

А. К. Сараев, А. Б. Никифоров, Н. Е. Романова, А. Е. Симаков

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АМТЗ И РМТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТРАСС СТРОИТЕЛЬСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Введение

При строительстве железнодорожных тоннелей большое значение имеет изучение геологического строения территории вдоль их трасс с выделением блоков пород различного качества (плотных, трещиноватых), картированием трещиноватых зон и отдельных разломов с оценкой степени их обводненности. Эти данные необходимы для выбора оборудования и технологии для проходки тоннелей и их последующей эксплуатации. Выбор проходческого щита (открытого или более дорогого закрытого типа) производится с учетом качества пород на участке проходки. Трещиноватые и обводненные зоны являются потенциально опасными при строительстве и эксплуатации тоннелей из-за возможного их обрушения или затопления. При этом повышенные требования к надежности предъявляются к тоннелям для высокоскоростных поездов.

Традиционно для изучения трасс строительства тоннелей используют комплекс геолого-геофизических методов, включающий детальное геологическое картирование с учетом данных о геоморфологии, дешифрирования аэрофотоснимков и бурения, сейсмической и электрической томографии и вертикальных электрических зондирований. Получаемая информация часто является недостаточной по глубинности и достоверности изучения участков строительства. Кроме того, в ряде случаев трассы тоннелей проходят по территориям заповедников, где запрещены бурение скважин и экологически небезопасные геофизические работы, такие как сейсморазведка.

При изучении участков строительства тоннелей значительные перспективы имеют электроразведочные методы аудиоманнителлурических зондирований (АМТЗ) и радиоманнителлурический (РМТ). Методы АМТЗ и РМТ нацелены на изучение удельного электрического сопротивления (ρ) горных пород, которое в значительной степени зависит от обводненности пород. Опыт работ различными методами электроразведки свидетельствует о том, что плотные (монокристаллические) блоки пород обычно характеризуются повышенными, а трещиноватые и обводненные зоны — пониженными значениями ρ , и задача картирования трещиноватых зон и отдельных разломов весьма благоприятна для электроразведочных методов.

Методы АМТЗ и РМТ обладают рядом преимуществ перед другими методами электроразведки при изучении участков строительства тоннелей. Метод АМТЗ нацелен на изучение глубинного строения, а РМТ ориентирован на изучение верхней части разреза. Применение этих методов позволит изучить разрезы участков строительства тоннелей в диапазоне глубин от 1–2 м до 1–2 км. Общая модель первичного поля (плоская волна) является предпосылкой для успешного комплексирования методов АМТЗ и РМТ. Достоинством этих методов является возможность проведения четырехканаль-

ных (тензорных) измерений, что повышает достоверность результатов работ при изучении горизонтально неоднородных сред. Компактные измерительные установки (общая длина симметричных электрических линий составляет 20 м для РМТ и 40 м для АМТЗ) и возможность бесконтактных измерений позволяют проводить работы в труднодоступных условиях, при пересеченном рельефе и в неблагоприятных условиях для заземления.

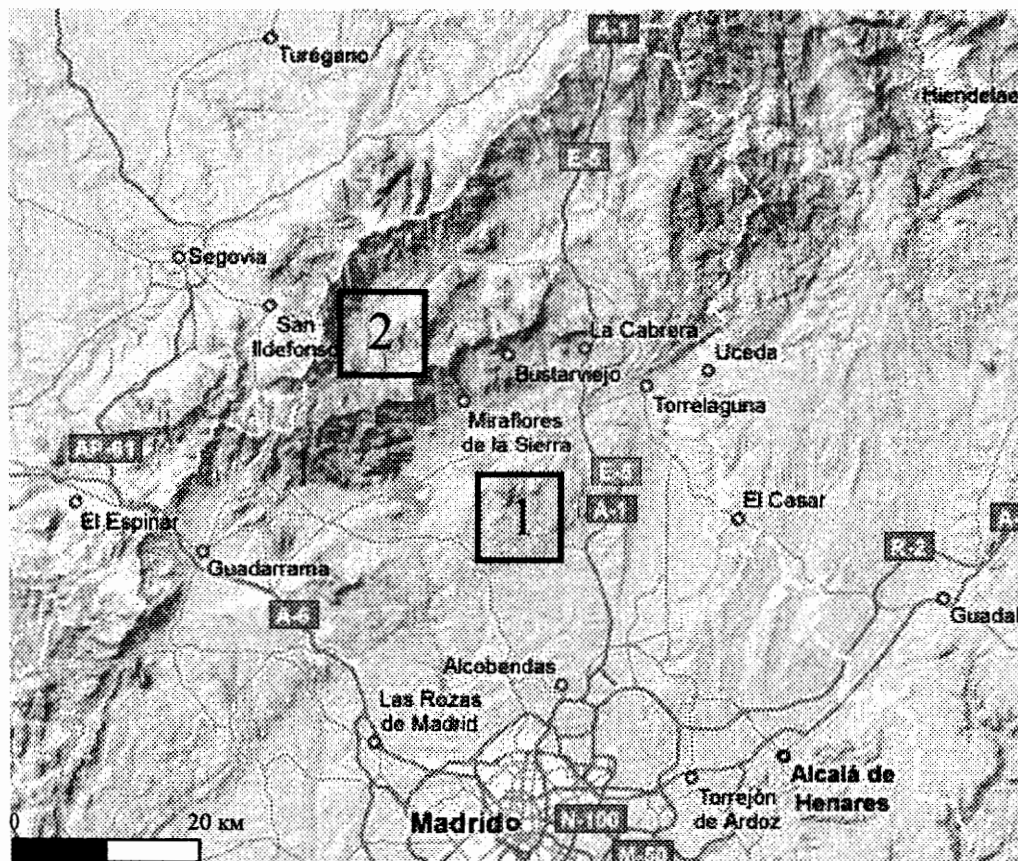


Рис. 1. Положение участков работ.
1 — участок Сан-Педро; 2 — участок Умбрия

В статье рассматриваются особенности аппаратно-программных комплексов методов АМТЗ и РМТ и результаты их применения в Испании при изучении тоннелей, пересекающих горные гряды Сан-Педро и Гуадаррама (участок Умбрия) (рис. 1) на трассе высокоскоростных поездов Мадрид — Вальядолид. Длина тоннеля Сан-Педро составляет около 8 км, а тоннеля Гуадаррама — около 28 км.

Методы АМТЗ и РМТ и используемая аппаратура

Метод АМТЗ является высокочастотной модификацией метода магнитотеллурических зондирований — МТЗ [1] и основан на измерениях естественных электромагнитных полей в диапазоне частот от единиц до первых тысяч герц [2]. Основным источником этих полей являются дальние грозы. При интерпретации данных АМТЗ используется модель первичного поля в виде плоской вертикально падающей волны.

В последние годы активно развивается метод РМТ, основанный на использовании электромагнитных полей удаленных радиостанций сверхдлинноволнового (СДВ) 10–30 кГц, длинноволнового (ДВ) 30–300 кГц и средневолнового (СВ) 300–1000 кГц диапазонов [3–5]. На удалении от радиостанции в несколько километров измеряемый поверхностный импеданс совпадает с импедансом плоской вертикально падающей волны.

По данным измерений горизонтальных и взаимно ортогональных составляющих электрического и магнитного полей в методах АМТЗ и РМТ определяется амплитуда поверхностного импеданса (или кажущееся сопротивление ρ_k) и фаза импеданса φ_z . По значениям кажущегося сопротивления и фазы импеданса на разных частотах получают кривые зондирования и в результате инверсии строят геоэлектрический разрез.

При проведении работ методом АМТЗ использовалась аппаратура АКФ-4М (разработка Санкт-Петербургского государственного университета и ООО «МикроКОР») [6]. Аппаратура включает цифровой регистратор с четырьмя синхронными каналами и 24-разрядными АЦП в каждом канале. Частотный диапазон аппаратуры 0.1–800 Гц, частоты дискретизации 160, 1600 и 3200 Гц, объем встроенной памяти 1024 Мб. Диапазон исследуемых глубин — от 30–50 м до 1–2 км.

Для работ методом РМТ Санкт-Петербургским государственным университетом, ООО «МикроКОР» (Россия) и Университетом г. Кельн (Германия) разработана цифровая аппаратура РМТ-F [7]. Аппаратура имеет четыре канала синхронных измерений с 16-разрядными АЦП в каждом канале. Частотный диапазон аппаратуры 10–1000 кГц, частоты дискретизации 312.5 кГц и 2.5 МГц, объем встроенной памяти 2048 Мб. Диапазон исследуемых глубин — от 1–2 до 50–100 м.

В аппаратуре АКФ-4М и РМТ-F имеются по две симметричных приемных электрических линий с предварительными усилителями и по две магнитные антенны для измерений горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей. Регистраторы приборов обеспечивают сбор, предварительную обработку и хранение данных измерений в энергонезависимой Flash-памяти. Четырехканальные (тензорные) измерения, реализованные в приборах АКФ-4М и РМТ-F, позволяют получать амплитудные и фазовые кривые зондирования по различным направлениям. Возможности тензорных измерений нерегулярно распределенных сигналов радиостанций рассмотрены в работе [4].

Регистраторы аппаратуры АКФ-4М и РМТ-F конструктивно выполнены однотипно. Они имеют дисплей и клавиатуру для автономной работы без компьютера и канал Ethernet для связи с внешним компьютером, а также GPS-приемник для привязки по координатам и времени. Установка измерительных параметров осуществляется при помощи клавиатуры регистратора или внешнего компьютера. При работе производится регистрация временных рядов или спектрограмм сигналов магнитного и электрического полей и вычисление кажущегося сопротивления и фазы импеданса непосредственно в измерительном блоке с записью данных во встроенную память. Реализованы че-

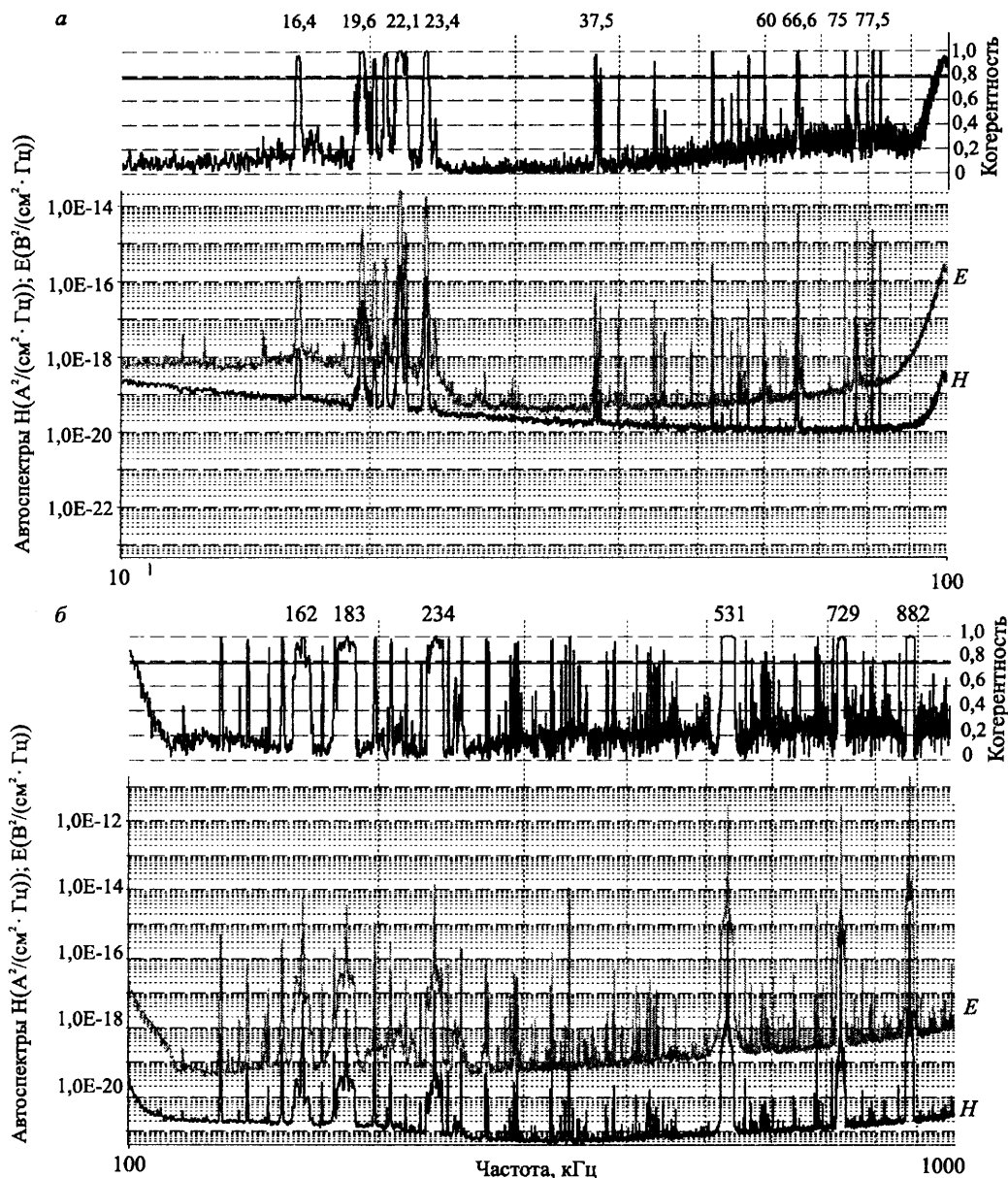


Рис. 2. Автоспектры электрического (E) и магнитного (H) полей и их взаимная когерентность для диапазонов частот 10–100 кГц (a) и 100–1000 кГц ($б$). Цифры над графиками когерентности — частоты наиболее мощных радиостанций

тырехканальные (тензорные) или двухканальные (скалярные) съемки. Визуализация спектральных характеристик сигналов производится на дисплее регистратора, и оценка качества данных выполняется непосредственно на точке наблюдений. На стационарных

пунктах обеспечивается проведение программно управляемого мониторинга. Разработанное программное обеспечение с робастными методами обработки данных позволяет получать кривые зондирования хорошего качества при повышенном уровне промышленных помех.

Измерения электрического поля производятся как с заземляемыми, так и с бесконтактными приемными линиями, что дает возможность проведения работ в районах с хорошими условиями заземления в летнее и в зимнее время по мерзлой земле, снегу и льду, а также в условиях, неблагоприятных для заземления (асфальт, бетон, гравий, сухая почва, курумник). Диапазон рабочих частот с бесконтактными электрическими линиями для аппаратуры АКФ-4М составляет 7–800 Гц, для аппаратуры RMT-F — 10–1000 кГц.

Во время работ в Испании использовалась предыдущая версия аппаратуры RMT-метода — аналоговый прибор ИПИ-1000 с частотным диапазоном 10–1000 кГц. Приборы RMT-F и ИПИ-1000 наряду с зондированиями позволяют проводить работы методом профилирования на одной частоте. В населенных регионах, в том числе в странах Европы, имеется большое количество радиостанций, достаточное для построения амплитудной и фазовой кривых зондирования и проведения последующей инверсии.

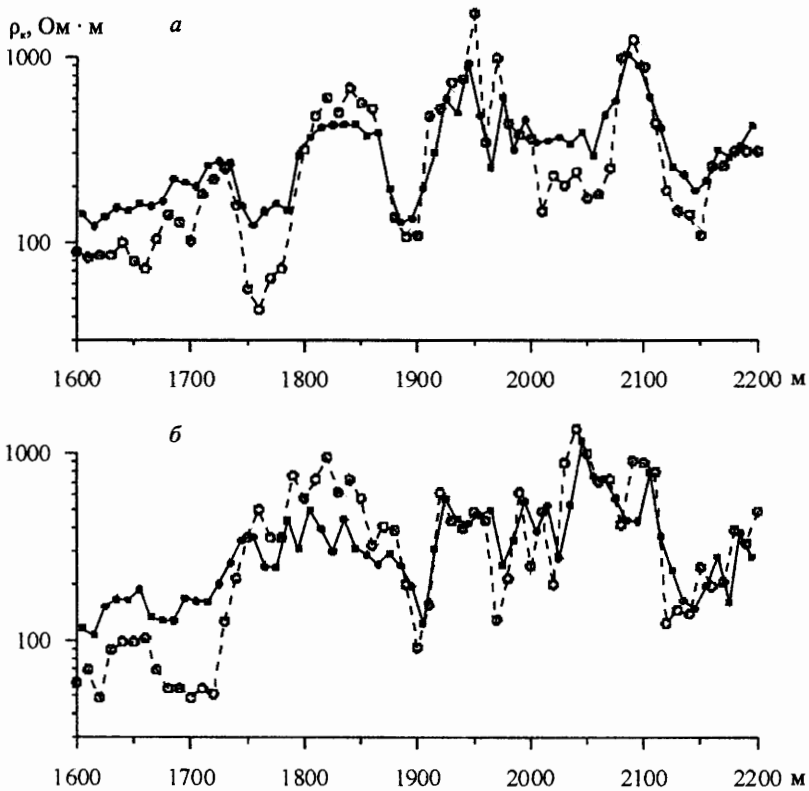


Рис. 3. Сопоставление графиков кажущегося сопротивления, полученных методами RMT (пунктир) и СГ (сплошная) по профилям 0 (а) и +50 (б)

На рис. 2 приведены автоспектры электрического и магнитного полей и их взаимной когерентности, зарегистрированные в одном из районов Испании. Наиболее мощными являются сигналы от радиостанций, работающих на частотах 16.4 кГц (Норвегия), 19.6 кГц (Великобритания), 20.2 кГц (Италия), 20.9 кГц (Франция), 22.1 кГц (Великобритания), 23.4 кГц (Германия), 37.5 кГц (Исландия), 60 кГц (Великобритания), 66.6 кГц (Россия), 75 кГц (Швейцария), 77.5 кГц (Германия), 90–110 кГц (морская радионавигационная сеть), 162 кГц (Франция), 183 кГц (Германия), 234 кГц (Люксембург), 531 кГц (Швейцария), 729 и 882 кГц (Германия).

Отбор частот (зарегистрированных сигналов) для построения кривых зондирования производится с учетом благоприятных азимутов радиостанций, обычно расположенных в секторе ± 25 –30 град. относительно направления приемной линии электрического поля, и величин взаимной когерентности (выше заданного порогового уровня, обычно 0.8–0.95). Для приведенного примера кривые зондирования могут быть построены по 27 частотам в диапазоне 16–736 кГц.

Для оценки достоверности данных метода РМТ в ходе работ было выполнено сравнение графиков ρ_k РМТ-профилирования с аппаратурой ИПИ-1000 и графиков ρ_k метода срединного градиента (СГ) с аппаратурой ЭРА (данные Б. Г. Сапожникова). Измерения с аппаратурой ИПИ-1000 были выполнены на частоте 19.6 кГц с бесконтактными приемными электрическими линиями геометрической длиной 20 м (действующей длиной 10 м). При работах методом СГ с аппаратурой ЭРА на частоте 4.88 Гц использовались питающая линия АВ длиной 700 м и приемная линия MN длиной 10 м, причем их ориентировка совпала с ориентировкой приемной линии электрического поля аппаратуры ИПИ-1000.

Как видно из рис. 3, наблюдается хорошая корреляция графиков ρ_k методов РМТ и СГ. При этом графики ρ_k метода РМТ более контрастно отражают проводящие участки профилей, что объясняется влиянием анизотропии пород (данные метода РМТ связаны с продольным удельным сопротивлением, а на результаты метода СГ влияет поперечное удельное сопротивление разреза).

Результаты работ по тоннелю Сан-Педро

Работы методом РМТ были выполнены в южной части участка строительства тоннеля Сан-Педро вдоль трассы тоннеля по профилям длиной около 1.5 км с расстоянием между профилями 25–50 м и между точками измерений 10 м. Положение точек измерений показано на рис. 4. На этот же рисунок вынесено проектное положение тоннеля, который состоит из двух линий (два направления движения поездов), оси которых расположены на расстоянии 30 м друг от друга. Разрез на участке представлен метаморфическими породами (ортогнейсы, сланцы) и гранитоидами и характеризуется наличием субвертикальных зон трещиноватости и дробления различного направления и мощности. Участок имеет многочисленные разломы, в основном, северо-восточного, а также других направлений. Мощность рыхлых перекрывающих отложений небольшая (1–5 м). Глубина тоннеля меняется: от 20 м в южной части до 200 м в северной части участка (на отдельных интервалах глубина достигает 300 м).

Измерения были проведены в варианте профилирования при помощи аппаратуры ИПИ-1000 на частоте 19.6 кГц с указанными выше параметрами электрической линии.

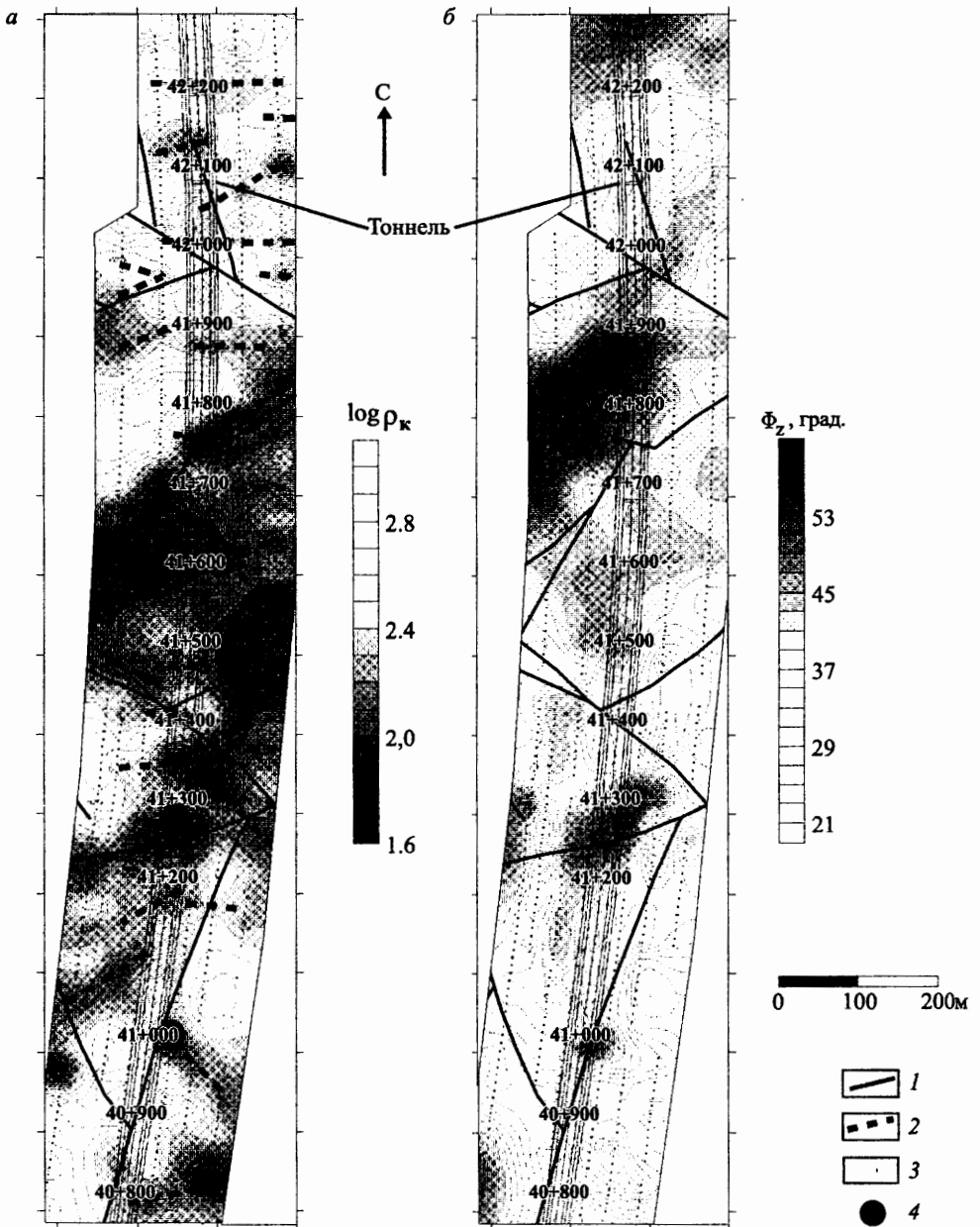


Рис. 4. Планы изолиний кажущегося сопротивления (а) и фазы импеданса (б) южной части тоннеля Сан-Педро по данным метода РМТ
 1 — разломы по данным предшествующих работ; 2 — разломы по данным метода РМТ; 3 — точки РМТ; 4 — скважины, заданные с учетом данных метода РМТ

Выбор радиостанции 19.6 кГц (Великобритания) обусловлен благоприятным азимутом ее расположения. При этом измерительная установка ориентировалась по профилям вдоль трассы тоннеля с возможностью картирования геоэлектрических неоднородностей субширотного простирания (ориентировка измерительной установки определяется направлением приемной линии электрического поля).

Полученные планы изолиний кажущегося сопротивления и фазы импеданса приведены на рис. 4. Параметры ρ_k и ϕ_z характеризуются различной глубиной и отражают соответственно детальные и общие структурные особенности верхней части разреза. Для диапазона изменений удельного сопротивления 300–600 Ом·м, наиболее характерного для участка Сан-Педро, глубинность метода РМТ на частоте 19.6 кГц по кажущемуся сопротивлению не превышает 30–50 м, по фазе импеданса — 70–100 м.

Анализ данных методов РМТ и АМТЗ по участку Сан-Педро показал, что низкими значениями удельного сопротивления ($\rho < 300$ Ом·м или $\log \rho < 2.5$) отмечаются трещиноватые и обводненные породы, средними значениями ($\rho = 300\text{--}1000$ Ом·м или $\log \rho = 2.5\text{--}3$) — трещиноватые породы, и высокими значениями ($\rho > 1000$ Ом·м или $\log \rho > 3$) — плотные породы. Эти особенности свойств пород различного состояния были использованы при анализе данных методов РМТ и АМТЗ.

Выделение тектонических нарушений на участке выполнено с использованием плана изолиний ρ_k (рис. 4, а). По данным метода РМТ картируется значительно большее число разломов, отмечающихся пониженными значениями ρ_k , что связано с их повышенной обводненностью, и их положение существенно отличается от данных предшествующих работ. Результаты метода РМТ при выделении разломов имеют хорошую корреляцию с данными метода СГ, полученными Б. Г. Сапожниковым. С учетом данных РМТ-метода на участке было пробурено несколько проверочных скважин (две из них показаны на рис. 4), подтвердивших прогнозную оценку качества пород.

Дополнительную информацию о строении верхней части разреза (50–100 м) позволяет получить анализ плана изолиний фазы импеданса (рис. 4, б). На данном плане выделяется несколько аномалий повышенных значений ϕ_z , связанных более глубинными, по сравнению с выделенными по ρ_k , проводящими блоками пород.

Наиболее контрастно проявлена аномалия ϕ_z в интервале пикетов 41+800 — 41+900. Сопоставление с планом изолиний кажущегося сопротивления показывает, что ближайшая аномалия ρ_k смещена в северо-западном направлении и выделяется в районе пикетов 41+900 — 41+950. При этом аномалии ρ_k и ϕ_z имеют северо-восточное простирание, это свидетельствует о том, что они связаны с одной и той же тектонической зоной. Смещение аномалий ρ_k и ϕ_z в плане указывает на юго-восточное падение проводящей зоны, а значительная контрастность аномалии фазы говорит об увеличении проводимости этой зоны с глубиной.

При проведении работ методом АМТЗ на участке Сан-Педро измерения выполнялись по трем профилям вдоль трассы тоннеля в его южной части и двум профилям в северной части с расстоянием между профилями 100 м и между точками зондирования 50 м. На отдельных интервалах выполнена детализация по более густой сети наблюдений. В некоторых случаях измерения выполнить не удалось из-за недоступности территории, находящейся в частной собственности. Измерения были выполнены в четырехканальном варианте при ориентировках установок по азимутам 0 и 90 град. (рис. 5).

При проведении работ особое внимание было уделено обеспечению качества изме-

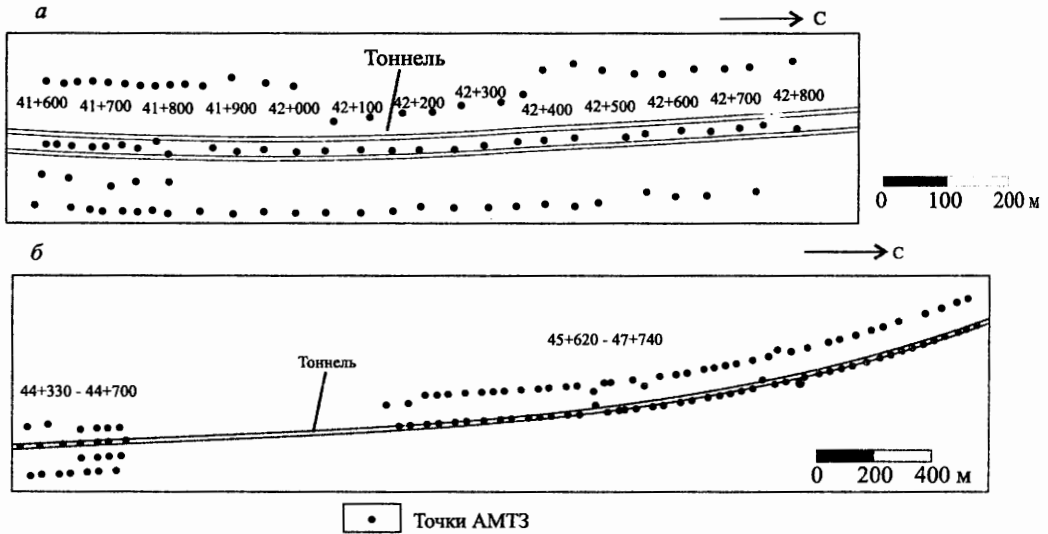


Рис. 5. Положение точек АМТЗ в южной (а) и северной (б) частях участка тоннеля Сан-Педро

рений электрического поля на участках с сухой почвой и неблагоприятными условиями для заземления. Для заземлений электрических линий использовались свинцовые электроды, которые закапывались в специально подготовленные ямки, предварительно увлажненные соленым раствором. Без заливки соленым раствором сопротивления заземлений составляли 50–100 кОм, а после заливки — не более 10 кОм, что позволяло измерять фазу импеданса с точностью не менее 1 град.

Инверсия кривых АМТЗ в 2D-модели среды и построение геоэлектрического разреза вдоль трассы тоннеля проводилась с использованием программы Shell2D (автор К. Д. Ратников), в которой используется алгоритм REBOCC [8]. Инверсия основана на использовании метода интегральных уравнений по модифицированному алгоритму ОССАМ [9].

При инверсии использовались кривые ρ_k и ϕ_z для H -поляризации (для установки по азимуту 0 град.). Разделение кривых АМТЗ на H - и E -поляризованные выполнено на основе анализа данных АМТЗ по трем профилям в южной части и двум профилям в северной части участка Сан-Педро и с учетом имеющейся информации о преобладающем простирании геологических структур (контакты различных пород, тектонические нарушения) в субширотном и северо-восточном направлении.

На рис. 6 показан обобщенный геоэлектрический разрез до глубины 1000 м вдоль трассы тоннеля Сан-Педро на участках, где удалось выполнить измерения. На разрезе показаны крупные блоки монолитных пород и проводящие зоны. Как видно из рисунка, практически весь интервал разреза на уровне проходки тоннеля Сан-Педро соответствует зоне трещиноватых и обводненных пород, что указывает на неблагоприятные условия для проходки тоннеля. При этом особо опасными для проходки и последующей эксплуатации тоннеля являются глубинные зоны тектонических нарушений, наиболее мощная из которых выделяется в районе пикетов 41+700 — 41+900. Сопоставление

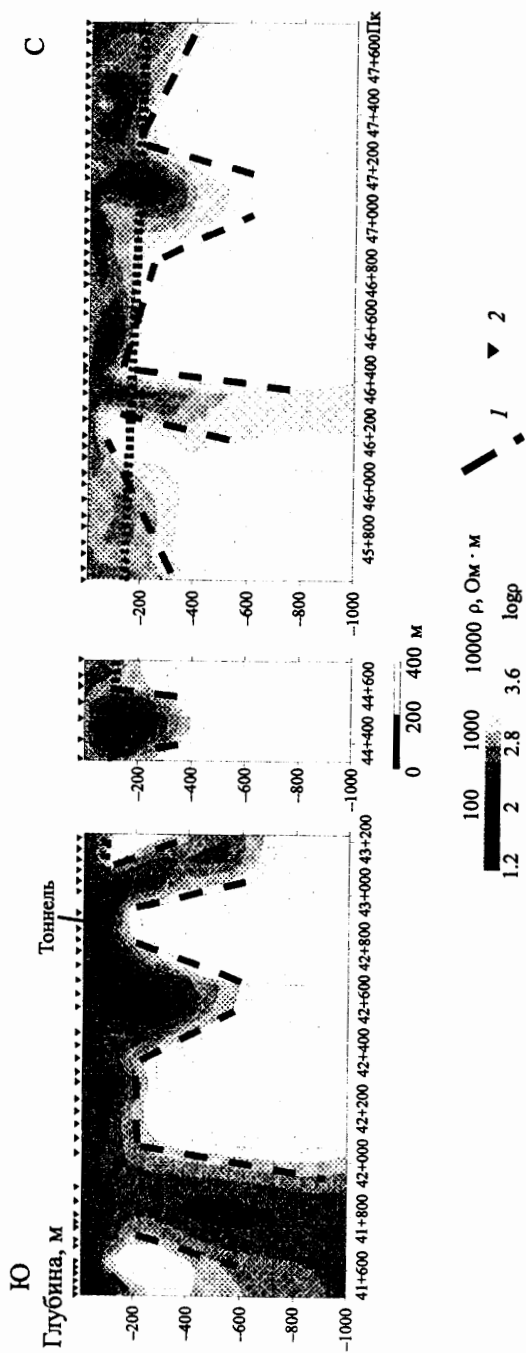


Рис. 6. Обобщенный геоэлектрический разрез по трассе тоннеля Сан-Педро по данным метода АМТЗ
1 — границы монолитных и трещиноватых блоков; 2 — точки АМТЗ

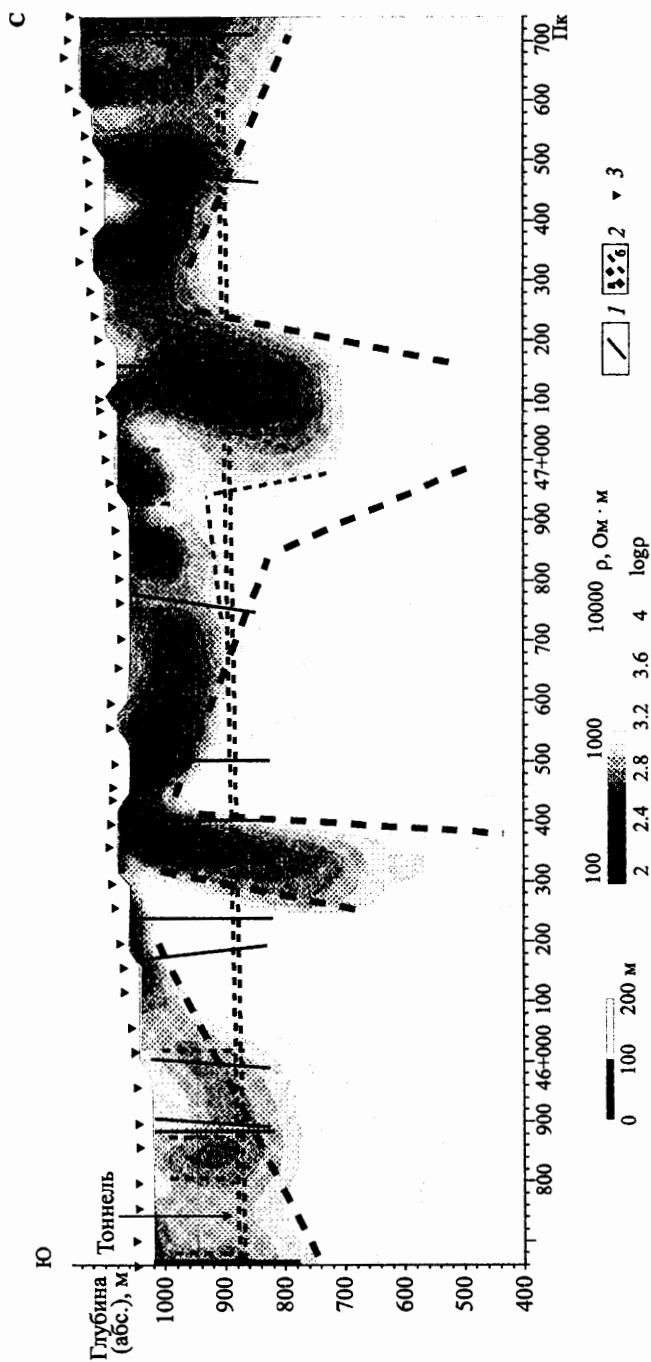


Рис. 7. Детальный геоэлектрический разрез северной части тоннеля Сан-Педро по данным метода АМТЗ
 1 — разломы по данным предшествующих работ; 2 — границы зон трещиноватости по данным АМТЗ (а — глубинные, б — приповерхностные); 3 — точки зондирования

с разрезами по параллельным профилям свидетельствует о том, что эта зона имеет северо-восточное простирание и юго-восточное падение. Она совпадает с рассмотренной ранее проводящей зоной, контрастно проявленной на плане изолиний ϕ_z метода РМТ (см. рис. 4, б) в интервале 41+800 — 41+900 и имеющей такое же простирание и падение. Совпадение результатов методов РМТ и АМТЗ по этому интервалу тоннеля подтверждает достоверность интерпретации полученных данных.

Детальный геоэлектрический разрез с выделением как крупных блоков непроводящих пород и проводящих зон, так и деталей строения верхнего (до 200 м) интервала разреза, построенный с учетом рельефа, показан на рис. 7. На этом же разрезе показано положение разломов по данным предшествующих работ. Как видно из рисунка, в целом наблюдается корреляция результатов предшествующих работ и новых данных АМТЗ. Вместе с тем некоторые тектонические зоны, проявленные в материалах АМТЗ, не были выявлены ранее (например, в районе пикетов 47+000, 47+400 и др.).

На разрезе в районе пикетов 46+300, 47+150 по данным АМТЗ контрастно выделяются мощные и обводненные, а следовательно, наиболее опасные для проходки и эксплуатации тоннеля, зоны разломов, характеризующиеся значениями $\rho < 300$ Ом·м ($\log \rho < 2.5$). По результатам предшествующих работ разломы, соответствующие мощным и обводненным зонам, не отличаются от менее обводненных и маломощных разломов (например, в районе пикета 46+000).

Все разломы по результатам предшествующих работ имеют субвертикальное падение, в то время как по данным АМТЗ наряду с субвертикальными выделяются и полого наклонные тектонические зоны (например, в районе пикетов 46+500–47+600).

Обычно на участках проходки тоннелей встречаются разломы, ориентированные преимущественно в одном направлении (для участка проходки тоннеля Сан-Педро это северо-восточное направление). Наряду с этим, имеется некоторое количество разнонаправленных тектонических нарушений, которые также могут представлять опасность при проходке и эксплуатации тоннеля.

На рис. 8 показаны планы изолиний кажущегося сопротивления по данным метода АМТЗ на частоте 80 Гц для ориентировки измерительной установки по азимутам 0 град. (*H*-поляризация) и 90 град. (*E*-поляризация). На рисунке также показаны разломы по результатам предшествующих работ (уверенно выделяемые и предполагаемые). По данным измерений с установкой по азимуту 0 град. (рис. 8, а) контрастно выделяются разломы северо-восточного направления в северной части, а также отмечается разлом этой же ориентировки в средней части участка.

По данным измерений с установкой по азимуту 90 град. (рис. 8, б) также выделяются разломы северо-восточного направления в северной части, но менее контрастно, чем в предыдущем случае. Наряду с этим, уверенно картируется тектоническая зона субмеридиональной ориентировки, которая не проявлена на плане изолиний для *H*-поляризованного поля. Анализ данных АМТЗ показывает, что эта зона крутопадающая и достаточно мощная, и ее наличие следует учитывать при проходке тоннеля.

Дополнительной причиной необходимости измерений с тензорными установками, позволяющими получать данные о свойствах среды по различным направлениям, является то, что тектонические зоны, расположенные вдоль трасс тоннелей, даже при их небольшой мощности ухудшают качество пород на значительных интервалах проходки тоннелей. Большое значение для достоверности и надежности интерпретации

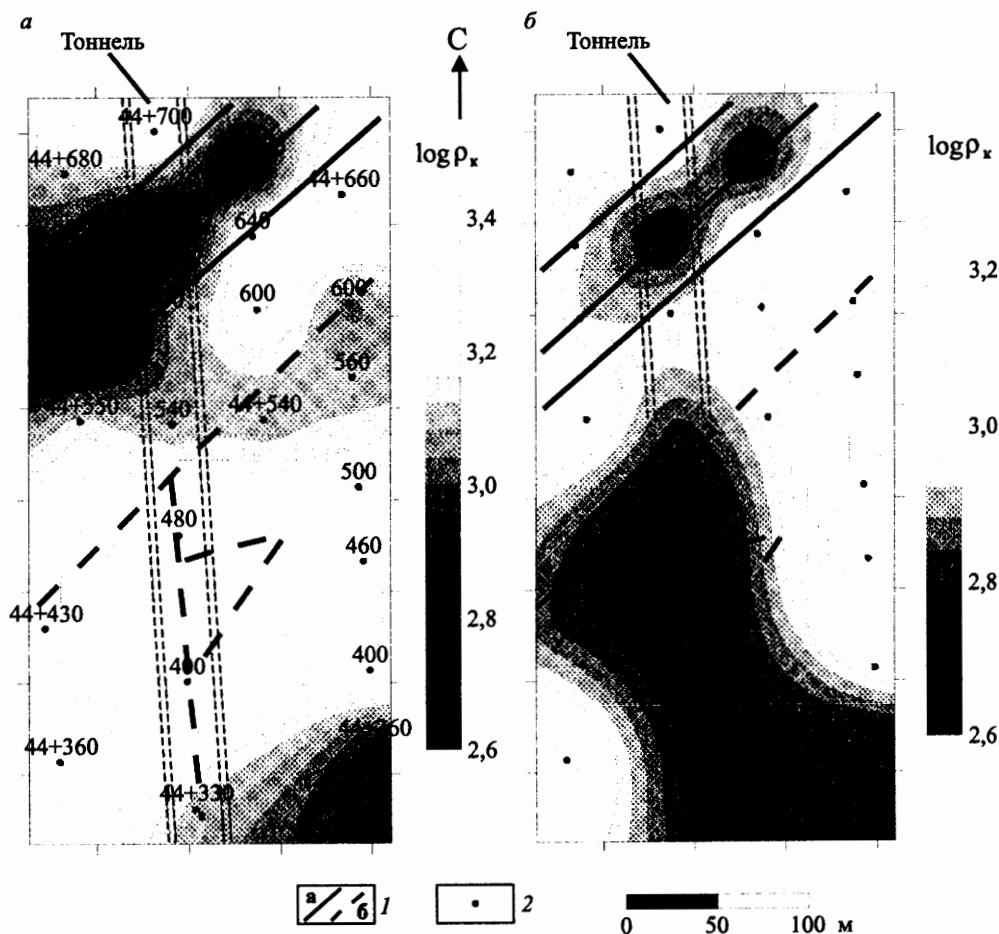


Рис. 8. Планы изолиний кажущегося сопротивления по данным метода АМТЗ на частоте 80 Гц для ориентировки измерительной установки по азимуту 0 град. (а) и 90 град. (б) 1 — разломы по данным предшествующих работ (а — уверенно выделенные, б — предполагаемые); 2 — точки зондирования

данных при наличии разнонаправленных тектонических нарушений на участках работ имеет также проведение зондирования по 2–3 параллельным профилям вдоль трассы тоннеля.

Результаты работ по тоннелю Гуадаррама (участок Умбрия)

По тоннелю Гуадаррама работы методом АМТЗ были выполнены на участке Умбрия по трем профилям с расстоянием между ними 100–200 м и между точками зондирования — 100 м (рис. 9). На рисунке показано предварительное (проектное) положение трассы тоннеля и фактическое, оптимальное для движения скоростных поездов.

Разрез на трассе тоннеля представлен метаморфическими породами (ортогнейсы,

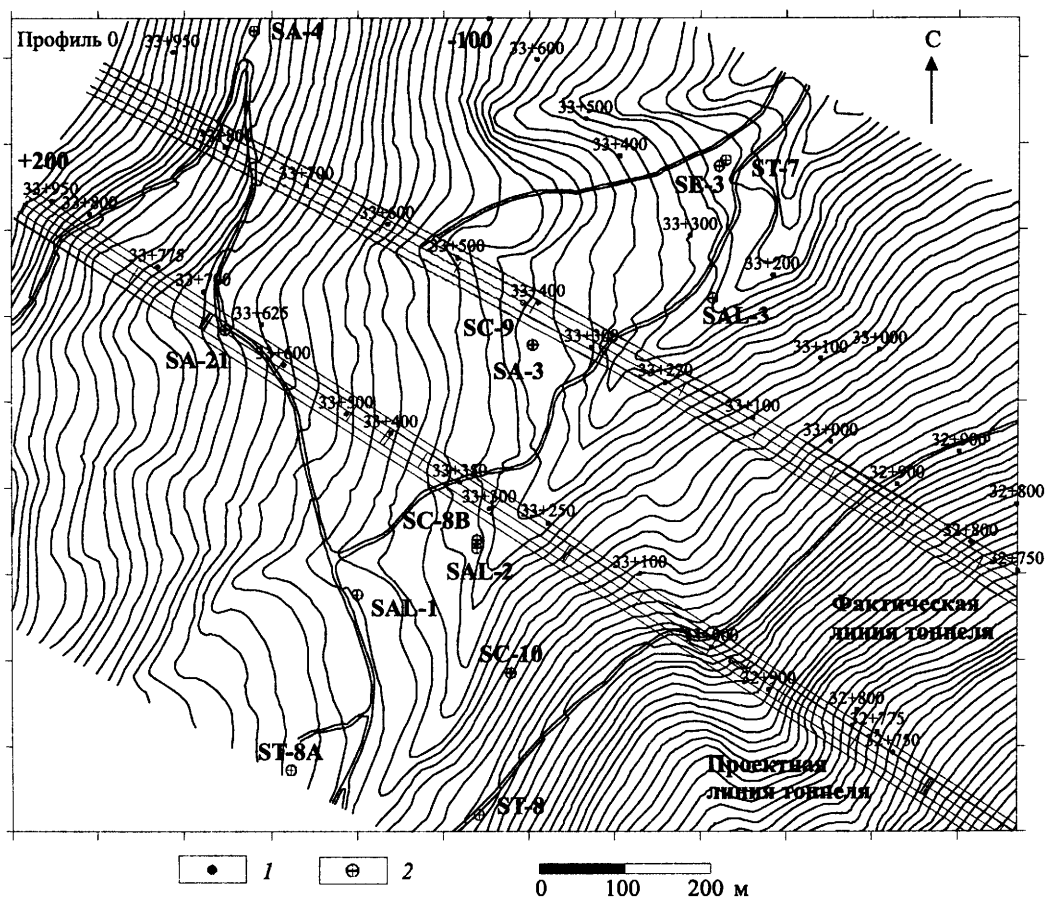


Рис. 9. Положение профилей метода АМТЗ на участке Умбрия
1 — точки АМТЗ; 2 — скважины, пробуренные на предшествующем этапе работ

сланцы) и гранитоидами. Имеются многочисленные разнонаправленные разломы и узлы их пересечения. Преимущественно разломы ориентированы в северо-восточном направлении. Мощность рыхлых перекрывающих отложений не превышает 5 м. Участок работ расположен в долине с небольшой речкой и на прилегающих склонах. Здесь пробурено несколько скважин, которые вскрыли мощную зону разломов, состоящую из серий тектонических нарушений, в которых наиболее проявлены разломы с субвертикальным юго-западным и юго-восточным падением (рис. 10). Глубина тоннеля на участке работ методом АМТЗ меняется от 200 до 350 м.

Зондирования на участке Умбрия проводились в тензорном варианте с ориентировкой измерительных установок вдоль профилей по азимуту 330 град. и вкrest профилей по азимуту 60 град. По сравнению с участком Сан-Педро здесь условия для заземлений были более благоприятные, что позволило использовать латунные электроды. Осложняли проведение измерений более крутые, чем на участке Сан-Педро, склоны на отдельных интервалах профилей.

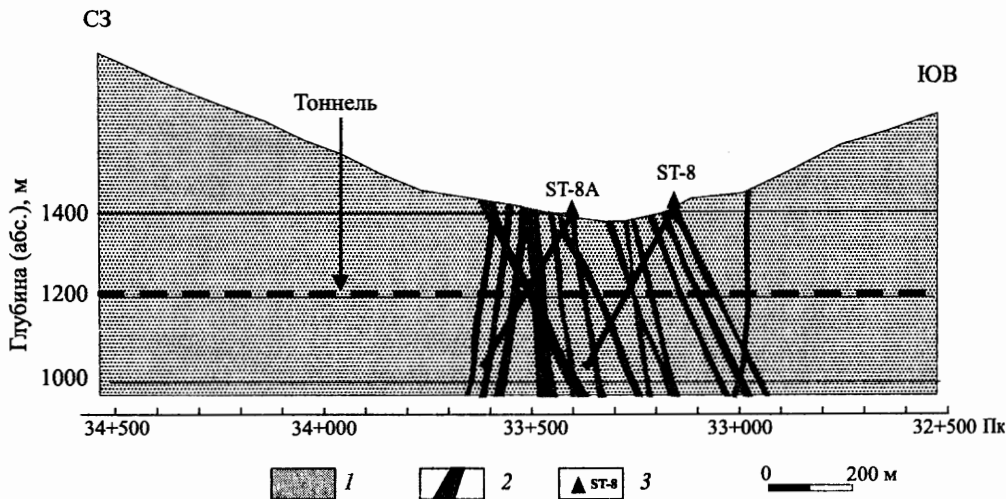


Рис. 10. Схематический разрез на участке Умбрия по данным предшествующих работ 1 — ортогнейсы; 2 — разломы; 3 — скважины

Анализ планов изолиний ρ_k и Φ_z для различных ориентировок измерительной установки по трем профилям на участке Умбрия показал, что наряду с двухмерными структурами здесь существенную роль играют трехмерные структуры, которые связаны с узлами пересечения разнонаправленных разломов. При этом кривые АМТЗ для азимута 330 град. можно считать случаем H -поляризации, а для азимута 60 град. — E -поляризации.

На рис. 11 приведен план изолиний ρ_k на частоте 80 Гц для азимута измерительной установки 330 град. На плане наиболее контрастно проявляется проводящая и вероятно обводненная зона в северо-западной части участка. Ориентировка этой зоны в северо-восточном направлении достаточно близка к направлению тектонических нарушений по данным предшествующих работ.

Сопоставление проводящей зоны с положением разломов, выделенных по результатам предшествующих работ, показывает, что по данным АМТЗ можно картировать обводненные зоны разломов, наиболее опасные для проходки и эксплуатации тоннелей. Помимо проводящей зоны, на плане изолиний в средней и восточной части участка выделяются нарушения субширотного направления.

Инверсия данных АМТЗ проводилась с использованием программы MEL (автор М. М. Харламов), в которой реализован метод эффективной линеаризации [10] для 1D-модели среды с градиентно изменяющимися свойствами. Выбор 1D-инверсии был обусловлен тем, что на участке работ проявляется существенное влияние трехмерных неоднородностей, и 2D-инверсия в данном случае является менее адекватной для имеющейся геологической ситуации.

Геоэлектрические разрезы по профилям 0 и +200 до глубины около 1 км по результатам инверсии для азимута измерительной установки 330 град. приведены на рис. 12. В северо-западных частях разрезов выделяется проводящая зона северо-западного падения под углом около 15 град. Наиболее интенсивно эта зона проявлена на профиле

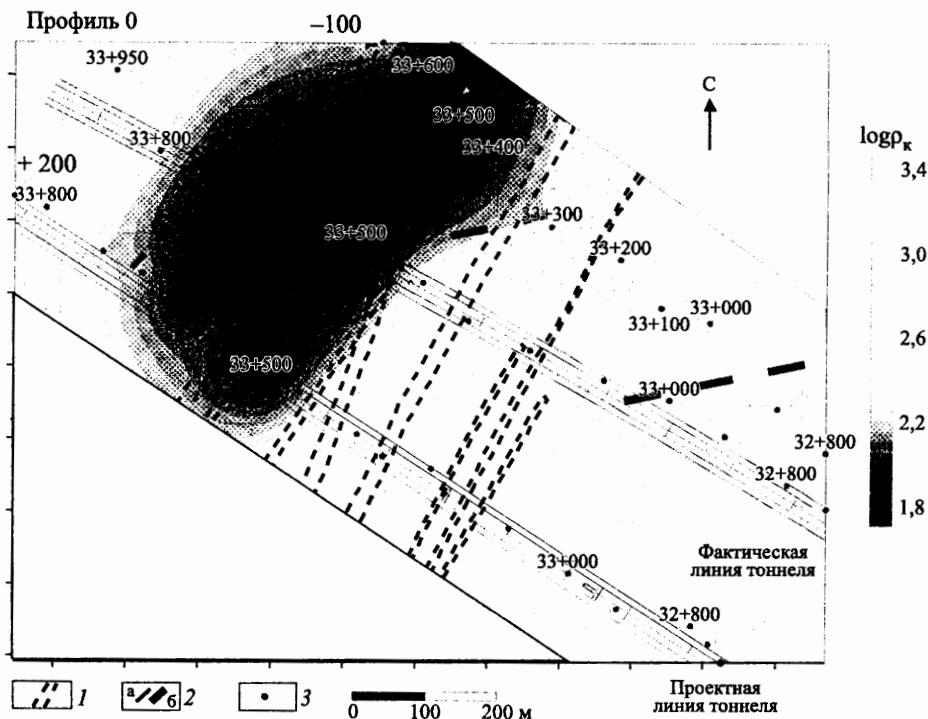


Рис. 11. План изолиний кажущегося сопротивления по данным АМТЗ на частоте 80 Гц на участке Умбрия для ориентировки измерительной установки по азимуту 330 град. 1 — разломы по данным предшествующих работ; 2 — границы проводящей зоны (а) и разломы (б) по данным АМТЗ; 3 — точки АМТЗ

0, который совпадает с фактической линией тоннеля. В районе пикета 33+500 проводящие породы подходят наиболее близко к поверхности земли. С глубиной горизонтальные размеры проводящей зоны увеличиваются, расширяясь в основном в северо-западном направлении. На уровне проходки тоннеля проводящие (обводненные и трещиноватые) породы имеют распространение на значительном (около 500 м) интервале (пикеты 33+350–33+850). Подобный характер поведения (наклонное залегание и северо-западное падение) рассмотренная проводящая зона имеет также на разрезах по профилю +200 (рис. 12) и -100. В средних и юго-восточных частях разрезов выделяются тектонические нарушения с юго-восточным падением и углом наклона около 30 град. Глубина их залегания больше, и они проявлены слабее, чем проводящая зона в северо-западных частях разрезов.

Установленные по результатам АМТЗ различные направления и углы падения проводящих зон в разных частях профилей (северо-западное в северо-западной части и юго-восточное в средней и юго-восточной части) согласуются с данными предшествующих работ (см. рис. 10). Аномальные зоны, выделенные на рассматриваемых геоэлектрических разрезах, достаточно хорошо совпадают с результатами бурения. На разрезы вынесены данные по ряду скважин, расположенных как вблизи (SA-21 и SAL-1), так и на некотором удалении (ST-8 и ST-8A) от этих профилей. Поскольку удаленные

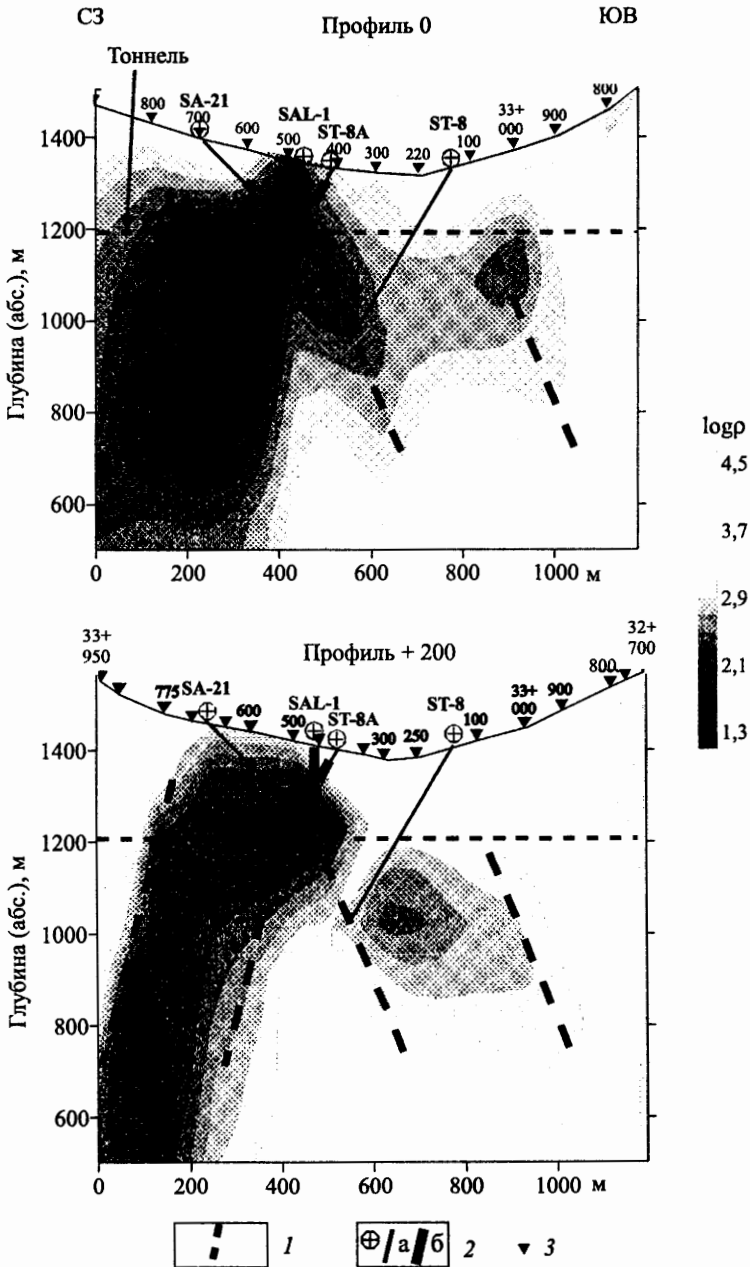


Рис. 12. Геоэлектрические разрезы

по профилям 0 и +200 на участке Умбрия по данным АМТЗ

1 — границы зон разломов по данным АМТЗ; 2 — скважины, пробуренные на этапе предшествующих работ (по интервалам монолитных (а) и трещиноватых (б) пород); 3 — точки АМТЗ

скважины находятся на расстоянии нескольких сотен метров от профилей, мы можем сравнивать общие черты геоэлектрических разрезов и данных бурения.

Как видно из рис. 12, наблюдается достаточно хорошее согласование данных АМТЗ и бурения. Зоны дробления отмечаются низкими значениями удельного сопротивления ($< 300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ или $\log \rho < 2.5$) среди монолитных пород с $\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\log \rho > 3$). Для наиболее проявленной по профилю 0 аномальной зоны в интервале пикетов 33+350–33+850 на уровне проходки тоннеля характерны значения $\rho = 50\text{--}200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\log \rho = 1.7\text{--}2.3$). При этом минимальными значениями $\rho < 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ($\log \rho < 2$) отмечается интервал пикетов 33+500–33+700. Другая аномальная зона по этому профилю на уровне проходки тоннеля выделяется в интервале пикетов 32+950–33+070.

Следует подчеркнуть, что выделенная по данным АМТЗ проводящая аномалия (обводненная зона) (рис. 12) расположена в северо-западной части зоны разломов, которые установлены по результатам предшествующих работ (см. рис. 10). В юго-восточной части зоны разломов по данным предшествующих работ проводящая аномалия выражена менее интенсивно, т. е. разломы участка Умбрия на этапе предшествующих работ не были дифференцированы по степени обводненности. Таким образом, применение метода АМТЗ позволяет оценивать степень обводненности зон разломов и выявлять наиболее опасные для проходки и последующей эксплуатации участки по трассам строительства тоннелей.

Заключение

Для изучения трасс строительства железнодорожных тоннелей предлагается использовать комплекс методов АМТЗ и РМТ. Метод АМТЗ нацелен на изучение глубинного строения вдоль трасс, а метод РМТ предназначен для детального картирования верхней части разреза. Использование плоской вертикально падающей волны как модели первичного поля является основой для комплексирования методов АМТЗ и РМТ.

При проведении работ методом АМТЗ может применяться аппаратура АКФ-4М, а методом РМТ – аппаратура РМТ-Ф. Четырехканальные (тензорные) измерения, реализованные в приборах АКФ-4М и РМТ-Ф, повышают достоверность результатов при изучении горизонтально неоднородных сред. Компактные измерительные установки и возможность бесконтактных измерений электрического поля позволяют проводить работы в труднодоступных условиях при пересеченном рельефе и в неблагоприятных условиях для заземления. Применяемые робастные методы обработки позволяют получать данные хорошего качества при повышенном уровне промышленных и других видов помех. При использовании аппаратуры РМТ-Ф метода РМТ в регионах с большим количеством радиостанций возможно построение амплитудных и фазовых кривых зондирования и проведение последующей инверсии для E - или H -поляризованных полей.

Методы АМТЗ и РМТ опробованы на участках строительства тоннелей Сан-Педро и Гуадаррама по трассе высокоскоростных поездов Мадрид – Вальядолид. По результатам работ методом АМТЗ на участке тоннеля Сан-Педро получены данные о глубинном строении территории и детальной структуре верхней части разреза. Выделены монолитные и трещиноватые блоки горных пород, выполнено картирование зон разло-

мов и оценка степени их обводненности, и, следовательно, опасности для строительства и последующей эксплуатации тоннеля. Отмечена необходимость проведения зондирований по 2–3 параллельным профилям вдоль трассы тоннеля и применения тензорной аппаратуры для обеспечения надежности интерпретации данных.

Материалы метода РМТ на участке строительства тоннеля Сан-Педро использованы при построении детальной схемы распределения разломов. Эта схема существенно отличается от результатов предшествующих работ стандартным комплексом методов. С учетом данных метода РМТ на участке было пробурено несколько проверочных скважин, подтвердивших прогнозную оценку качества пород. В целом результаты работ по участку тоннеля Сан-Педро показали, что породы с точки зрения проходки тоннеля имеют низкое качество (трещиноватые, обводненные), и эти оценки значительно отличаются от выводов, полученных на этапе предшествующих работ на основе использования стандартного комплекса методов.

По данным метода АМТЗ по трассе тоннеля Гуадаррама (участок Умбрия) изучено глубинное строение участка. Установленные особенности залегания зон разломов (направления и углы падения) согласуются с данными предшествующих работ. В результате выполненных исследований выделена мощная проводящая зона, связанная с разрушенными и обводненными породами. Отмечено хорошее совпадение данных метода АМТЗ и бурения по интервалам монолитных и разрушенных пород и показано, что применение метода АМТЗ позволяет оценивать степень обводненности зон разломов и выявлять наиболее опасные для проходки и последующей эксплуатации участки по трассам строительства тоннелей.

Выполненные работы показывают необходимость изменения комплекса методов, применяемого на участках строительства железнодорожных тоннелей, и дополнения его электромагнитными исследованиями АМТЗ и РМТ. Их применение обеспечит изучение разреза в диапазоне глубин от 1–2 м до 1–2 км, выделение монолитных и трещиноватых блоков горных пород, картирование зон разломов и отдельных тектонических нарушений и оценку степени их обводненности.

Авторы приносят благодарность сотрудникам испанской компании ТИГСА, обеспечившим организацию работ, а также С. С. Крылову, М. И. Пертелю, О. М. Прокофьеву и А. М. Суханову, принимавшим участие в работах методами АМТЗ и РМТ на участках строительства тоннелей Сан-Педро и Гуадаррама.

Указатель литературы

1. *Vosoff K.* The magnetotelluric method. Electromagnetic methods in applied geophysics. Vol. 2 Applications. Series: Investigations in geophysics. 1991. N 3. P. 641–711.
2. *Strangway D. W., Swift C. M., Holmer R. C.* The application of audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration // *Geophysics*. 1973. Vol. 38. N 6. P. 1159–1175.
3. *Tezkan B.* A review of environmental application of quasi-stationary electromagnetic techniques // *Surveys in Geophysics*. 1999. Vol. 20. P. 279–308.
4. *Bastani M., Pedersen L. P.* Estimation of magnetotelluric transfer functions from radio transmitters // *Geophysics*. 2001. Vol. 66. N 6. P. 1038–1051.
5. *Pedersen L. B., Bastani M., Dynesius L.* Some characteristics of the electromagnetic field from radio transmitters in Europe // *Geophysics*. 2006. Vol. 71. N 6. P. G279–G284.
6. *Сараев А. К., Головенко В. Б., Ларионов К. А., Смирнова Т. Е.* Аппаратура аудиоманнителлурических зондирований АКФ-4М // *Индустрия*. 2003. № 3. С. 110.

7. *Tezkan B., Saraev A.* A new broadband radiomagnetotelluric instrument: application to near surface investigations // *Near Surface Geophysics*. 2008. Vol. 6. N 4. P. 245–252.
8. *Siripunvaraporn W., Egbert G.* An efficient data-subspace inversion method for 2D magnetotelluric data // *Geophysics*, 2000, Vol. 65. N 3. P. 791–803.
9. *de Groot-Hedlin C., Constable S.* Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data // *Geophysics*. 1990. Vol. 55. N 12. P. 1613–1624.
10. *Porokhova L. N., Kharlamov M. M.* The solution of the one-dimensional inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1990. Vol. 60. P. 68–79.