работ. В эти отложения происходит активная разгрузка подземных вод из подстилающего угленосного горизонта, выполненного алевролитами, песчаниками и пластами угля (15–40 Ом·м). Перекрывается разрез насыпным грунтом (70–100 Ом·м). Модель характеризуется типом Н.

Четвертая модель приурочена к средней части склона ближе к мульде. Глинистые и песчано-глинистые отложения практически везде отсутствуют. Техногенные образования (15–25 Ом·м), представленные рыхлыми песчаными, песчано-гравийными смесями с обломками пород различного генезиса, полностью являются зоной ослабления. Поверхность скольжения совпадает с подошвой слоя, а ниже залегают породы угольного горизонта (15–40 Ом·м). Эта модель также представлена типом Н.

Как видно, геоэлектрические модели включают три-четыре слоя и мощности, нарастающие с глубиной, за исключением второй модели. Такая закономерность является благоприятным фактором при изучении среды.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ОСЛАБЛЕННЫХ СЛОЕВ И ЛИНЗ В ГЕОЛОГИЧЕСКОМ РАЗРЕЗЕ

Основные задачи электрической томографии при оценке оползневых откосов:

- изучение структурно-тектонического строения, включая определение геометрических и электрических параметров основных комплексов пород на глубинах до 40–50 м;
- обнаружение и прослеживание линз и слоев с низким удельным сопротивлением, связанных с мягкопластичными и пластичными глинами;
- исследования динамики изменения параметров ослабленных линз и слоев при мониторинговых наблюдениях.

При решении задач предварительно проводилось моделирование электрических полей для неоднородных сред, аппроксимирующих фрагменты фоновых моделей. Для моделирования полей использовались разработанные программы расчета кажущихся сопротивлений для слоистых сред и сред с горизонтально-протяженными локальными объектами. В результате анализа данных моделирования определены критерии обнаружения и прослеживания слоев, выклинивающихся пластов и линз. Установлено, что слои мягкопластичных глин в четвертичных отложениях могут уверенно выделяться на глубинах 10–30 м, если их мощность превышает 7 м.

Для обнаружения и прослеживания выклинивающихся пластов и линз на разрезах кажущихся сопротивлений следует учитывать:

- своеобразную форму аномальных областей для проводящих и непроводящих объектов, законы ее изменения в зависимости от расположения середины установки относительно особых точек изучаемых объектов;
- расположение линий наибольшего градиента в пределах аномальной области позволяет установить размеры объекта по профилю, приближенно определить его кровлю, менее уверенно — подошву;

— размеры аномалий возрастают при увеличении объема неоднородности, попадающего в область распространения токов;

— расположение аномалий, связанных с экранными эффектами при выделении горизонтально-протяженных линз.

В процессе полевых работ применялись многоэлектродные поверхностные системы наблюдений цифровой аппаратуры “SARIS” (Scintrex Ltd, Канада) с расположением от 75 до 100 электродов при каждом измерении (расстановке) и опросе системы наблюдений по схеме установки Веннера ($AM = MN = NB$). С учетом расстояний между электродами (4.5 м) длина каждой расстановки составляла от 333 до 445.5 м. Исследования проводились по профилям параллельно бровке борта разреза.

Вначале проводились построения разрезов кажущихся сопротивлений. На основе детального анализа разрезов, сравнения их с теоретическими, рассчитанными по параметрам фоновых разрезов, использования результатов моделирования получены сведения о закономерностях изменения удельных сопротивлений по глубине и профилям. В итоге уточнены предварительные параметры фоновой геоэлектрической модели, которые использовались в процессе интерпретации полевых данных.

В результате интерпретации, выполненной с помощью программы Res2dinv [6], получены геоэлектрические модели по каждому профилю. Использование информации о предварительных параметрах, критериях обнаружения и прослеживания выклинивающихся пластов и линз в геоэлектрическом разрезе позволило существенно повысить качество интерпретации.

На геоэлектрических разрезах видны основные элементы структурно-тектонического строения оползневого склона. Высокими удельными сопротивлениями от 34 до 100 Ом·м выделяются безводные насыпные грунты, техногенные образования, почвенно-растительный слой и гравийно-галечниковые отложения. Сопротивлениями в диапазоне 14–34 Ом·м отмечаются слабообводненные тугопластичные глины, суглинки, песчано-глинистые и песчано-гравийные отложения. Интервалы разреза с сопротивлением ниже 14 Ом·м соответствуют сильнообводненным породам разного возраста, мягко- и текучепластичным глинам и суглинкам.

После определения геоэлектрических разрезов, наполнения их геологическим содержанием и привязки геоэлектрических горизонтов к литологическим построены геолого-геофизические разрезы.

На одной из площадей оползневого откоса, где выполнены 24 профиля электрической томографии, комплексы пород сверху вниз располагаются следующим образом:

1) насыпные грунты, местами погребенный почвенно-растительный слой мощностью от 1 до 10 м с удельным сопротивлением 24–100 Ом·м;

2) глины, суглинки, песчано-глинистые и песчано-гравийные отложения четвертичного возраста мощностью до 30 м с удельным сопротивлением от 14 до 34 Ом·м. Глины и суглинки тугопластичные полутвердые имеют сопротивления 14–20 Ом·м, песчано-глинистые и песчано-гравийные включения в нижней части комплекса — 20–34 Ом·м. Среди пород этого комплекса вблизи поверхности уверенно выделяются линзы мягкопластичных и пластичных глин с сопротивлением 10–14 Ом·м и мощностью до 10 м;

3) подстилающий обводненный горизонт верхнепалеогеновых и нижненеогеновых пород, представленный мягко- и текучепластичными глинами, аргиллитоподобными суглинками или водоносными гравелитами. Горизонт находится на глубине более 30 м, удельные сопротивления его изменяются незначительно в диапазоне от 8 до 24 Ом·м.

Геолого-литологическое строение верхних двух комплексов характеризуется резкими изменениями условий залегания пород вдоль склона. Здесь наблюдаются частые фациальные за-

мещения и выклинивания отдельных литологических разностей. Среди глин наблюдаются песчано-глинистые и песчано-гравийные отложения.

Анализ закономерностей распределения удельных сопротивлений дает основание для выделения на площади оползневого массива блоков с разными соотношениями туго- и мягкопластичных пород. Блоки имеют северо-восточное простирание. Границы между блоками характеризуются областями пониженных удельных сопротивлений, и можно предположить, что так отмечаются зоны разгрузки напорных подземных вод подстилающего горизонта в вышележащем отложении. По направлению к мульде доля тугопластичных пород в блоках уменьшается до полного выклинивания.

На рис. 2 приведены типовые геолого-геофизические разрезы по трем профилям. На них отражены условия залегания основных комплексов пород с выделением мягкопластичных и пластичных глин и закономерности изменения электрических параметров.

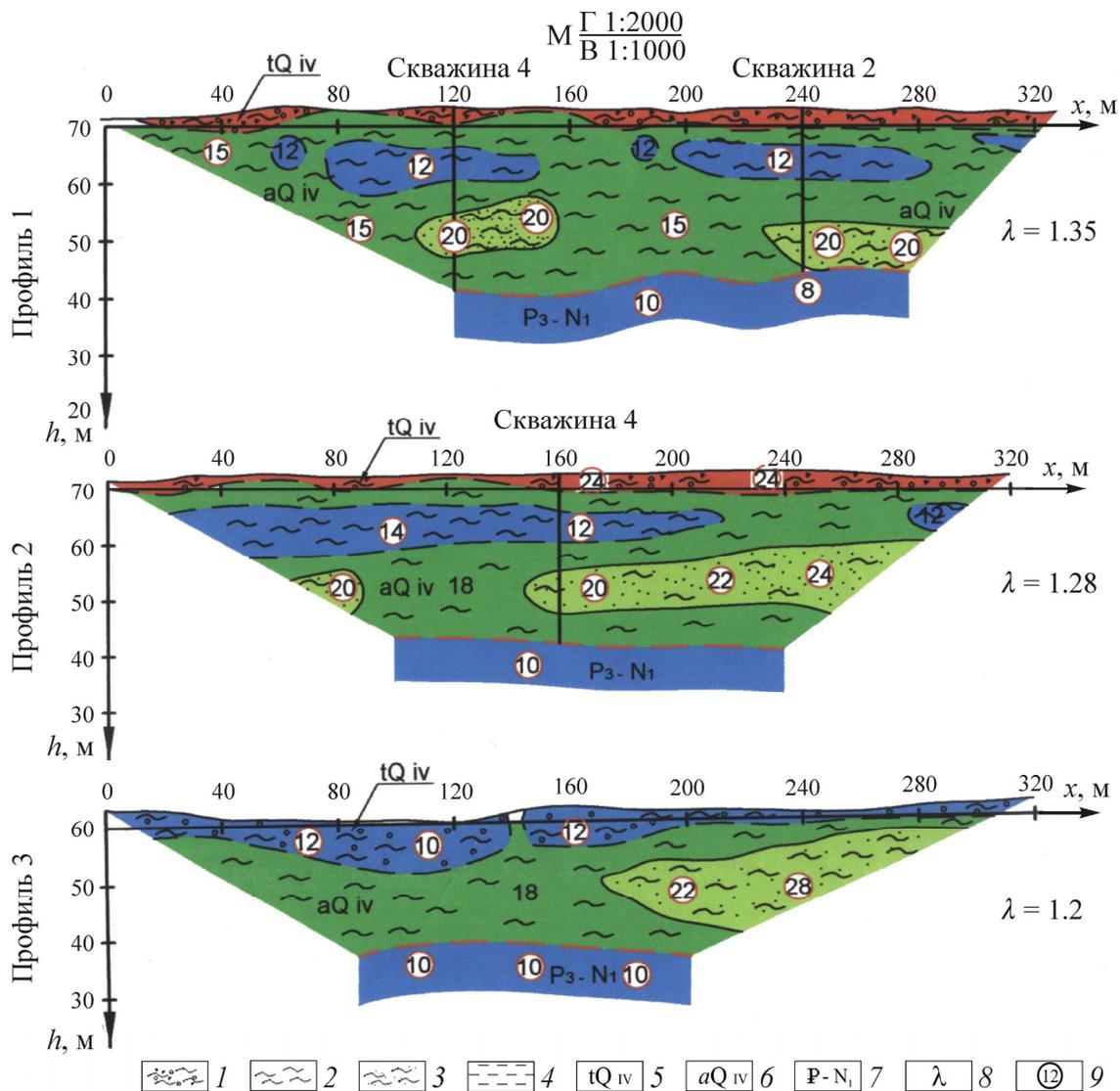


Рис. 2. Геолого-геофизические разрезы для профилей 1–3: 1 — насыпной грунт; 2 — глины, глинистые породы; 3 — песчано-глинистые отложения; 4 — аргиллитоподобные суглинки; 5 — техногенные четвертичные отложения; 6 — отложения четвертичного возраста; 7 — олигоцен-миоценовые отложения (глины и аргиллитоподобные суглинки); 8 — значения коэффициента анизотропии; 9 — значения удельного сопротивления

Видно, что мягкопластичные глины в четвертичных отложениях представлены в виде линз, а подстилающие глины палеоген-неогенового возраста — в виде слоев.

В процессе мониторинговых наблюдений установлено, что тугопластичные четвертичные глины при обводнении переходят в мягкопластичные. В обводнении исследуемого оползневого откоса участвуют как атмосферные осадки, так и подземные напорные воды угольного водоносного горизонта.

Напорные воды играют основную роль в обводнении и являются главным фактором формирования негативных геодинамических процессов, осложняющих проведение горных работ. По данным режимных наблюдений, на выбранных профилях с интервалом 6 мес (рис. 3) общая протяженность мягкопластичных глин увеличилась. Также увеличилась и мощность этих глин примерно на 2–3 м.

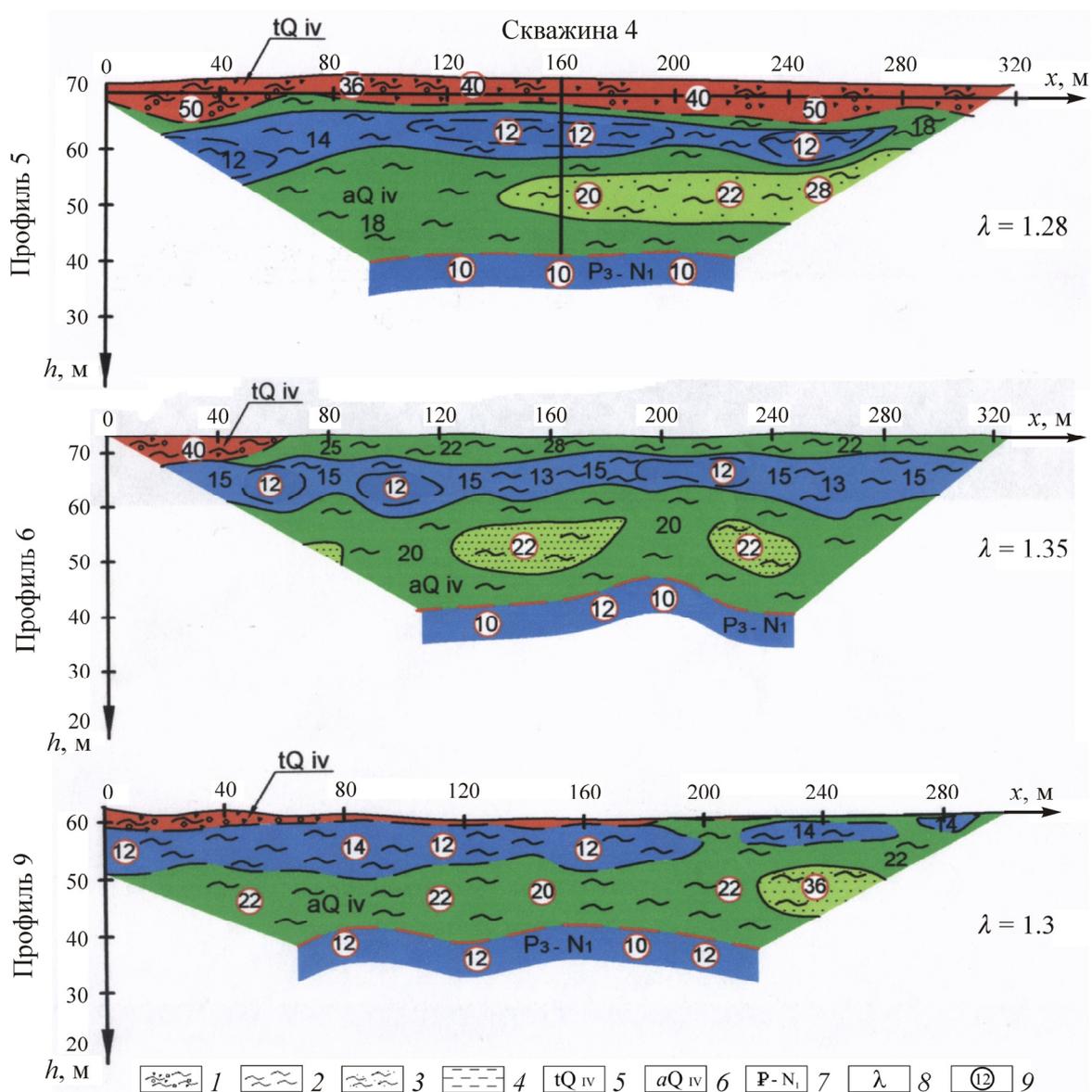


Рис. 3. Геолого-геофизические разрезы мониторинговых наблюдений для профилей 5 (по профилю 2), 6 (по профилю 1), 9 (по профилю 3). Усл. обозн. см. на рис. 2.

Кроме того, отмечаются изменения в залегании верхнего комплекса. На профилях вблизи бровки и ближе к мульде мощность его увеличилась, на среднем профиле линзы повышенного сопротивления выделяются только в начале профиля. Эти изменения связаны с увеличением мощности насыпного грунта и с обводнением пород в массиве. Есть изменения формы линз песчано-глинистых пород.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных опытно-экспериментальных работ на Бикинском буроугольном месторождении методом электрической томографии выделены ослабленные контакты, связанные с кровлей мягкопластичных глин или с кровлей водонасыщенных песчано-гравийных, песчано-глинистых пород. Установленные закономерности поведения ослабленных контактов в пространстве и времени используются геологической службой угольного разреза для оценки развития оползневых процессов. В условиях блочной структуры массива вышележащие породы могут сползать в выработанное пространство не сплошной массой одновременно, а частями, по мере перехода тугопластичных глин в упругопластическое состояние.

Рекомендовано выполнять постоянные мониторинговые наблюдения с применением электрической томографии по всей площади оползневого массива и контрольное бурение скважин в отдельных точках. Принимая во внимание, что бурение скважин непосредственно на склонах бортов осуществить крайне сложно (а в ряде случаев невозможно), применение электрической томографии является необходимым элементом обоснования противооползневых мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкабарня Г. Н. Возможности и перспективы электрической томографии при детальном изучении геологической среды // ГеоИнжиниринг. — Краснодар: Изд-во “ИнжГео”, 2006. — № 1.
2. Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques. Computers & Geosciences, 2001, No. 27.
3. Седых А. К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья. — Владивосток: Дальнаука, 2008.
4. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах. — СПб.: ВНИМИ, 1998.
5. 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. — № 9.
6. Loke M. H., Acworth I. and Dahlin T. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys, Exploration Geophysics, 2003, No. 34.

Поступила в редакцию 1/IV 2013