

**ДИНАМИКА
ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
ЗЕМЛИ**



РЕДАКЦИОННО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ
ПРОГРАММЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ № 7

«Физические поля и внутреннее строение Земли.
Динамика межгеосферных взаимодействий»:

член-корреспондент РАН Г.А. Соболев — председатель;
академик РАН В.В. Адушкин — заместитель председателя;
кандидат физико-математических наук
С.А. Тихоцкий — ученый секретарь;
член-корреспондент РАН А.А. Маловичко;
член-корреспондент РАН П.С. Мартышко;
член-корреспондент РАН В.П. Трубицын;
доктор физико-математических наук С.В. Анисимов;
доктор физико-математических наук А.А. Спивак;
кандидат физико-математических наук А.Я. Сидорин

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Отделение наук о Земле

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЗЕМЛИ

Светоч Плюс
Москва
2011

УДК 550.3

ББК 26.2

Д46

Д46 **Динамика физических полей Земли.** — М.: Светоч Плюс, 2011. — 312 с.: ил.
ISBN 978-5-904393-10-6

В сборнике научных трудов представлены результаты исследований, выполненных в 2009–2011 гг. по 16 проектам Программы фундаментальных исследований № 7 Отделения наук о Земле Российской академии наук «Физические поля и внутреннее строение Земли. Динамика межгеосферных взаимодействий». Программа охватывает широкий спектр проблем современной геофизики, при этом большое внимание уделено поддержке экспериментальных исследований. Содержание сборника можно условно разделить на три тематических направления: 1) глубинное строение Земли по геофизическим данным; 2) напряженное состояние и сейсмичность; 3) геофизические явления в приповерхностных слоях твердой Земли и атмосферы. Доминирующая черта исследований, особенно в первом и втором из отмеченных тематических направлений, — междисциплинарный подход при проведении наблюдений и интерпретации результатов.

Ответственные редакторы:

академик РАН М.И. Эпов

академик РАН В.В. Адушкин

член-корреспондент РАН Г.А. Соболев

Ответственный составитель:

кандидат физико-математических наук С.А. Тихоцкий

ISBN 978-5-904393-10-6

© Российская академия наук, 2011 г.

© Коллектив авторов, 2011 г.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ РАЙОНА ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ И ЕСТЕСТВЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ (МТЗ, ЗС)

*М.И. Эпов, Н.Н. Неведрова, Е.В. Поспеева,
А.М. Санчаа, В.В. Потапов*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск*

Введение

Алтае-Саянская складчатая область до последнего времени была недостаточно изучена электромагнитными методами. В частности, работы методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) на этой территории впервые выполнены только в 2004 г. В это же время Институт нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ СО РАН) приступил к полевым исследованиям с использованием активных методов геоэлектрики — зондирований становлением поля (ЗС) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), а с 2007 г. выполняется среднемасштабная съемка МТЗ, что значительно расширило возможности исследований и интерпретации данных.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью определения геоэлектрического строения верхней части литосферы Горного Алтая на основе получения новых полевых данных комплексом электромагнитных методов, развития методик измерения и интерпретации полевых данных для сложно построенных, сейсмоактивных регионов. Знания о строении востребованы для целого ряда геолого-геофизических задач, связанных с поисками полезных ископаемых, воссозданием геологической истории развития Горного Алтая, а также проблемами сейсмобезопасности, так как впадина подвержена сильным сейсмическим воздействиям.

В настоящее время накоплен значительный объем полевых данных, полученных на территории Чуйской впадины Горного Алтая комплексом методов

электромагнитных зондирований с контролируемым и естественным источником (ВЭЗ, ЗС, МТЗ) за несколько лет исследований (2004–2010). Рассмотрим карту фактического материала, на которой отражено размещение большей части профилей и пунктов измерений комплекса методов геоэлектрики, выполненных на территории Чуйской впадины (рис. 1).

Необходимо отметить, что для решения поставленной задачи кроме современных полевых материалов ЗС были использованы и архивные данные. Они получены по профилям и пунктам, выполненным Алтайскими партиями в 80-е годы прошлого века на территории депрессии (см. рис. 1). В те годы методом ЗС был получен самый значительный объем электромагнитных данных. Эти измерения выполнены в период спокойной сейсмической обстановки. По результатам их обработки построена основная геоэлектрическая модель осадочного чехла Чуйской впадины и оценены значения геоэлектрических параметров до Чуйского землетрясения 2003 г. Современные измерения методом ЗС, выполненные за период с 2004 по 2010 гг., включая режимные пункты, сосредоточены на нескольких участках котловины.

Основной объем современных ВЭЗ выполнен с целью уточнения строения самой верхней части разреза и изучения процессов консолидации среды в западной части впадины. Методом МТЗ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН) выполнил на территории Горного Алтая четыре протяженных профиля, три из них, отмеченные на рис. 1 флажками красного цвета, — во время полевых сезонов 2008–2009 гг. Профиль I пройден в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения в западном замыкании впадины и захватывает территорию Южно-Чуйского хребта. Региональный профиль II пересекает центральную часть депрессии с юга на север, практически параллельно первому. Профиль III проходит через территорию Курайской впадины с юго-запада на северо-восток. В 2010 г. пройден профиль, пересекающий Чуйскую котловину в широтном направлении, вкрест простиранья региональных структур. На рис. 1 он обозначен флажками черного цвета.

В работе использованы также данные МТЗ, полученные ИНГГ СО РАН от сторонних организаций. В 2004 г. в рамках программы изучения плейстоценовой области Чуйского землетрясения сотрудниками Научной станции РАН (г. Бишкек) проведено изучение глубинного строения литосферы в районе Курайско-Чуйской системы межгорных впадин Горного Алтая. Магнитотеллурические исследования проведены по двум секущим эпицентральной зону Чуйского землетрясения региональным профилям, длиной более 100 км каждый и шагом 8–15 км. Эти профили отмечены на карте флажками розового цвета).

В результате исследований на глубине 20 км выделен внутрикоровый проводящий слой с суммарной продольной проводимостью порядка 1000 См, а также субвертикальные и наклонные проводящие зоны. Эти зоны протягиваются от корового проводящего слоя к поверхности и характеризуются суммарной продольной проводимостью 300 См [Новиков и др., 2008]. По мнению авторов, субвертикальные зоны связаны с трассами новейших разломов, разделяющих блоки, не испытавшие перемещение друг относительно друга в вертикальном направлении, и интерпретируемых ими как сдвиги. Наклонные зоны разделяют блоки, смещенные по вертикали.

Начиная с 2005 г. Федеральное агентство недропользования проводит целенаправленную политику регионального геолого-геофизического изучения глубинного строения Алтае-Саянской сейсмоактивной области с целью выявления сейсмоопасных участков и прогнозирования развития геодинамических процессов. В рамках этой программы Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья (ГПКК «КНИ-ИГиМС») проведены комплексные электроразведочные исследования — аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ, высокочастотный диапазон 2000–1 Гц), МТЗ (среднечастотный диапазон 300–0.001 Гц), глубинные МТЗ (ГМТЗ, низкочастотный диапазон — до 0, 0001 Гц) по профилю Ташанта – Кош – Агач – Тээли общей протяженностью 100 п. км. Часть этого профиля, пересекающая территорию Горного Алтая, показана на рис. 1, пункты МТЗ отмечены флажками зеленого цвета. Наблюдения методом АМТЗ выполнены с шагом 1 км, МТЗ — 3 км и ГМТЗ — 40 км. В результате этих исследований установлено, что под известными очаговыми зонами землетрясений (Алтайская и Шапшальская) отмечается приподнятое положение корового слоя до 8–12 км и понижение удельного продольного сопротивления слоя до значений 10–20 Ом·м.

Таким образом, учитывая весь имеющийся объем данных, можно изучить геоэлектрическое строение района Чуйской депрессии в широком диапазоне глубин. Основная цель этих исследований — построение глубинных геоэлектрических моделей литосферы, а также уточнение строения осадочного чехла и верхней части палеозойского фундамента с использованием комплекса методов МТЗ и ЗС.

Методика комплексной обработки и интерпретации данных электромагнитных зондирований МТЗ и ЗС

Рассмотрим методику совместной интерпретации данных МТЗ и зондирований становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Преимущества комплексной интерпретации будет продемонстрировано на конкретном примере. Ос-

новная сложность интерпретации МТЗ состоит в трудности учета влияния локальных и региональных неоднородностей различной проводимости. Существует целый ряд проблем, связанных с влиянием верхней части разреза и определением размерности геоэлектрической модели на участке магнитотеллурического зондирования. Решение таких вопросов невозможно без комплексирования МТЗ с другими видами электромагнитных зондирований. Оптимальный вариант комплексирования основан на привлечении данных ЗС. Зондирования ЗС и МТЗ выполняются в одном пункте, при этом параметры зондирований выбираются так, чтобы перекрывались интервалы, в пределах которых на зондирования влияют одни и те же геоэлектрические характеристики разреза.

При комплексировании двух методов возникает проблема совмещения кривых различного вида электромагнитных зондирований. Впервые пример совмещения кривых МТЗ и ЗС и последующего выбора одной из кривых МТЗ для интерпретации с использованием уравнения линии H был продемонстрирован в статье [Ваньян и др., 1982].

В этом исследовании был опробован способ совмещения кривых по уровню кажущегося сопротивления и параметрам S и H , если они едины для области перекрытия. Совмещение производится следующим образом. В результате инверсии по кривой ЗС определяется суммарная проводимость (S_{Σ}); затем из аналитического выражения $S = 452\sqrt{2\pi t}/\rho$ при фиксированном сопротивлении, по которому производится совмещение кривых, определяется $\sqrt{2\pi t}$. Через точку пересечения ρ и $\sqrt{2\pi t}$ проводится асимптота под углом 63° . Из аналитического выражения $S = 356\sqrt{T}/\rho$ при том же значении сопротивления определяется \sqrt{T} , которому соответствует значение S_{Σ} , определенное по кривой ЗС. Через точку пересечения ρ и \sqrt{T} проводится асимптота под углом 63° . Кривые совмещаются по выбранному сопротивлению до пересечения асимптотических линий. Кривая МТЗ в левой части дстраивается по параметрам кривой ЗС в координатах ρ и \sqrt{T} , а затем интерпретируется как единая кривая МТЗ. На рис. 2 приведены примеры совмещения продольных кривых МТЗ с кривыми ЗС в едином пункте зондирования.

Совпадение параметров ЗС и одной из кривых МТЗ используется в качестве одного из критериев выбора размерности модели геоэлектрического разреза и определения той кривой МТЗ, на которую влияние верхней части разреза минимально. Предложенная методика повышает достоверность выполненной интерпретации и точность построения геоэлектрических моделей.

В качестве примера рассмотрим результаты комплексной интерпретации полевых данных ЗС и МТЗ по профилю 3 (ЗС) в западном замыкании Чуй-

ской впадины, на котором практически все пункты были совмещены с пунктами МТЗ. Геоэлектрический разрез по этому профилю и пример совмещения кривых представлен на рис. 3.

Отметим основные особенности полученного разреза. Наиболее проводящий слой, залегающий на палеозойских высокоомных отложениях, выдержан по значениям удельного электрического сопротивления, которые в его центральной части находятся в узком интервале от 23 до 27 Ом·м (по данным ЗС 118–138 Ом·м). В северной части профиля резко сокращается мощность этого слоя и повышается сопротивление (по данным ЗС 138–170 Ом·м). Слой выдержан по мощности и сопротивлению. Самый верхний горизонт переменной мощности наиболее высокоомный, что связано с его литологическим составом — присутствием моренных грубообломочных пород.

Впервые в палеозойских отложениях на глубинах более 1000 м уверенно выделяется геоэлектрическая граница, которая показана на рис. 3 пунктирной линией, причем она вначале была получена независимо по данным обоих методов в северной части профиля. Ее наличие свидетельствует о более сложной геологической истории формирования впадины в палеозойское время. Сейчас есть только предположения, с какими породами может быть связана смена электрических свойств пород на этой глубине в верхней части фундамента, и пока нет обоснованного геологического объяснения. Это предмет дальнейшего исследования.

Результаты ЗС на территории Чуйской впадины

В настоящее время для территории Чуйской впадины имеются самые представительные полевые данные, полученные электромагнитными методами с контролируемым источником в разные годы. Остановимся на характеристике архивных материалов ЗС. Использование этих данных — очень важный элемент исследования Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны. В результате интерпретации оценены количественные электромагнитные параметры осадочного чехла и верхней части фундамента до разрушительного Чуйского землетрясения. Современные вариации этих параметров позволяют оценить степень воздействия на геологическую среду сильного сейсмического события. Кроме того, эти данные используются для построения неотектонической карты разломно-блокового строения депрессии.

Зондирования становлением электромагнитного поля в 1980-х годах в Чуйской депрессии проводились по профилям, показанным на рис. 1, с аппаратурой «Цикл». Расстояние между профилями в среднем составляло 4–5 км, использовалась соосная, симметричная установка («петля в петле»). Для большей части зондирований применяли генераторные и приемные петли

размером 400×400 м с таким же шагом по профилю. Обычно в каждой точке проводились два зондирования с различным током (12 и 40 А). При токе 12 А измерения ЭДС начинались в среднем с 0.3 мс, а при токе в 40 А — от 0.6 до 1.0 мс. Конечное время измерений ограничивалось уровнем помех и составляло от 40 до 90 мс. В каждом пункте зондирований на меньшем токе регистрировался один цикл измерений при 100 накоплениях, на большем токе проводились 3 цикла измерений при одном и том же числе накоплений. Минимальная величина измеряемого полезного сигнала составляла в среднем 10 мкВ. Средняя относительная ошибка измерений оценивалась примерно с 3–5% на ранних временах до 10–15% на поздних.

Для анализа и интерпретации полевых данных были использованы две автоматизированные системы, разработанные в электромагнитных лабораториях ИНГГ СО РАН. Программные комплексы ЭРА и EMS созданы для решения обратных задач и математического моделирования нестационарных электромагнитных полей [Эпов и др., 1990; Хабинов и др., 2009]. Для формирования базовой интерпретационной модели привлекается дополнительная априорная информация. Так, для Чуйской депрессии были проанализированы и обобщены данные по имеющимся скважинам (~ 30 скважин).

Кратко рассмотрим основные результаты интерпретации [Неведрова и др., 2001; Неведрова, Поспеева, 2009]. Сложный рельеф фундамента области Чуйской депрессии наглядно представлен на трехмерной модели (рис. 4). В верхней части рисунка показаны размещение профилей и пунктов измерений ЗС и карта мощности осадочного заполнения. По этому рисунку можно судить об общем геологическом строении впадины, состоящей из нескольких прогибов, ограниченных поднятиями. Наиболее темным цветом показаны места наибольшего погружения фундамента, которые находятся у северного борта впадины. Западный прогиб впадины в плане имеет достаточно сложную конфигурацию, фактически здесь имеются несколько локальных углублений, разделенных приподнятыми блоками. Наиболее протяженный прогиб вытянут с северо-запада на юго-восток. Такое же простираие имеют основные разломные нарушения, разделяющие крупные приподнятые и погруженные блоки.

Трехмерная модель построена с интерполяцией, но, тем не менее, хорошо отражает блоковое строение верхней части фундамента Чуйской депрессии.

На рис. 5 показаны разрезы через основные структурные элементы впадины. Они построены от зоны разломов Курайского хребта на севере до южного горного обрамления с учетом имеющегося рельефа. Разрез по профилю № 5 относится к западной части впадины. Профили № 7 и 10, более протяженные, находятся в ее центральной части. На примере этих разрезов

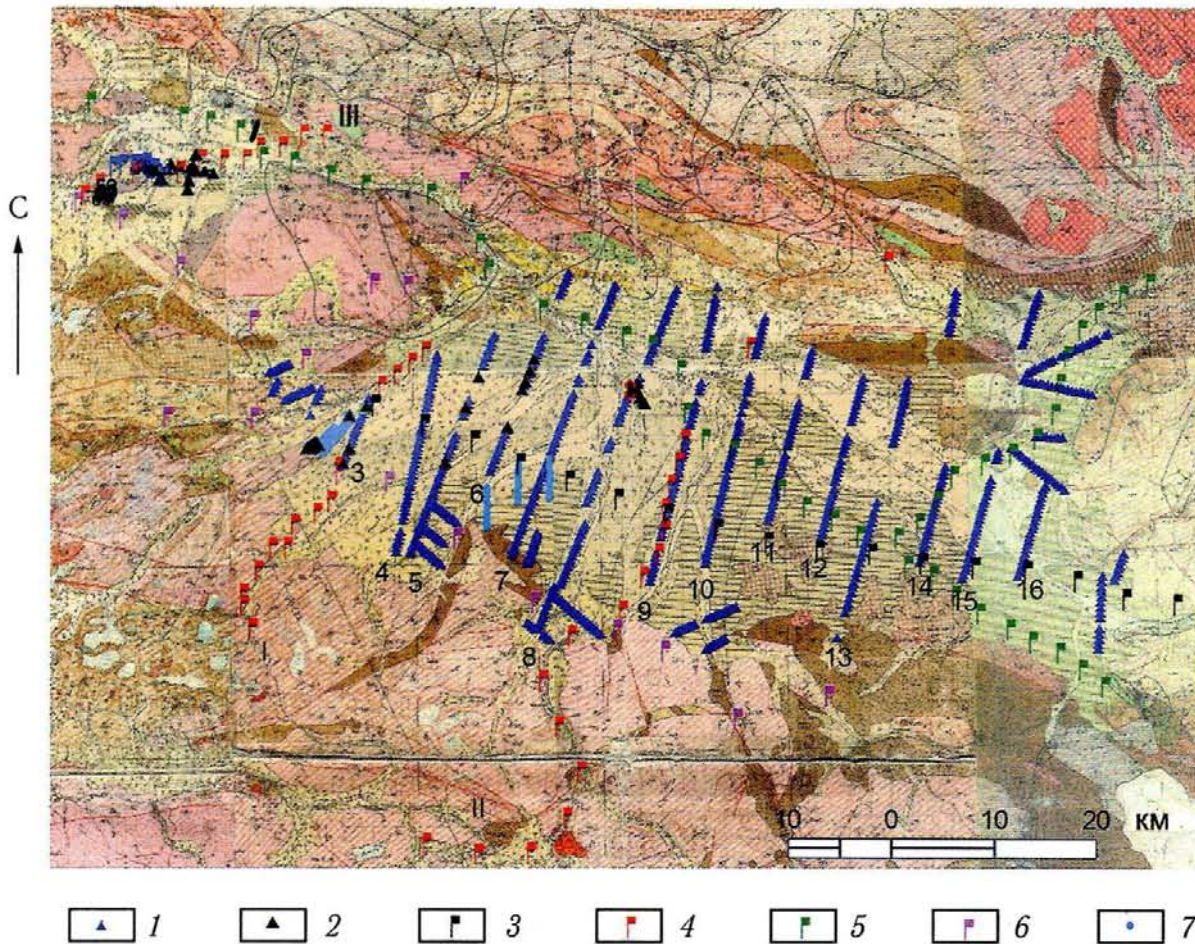


Рис. 1. Карта фактического материала с размещением профилей и пунктов измерений комплексом электромагнитных методов ВЭЗ, ЗС, МТЗ на территории Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая

1 — пункты ЗС (архивные); 2 — пункты современных измерений ЗС (ИНГГ СО РАН); 3 — пункты профиля МТЗ, выполненного в 2010 г. (ИНГГ СО РАН); 4 — пункты профилей МТЗ, выполненных в 2008–2009 гг. (ИНГГ СО РАН); I — в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения; II — региональный профиль; III — через территорию Курайской впадины; 5 — пункты профилей МТЗ, выполненных КНИИГГиМС; 6 — пункты профилей МТЗ, выполненных Научной станцией РАН; 7 — пункты ВЭЗ

отмечается ступенчато-блоковое строение осадочного чехла и палеозойского фундамента.

Можно видеть, что наиболее сложно устроен северный борт впадины, расположенный вблизи зоны Курайского разлома. Здесь обнаружены надвижки плохо проводящих пород палеозойского основания на более поздние третичные осадочные отложения. Мощность осадочного заполнения в северной части депрессии превышает 1300 м.

Осадочные породы на северной окраине образуют крутые и, вероятно, даже опрокинутые складки. Наблюдаются выходы хорошо проводящих от-

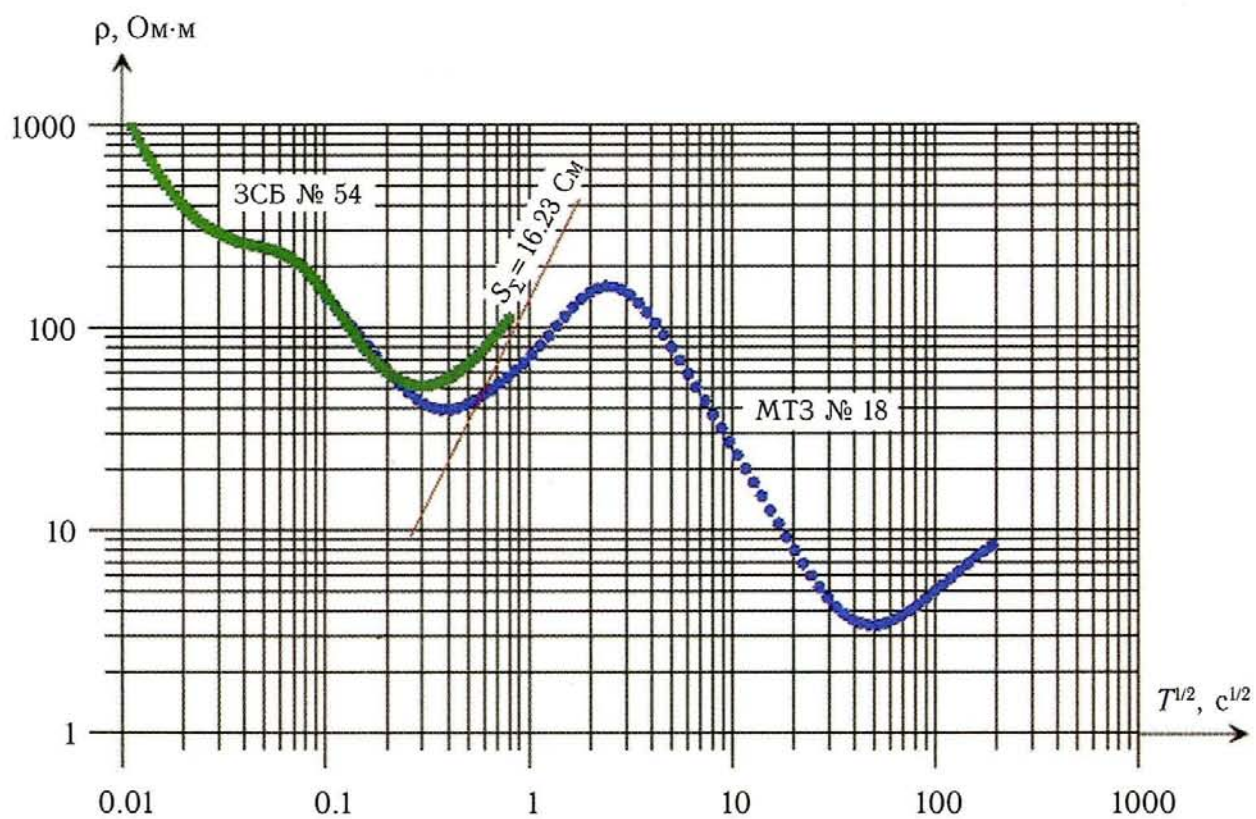
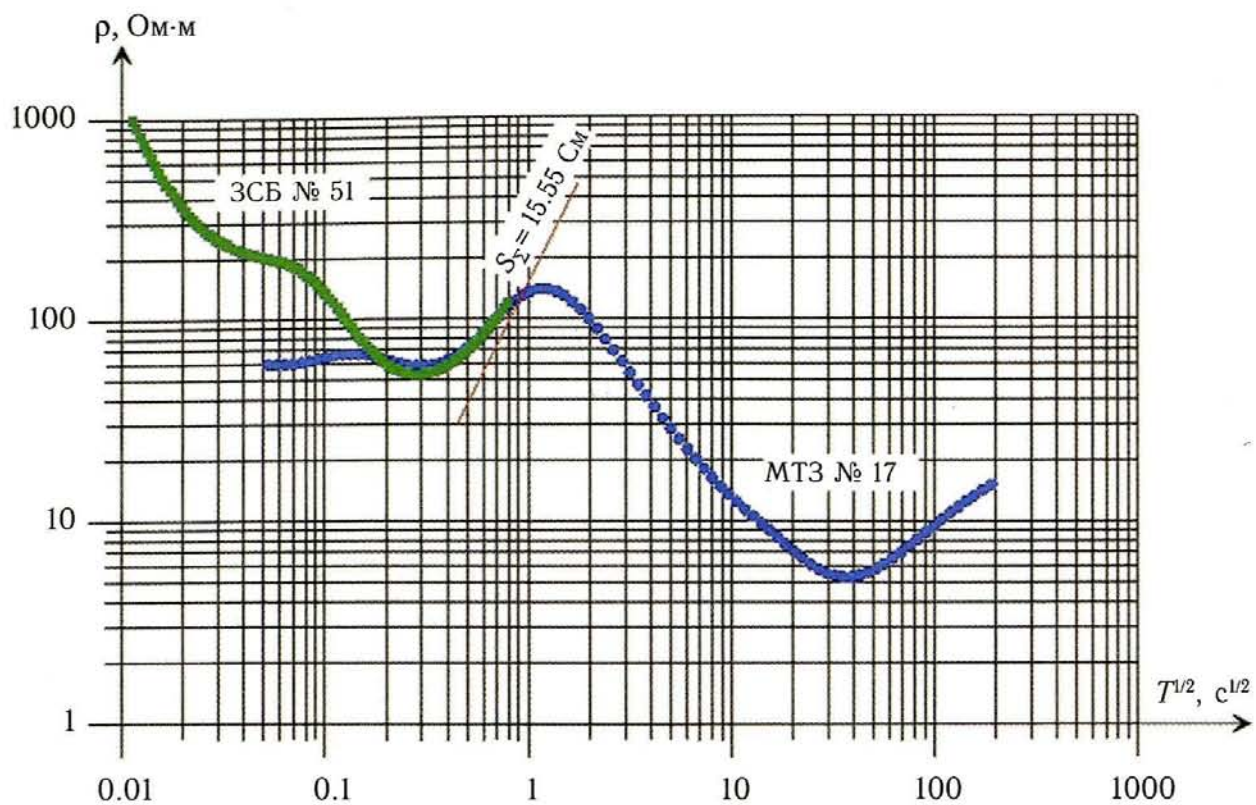


Рис. 2. Примеры совмещения кривых ЗС и МТЗ в едином пункте зондирования на региональном профиле

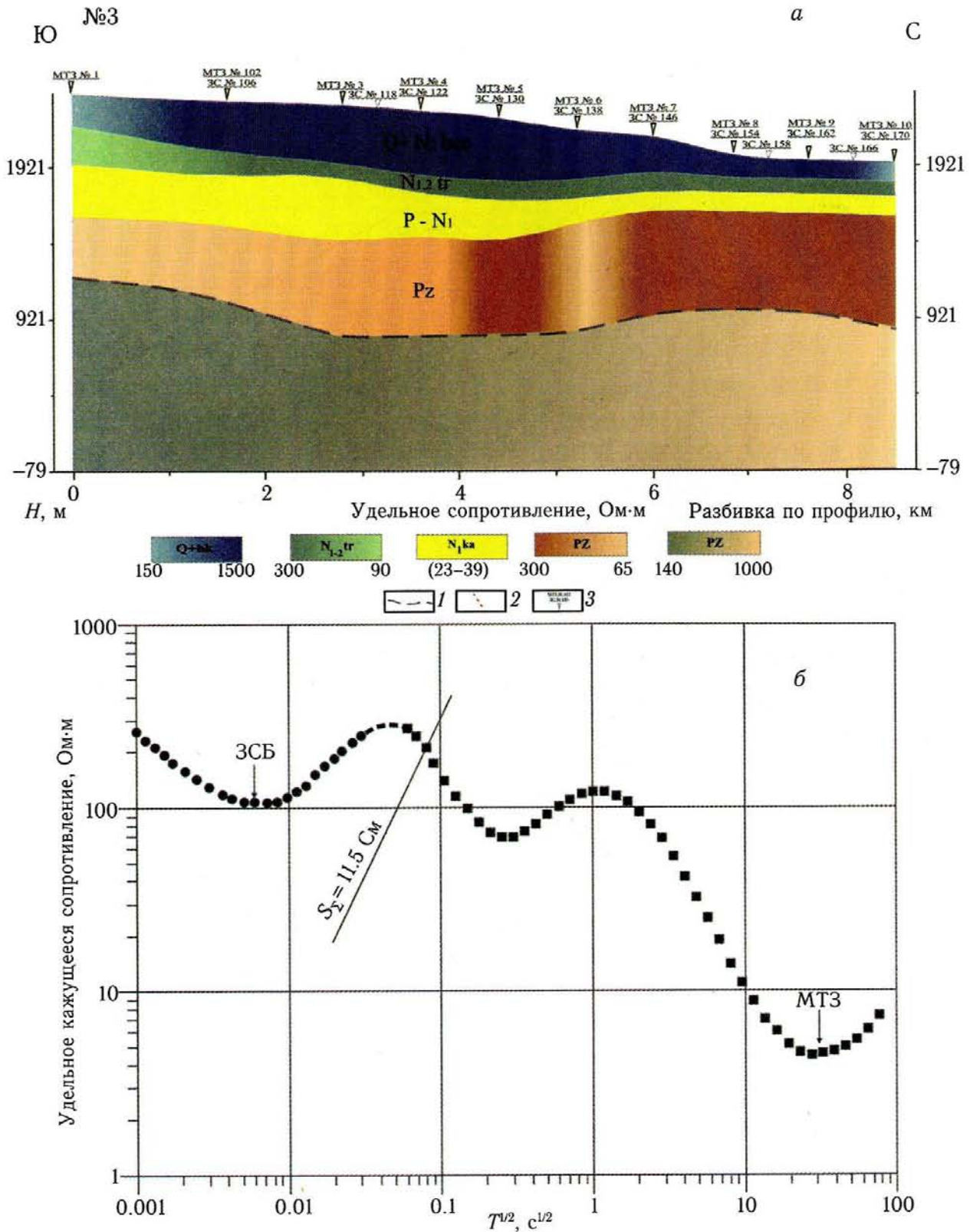


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю № 3 по результатам комплексной интерпретации данных ЗС и МТЗ

Пунктиром показана граница в палеозойском фундаменте (а) и пример совмещения кривых ЗС и МТЗ в едином пункте зондирования 102 (б)

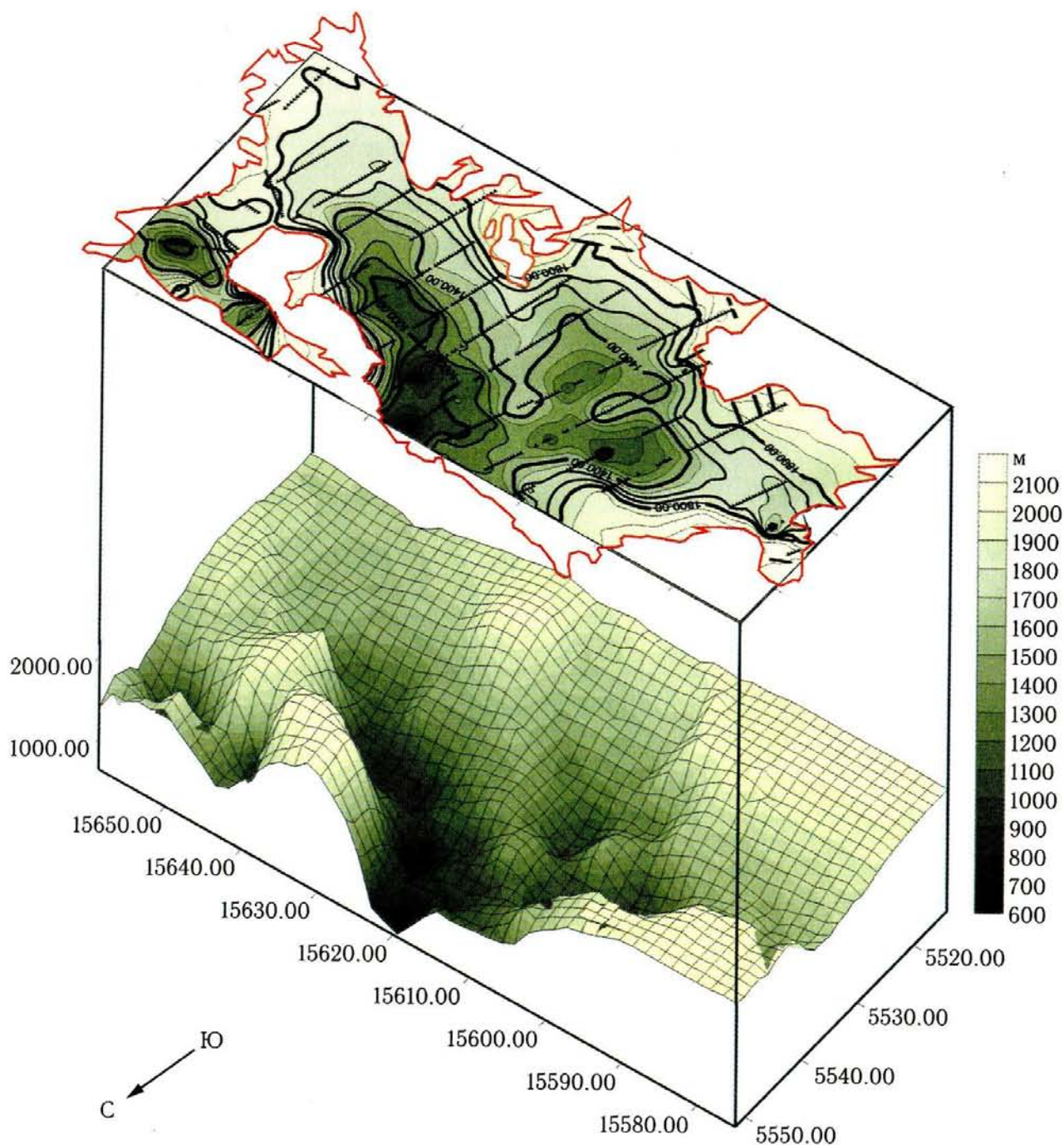


Рис. 4. Рельеф фундамента Чуйской впадины по данным архивных ЗС

ложений на поверхность. Возможно, что этим выходам соответствуют зоны четвертичных разломов, заполненные разуплотненными породами.

Фундамент пересечен многочисленными тектоническими нарушениями, которые фиксируются резкими его уступами и достаточно четко прослеживаются выше — ступенями в осадочном чехле. Следует отметить, что разломные зоны в осадочном заполнении Чуйской впадины, по-видимому, невелики

по ширине, не превышающей 100–300 м. О ширине разломных зон можно судить по шагу геофизической съемки и анализу геоэлектрических моделей в двух соседних пунктах зондирований.

Геоэлектрические разрезы по профилям МТЗ с учетом данных ЗС

Обратимся к результатам, полученным по региональному профилю МТЗ II, проходящему от южного горного обрамления вдоль течения р. Тархата с выходом в северной части в зону Курайского хребта (см. рис. 1). Вначале рассмотрим методику интерпретации, общую для всех профилей МТЗ.

На первом этапе обработки были определены частотные характеристики магнитотеллурического $|Z|$ и магнитовариационного $|W|$ тензоров. Согласно М.Н. Бердичевскому и В.В. Дмитриеву [2009], параметры N , skew, η и N_{mv} оцениваются по отношению к пороговым значениям δ , которые характеризуют уровень измерительных погрешностей. В магнитотеллурическом тесте значения δ выбираются в интервале 0.05–0.15, в магнитовариационном — 0.03–0.05. Анализ магнитотеллурического теста показал, что на высоких частотах (период $T \ll 1$ с) все три магнитотеллурических параметра находятся в пределах пороговых значений δ и составляют: N — 0.1–0.15; skew — < 0.1 ; η — < 0.07 . На периоде $T = 1$ с значения N увеличиваются до 0.3–0.4, а с понижением частоты ($T \gg 100$ с) становятся равными 0.7–0.8.

Повышенным значениям N отвечают повышенные значения параметров skew (0.4–0.8) и η (более 0.3), что свидетельствует об отсутствии в верхней части разреза 2D- и 3D-неоднородностей. В пределах проводящих неоднородностей (МТЗ 6–10; 13–15) отмечается повышение значений магнитотеллурических параметров во всем диапазоне частот. Аналогичная ситуация отмечается и в пределах неоднородности высокого сопротивления (МТЗ № 11–13).

Таким образом, основную геоэлектрическую модель по профилю можно рассматривать как региональную двумерную структуру с локализованными 3D-неоднородностями, расположенными в верхней — средней коре. Этот вывод подтверждает анализ полярных диаграмм магнитотеллурического тензора, конфигурация которых является надежным индикатором размерности геоэлектрических структур [Бердичевский, Дмитриев, 2009].

Оценка магнитовариационного параметра неоднородности N_{mv} показала, что исследуемый разрез характеризуется значительной горизонтальной неоднородностью. При этом на фоне в целом повышенных значений выделяются горизонтально неоднородные области, где $N_{mv} \gg \delta$, которые можно разделить на два типа — локальные и региональные. Первый тип характерен для проводящих неоднородностей, верхняя кромка которых фиксируется на

глубинах от 300 м до 4000 м (МТЗ № 7–10 и 13–15). Здесь отмечается повышение значений N_{mv} во всем частотном диапазоне, начиная с самых высоких периодов (рис. 6).

Региональная неоднородность прослеживается по всему профилю, начиная с периодов 100–110 с, и характеризуется самыми высокими значениями $N_{mv} > 0.9$ (см. рис. 6). На низких частотах магнитовариационные параметры свободны от приповерхностных эффектов и отражают глубинные структуры. В этом случае региональная горизонтальная неоднородность отражает структуру внутрикорового (литосферного) проводящего слоя, глубина залегания которого составляет 16–18 км, поднимаясь до значений 8–10 км в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения. Количественная интерпретация осуществлялась в рамках 1D-модели.

В качестве интерпретационных были выбраны продольные (квазипродольные) кривые, так как неоднородности, формирующие эффекты, искажающие МТ-поле, имеют гальваническую природу. Правомерность такого выбора обоснована результатами комплексирования МТЗ с нестационарными индукционными зондированиями с соосными установками, так как в этой модификации метода измеряется дифференцированная по времени магнитная составляющая электромагнитного поля. При этом кривые ЗС не только несут информацию о верхней части разреза, но и помогают в значительной степени понизить многозначность определения глубинной геоэлектрической модели (см. рис. 2).

Рассмотрим геоэлектрический разрез литосферы по этому профилю (рис. 7). В разрезе выделяются две области с различными особенностями строения. Первая — юго-западная — охватывает часть Южно-Чуйского хребта (МТЗ № 6–13). Вторая располагается в северо-восточной части профиля и в плане соответствует Чуйской впадине (МТЗ № 14–23). В южной части профиля выделена мощная аномалия пониженного сопротивления сложной конфигурации (МТЗ № 6–10), состоящая из неоднородностей двух порядков. Неоднородность первого порядка с сопротивлением менее 3–6 Ом·м картируется на глубине порядка 4 км. В районе пунктов 8, 9 и 10 она сочленяется с проводящей неоднородностью второго порядка с четким наклоном боковых границ, соответствующей зоне глубинного разлома. Верхняя кромка неоднородности располагается на относительно небольших глубинах, а сопротивление уменьшается до 1 Ом·м.

В районе пунктов 11–13 выделен высокоомный блок, сложенный по геологическим данным дайковыми поясами щелочных базальтоидов и слюдяными лампрофирами чуйского комплекса [Владимиров и др., 1997, 2005]. Значения сопротивления в нем превышают 7000 Ом·м. В потенциальных полях

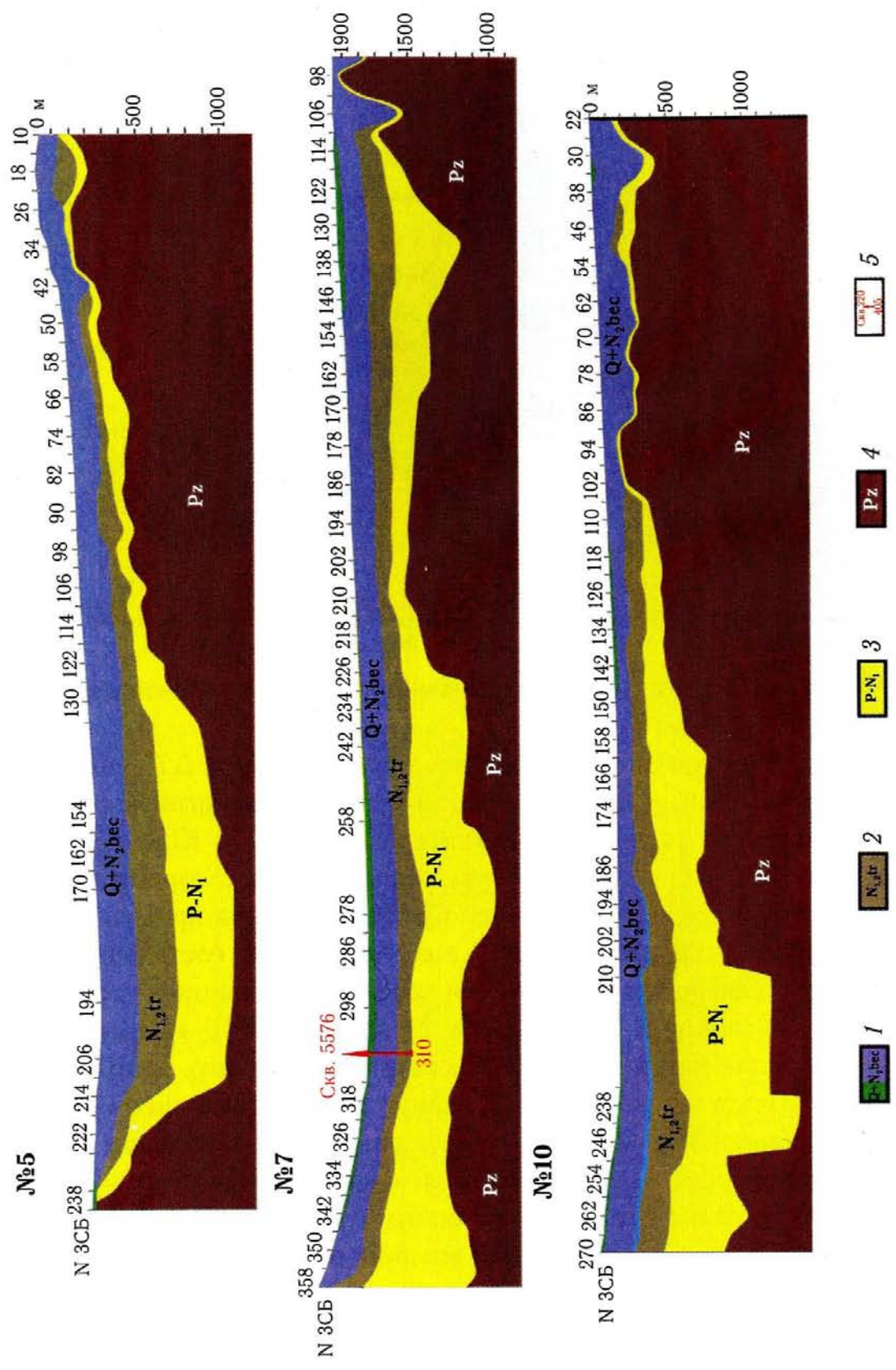


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по профилям 5, 7, 10 в Чуйской впадине
 1 — верхняя часть разреза и Бекенская свита, $\rho = 200-1000$ Ом·м, 2 — Туеркская свита, $\rho = 90-120$ Ом·м,
 3 — палеоген-нижнеогеновые отложения, $\rho = 8-30$ Ом·м, 4 — высокоомный фундамент, $\rho = 500-2000$ Ом·м,
 5 — скважина, ее номер и глубина

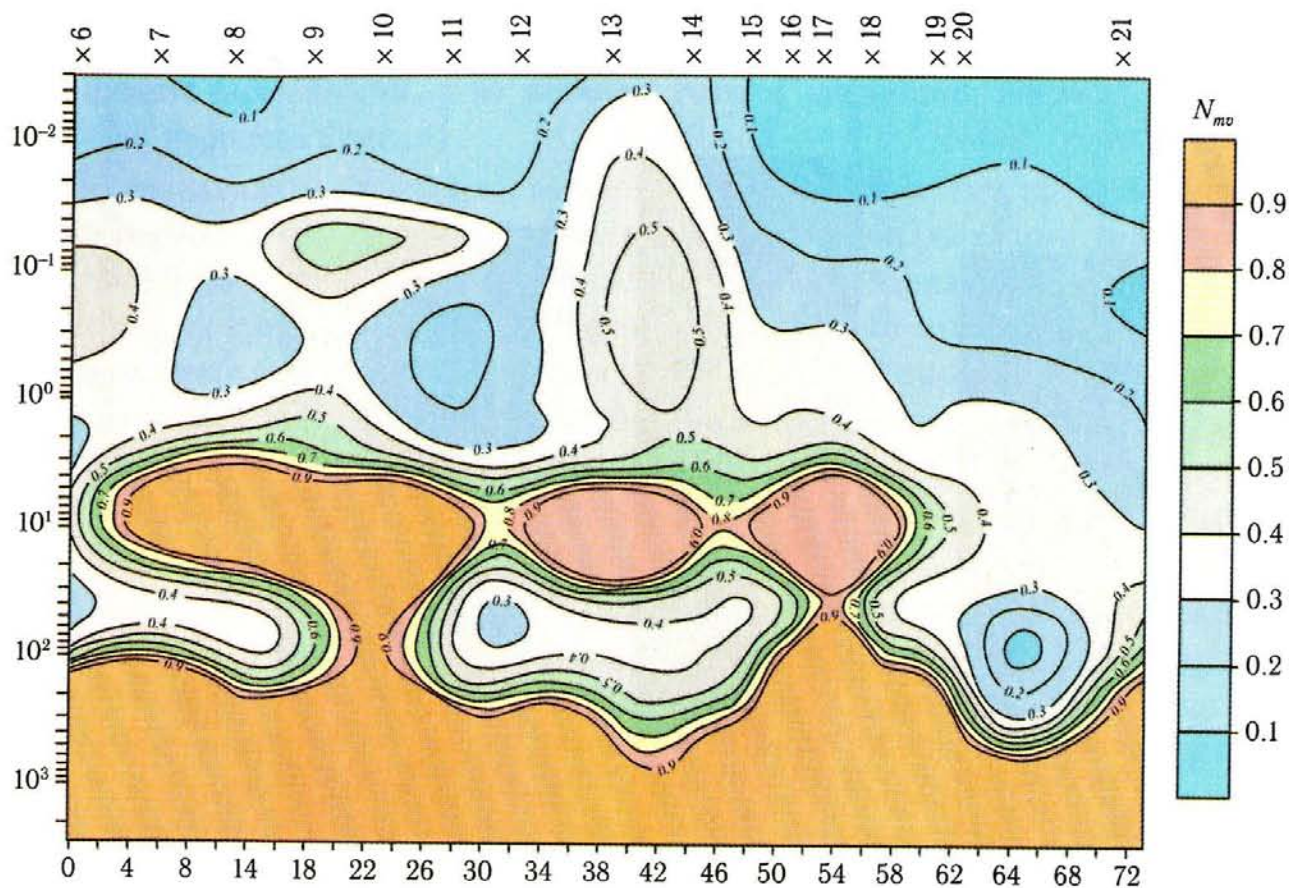


Рис. 6. Частотный разрез магнитовариационного параметра неоднородности

этому блоку соответствуют положительные аномалии Δg и ΔT , связанные с присутствием в верхней — средней коре высокоплотных магнитных пород. Тектонической границе, разделяющей Чуйскую впадину и Южно-Чуйский хребет, соответствует субвертикальная проводящая зона с сопротивлением менее 3 Ом·м и глубиной залегания около 5 км. Еще одна проводящая зона выделена в районе пунктов 20 и 21. Ее сопротивление составляет менее 3 Ом·м. Строение в северо-восточной части профиля нуждается в уточнении, так как расстояние между пунктами 21 и 23 превышает 10 км, выделение высокоомной аномалии на этом участке необходимо проверить дополнительным измерением. Присутствие в разрезе земной коры проводящих аномалий значительно затрудняет изучение глубинного разреза. Тем не менее в районах их отсутствия фрагментарно выделяется «нормальный» внутрикоровый проводящий слой, глубина залегания которого в пределах Южно-Чуйского хребта составляет 16–20 км, а в Чуйской впадине он поднимается до глубин 8–10 км.

На рис. 7 показано размещение профиля ЗС относительно пунктов МТЗ. Измерения ЗС проведены в 6 пунктах (ЗС 50–55), совмещенных с пунктами МТЗ. Для ЗС была выбрана установка с квадратными (соосными) конту-

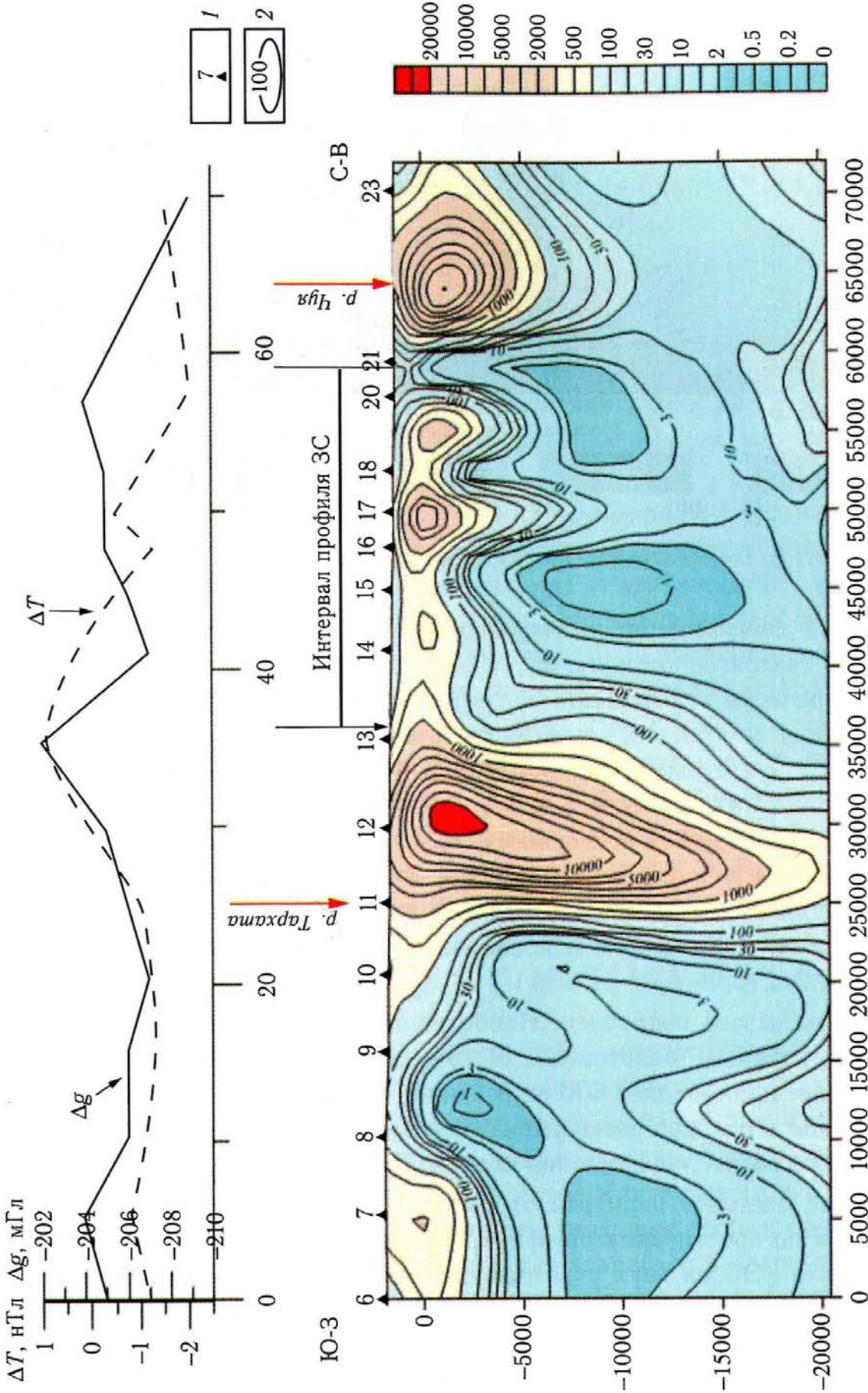


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по региональному профилю по данным МТЗ
 1 — пункты МТ-зондирований; 2 — изолинии удельного электрического сопротивления, Ом·м

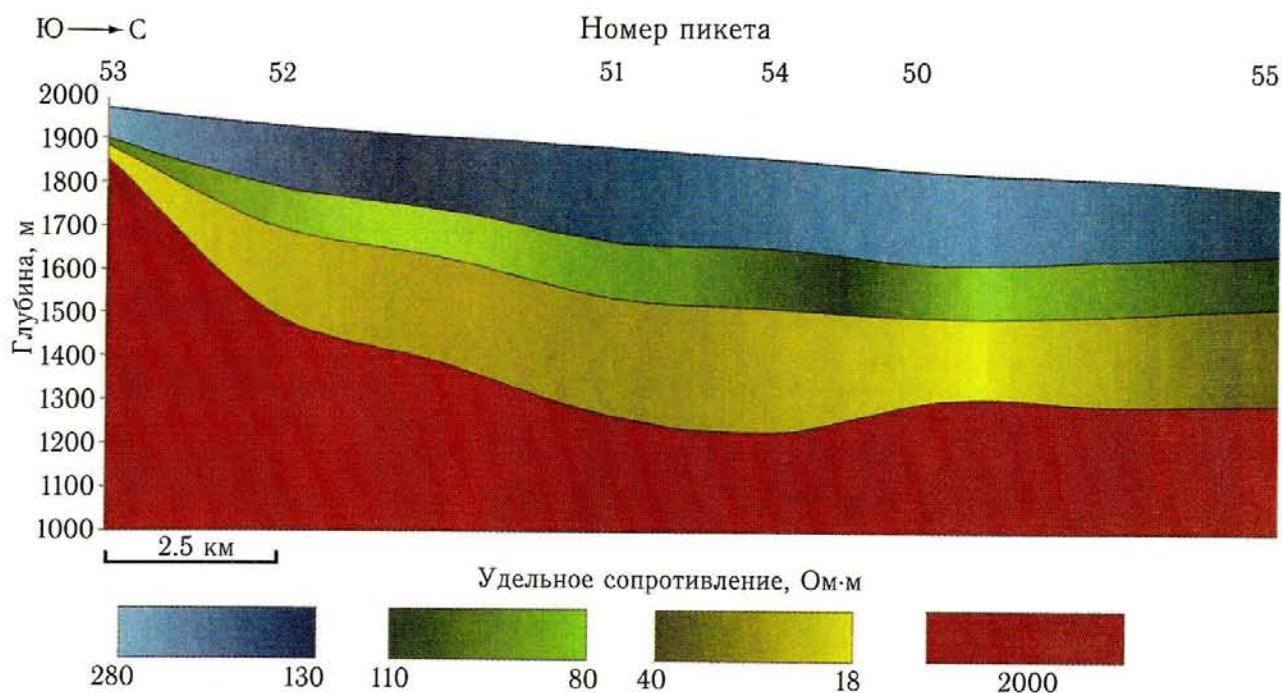


Рис. 8. Геоэлектрический разрез по профилю 9 (ЗС 50–55)

рами. Сторона генераторного контура составляла 500 м, измерительного — 200 м. Ток в генераторном контуре достигал 50 А. Для большей части этих измерений процессы становления превышали 100 мс. Эти данные были использованы для построения геоэлектрического разреза осадочного чехла и верхней части фундамента, представленного на рис. 8. Интерпретация данных выполнена в программном комплексе EMS. Начальная модель разреза согласована с априорными геологическими данными. Основная интерпретационная модель — четырехслойный разрез, типичный для осадочного чехла Чуйской впадины с высокоомной верхней частью, третьим, хорошо проводящим, слоем и непроводящим основанием. Кривые подобного разреза относятся к типу QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$).

Рассмотрим разрез подробнее. Наибольшая мощность осадочной толщи наблюдается в районе пикетов ЗС 51, 54, расположенных в центральной части профиля, и составляет 600 м. В южной части профиля (район пункта ЗС 53) мощность осадков резко уменьшается до 110 м. Пункт 53 находится вблизи южного горного обрамления впадины.

На разрезе цветовой палитрой отражено изменение УЭС основных осадочных слоев по простиранию профиля. Выделяются области с пониженными значениями УЭС на двух участках профиля. Первая наклонная область расположена в районе ЗС 52 и 53, максимальное понижение сопротивления наблюдается по данным ЗС 53. Вторая область находится между пунктами ЗС 50 и 55, ближе к пункту 50, здесь ощутимо понижено сопротивление

всех осадочных слоев разреза. Эти области по априорной информации соответствуют разломным нарушениям. Первая из них относится к тектонической границе южной части впадины с горным обрамлением (Южно-Чуйский хребет), вторая ограничивает северный, наиболее глубокий прогиб Чуйской депрессии.

Следует отметить хорошее согласование результатов ЗС и МТЗ, так как на региональном профиле МТЗ на этих же участках (см. рис. 7) прослеживаются глубинные разломы соответственно в пунктах МТЗ 13–14 (ЗС 52–53) и МТЗ 21 (ЗС 50–55).

Высокое качество современных измерений ЗС позволило получить наиболее точные геоэлектрические характеристики разреза осадочного чехла Чуйской депрессии на участках их выполнения. Далее все данные ЗС будут использованы для углубленной интерпретации данных метода МТЗ и построения ее комплексной модели.

Анализ результатов МТЗ, полученных по профилю I (размещение пунктов см. на рис. 1), пересекающему эпицентральному зону Чуйского землетрясения, показал, что тектоническая впадина и примыкающие к ней хребты характеризуются различным характером распределения глубинной электропроводности. На рис. 9 показан геоэлектрический разрез по профилю I в западном замыкании Чуйской впадины, пересекающем Южно-Чуйский хребет.

Сопrotивление верхней – средней коры Южно-Чуйского хребта составляет свыше 5000 Ом·м. Здесь на глубинах порядка 16–20 км выделяется внутрикоровый проводящий слой с сопротивлением менее 100 Ом·м. Непосредственно под Чуйской впадиной верхняя кромка проводящего слоя поднимается до глубин 8–10 км, а УЭС падает до значений 20–10 Ом·м. От горного хребта впадина отделяется зонами глубинных разломов, которые в магнитотеллурическом поле фиксируются проводящими зонами с явно выраженным наклоном боковых границ (МТЗ № 13, 14; МТЗ 22, 18–17). Сопrotивление в их пределах изменяется от 3 до 1 Ом·м.

Рассмотрим результаты, полученные по широтному профилю МТЗ, пройденному в 2011 г. (рис. 10). Они не только существенно дополнили полученную ранее информацию об аномальных особенностях корового проводящего слоя, но и выявили новые данные о строении верхней – средней коры Чуйской впадины. В юго-западной части профиля (п.п. 11–17) на глубинах 100–1200 м выделена проводящая неоднородность с сопротивлением 1–2 Ом·м. Эта неоднородность представляет интерес в плане рудной специализации Чуйской впадины, расположенной в пределах Курайской рудной зоны, включающей Акташское, Чаган-Узунское и Чуйское ртутные месторождения. Акташское месторождение осваивалось с 30-х годов прошлого

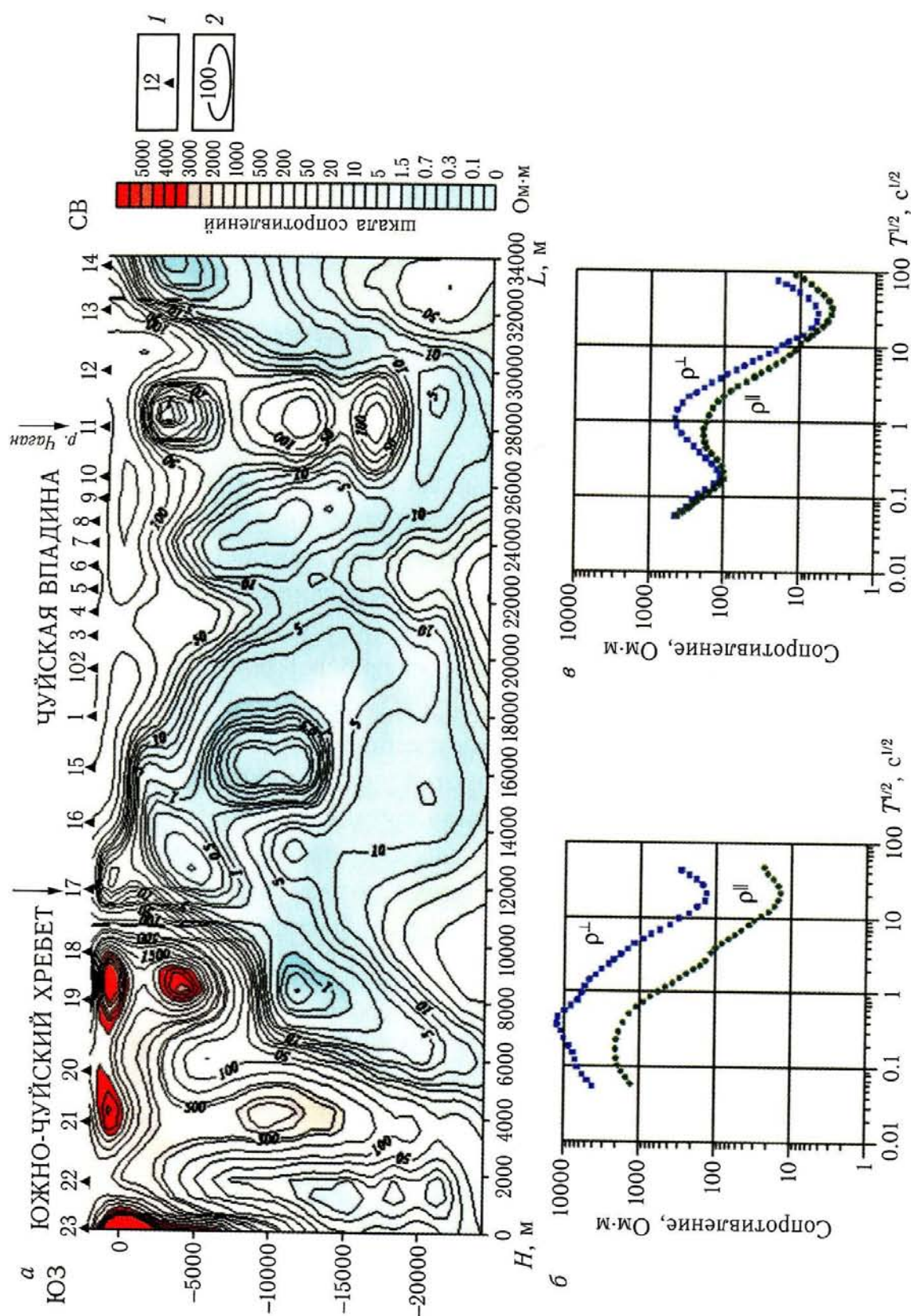


Рис. 9. *a* — геоэлектрический разрез через западное замыкание Чуйской впадины; *б* — средние продольные и поперечные кривые (слева над Южно-Чуйским хребтом, справа над Чуйской впадиной); *в* — кривые зондирований; 1 — пункты МТЗ, 2 — изолинии УЭС

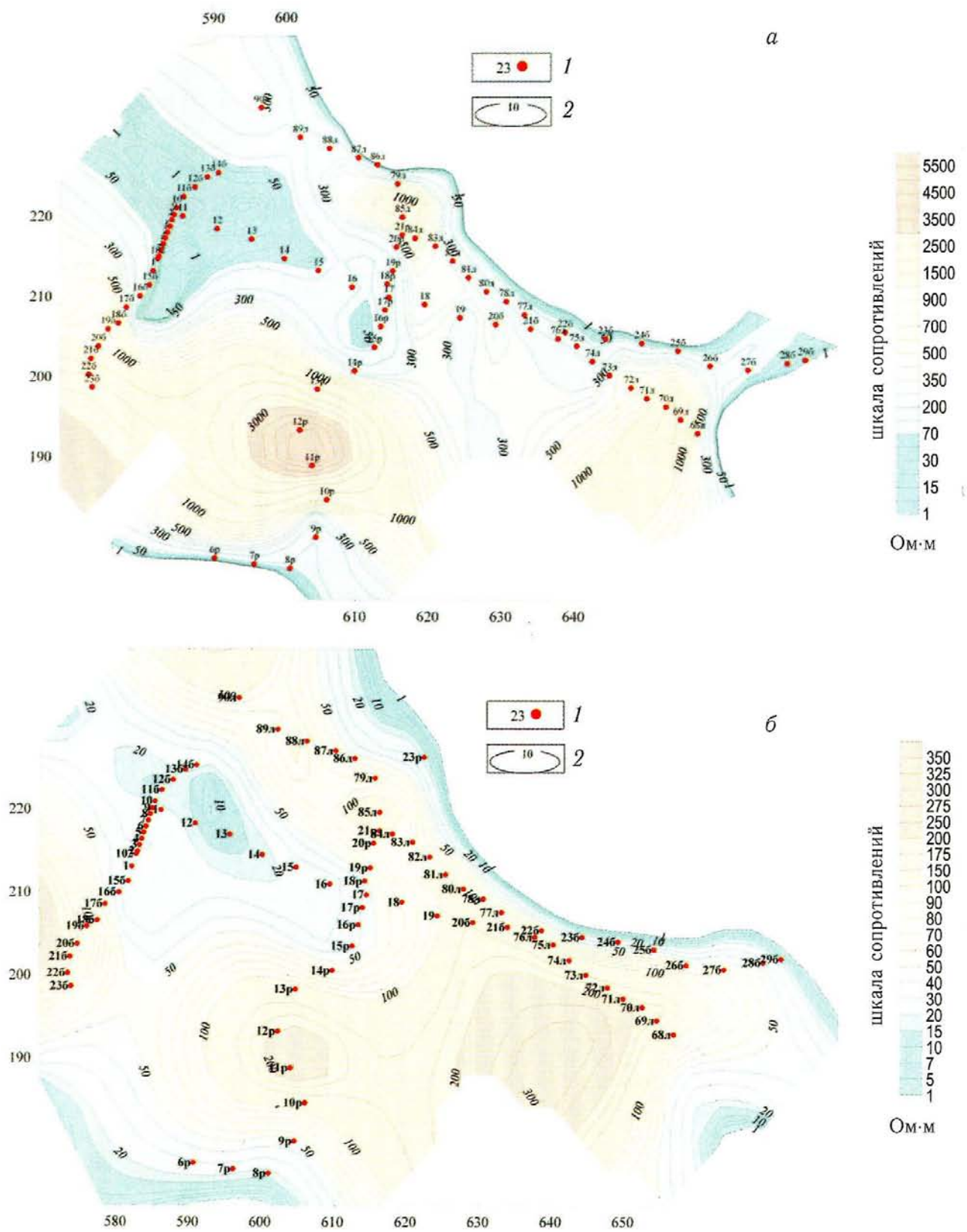


Рис. 11. Схема распределения УЭС на глубине 10 км (а) и на периоде 25 с (б)
1 — пункты МТЗ; 2 — изолинии УЭС, Ом·м

века и сейчас полностью отработано. В настоящее время на территории Республики Алтай единственное промышленное месторождение ртути — Чаган-Узунское, оно контролируется Чаган-Узунским разломом и относится к группе эпitherмальных, связанных с процессами мезозойской тектономагматической активизации.

Интерпретация площадных данных МТЗ

Рассмотрим весь имеющийся объем полевых материалов МТЗ для территории Чуйской впадины. Кроме данных, полученных сотрудниками лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН (более 56 физ. н.), анализируются полевые материалы КНИИГГиМСа и Научной станции РАН, переданные в ИНГГ СО РАН в рамках научного сотрудничества. Все материалы в количестве 120 физ. наблюдений обобщены и сведены в базу данных. Схема наблюдений МТЗ, выполненных разными организациями, представлена на рис. 1. На основании интерпретации этих материалов построены площадные схемы распределения УЭС на глубине 10 км и периоде 25 с, представленные на рис. 11.

Анализ кажущихся сопротивлений на фиксированных периодах по площади исследований проводится с целью выявления участков с аномальным распределением электропроводности. Наиболее целесообразно проводить изучение кажущихся сопротивлений на периодах, относящихся к максимумам кривых МТЗ, характеризующих слои повышенного сопротивления в земной коре. Для района исследований это период 25 с.

Распределение УЭС на глубине 10 км выбрано из-за того, что в этом интервале разреза располагаются все области повышенной электропроводности, вне зависимости от глубины залегания их верхних кромок.

Из рассмотрения представленных на рис. 11 материалов следует, что большая часть территории Чуйской впадины на глубине 10 км располагается в пределах области с низкими значениями удельного электрического сопротивления (менее 300 Ом·м). В западной части впадины, входящей в эпицентральную зону Чуйского землетрясения 2003 г., этим глубинам соответствует область еще более низкого сопротивления — до 50 Ом·м. Здесь же фиксируются аномальные участки с сопротивлением 1–5 Ом·м, характеризующие, скорее всего, зоны разломов различной ориентации.

Заключение

Исследования, выполненные комплексом электромагнитных методов МТЗ и ЗС, позволили не только значительно уточнить глубинную структуру Чуйской сейсмоактивной области, но и достаточно подробно исследовать строе-

ние осадочного заполнения и верхней части палеозойского фундамента Чуйской впадины.

По данным МТЗ впервые построены геоэлектрические модели, характеризующие глубинное строение района Чуйской впадины до глубин ~ 20 км. Основная характерная черта этих моделей — положение верхней границы проводящего корового слоя. В горном обрамлении впадины эта граница выделяется на глубинах около 16 км, непосредственно под впадиной она поднимается до 8–10 км.

По всему объему данных МТЗ построены площадные схемы распределения УЭС на различных глубинных срезах. Наиболее информативной оказалась приведенная в статье схема распределения УЭС на глубине 10 км, из которой следует, что большая часть территории Чуйской впадины располагается в области пониженных значений удельного сопротивления, которые в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения уменьшаются еще значительно.

Авторами развивается методика совместной интерпретации данных ЗС и МТЗ. Применение этой методики дает возможность выбрать неискаженную горизонтальными неоднородностями кривую МТЗ, что улучшает точность построения моделей и достоверность результатов метода с естественным источником. Дальнейшее развитие комплексной обработки позволит выяснить соотношение поверхностных и глубинных структур Горного Алтая, что крайне важно для понимания сценария происходящих геодинамических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 679 с.
- Ваньян Л.Л., Морозова Г.М., Зыкова Н.Ф., Неведрова Н.Н., Шпак И.П.* Применение глубинных электромагнитных зондирований для изучения строения земной коры Восточной Сибири // Геофизические методы в региональной геологии. Новосибирск: Наука, 1982. С. 141–147.
- Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Полянский О.П. и др.* Корреляция герцинских деформаций, осадконакопления и магматизма алтайской коллизионной системы как отражение плейт- и плюмтектоники // Проблемы тектоники Центральной Азии. М.: ГЕОС, 2005. С. 277–308.
- Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Шокальский С.П. и др.* Позднепалеозойский-раннемезозойский гранитоидный магматизм Алтая // Геология и геофизика. Т. 38, № 4. 1997. С. 715–730.
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А., Дучков А.Д.* Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 9. С. 1399–1416.

- Неведрова Н.Н., Поспеева Е.В.* Комплексная интерпретация данных электромагнитных зондирований с естественным и контролируемым источником в сейсмоактивных районах (на примере Горного Алтая) // Геофизический журнал. Киев, 2009. Т. 31, № 4. С. 142–157.
- Новиков И.С., Еманов А.А., Лескова Е.В., Баталев В.Ю.* Система новейших разрывных нарушений юго-восточного Алтая: данные об их морфологии и кинематике // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 11. С. 1139–1149.
- Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю.* Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: сб. науч. статей. Новосибирск, 2009. С. 108–113.
- Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н.* Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1990. 29 с.