

Результаты первого этапа электроразведочных работ АМТЗ и МТЗ в Геналдонском ущелье

В.Н. Арбузкин¹, И.С. Фельдман², Е.А. Трофименко³

Магнитотеллурические исследования являются составной частью комплекса геолого-геофизических работ, проводимых в различных регионах, в том числе с целью изучения геодинамического состояния среды, оценки возможности развития опасных (катастрофических) геологических процессов. В 2001–2002 гг. работы МТЗ, выполненные в Приэльбрусье, позволили выделить в районе вулкана аномалии проводимости, которые трактуются как магматическая камера (на глубинах 2–8 км) и магматический очаг (глубины свыше 30 км).

В Геналдонском ущелье небольшой объем АМТЗ и МТЗ выполнен в июле–августе 2003 г. геофизической службой ФГУГП «Кавказгеолсъемка» по договору с Владикавказским научным центром (ВНЦ) РАН.

Аудиомагнитотеллурические зондирования (АМТЗ) играли вспомогательную роль и проводились с целью изучения верхней части разреза, оценки уровня помех и выбора пунктов постановки МТЗ. Работы выполнялись станцией АКФ (аппаратура корреляционных функций). Крестообразной установкой регистрировались 4 компонента естественного электромагнитного поля Земли E_x , E_y , H_x , H_y . Длина приемных диполей была выбрана на основании опытных работ и составила 50 м. Увеличение длины линий до 100 м приводило к резкому увеличению уровня регистрируемых помех и весьма ограничивало выбор площадок, пригодных к работе. Методика наблюдений была стандартной и соответствовала «Инструкции по эксплуатации аппаратуры АКФ». Перед началом полевых работ и в их процессе проводились калибровки каналов и индукционных датчиков. Наблюдения выполнялись с помощью портативного Notebook «Toshiba», который использовался как управляющий, регистрирующий и обрабатывающий блок. Диапазон измерений составлял в основном 10–600 Гц, на отдельных точках низкие частоты регистрировались с 8 Гц. Длительность собственно измерений в этом

частотном диапазоне не превышает 1 мин., но цикл считается завершенным, если когерентность между соответствующими каналами не ниже 0,7. Неожиданно высоким оказался фон электромагнитных помех, особенно в районе п. Кармадон. Поэтому на каждой точке цикл измерений многократно повторялся, часто с переменной места установки, до получения необходимой когерентности. Фактически на отработку одного пункта АМТЗ уходил рабочий день. Всего на профиле выполнено 11 ф.т. АМТЗ, пригодными к обработке и интерпретации признаны наблюдения в 10 пунктах.

Полевые работы МТЗ выполнялись двумя станциями «Phoenix» (Канада) – MTU-5MT № 1285 и MTU-2E № 1403. Станция MTU-5MT использовалась как базовая на точке № 10, остальные пункты отработаны станцией MTU-2E. Перед началом профильных работ на базовой точке в течение 3 суток изучалось соотношение сигнал/помеха с регистрацией 4 компонент естественного электромагнитного поля (E_x , E_y , H_x , H_y) в полном частотном диапазоне станций MTU (320–0,00055 Гц). Было установлено, что наиболее благоприятное время – ночные часы. На рядовых пунктах электрические поля регистрировались крестообразной установкой длиной 50–90 м, в азимутах 0–90°. Регистрация проводилась с 19 часов вечера до 6–7 часов утра. Практически весь период наблюдений сопровождался пасмурной погодой, дождями с грозами и туманами, что осложняло как выбор площадок, так и перемещение аппаратуры с пункта на пункт. Калибровка станций и индукционных датчиков выполнена дважды: до начала работ и по их завершении. Планово-высотная привязка пунктов наблюдений осуществлялась с помощью GPS-приемников, входящих в состав станций. Схема расположения пунктов наблюдений показана на *рис. 1*.

Обработка материалов АМТЗ выполнена по обычной схеме. После окончания сеанса измерений

¹ В.Н. Арбузкин – начальник партии, ФГУГП «Кавказгеолсъемка», г. Ессентуки.

² И.С. Фельдман – к. г.-м. н., ООО «Центр ЭМИ», главный геофизик, г. Москва.

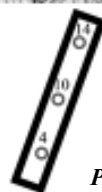
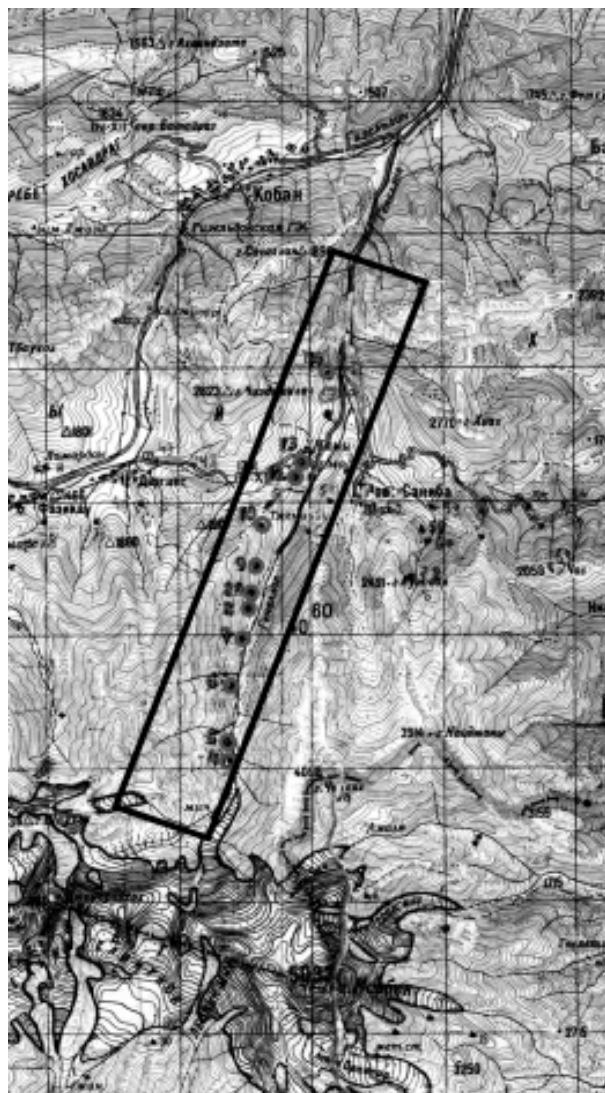
³ Е.А. Трофименко – главный геофизик партии, ФГУГП «Кавказгеолсъемка», г. Ессентуки.

с помощью пакета программ CR4 вычислялись спектры следующих величин:

- горизонтальных составляющих магнитного H_x , H_y и электрического E_x , E_y полей;
- разности фаз и коэффициенты когерентности между каждой парой компонент электрического поля;
- отношений сопряженных компонент поля;
- отношений дополнительных компонент поля.

Расчет элементов тензора импеданса проводился с использованием соответствующих вычислительных программ, содержащихся в пакете CR4. При помощи программы FURCOR исходные данные пересчитывались в кривые кажущихся сопротивлений $\rho_k \rightarrow f(\text{Гц})$. Просмотр и корректировка результатов решения обратной задачи осуществлялись запуском таблицы Qpro. По результатам вычислений ρ_k в каждой точке измерений с помощью программы «SURFER» построен разрез $\rho_k \rightarrow f(H)$.

Поскольку аппаратура MTU новая в практике электроразведочных работ, выполняемых в России, остановимся более подробно на обработке данных МТЗ. Ее можно условно разделить на два этапа. Начальный – проводится непосредственно в поле с помощью программ пакета Ssmt-2000, разработанного компанией «Phoenix Geophysics Ltd». Выполняется обработка результатов калибровки, переформатирование записей поля (сшивание файлов записей различных режимов оцифровки), построение компонент тензора импеданса в различных режимах (одиночный, синхронный). В связи с особенностью режима оцифровки записей поля, данные станций «Phoenix» сохраняются в двух файлах: с расширением .tsl – низкие частоты (оцифровка с частотой 24 Гц на протяжении всей записи), с расширением .tsh – средние и высокие частоты (оцифровка с частотами 320 и 2 560 Гц соответственно по выбранной оператором схеме включения режимов). Для того чтобы сшить эти файлы, используется программа MTU-V5TS. В процессе работы программа запрашивает информацию, которую необходимо ввести вручную из полевых дневников операторов станций: длины электрических линий, азимуты, сопротивления и потенциалы на электрических линиях, серийные номера магнитных датчиков, а также условное время начала записи. Это время может отличаться от фактического времени начала работы станции. При синхронной обработке особенно важно, чтобы совпадали условные времена начала записи рабочей и базовой



- участки работ и пункты наблюдений

Рис. 1. Схема расположения участка работ.

станций, в противном случае обработка дает неверный результат.

На выходе программы MTU-V5TS создается объединенный файл с расширением .tsd. Кроме того, создается текстовый файл-этикетка (hdr) с записью параметров съемки (введенных вручную, считанных из стартового табло и из файлов данных .tsl, .tsh).

Далее проводится выделение из полученных данных (файлы .tsd) компонент тензора импеданса в программе MtuRobst. Программа основана на корреляционном методе, при котором сначала рассчитываются функции взаимной корреляции всех компонент поля. Далее проводится Фурье-преобразо-

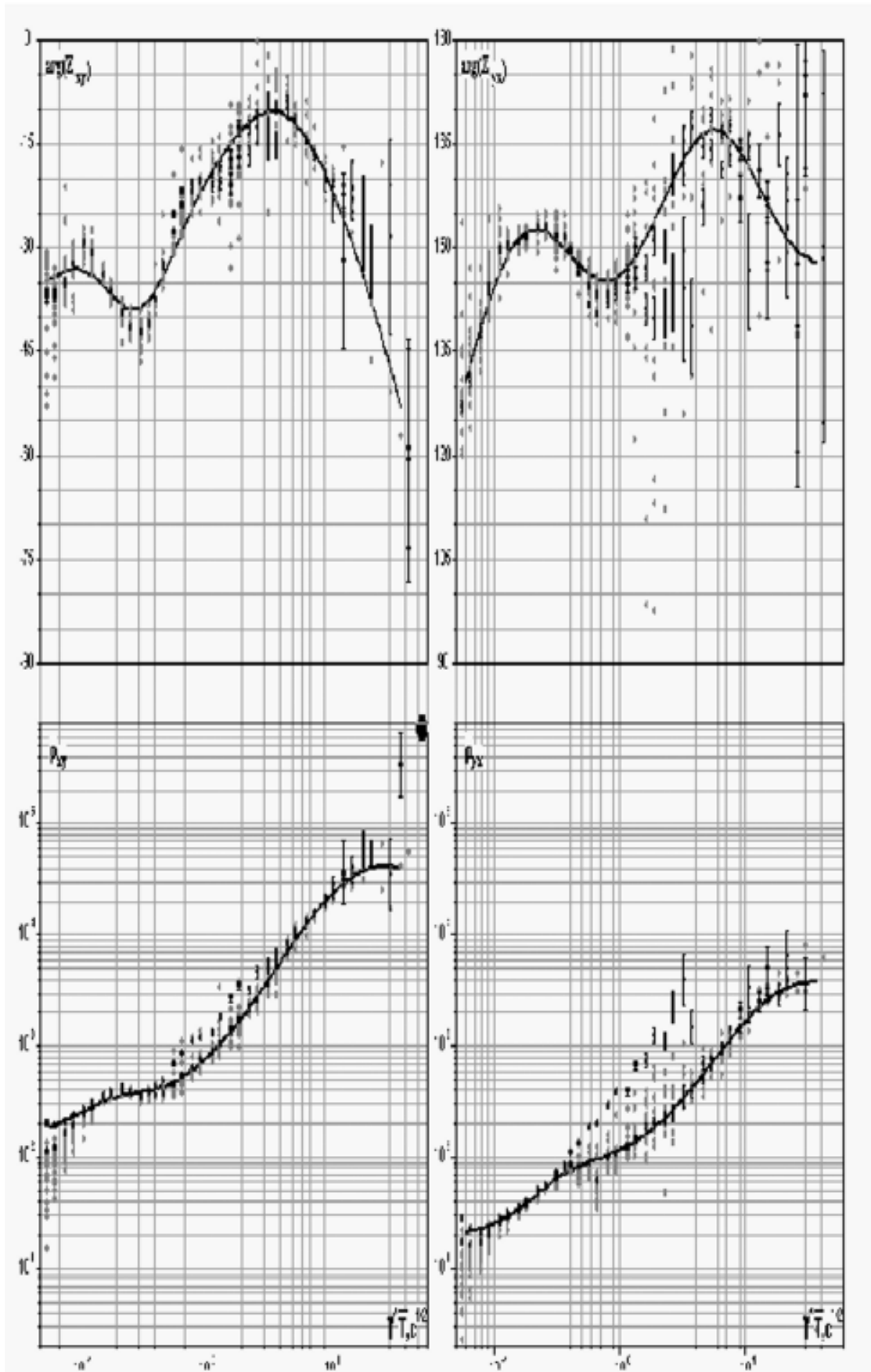


Рис. 2. Геналдон. Пример проведения сплайнов основных импедансов. Пункт 4.

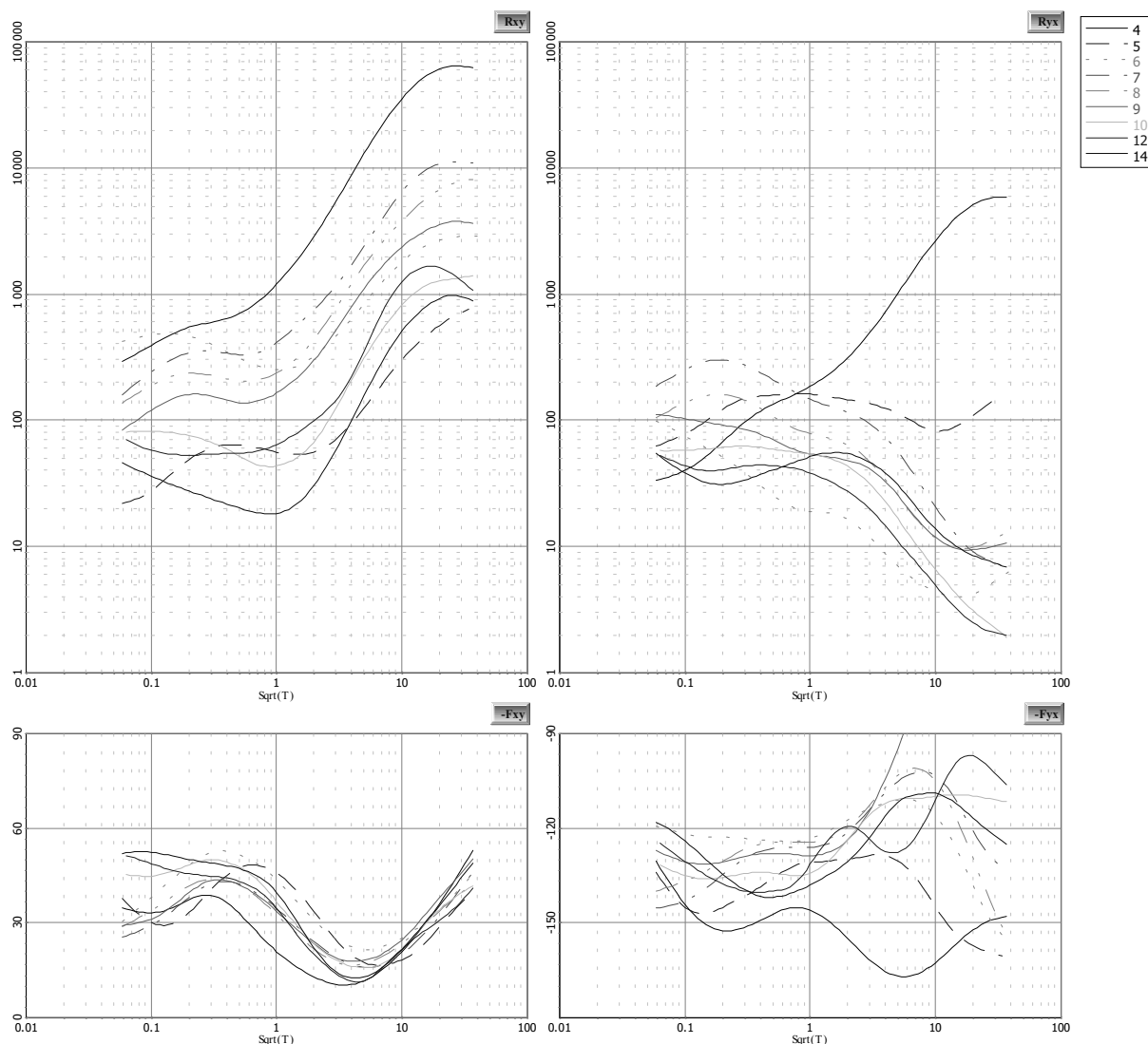


Рис. 3. Геналдон. Амплитудно-фазовые кривые МТЗ, полученные вдоль линий измерения.

вание, в результате чего определяются кросс-спектры мощности в широком частотном диапазоне, которые затем пересчитываются в компоненты тензора импеданса. С помощью программы MtuRobst можно проводить обработку как в одиночном (single), так и в синхронном (remote) режимах. При обработке в синхронном режиме происходит подавление некоррелируемых между рабочей и базовой точками вариаций поля, которые обусловлены влиянием помех. Таким образом, при синхронных наблюдениях с удаленной базой точность определения компонент тензора импеданса и других передаточных функций существенно повышается. Программа дает возможность проводить синхронную обработку как по магнитным, так и по электрическим каналам. На выходе программы создается файл с расширением .mt.

На завершающем этапе обработки с использованием программ Editor и Corrector были постро-

ны сплайны по частотным зависимостям компонент тензора импеданса и получены кривые кажущегося сопротивления в направлениях установки датчиков поля. Проведение сплайнов по программе Corrector заключается в получении гладких частотных зависимостей различных компонент. Произвольной частоте отвечает несколько оценок некоторой компоненты тензора импеданса (каждая оценка отвечает одному участку записи). Вначале проводится автоматическая и ручная отбраковки значений, искаженных различного рода помехами. Иногда эти значения представляют собой лишь случайные «отскоки», однако при наличии постоянной, мощной помехи (например, от линий электропередач) могут возникать систематически смещенные оценки компоненты. Удалив искаженные значения, проводят сглаживающую сплайн-аппроксимацию рассматриваемой частотной зависимости. Параметр сглаживания подбирается так, чтобы, с одной сто-

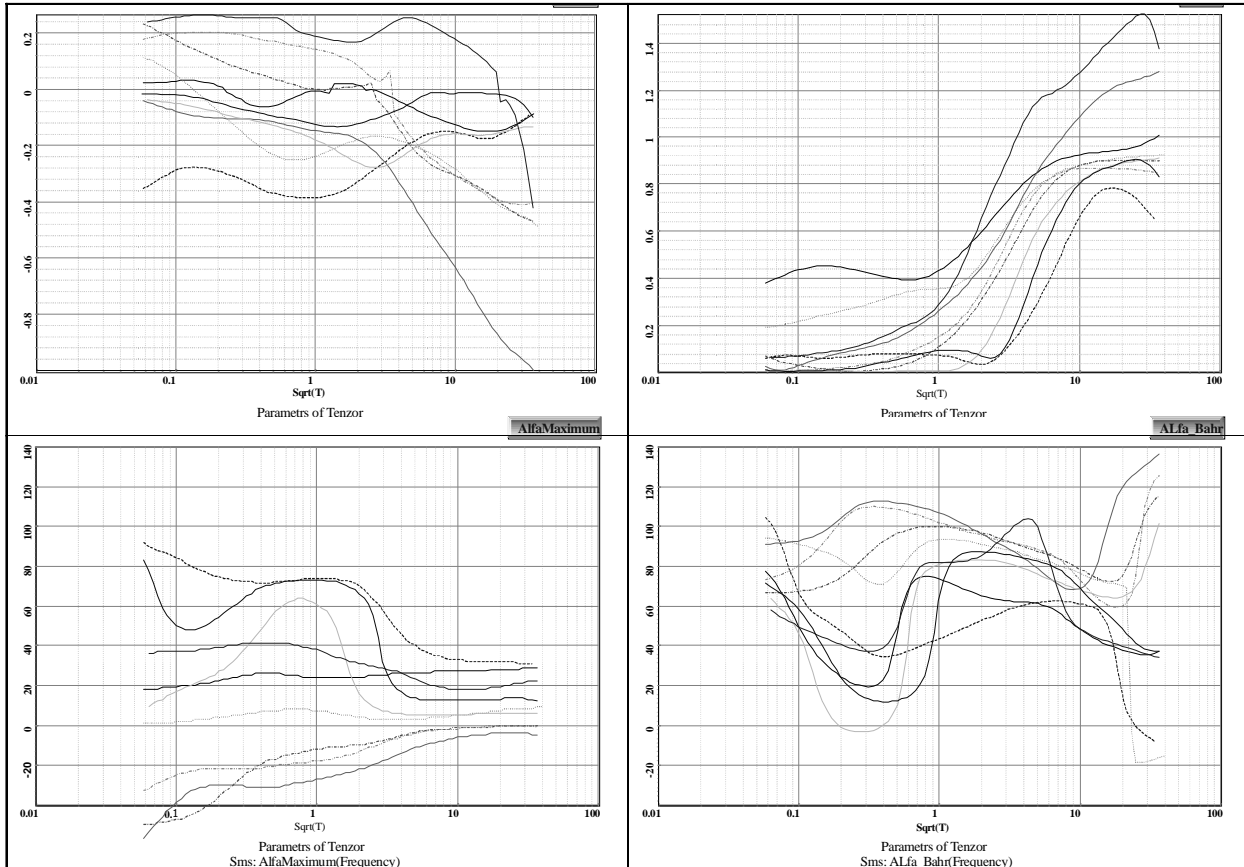


Рис. 4. Геналдон. Частотные характеристики параметров неоднородности тензора импеданса (Σ) (вверху) и азимутальные параметры AzZ_{max} и Az_Br (внизу).

роны, удовлетворить условию максимальной гладкости кривой, а с другой – условию минимальной невязки сплайна и средних значений компоненты на каждом периоде (рис. 2). При проведении сплайнов в точках МТЗ в качестве начального приближения можно было использовать сплайны соседних точек. Это позволяло эффективно отслеживать помехи, а также восстанавливать по соседним точкам МТЗ участки кривых, отбракованные из-за сильного влияния помех.

Таким образом, в результате обработки были получены:

- сплайны по компонентам тензора импеданса,
- кривые кажущегося сопротивления в направлениях установки датчиков поля (меридиональном и широтном).

Полученные кривые по профилю показаны на рис. 3. Они отражают контрастную структуру проводимости как по окрестности участка работ (латерали), так и по глубине. Кривые по направлениям имеют существенно другую форму, что делает невозможным интерпретацию в рамках горизонтально-слоистых сред. Поэтому тензор импеданса был развернут на направления, близкие к направлени-

ям поперек и вдоль геоэлектрической структуры. Направление поворота тензора контролировалось расчетом параметров неоднородностей и азимутальных параметров (рис. 4 и 5). Были выбраны направления, близкие к широтному и меридиональному. В конкретной геологической ситуации эти направления соответствуют простиранию и падению основных геологических комплексов района работ.

Квазипродольное направление соответствует ТЕ-поляризации, а квазипоперечное ТМ-поляризации. Направление профиля практически перпендикулярно простиранию. В этом случае возможно использование аппарата 2d-решения обратной задачи.

Однако кроме действия региональных особенностей геоэлектрического разреза кривые МТЗ осложнены влиянием локальных неоднородностей поперечника, соизмеримого с шагом наблюдений. Для подавления действия этих локальных трехмерных эффектов была выполнена пространственная нормализация модулей тензора Z с радиусом 8,0 км, а также последующая пространственная фильтрация всех компонент тензора с радиусом 3,5 км. Результатив-

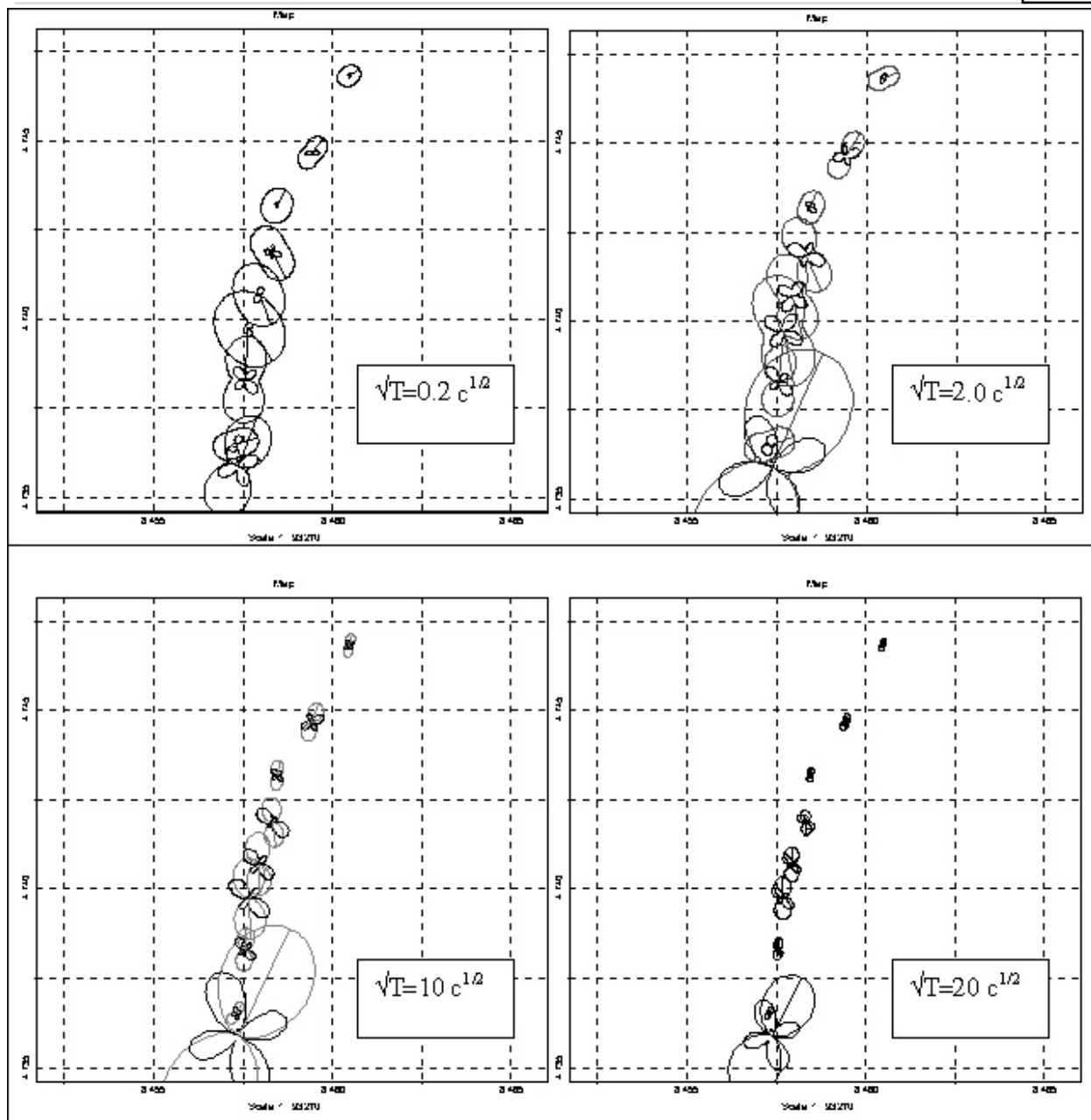


Рис. 5. Геналдон. Импедансные диаграммы основных и дополнительных импедансов (более четкие линии) для 4 периодов.

ные кривые по главным направлениям (рис. 6) были использованы для решения обратной 2D-задачи.

Обратная 2D-задача решена в варианте бимодальной интерпретации, т. е. были использованы как ТЕ-, так и ТМ-моды. Всего было выполнено 96 итераций. Погрешность решения составила для ТЕ-моды – 1,8 %, а по ТМ-моды – 1,4% (дальнейшее увеличение числа итераций не приводит к снижению погрешности). Полученная геоэлектрическая модель отражает действительно достаточно сложный геоэлектрический разрез с чрезвычайно контрастными соотношениями сопротивлений от

0,6 Ом·м до нескольких тысяч Ом·м. (рис. 7).

Следующим этапом работы является расчет т.н. коэффициентов индукции и гальваники, позволяющих перейти для данного разреза от ТЕ- и ТМ-кривых к локально-нормальным (рис. 8). Для них была решена 1D-задача в два этапа. На первом этапе решалась методом МЭЛ (метод эффективной линеаризации) в классе гладких функций геоэлектрического разреза. После этого при определенном разбиении модель МЭЛ подается в качестве первого приближения в программу ИП (1D-обратная задача для конечно-слоистого разреза). Далее выполняется интерактивное решение 1D-задачи с оптимизацией самой геоэлектрической мо-

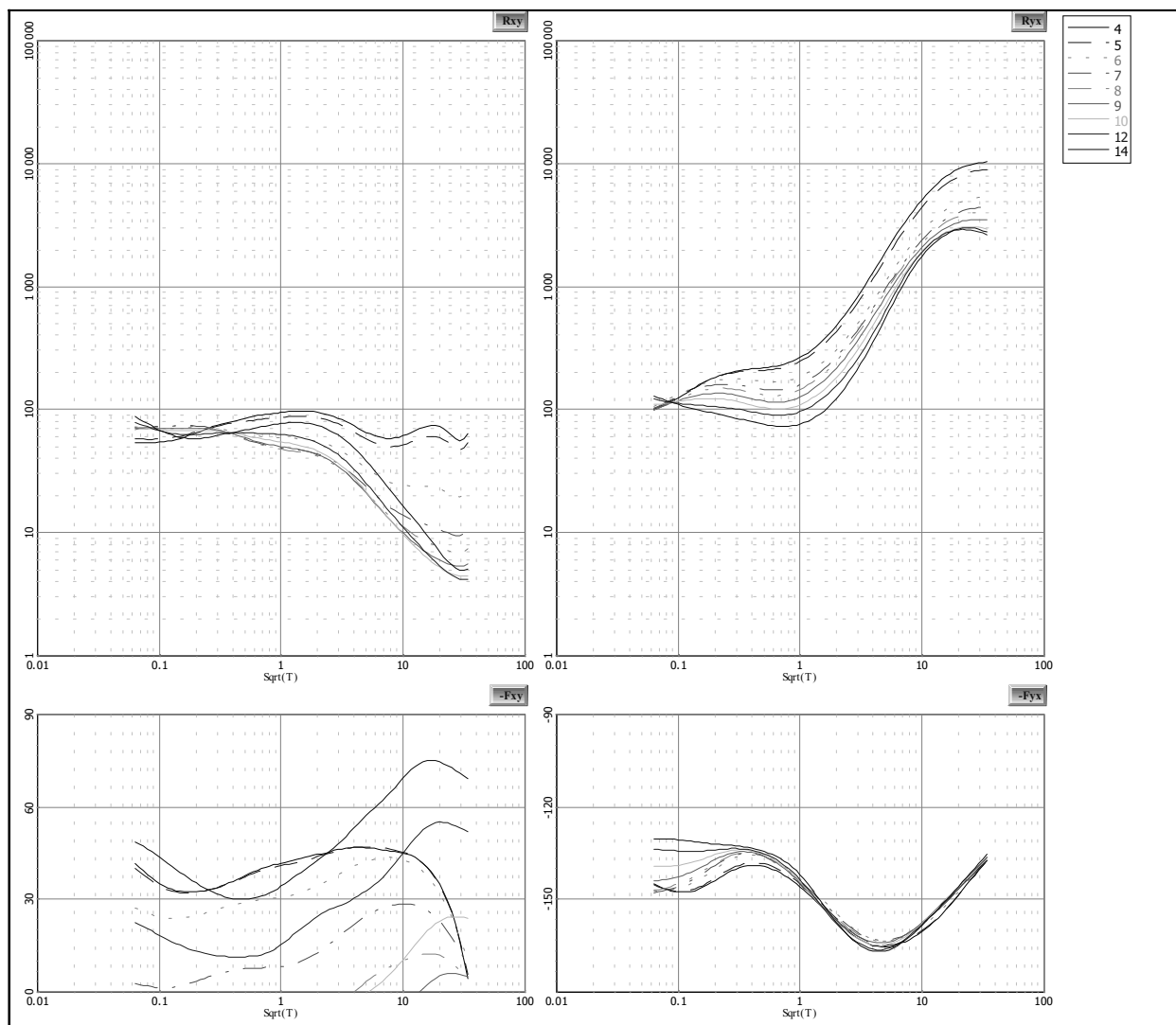


Рис. 6. Геналдон. Амплитудно-фазовые кривые МТЗ – дважды нормализованные, повернутые на 90° и фильтрованные с радиусом $R = 3,5$ км.

дели и минимизации погрешности решения.

Полученная геоэлектрическая модель для ТЕ-моды показана на рис. 9. Анализ псевдоразреза погрешностей решения в функции эффективной глубины показывает возрастание погрешности на глубинах 10–15 км, что свидетельствует о неучтенном влиянии, скорее всего, трехмерных дальних окрестностей пунктов наблюдений. Это, к сожалению, неизбежная плата за малое число наблюдений на коротком отрезке профиля.

В результате обработки и интерпретации материалов составлены три геоэлектрических разреза, в различной степени характеризующие распределение электропроводности как по латерали, так и на глубину.

По данным АМТЗ (рис. 10), дифференциация верхней части разреза весьма значительна. Юрские осадочно-вулканогенные образования характеризуются широким диапазоном сопротивлений

(10–800 Ом·м). Поведение изограмм отражает сложное строение участка работ, особенно в пределах Дигоро-Осетинской тектонической зоны, в полосе, примыкающей с севера к Бурон-Ларскому взбросу. Не исключено, что предполагаемые по геологическим данным массивы гранитоидов имеют бескорневой характер и располагаются значительно ближе к дневной поверхности.

Подтверждается (до глубины 600–700 м) тектонический характер контакта Геналдонского, тектонически выжатого блока с породами, слагающими Адайхох-Дарьяльскую зону. Протерозой – палеозойские образования, представленные кристаллическими сланцами и амфиболитами, по сопротивлению практически не отличаются от деформированных свит нижней юры (кистинской и циклаурской). В северной части профиля субвертикальная зональность в распределении сопротивлений практически не наблюдается.

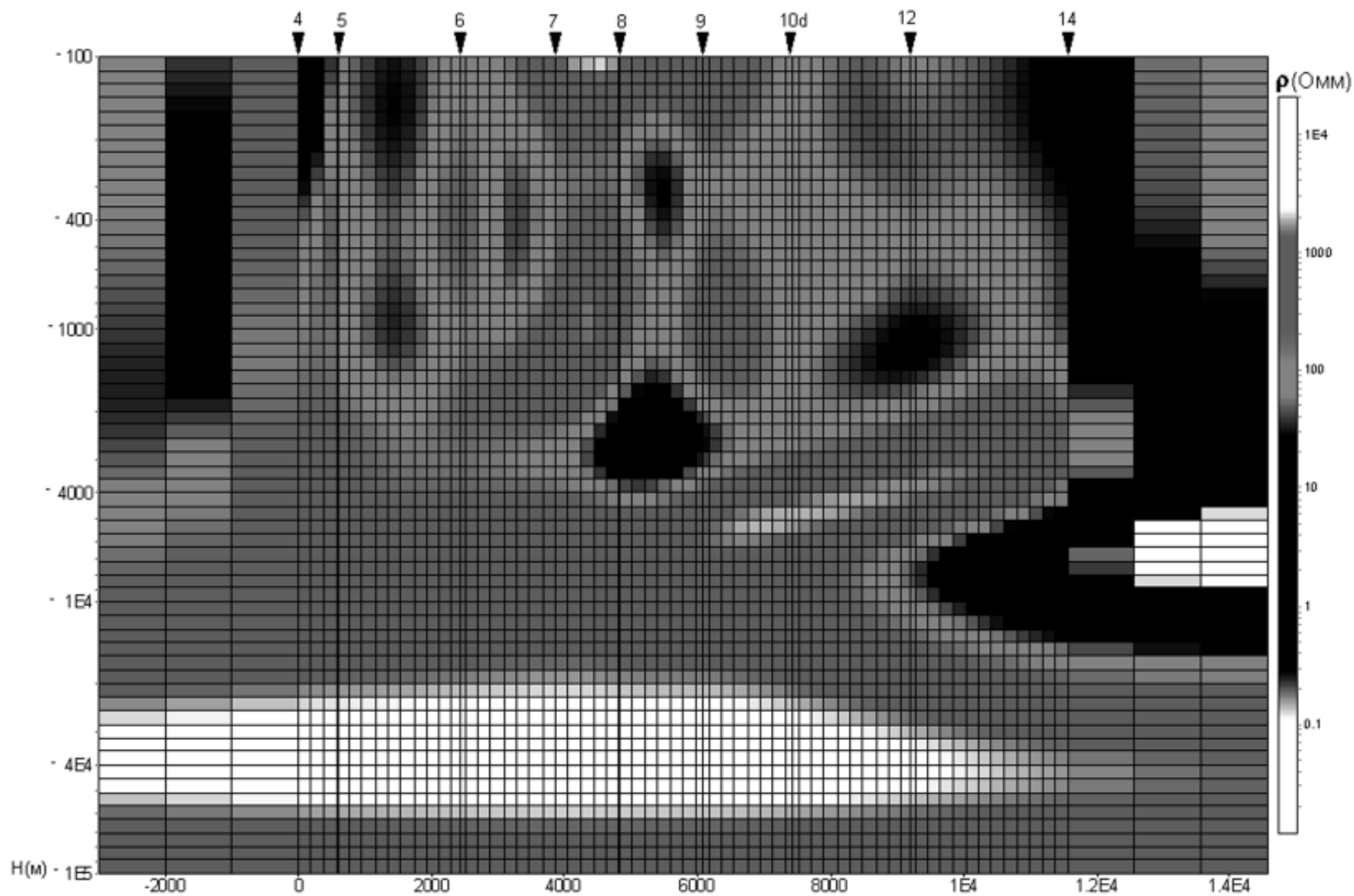


Рис. 7. Геналдонский профиль. Геоэлектрический разрез до 100 км по результатам решения обратной 2d задачи МТЗ методом REBOCC. (E. H - поляризация, 96 итераций, $\sigma_E=1,8\%$, $\sigma_H=1,4\%$). Масштаб глубин - логарифмический.

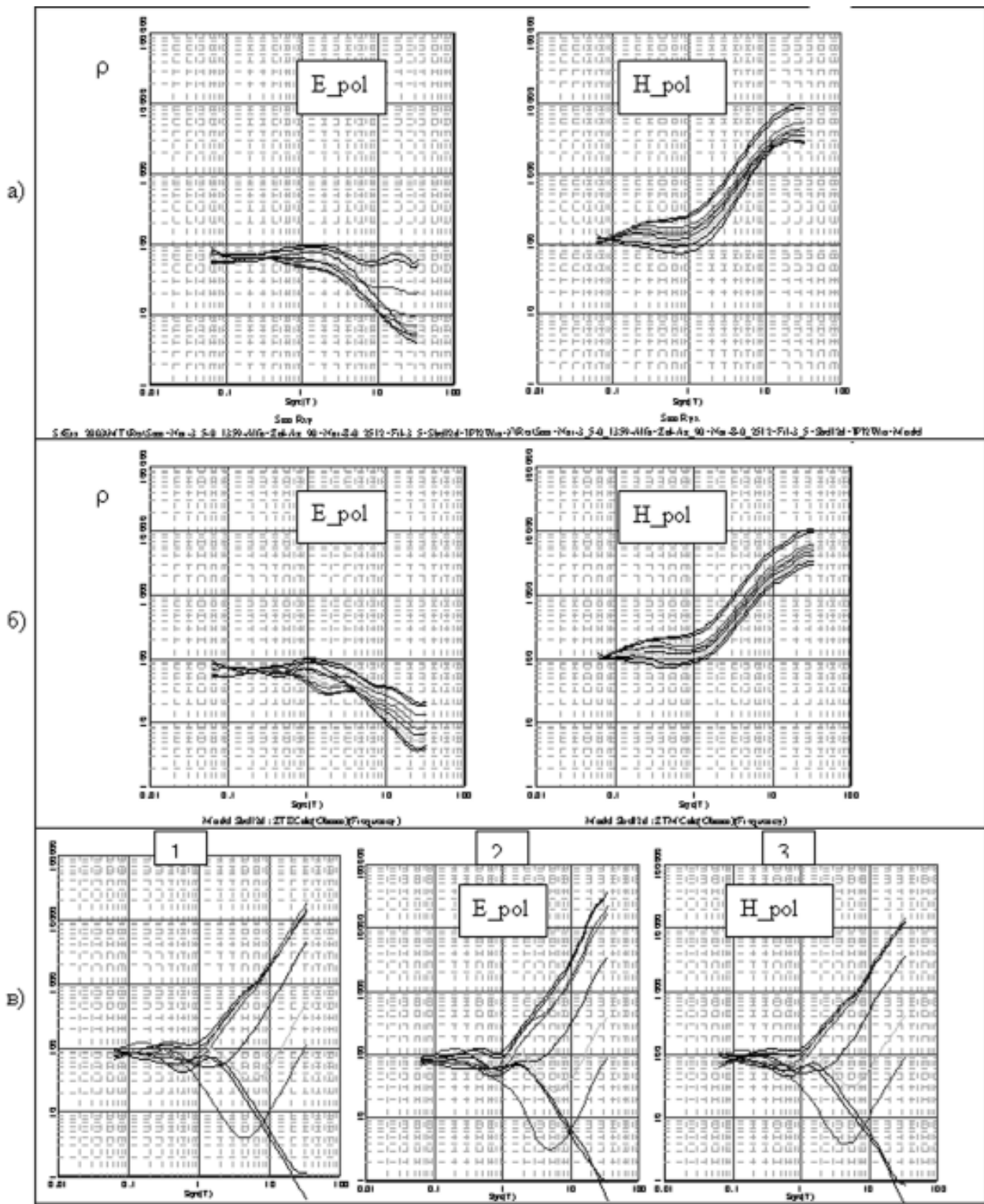


Рис. 8. Геналдон. Результаты решения 2d-обратной задачи МТЗ методом REBOCC: а) входные данные; б) теоретические кривые МТЗ при Е и Н-поляризации; в) 1 – локально-нормальные кривые МТЗ, 2 и 3 – экспериментальные кривые МТЗ после введения поправок за индукцию (2) и гальванику (3).

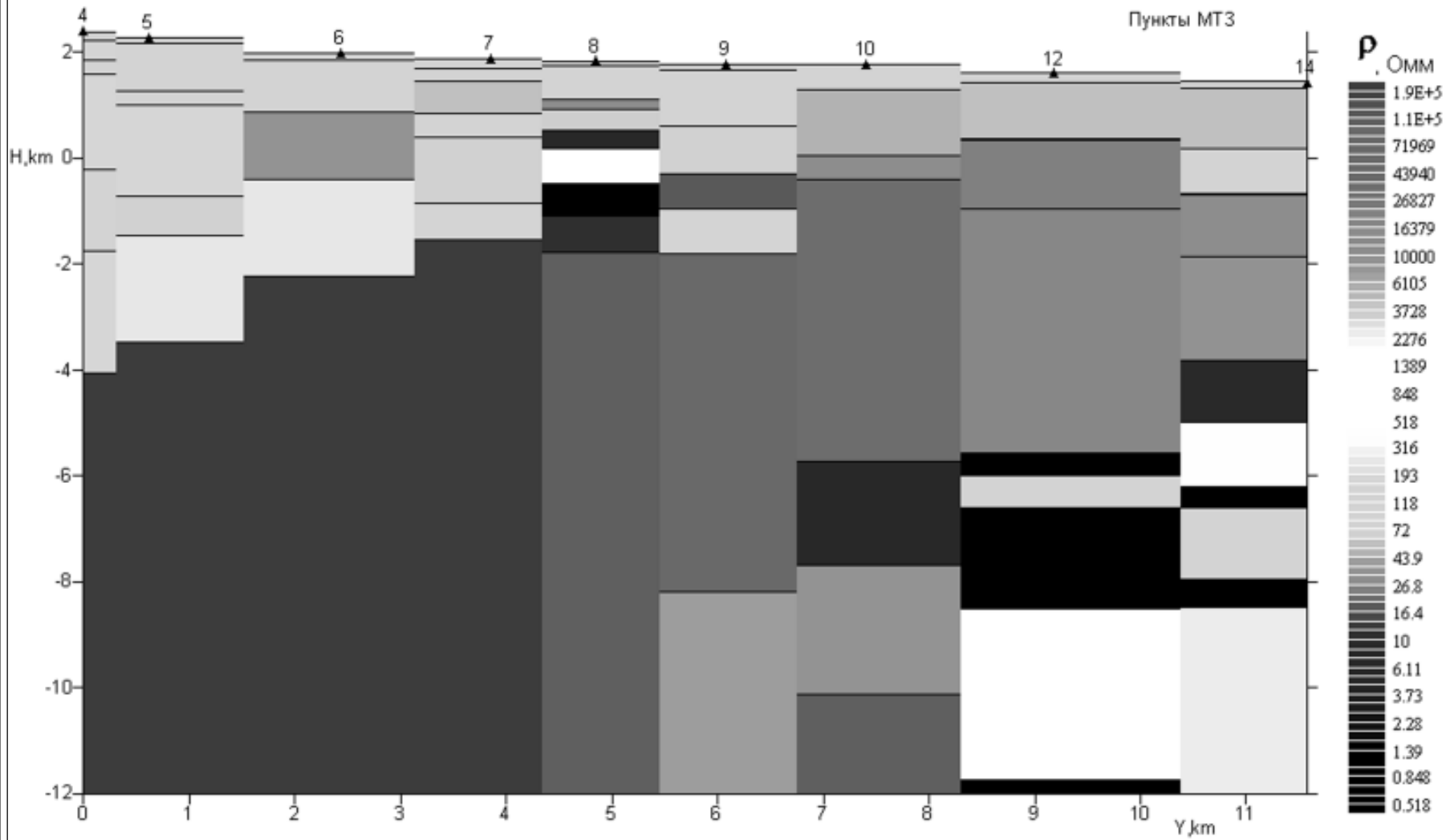


Рис. 9. Геналдон. Геоэлектрический разрез, полученный при решении 1d-мерной задачи методом IPI после ввода в экспериментальные кривые МТЗ поправок за индукцию.

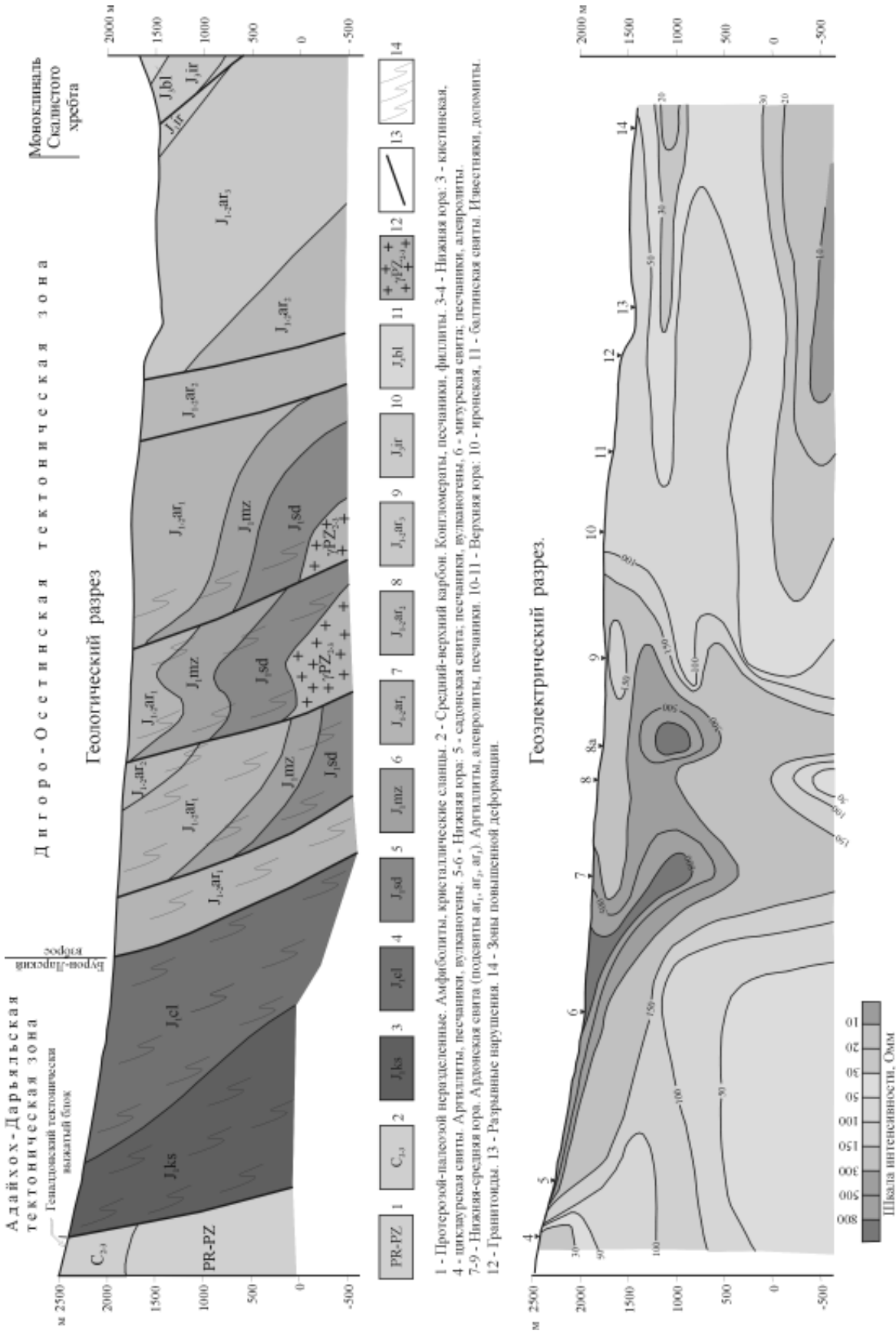


Рис. 10. Результаты работы методом АМТЗ, масштаб 1 : 50 000.

Общие выводы, которые можно сделать при решении обратной 1d-задачи (рис. 9) по программе IPI (с учетом ранее сделанных замечаний о применимости решения в классе горизонтально-слоистых моделей), сводятся к следующему:

- в геоэлектрическом разрезе сверху, до глубины 2–4 км отмечается сложная картина распределения сопротивлений;

- отмечается аномально низкое сопротивление ($0,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в юрском комплексе на абсолютной глубине 600 м на пикете 8. Однако локальность этой аномалии при очень сложном строении данного участка может объясняться и боковым (неучтенным) влиянием неоднородностей. Для расшифровки этой аномалии требуются дополнительные работы в окрестностях этого пункта;

- осадочный чехол залегает на высокоомном основании, кровля которого воздымается с севера на юг от отметок -2 км до $-0,6$ (в районе МТЗ 10) и далее погружается на юг до -4 км на южном окончании профиля;

- в нижележащем разрезе в северной части профиля выделяется объект (на глубинах 6–8 км) с аномально низкими сопротивлениями ($0,6\text{--}3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Такие сопротивления могут иметь или существенно графитизированные первично-осадочные образования, или зоны дробления, насыщенные высокоминерализованными растворами. Выделенный объект состоит из нескольких проводящих горизонтов и, по-видимому, имеет сложную структуру, отрисовка которой при данной плотности наблюдений невозможна.

Результирующий разрез на полную глубину исследований (до 100 км) (рис. 11) следует рассматривать как сугубо предварительный. Отработанный профиль имеет длину всего 11,5 км с 9 пунктами МТЗ. При решении 2d-задачи на большую глубину необходимо задавать геоэлектрическую модель в обе стороны от профиля на расстояния, сопоставимые с глубиной. Отсутствие априорных данных о распределении электропроводности на больших глубинах привело к тому,

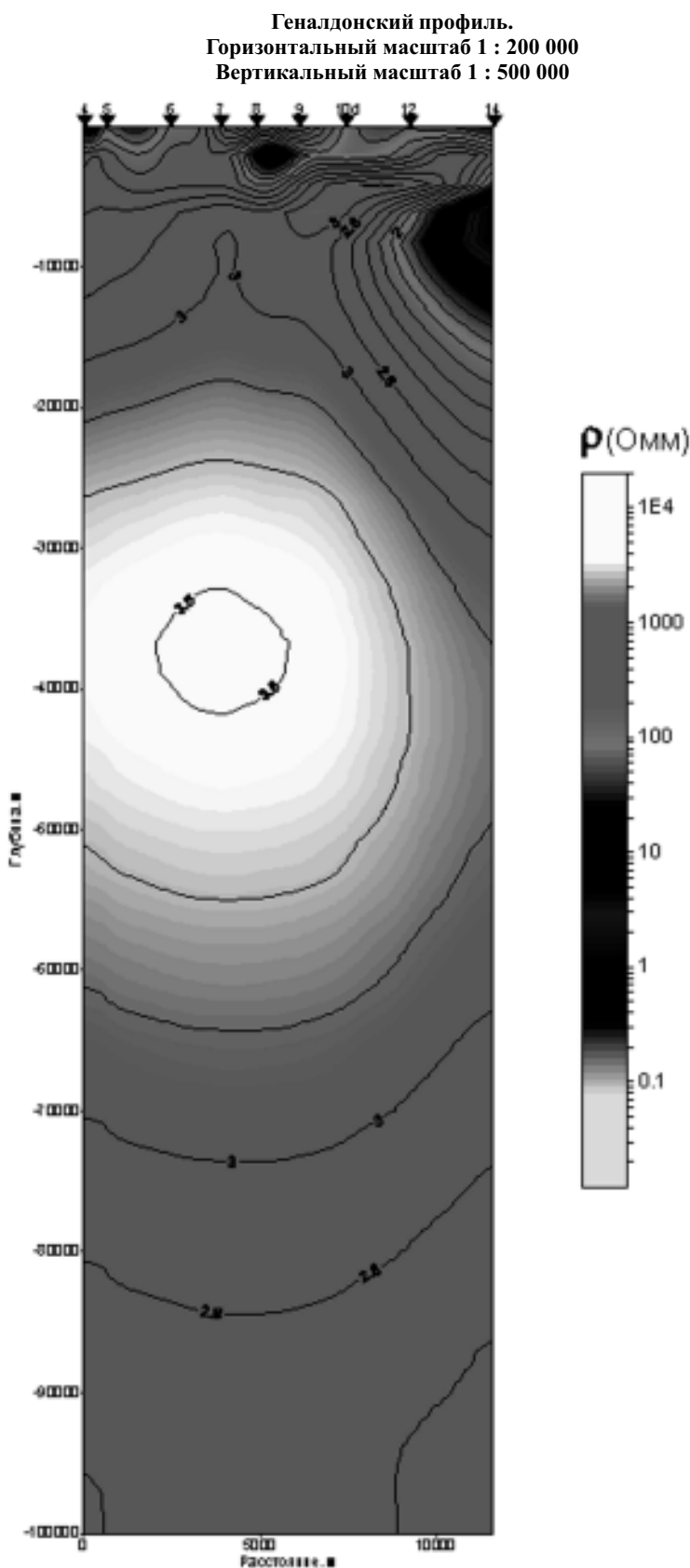


Рис. 11. Геоэлектрический разрез до 100 км по результатам решения обратной 2d-задачи МТЗ методом REBOCC. (E, H - поляризация, 96 итераций, $\sigma_E=1,8\%$, $\sigma_H=1,4\%$).

что в стартовой модели проводимость в обрамляющих ячейках задавалась как средняя величина, определяемая по кривым в отработанной части профиля. Полученная модель (с высокой схожимостью расчетных и теоретических кривых, *рис. 7*) отражает увеличение сопротивлений (до 4 500 Ом·м) до глубины ~ 40 км и последующее плавное снижение с переходом к верхней мантии.

Безусловно, заслуживают дальнейшего изучения аномалии проводимости выделенные в районе пунктов 8 и 12–14. Учитывая, что профиль пройден в пределах Казбекского вулканического центра, «заманчиво» их природу объяснить возобновлением вулканической активности и образованием промежуточных камер. Но подобные величины сопротивлений могут иметь и зоны дробления, насыщенные высокоминерализованными термальными растворами и существенно графитизированные первично-осадочные образования.

Таким образом, работы первого этапа позволили сделать некоторые выводы, которые необходимо учитывать при дальнейшем про-

ведении электромагнитных исследований на этом объекте.

I. Необходимо проектировать и выполнять полевые работы по методике КМТЗ, с организацией базовой станции, на которой наблюдения выполняются 5-канальной аппаратурой, а на рядовых пунктах – 2-канальной.

II. Отработанный профиль обязательно нужно продолжить в обе стороны. На юг выставить 1–2 дополнительные точки (с применением вертолетного транспорта) на северном склоне массива г. Казбек. На север профиль продолжить до первой (южной) точки ранее отработанного профиля Владикавказ – Левокумское, что позволит учесть влияние мощной проводящей толщи осадочного чехла Терско-Каспийского прогиба. Желательно провести аналогичные работы и на южном склоне (за пределами РФ). Наиболее оптимальным вариантом является выполнение площадных работ, с последующим проведением 3D-интерпретации и составлением объемной геоэлектрической модели исследуемого района.

