

УДК 550.837

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РАЙОНАХ (НА ПРИМЕРЕ ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЫ ГОРНОГО АЛТАЯ)

© 2011 г. Н. Н. Неведрова, Е. В. Поспеева, А. М. Санчаа

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

Поступила в редакцию 12. 01. 2010 г.

В статье предложена методика совместной интерпретации данных МТЗ и ЗСБ. Продемонстрированы преимущества комплексной интерпретации на конкретных примерах. На основе выполненной интерпретации полевых данных построены геоэлектрические разрезы литосферы западной части Чуйской депрессии. Выявлен подъем кровли проводящего корового слоя в эпицентральной зоне, а также геоэлектрическая граница в верхней части палеозойского фундамента.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Горного Алтая Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН проводит комплексные геолого-геофизические исследования. Значительное расширение этих работ связано с разрушительным Чуйским землетрясением, которое произошло 27 сентября 2003 г. с магнитудой 7.3 по шкале Рихтера. Это событие является наиболее сильным за инструментальный период сейсмологических наблюдений. Очаговая зона располагается на территории Чуйской, Курайской впадин, Северо-Чуйского хребта. Основной разрыв землетрясения хорошо прослеживается в западной части Чуйской впадины в виде прерывистой полосы локальных трещин, оползней и смещений грунта. Для проведения полевых работ комплексом электромагнитных методов был выбран полигон, расположенный в западном замыкании Чуйской впадины. На полигоне была развернута сеть электромагнитных измерений с контролируемым и естественным источником (рис. 1).

Так как вплоть до последнего времени магнитотеллурических зондирований на территории Горного Алтая не проводилось, основной целью наших исследований является построение глубинного геоэлектрического разреза литосферы по данным МТЗ, а также уточнение строения осадочного чехла и верхней части палеозойского фундамента с использованием комплекса методов МТЗ и ЗСБ.

Вторая важная задача, которая здесь решается, актуальна для всех сейсмоактивных регионов, включая Горный Алтай: это изучение временной динамики геоэлектрических параметров геологического массива, подвергнутого сильному сейсмическому воздействию [Неведрова, 2007]. В поддержку современных работ существует значительный объ-

ем фондовых материалов по электротометрии (ВЭЗ, ЗСБ), полученных на территории Алтайских впадин во второй половине прошлого века, по которым определены геоэлектрические характеристики среды до разрушительного землетрясения.

Эффективность электромагнитного мониторинга геодинамических процессов, без сомнения, зависит от детальных исследований геоэлектрического строения, которым, в основном, и посвящена статья.

МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ РАБОТ

Электромагнитные зондирования с контролируемым источником (ЗСБ, ВЭЗ) выполнены в западной части Чуйской впадины по сети профилей (рис. 1). На рис. 1 показаны профили и пункты измерений всех электромагнитных методов. Для метода ЗСБ использована модификация зондирования с индукционным возбуждением поля и регистрацией производной по времени вертикальной компоненты магнитного поля ($\partial H_z / \partial t$) в конфигурации “соосные петли”. Отметим, что при индукционном возбуждении и приеме не сказывается влияние высокоомных экранов, слабо влияют локальные приповерхностные неоднородности. Эти факторы являются важным и при работе на территории межгорных тектонических впадин, где в верхней части разреза присутствуют островные мерзлотные породы и линзы грубообломочных отложений. Сторона генераторной петли равнялась 400 м с таким же шагом по профилю. Среднее расстояние между профилями ЗСБ составляло 2–4 км.

Ранее по результатам интерпретации было установлено, что электромагнитные методы с активным источником в геологических условиях Горного Ал-

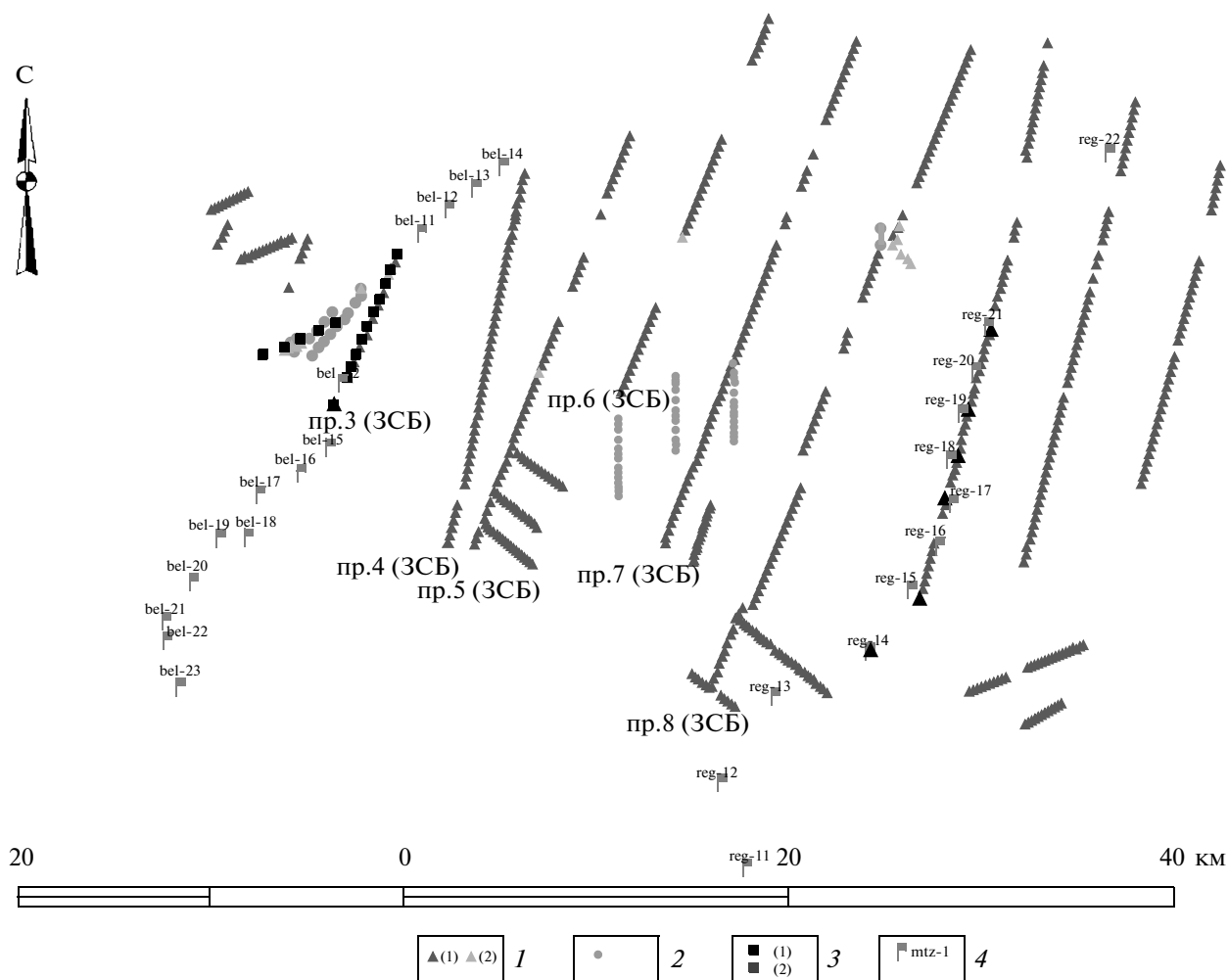


Рис. 1. Карта фактического материала. Профили и пункты электромагнитных наблюдений в западной части Чуйской впадины: 1 – пункты ЗСБ, архивные и современные; 2 – пункты ВЭЗ; 3 – пункты МТЗ 2007–2008 гг.; 4 – пункты МТЗ 2009 г.

тая позволяют получать информацию о разрезе до глубин 1–2 км. С целью увеличения глубинности и информативности геоэлектрических исследований эпицентральной зоны крупного землетрясения были выполнены среднемасштабные исследования методом МТЗ в диапазоне периодов 0.003–6000 с аппаратурой нового поколения MTU-System-2000 (“Phoenix Geophysics”, Канада), оснащенной программой обработки первичных данных (SSMT).

В западной части Чуйской впадины выполнен протяженный профиль МТЗ, который начинается в юго-западном горном обрамлении впадины – Южно-Чуйском хребте и заканчивается в ее северной части – в районе Чаган-Узунского горстового массива. Всего на профиле были проведены измерения в 23 пунктах с шагом в среднем 2 км. В зоне тектонических деформаций землетрясения шаг был более детальным – 1 км, на этом участке пункты МТЗ были совмещены с пунктами ЗСБ.

При регистрации магнитотеллурических вариаций применялись прямоугольные приемные установки, состоящие из заземленных приемных линий E_x , E_y и трех магнитных датчиков H_x , H_y и H_z . Длина приемных электрических линий составляла 100 метров. Это наиболее удобная длина, обеспечивающая в районе исследования оптимальное соотношение сигнал/помеха. Время регистрации – 19–22 часа.

ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МЕТОДОВ

Метод ЗСБ

На первом этапе обработки были рассмотрены полевые данные ЗСБ по профилям наблюдений. Был выполнен анализ всего объема полевого материала, отдельно анализировалась каждая кривая кажущегося удельного сопротивления. При этом оце-

нивалось качество измерений, возможные искажения экспериментальных данных, рассматривался характер изменения кривых по профилю, их корреляция между собой, выявлялись основные закономерности процесса становления на различных участках. Далее весь объем полевых данных ЗСБ обрабатывался в интерактивных компьютерных системах интерпретации и математического моделирования нестационарных электромагнитных полей. Были использованы две автоматизированные системы, разработанные в лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН, программные комплексы ЭРА и EMS [Эпов, 1990; Хабинов, 2009]. Программный комплекс ЭРА – универсальная диалоговая система для работы с данными электромагнитных зондирований становлением поля. Следует отметить, что интерпретационная система EMS является развитием и расширением программного комплекса ЭРА для современных компьютерных средств, в ней заложены значительные перспективы для использования новых модификаций ЗСБ, а также способов визуализации результатов. Обе системы позволяют выполнить обработку и интерпретацию полевых данных электромагнитных зондирований с активным источником с использованием моделей горизонтально-однородных сред.

Наиболее важным этапом при компьютерной обработке полевых данных ЗСБ является формирование базовой интерпретационной модели. Для этого привлекалась дополнительная априорная информация. Были проанализированы и обобщены данные по имеющимся скважинам. Осадочное заполнение впадины формировалось в одно геологическое время, поэтому, несмотря на то, что большая часть скважин находится в центральной части Чуйской впадины, эти же данные можно использовать при интерпретации полевых материалов для западной части депрессии. Средняя глубина бурения скважин относительно небольшая (200–300 м). Всего несколько скважин вскрыли палеозойский фундамент [Неведрова, 2001]. По разрезу этих скважин можно проследить, как меняется литологический состав пород при увеличении глубины. В верхней части разреза залегают наиболее грубообломочные гравийно-галечные породы, которые с глубиной отложения становятся более тонкозернистыми. В самой нижней части на породах фундамента обычно залегают тонкослоистые глины и мелкозернистые песчаники без примеси грубообломочного материала. По этим же скважинам можно оценить мощности всех имеющихся литологических комплексов и суммарную мощность осадочного заполнения, что позволяет при интерпретации однозначно определить электрические сопротивления выделенных слоев и, следовательно, решать сложные вопросы эквивалентности геоэлектрических моделей.

Было установлено, что наиболее низкие значения сопротивлений характерны для тонкослоистых образований: современных и палеоген-неогеновых

глин, алевролитов, аргиллитов. Значения удельного электрического сопротивления (УЭС) этих отложений изменяются от 5 до 50 Ом м. Среди палеоген-неогеновых пород повышенными значениями сопротивления (до 200–300 Ом м) обладают песчаники туерыкской свиты, мергели и бурые угли. Породы туерыкской и кошагачской свит обычно дифференцированы по сопротивлению. Осадочные отложения палеозоя и венда имеют значения сопротивления от 100 до 500 Ом м (за исключением известняков, у которых УЭС достигает 1000 Ом м и более). Магматические породы характеризуются сопротивлениями в интервале от 500 до 5000 Ом м.

На основе анализа априорных данных была сформирована основная интерпретационная модель – четырехслойный разрез с высокоомной верхней частью, третьим хорошо проводящим слоем и непроводящим основанием. Кривые подобного разреза относятся к типу QH ($\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$).

Для большей части полевых данных ЗСБ интерпретация была выполнена в классе горизонтально-слоистых моделей. Это связано, в первую очередь, с высокой локальностью выбранной для измерений установки [Рабинович, 1987; Методические рекомендации..., 1983]. Именно индукционные установки с соосными петлями наименее чувствительны к негоризонтальным границам. На погрешности измерений также слабо влияют наклоны генераторной и приемной петель, обусловленные рельефом дневной поверхности.

Влияние негоризонтальных границ и уступов в фундаменте проявляется в явном искажении отдельных участков некоторых кривых зондирований (в основном искажена их правая ветвь). Эти искажения ранее были подробно проанализированы [Кузнецов, 1982; Неведрова и др., 2006]. Если нет оснований учитывать явление вызванной поляризации, определение основных геоэлектрических параметров разреза целесообразно проводить по кривой, включая область минимума и отбросив большую часть правой ветви (в этом случае мы не сможем достоверно получить УЭС опорного горизонта).

В качестве примера интерпретации данных рассмотрим одну из полевых кривых ЗСБ профиля № 3 и соответствующую геоэлектрическую модель (рис. 2). Кривая ЗСБ 102 полностью соответствует описанному типу. Область минимума кривой свидетельствует о присутствии в разрезе проводящего слоя, залегающего на опорном электрическом горизонте. По результатам инверсии полевых данных получена четырехслойная модель, УЭС третьего, наиболее низкоомного слоя равно 31 Ом м, следовательно, эти отложения можно отнести к кошагачской свите. Выше по разрезу залегают слои с УЭС 196 Ом м, характеризующим туерыкскую свиту. Самый верхний горизонт наиболее высокоомный: УЭС составляет 1100 Ом м. Следует отметить, что

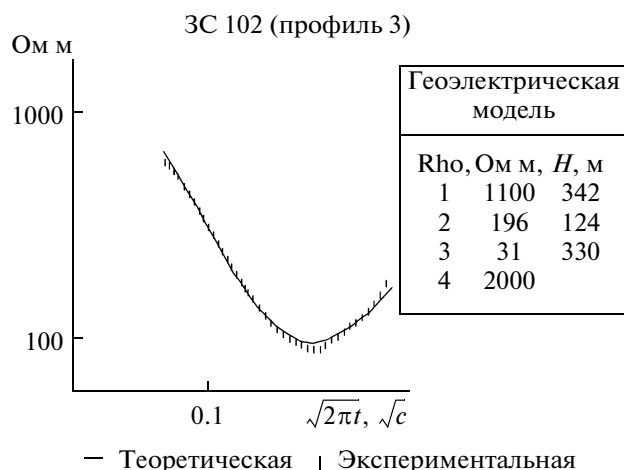


Рис. 2. Полевые данные, синтетическая кривая и геоэлектрическая модель ЗСБ 102 (профиль 3).

УЭС верхнего слоя изменяется на площади исследования в широких пределах, в основном в зависимости от содержания грубообломочных, многолетнемерзлых пород, степени обводнения. Наблюдается характерное искажение правой ветви кривой ЗСБ 102. Известно, что в слоисто-однородных средах с непроводящим основанием кривые кажущего-

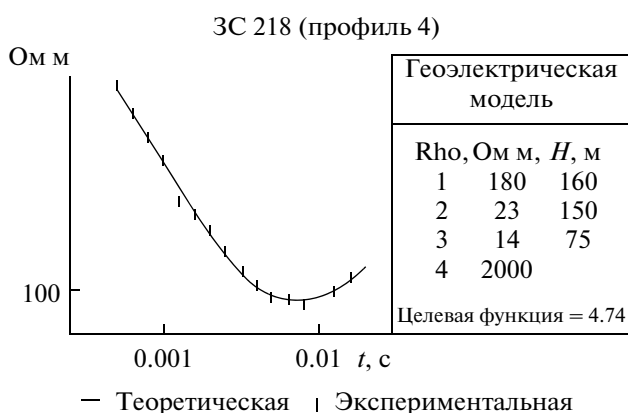
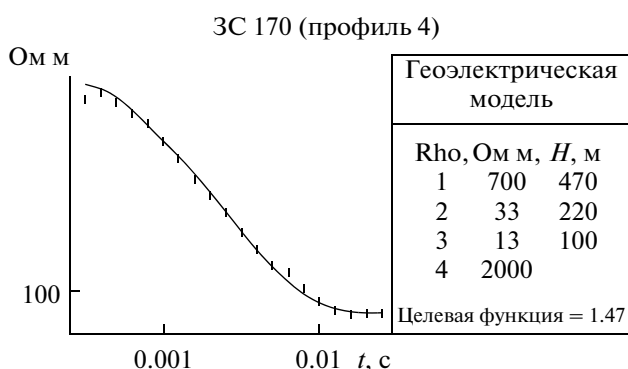


Рис. 3. Полевые данные, синтетические кривые и геоэлектрические модели ЗСБ 170 и 218 (профиль 4).

ся сопротивления в билогарифмическом масштабе с увеличением периодов приближаются к прямой, наклоненной под углом примерно 63° . На искаженных кривых этот угол, как правило, значительно больше. Поэтому при определении параметров разреза часть правой ветви кривой ЗСБ 102 не учитывалась и УЭС опорного горизонта определено условно.

Обратимся к рис. 3, на котором представлены полевые кривые ЗСБ профиля № 4. Этот профиль более протяженный по сравнению с третьим и отражает основные особенности тектонической впадины. На нем выделено несколько предполагаемых разломных структур. Геоэлектрические модели ЗСБ 170 и 218 также содержат четыре слоя, УЭС которых несколько отличаются от моделей для профиля № 3. Пункт ЗСБ 218 находится в русле реки Чаган-Узун. Отложения верхнего горизонта, скорее всего, обводнены и имеют УЭС менее 200 Ом м. По мере удаления от реки сопротивление этого слоя повышается и в пункте 170 составляет 700 Ом м. Отложения второго и третьего слоя также более проводящие, чем на профиле № 3. Это также определяется геологическими условиями; скорее всего, отложения, залегающие ближе к центру впадины, становятся более тонкослоистыми.

Так как методика обработки и интерпретации данных ЗСБ, полученных в тектонических впадинах, подробно изложена в нескольких работах [Неведрова, 2001; Неведрова и др., 2006], в этой статье мы рассмотрим более детально интерпретацию для метода МТЗ, который для среднемасштабных исследований на территории Горного Алтая используется впервые, а также комплексную интерпретацию двух электромагнитных методов.

Метод МТЗ

Начнем с этапа качественной интерпретации, на котором выбирается размерность геоэлектрической модели. Известно, что реальное распределение МТ-поля зависит от всех элементов зондируемой среды – как вертикальных, так и горизонтальных. Поэтому важным этапом интерпретации является анализ магнитотеллурических данных, позволяющий построить интерпретационную модель изучаемого района. При этом ведущую роль играют полярные диаграммы магнитотеллурического тензора \hat{Z} , представляющие зависимость МТ-функций отклика от их ориентации [Бердичевский, Логунович, 2005] и магнитотеллурические параметры – неоднородности N [Бердичевский и др., 1997], асимметрии (skew) [Swift, 1967] и фазочувствительный параметр асимметрии η [Bahr, 1988].

Анализ полярных диаграмм тензора импеданса, полученных в западной части Чуйской впадины показал, что в целом разрез имеет “квасидвумерную” структуру (рис. 4). Для двумерной модели, простирающейся которой совпадает с осью X :

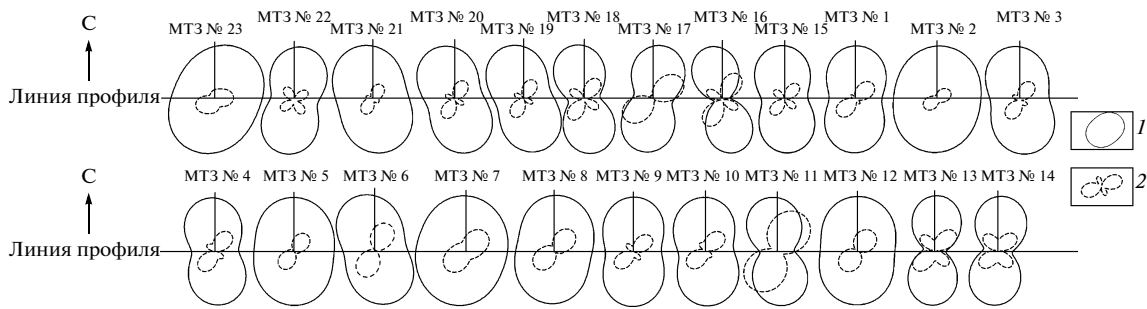


Рис. 4. Полярные диаграммы тензора импеданса \hat{Z} на периоде $T = 1$ с: 1 – полярная диаграмма $|Z_{xy}|$; 2 – полярная диаграмма $|Z_{xx}|$.

$$\hat{Z} = \begin{pmatrix} 0 & Z^{\parallel} \\ -Z^{\perp} & 0 \end{pmatrix},$$

где Z^{\parallel} и Z^{\perp} – продольный и поперечный импедансы – главные значения тензора импеданса.

Кривые кажущегося удельного сопротивления, рассчитанные по направлениям главных значений тензора импеданса, являются продольными (ρ^{\parallel}) и поперечными (ρ^{\perp}) к простиранию геологических структур. Правомерность выбора “квазидвумерной” модели подтверждается результатами анализа магнитотеллурических параметров N , skew и η (рис. 5), которые находятся по формулам:

$$N = \sqrt{1 - 4 \frac{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}{(Z_{xy} - Z_{yx})^2}},$$

$$\text{Skew} = \frac{Z_{xx} + Z_{xy}}{Z_{xy} - Z_{yx}},$$

$$\eta = \frac{\sqrt{0.5 |\text{Im}(Z_{xy}Z_{yy}^* + Z_{xx}Z_{yx}^*)|}}{|Z_{xy} - Z_{yx}|},$$

где * – означает комплексную сопряженность.

Известно, что для горизонтально-однородной модели выполняется условие:

$$N = \text{skew} = \eta.$$

Отклонение N от 0 является критерием горизонтальной неоднородности среды. В двумерной модели $N \neq 0$, а skew = $\eta = 0$. В 3-D модели все три параметра отличны от нуля. Из рис. 5 следует, что на высоких частотах ($T \ll 1$) параметр неоднородности N менее 0.2, что свидетельствует о возможности одномерных оценок сопротивления самой верхней части разреза. Начиная с периодов $T > 1$ с значение N увеличивается до 0.4–0.5, с понижением частоты ($T > 100$ с) оно увеличивается до 0.7. Высоким значениям N отвечают повышенные значения skew, которые изменяются на длинных периодах от 0.05–0.1, а на коротких периодах – до 0.6. С увеличением

частоты наблюдается увеличение значений фазочувствительного параметра асимметрии η , что согласно Бару [Bahr, 1988], свидетельствует об отсутствии локальных трехмерных неоднородностей в верхних горизонтах разреза. В двух областях отмечается уменьшение η до значений 0.08 в диапазоне периодов 1–160 с. Первая располагается в пределах точек МТЗ № 18–15 и соответствует зоне глубинного разлома, вторая – (МТЗ № 6–14), по-видимому, отражает разломные структуры самой впадины и ее границы с Чаган-Узунским блоком (рис. 5).

Таким образом, исследуемый разрез можно рассматривать как региональную двумерную структуру с локализованными трехмерными неоднородностями в средней-верхней коре. О двумерной структуре изученного разреза свидетельствуют и результаты сопоставления данных МТЗ и ЗСБ, представленные в следующем разделе.

В литературных источниках содержатся различные рекомендации и выводы по поводу того, какие из кривых МТЗ являются наиболее информативными при 1D-инверсии [Ковтун, 2004; Спичак, 1999; Современные методы..., 2009]. Результаты, представленные в этой статье, получены по продольным кривым. Основанием для их выбора послужил тот факт, что в районе исследования именно продольные кривые МТЗ согласуются с кривыми ЗСБ, после совмещения с которыми они были проинтерпретированы с использованием одномерных программ.

Выбор продольных (квазипродольных) кривых на площади исследований реализован в пакете программ “Line-Inter-MT”, в рамках которого выполнялась профильная обработка и интерпретация материалов МТЗ. На рис. 6 приведены типичные продольные кривые, полученные в западной части Чуйской впадины.

Основной задачей дальнейшей профильной обработки полученных результатов одномерной инверсии является введение поправок за S-эффект и подготовка данных для построения окончательных геоэлектрических разрезов.

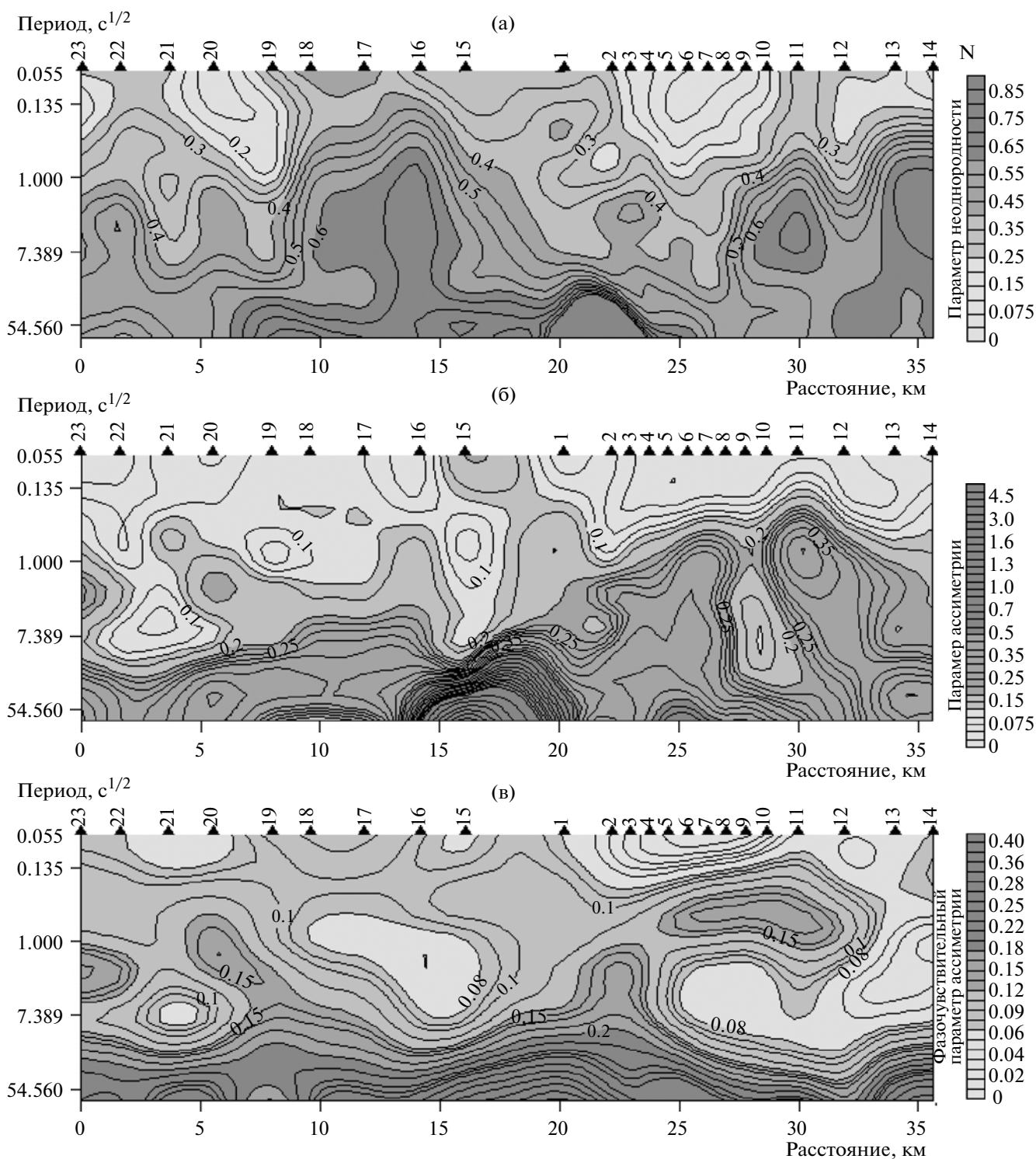


Рис. 5. Частотные разрезы магнитотеллурических параметров: (а) – параметр неоднородности N ; (б) – параметр асимметрии skew; (в) – фазочувствительный параметр асимметрии η .

Как известно, действие S -эффекта в общем случае при наличии неоднородностей на всех уровнях разреза нарастает с увеличением глубины проникновения МТ-поля вглубь Земли, так как при этом начинают оказывать влияние все новые и новые

геоэлектрические неоднородности, вовлеченные в охваченный объем.

В районе работ эта ситуация является типичной, т.е., с увеличением периода колебаний электромаг-

нитной волны расхождения кривых ρ_t увеличиваются.

В таких условиях для различных глубинных интервалов геоэлектрического разреза необходимо введение разных поправок, компенсирующих действие S -эффекта. Такая методика реализована в пакете программ "Line-Inter-MT". Ее суть заключается в расчете квазипродольной компоненты, избавленной от действия S -эффекта. При этом для определенной глубины проникновения МТ-поля вглубь Земли (т.е. с некоторыми допущениями – для величины импедансов на определенном периоде) при анализе материалов на профиле не могут иметь место градиенты импеданса более описываемых полиномом некоторой степени. В таком случае, если аппроксимировать массив значений импедансов, рассчитанных для профиля на определенном периоде (частоте), необходимым полиномом, то все отклонения от него следует признать геологическим шумом (в основном в виде S -эффекта) и ввести соответствующие поправки, приводящие значения измеренных импедансов к значению полинома. После этого необходимо внести коррективы в результаты одномерной инверсии. По сути, происходит фильтрация, выполняемая для разных глубин с различными параметрами (окнами) фильтра.

Работа с результатами одномерной инверсии в модуле профильной обработки пакета "Line-Inter-MT" проводится на модели, которая пересчитывается после введения поправок за S -эффект. При этом находясь на каждом пункте наблюдения можно оценить положение скорректированных теоретических и практических кривых относительно нормальной кривой Л.Л. Ваньяна и глобальной кривой МВЗ (рис. 7). Такая оценка служит хорошим критерием при работе с разрезом до глубин свыше 200 км, где основным объектом является кровля проводящего мантийного слоя.

Методика комплексной интерпретации данных электромагнитных зондирований (МТЗ и ЗСБ)

Многие вопросы влияния верхней части разреза, определение модели геоэлектрического разреза в окрестностях магнитотеллурических зондирований и степени влияния локализованных неоднородностей различной проводимости, расположенных в осадочном чехле, на часть зондирований, несущих глубинную информацию, невозможно без комплексирования МТЗ с другими видами электромагнитных зондирований.

Наиболее оптимальный вариант комплексирования – это зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и магнитотеллурические зондирования (МТЗ). Зондирования ЗСБ и МТЗ должны быть выполнены так, чтобы перекрывались интервалы, в пределах которых на зондирования влияют одни и те же параметры разреза.

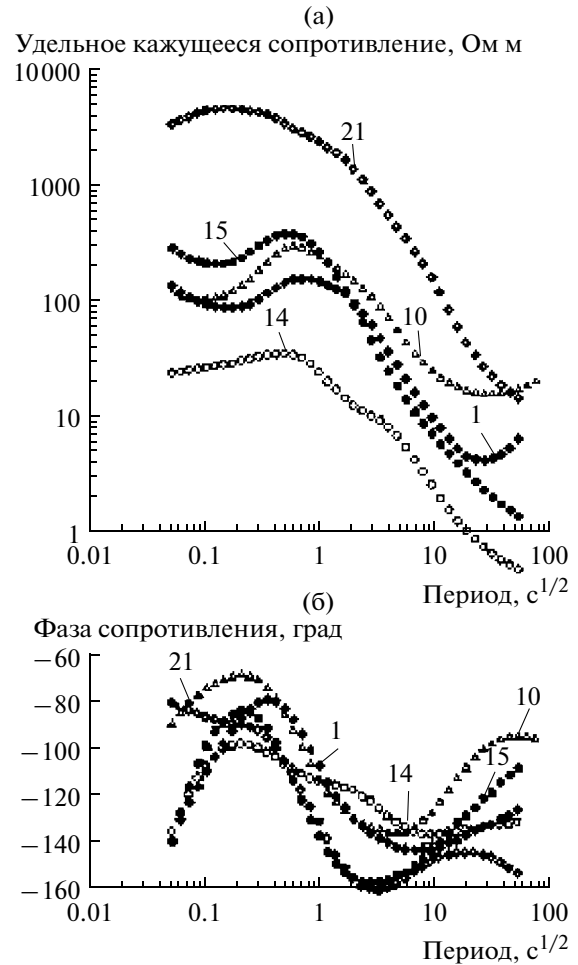


Рис. 6. Типичные продольные кривые МТЗ по профилю I-I: (а) – амплитудные; (б) – фазовые.

При комплексировании ЗСБ и МТЗ возникает проблема совмещения кривых различного вида электромагнитных зондирований. Наиболее подходящим способом является совмещение 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 ЗСБ определяется суммарная проводимость – S_2 ;

– из аналитического выражения $S = 452 \sqrt{\frac{2\pi t}{\rho}}$ на 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 $S = 356 \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ на том же сопротивлении определяется \sqrt{T} , которому соответствует значение S_2 , определенное по кривой

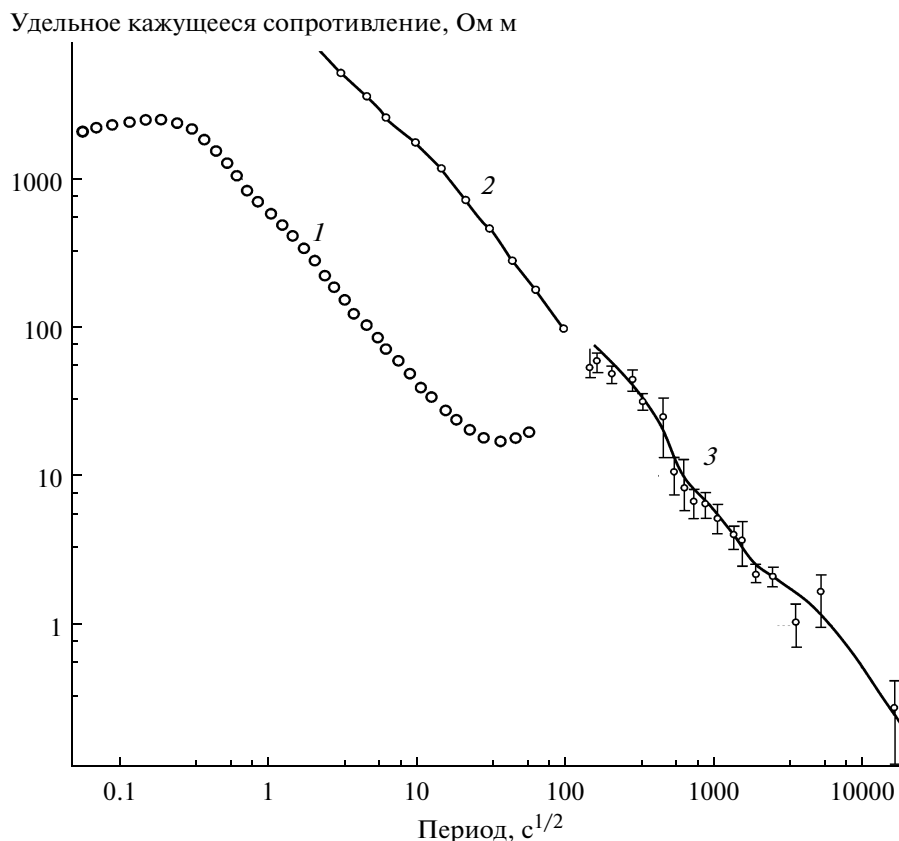


Рис. 7. Положение наблюдаемой кривой МТЗ относительно “нормальной” кривой Ваньяна и кривой глобального МВЗ: 1 - глобальная кривая Ваньяна; 2- МВЗ; 3 - экспериментальные данные.

ЗСБ. 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 достраивается по параметрам кривой ЗСБ в координатах ρ и \sqrt{T} и затем может быть интерпретирована как единая кривая МТЗ. В качестве примера на рис. 8 приведены совмещенные в одном пункте профиля № 3 кривые ЗСБ и МТЗ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ ЗСБ И МТЗ

Вначале рассмотрим результаты комплексной интерпретации данных ЗСБ и МТЗ, выполненной для профиля № 3 (ЗСБ), на котором практически все пункты были совмещены с пунктами МТЗ. Геоэлектрический разрез по этому профилю представлен на рис. 9. Отметим основные особенности полученного разреза. Наиболее проводящий слой, залегающий на палеозойских высокоомных отложениях, выдержан по значениям УЭС, которые в его центральной части находятся в узком интервале от 23 до 27 Ом м (ЗСБ 118–138). В северной части

профиля резко сокращается мощность этого слоя и повышается сопротивление (ЗСБ 138–170). Слой, отнесенный к туерьской свите, выдержан по мощности и сопротивлению. Самый верхний горизонт переменной мощности наиболее высокоомный, что связано с его литологическим составом – присутствием моренных грубообломочных пород.

Наиболее интересным результатом является то, что впервые в палеозойских отложениях на глубинах более 1000 м достаточно уверенно выделяется геоэлектрическая граница, которая показана на рис. 9 пунктирной линией. Следует отметить, что в северной части профиля эта граница была получена независимо по данным ЗСБ. Выявление этой границы свидетельствует о более сложной, чем считалось ранее, геологической истории формирования впадины в палеозойское время. В настоящее время имеются только предположения о том, с какими породами может быть связана смена электрических свойств пород на этой глубине в верхней части фундамента. Объяснение этого эффекта является предметом дальнейшего исследования.

Рассмотрим глубинное строение литосферы по данным МТЗ по профилю I–I, часть которого совпадает с профилем № 3 ЗСБ. В разрезе литосферы выделяются две области с различными геоэлектри-

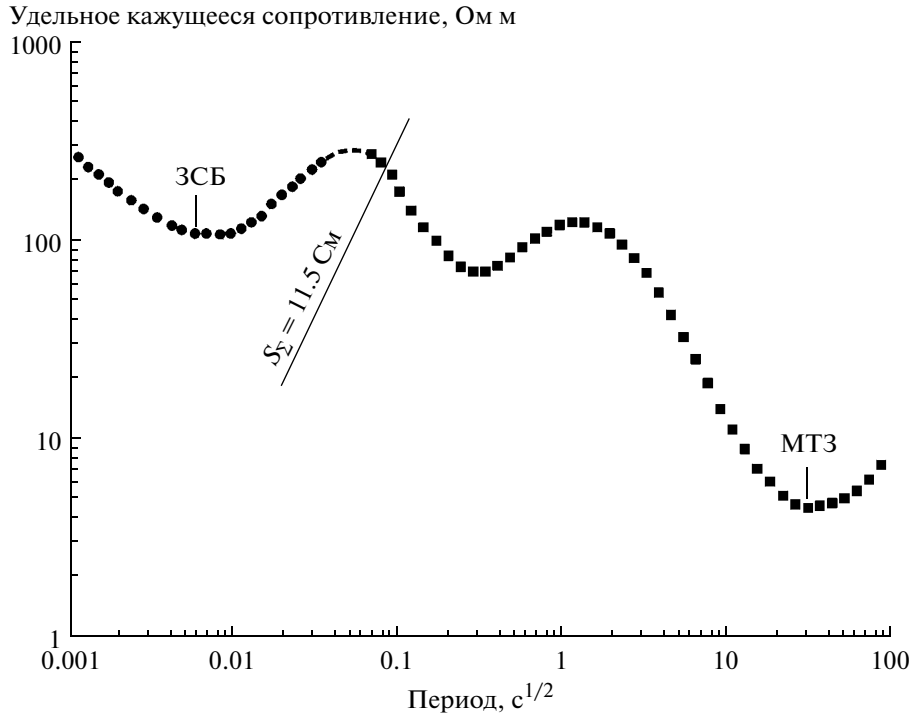


Рис. 8. Пример совмещения кривых ЗСБ и МТЗ в едином пункте зондирования.

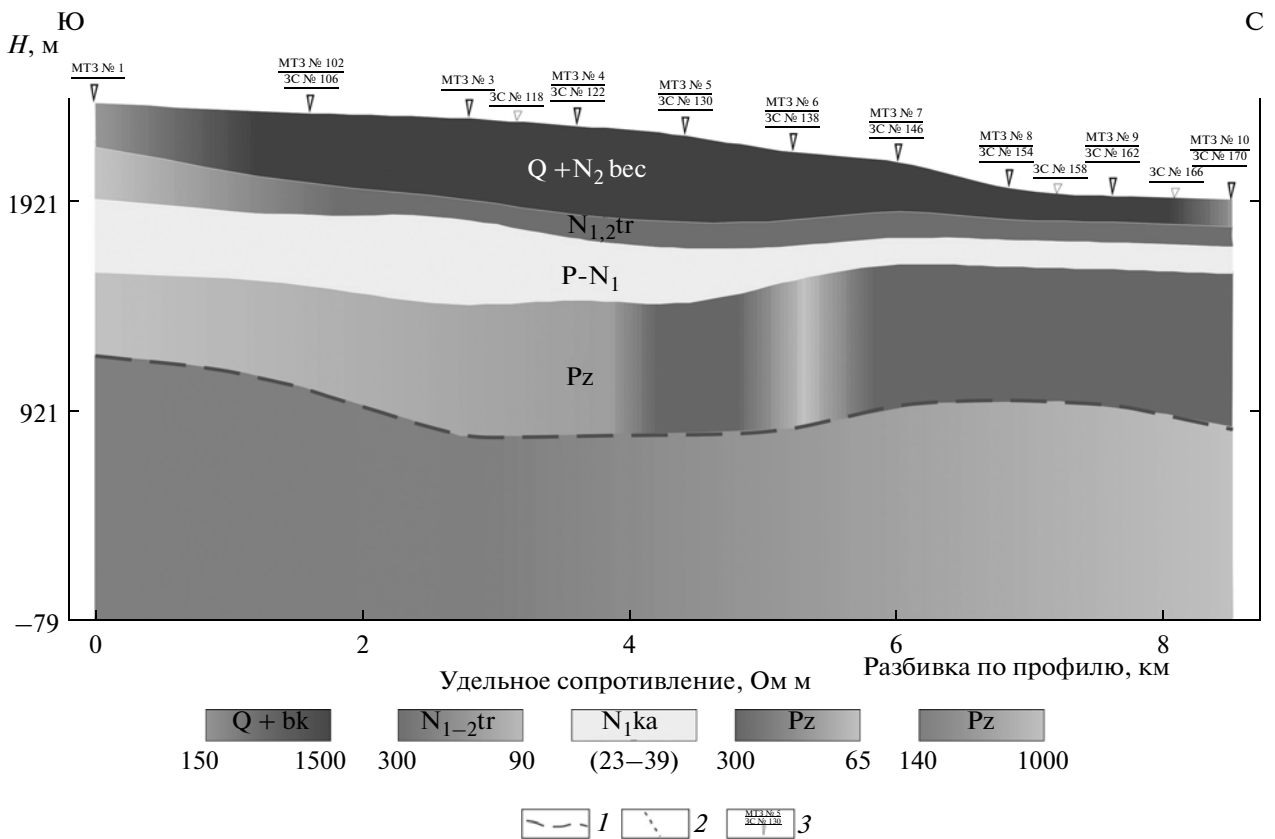


Рис. 9. Геоэлектрический разрез по профилю 3 по результатам комплексной интерпретации данных ЗСБ и МТЗ: 1 – геоэлектрическая граница в фундаменте; 2 – предполагаемые разломы; 3 – пункты ЗСБ и МТЗ.

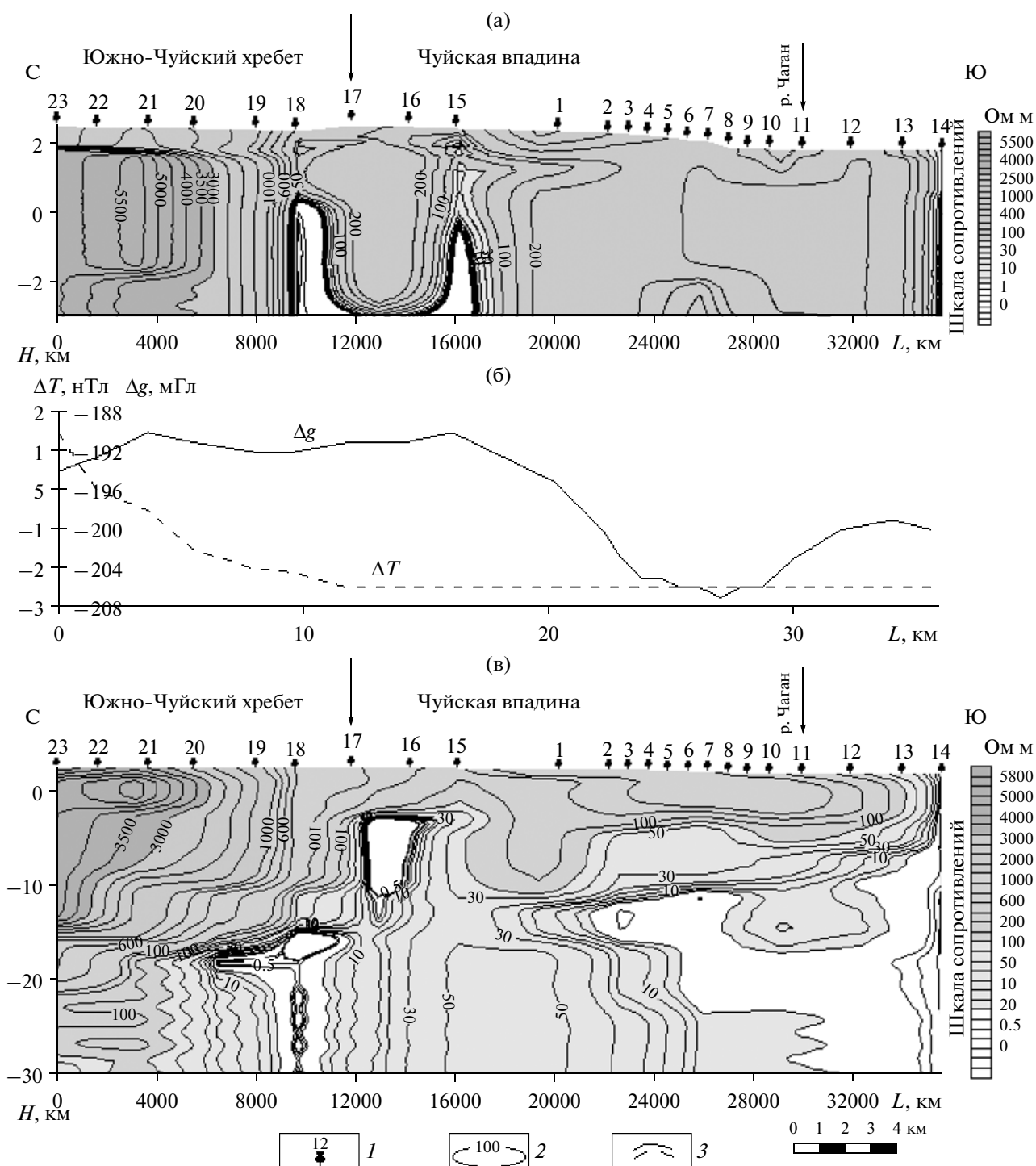


Рис. 10. Геоэлектрический разрез осадочного чехла по профилю I–I; (а) – верхняя часть геоэлектрического разреза; (б) – графики гравитационного и магнитного полей; (в) – глубинный геоэлектрический разрез по профилю I–I; 1 – пункты магнитотеллурических зондирований; 2 – изолинии удельного кажущегося сопротивления в Ом м; 3 – графики гравитационного и магнитного полей.

ческими характеристиками (рис. 10). Первая – юго-западная область (МТЗ №№ 23–17) – характеризует особенности земной коры Южно-Чуйского хребта, сложенного здесь дайковыми поясами щелочных базальтоидов и слюдяными лампрофирами

чуйского комплекса [Владимиров и др., 2005; 1997]. По данным магнитотеллурических зондирований сопротивление верхней-средней коры Южно-Чуйского хребта составляет более 5000 Ом м. Здесь же отмечается повышение значений гравитационного

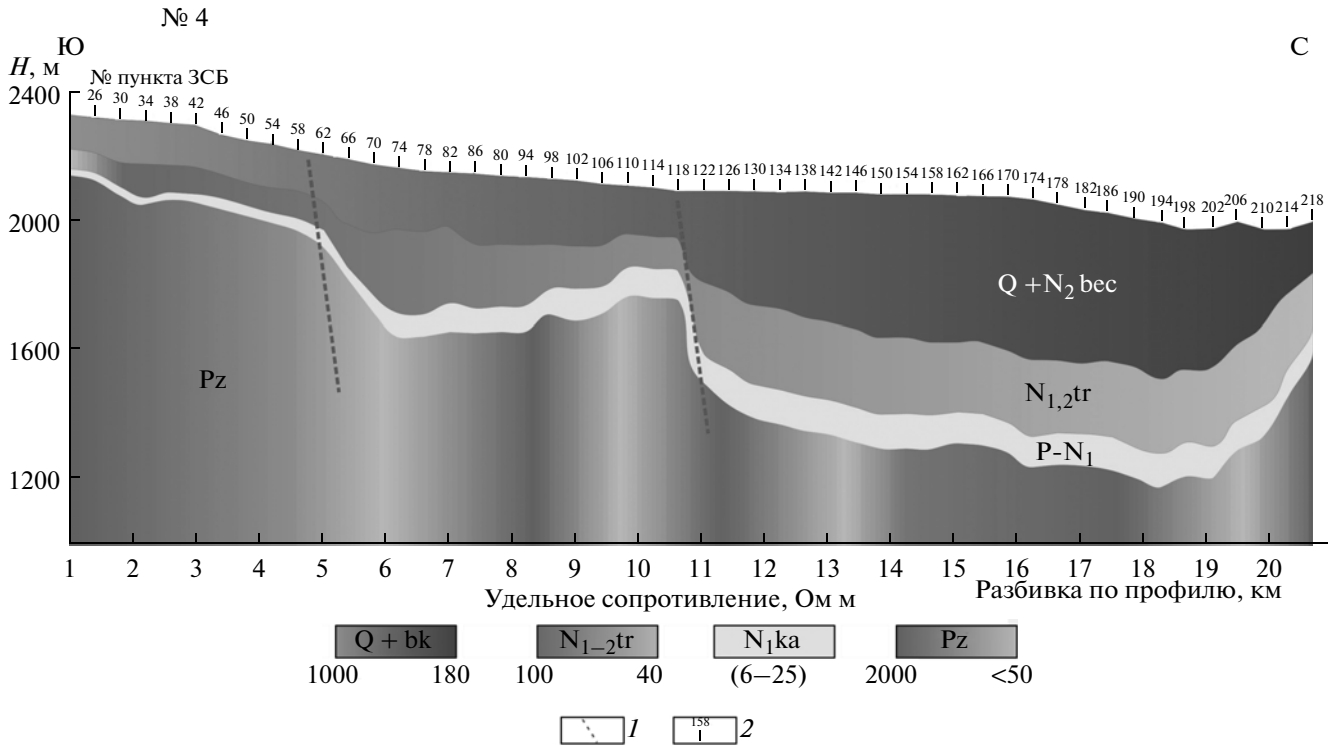


Рис. 11. Геоэлектрический разрез по профилю 4 по данным ЗСБ: 1 – предполагаемые разломы; 2 – пункты ЗСБ и МТЗ.

(Δg) и магнитного (ΔT) полей (рис. 10). В средней коре выделяется проводящий слой, с глубиной залегания верхней кромки 18–20 км и сопротивлением менее 100 Ом м. Эти параметры соответствуют “нормальному” геоэлектрическому разрезу тектонически активных областей. Вторая область располагается в центральной и северо-восточной части профиля и в плане соответствует Чуйской впадине. С юго-запада (МТЗ № 18, 17) Чуйская впадина ограничена наклонной проводящей зоной (с сопротивлением единицы Ом м), которая контролирует тектоническую границу складчатой системы Южно-Чуйского хребта. В пределах Чуйской впадины отмечается подъем корового проводящего слоя до глубин примерно 12 км, а в северной части профиля — до 8–10 км, сопротивление этого слоя уменьшается до величин 5–10 Ом м.

В заключение рассмотрим геоэлектрический разрез по профилю № 4 по данным ЗСБ (рис. 11). Профиль пересекает западную часть впадины практически с юга на север, начинается вблизи южного горного обрамления и на севере заканчивается возле Чаган-Узунского блока. На профиле выделено два предполагаемых разлома, которые фиксируются резкими уступами фундамента и достаточно четко прослеживаются выше в виде ступеней в осадочном чехле. Аналогичные разломы выделены и на соседнем профиле № 5. Разломы являются наиболее важными тектоническими элементами, опреде-

ляющими, в конечном счете, разломно-блоковое строение межгорных впадин.

Сопоставление глубинного строения литосферы с данными по гипоцентрам зарегистрированных землетрясений позволяет предположить, что приподнятая кровля внутрикорового проводящего слоя может отделять верхний жесткий блок от более пластичной флюидонасыщенной нижней части, на границе которых и происходит основной объем разгрузки накапливающихся напряжений.

Аналогичные результаты получены на участке регионального профиля Ташанта–Кош-Агач–Тээли, выполненного Красноярским научно-исследовательским институтом геологии и минерального сырья (ГПКК “КНИИГиМС”). Работы проведены по федеральной программе “Геофизические исследования сейсморазведочными и электроразведочными методами глубинного строения Алтае-Саянской складчатой области”. По результатам этих исследований также отмечается приподнятое положение корового слоя до 8–12 км в районах известных очаговых зон землетрясений (Алтайская и Шапшальская). Наиболее значительно параметры “корового проводящего слоя” изменены в пределах Алтайской очаговой зоны землетрясений. Наблюдается понижение удельного продольного сопротивления этого слоя до величин 10–20 Ом м, а кровля поднимается на минимальные в этом районе отметки — 8 км.

Временные изменения флюидной системы и геофизических неоднородностей консолидированной коры находятся в зависимости от геодинамической обстановки и, следовательно, термодинамических условий. Вариации удельного сопротивления корового проводящего слоя до и после серии землетрясений слабых и умеренной силы, были зарегистрированы в течение нескольких месяцев на Бишкекском полигоне, что интерпретировалось как изменение флюидонасыщенности проводящего слоя [Кисин, 2001].

Изменение параметров корового проводящего слоя в сейсмоактивных регионах отмечается во многих регионах нашей страны и за ее пределами. Так, например, в Венгрии в пределах Задунайской сейсмоактивной области он поднимается до отметок 5.5–7 км. К этой области приурочены наиболее интенсивные землетрясения. Интересные данные получены на Краснослободском геодинамическом полигоне, расположенном в зоне восточного краевого глубинного разлома Центрально-Белорусской шовной зоны, которая является зоной стыка Фенноскандинавского и Сарматского геосегментов. Здесь по данным магнитотеллурических зондирований кровля электропроводящего слоя находится на глубине 10 км в центральной части и 18 км — на периферии с одновременным увеличением проводимости от 50 до 200 См.

Таким образом, изменение геоэлектрических параметров (глубины залегания и сопротивления) корового проводящего слоя может стать одним из критериев оценки глубинной природы сейсмичности по электроразведочным данным.

Результаты детальных комплексных электромагнитных исследований позволили продвинуться в понимании особенностей геоэлектрического строения осадочного чехла и земной коры сложного тектонического участка в эпицентральной области Чуйского землетрясения. Получены новые данные о глубинном геоэлектрическом строении земной коры, построен детальный разрез осадочного чехла западной части Чуйской впадины.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Комплексирование методов ЗСБ и МТЗ позволяет выбрать для количественной интерпретации одну из кривых МТЗ (поперечную либо продольную), которая наименее осложнена влиянием верхней части разреза.
2. Совпадение параметров ЗСБ и одной из кривых МТЗ может служить одним из критериев выбора глубинной модели геоэлектрического разреза.
3. Использование комплексного подхода к обработке полевых данных повышает достоверность полученных геоэлектрических разрезов.
4. Показаны основные преимущества каждого метода. Данные ЗСБ более детально отражают

верхнюю часть разреза до 1.5–2 км, а МТЗ позволяют получить информацию о глубинном строении литосферы.

5. По данным МТЗ получены глубины до кровли внутрикорового проводящего слоя и установлено поднятие его кровли до глубин 8–10 км в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения.

6. Выявление геоэлектрической границы в верхней части фундамента западной части Чуйской впадины по данным ЗСБ и МТЗ свидетельствует о более сложном строении и геологической истории Чуйской впадины Горного Алтая, чем считалось ранее.

Исследования поддержаны государственным контрактом П 792 по ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России за 2009–2013 гг.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастуцан В.В.* Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог МГУ. 1997. 161 с.
- Бердичевский М.Н., Логунович Р.Ф.* Магнитотеллурические полярные диаграммы // *Физика Земли*. 2005. № 10. С. 66–78.
- Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарев П.Ю., Романюк Т.В.* Геоэлектрическая модель каскадной субдукционной зоны // *Физика Земли*. 2002. № 10. С. 23–53.
- 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. и др.* Позднепалеозойский–раннемезозойский гранитоидный магматизм Алтая // *Геология и геофизика*. 1997. Т. 38. № 4. С. 715–730.
- Кисин И.Г.* Флюидная система и геофизические неоднородности консолидированной земной коры континентов // *Вестник ОГГН РАН*. 2001. № 2 (17). С. 1–19.
- Ковтун А.А., Вагин С.А. и др.* Особенности строения Карельского региона по данным геоэлектрических исследований. Глубинное строение и сейсмичность Карельского региона и его обрамления. Петрозаводск. 2004.
- Кузнецов А.Н.* Искажающие эффекты при электромагнитном зондировании горизонтально-неоднородных сред с искусственным источником поля // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1982. № 2. С. 67–78.
- Методические рекомендации по анализу зондирований становлением поля в ближней зоне в горизонтально-неоднородных средах / Под ред. Рабиновича Б.И., Финогеева В.В. Новосибирск: Наука. 1983. 46 с.
- Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Дашевский Ю.А.* Геоэлектрические исследования в районе Горного Алтая в связи с Чуйским землетрясением 2003 г. *Вестник Национального Ядерного Центра Республики Казахстан*. 2006. Вып. 2. С. 161–166.
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А.* Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зон-

- дирований // Геология и геофизика. 2001. Т. 41. № 9. С. 1399–1416.
- Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю.* Электромагнитные методы для исследования строения и геодинамики Чуйской впадины Горного Алтая. Сборник статей “Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия”. Горно-Алтайск: изд-во Горно-Алтайского государственного университета. 2004. С. 37–47.
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю.* Способ учета характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах // Геофизический вестник. 2006. № 6. С. 8–14.
- Рабинович Б.И.* Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне. Иркутск: изд-во Иркутского политехнического института. 1987. 52 с.
- Современные методы измерения, обработки и интерпретации электромагнитных данных / Под ред. Спичака В.В. 2009. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”. 304 с.
- Спичак В.В.* Магнитотеллурические поля в трехмерных моделях геоэлектрики. М.: Научный мир. 1999. 204 с.
- Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю.* Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS. ГЕО-Сибирь-2009. 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.
- Bahr K.* Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion // J. Geophysics. 1988. P. 119–127.
- Swift C.M.* A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Dissertation MIT. 1967. Cambridge.