

## ГЛУБИННАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИМОРЬЯ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК)

*В.М. Никифоров, И.В. Дмитриев, С.С. Старжинский*

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток*

Обсуждаются результаты магнитотеллурических зондирований, выполненных на территории Приморья. Показано, что глубинная геоэлектрическая структура образуется как субгоризонтальными, так и крутопадающими границами разделов. Последние тракуются как глубинные разломы. В зонах сочленения кулисообразно расположенных разломов могут развиваться дуплексы, которые, вследствие заполнения трещин глубинными флюидами, приобретают анизотропную электрическую проводимость. С такими коровыми комплексами пород пространственно и, вероятно, генетически связаны очаги коровых землетрясений.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, анизотропия сопротивления, глубинные разломы, дуплексы, сейсмическая активность, Приморье.

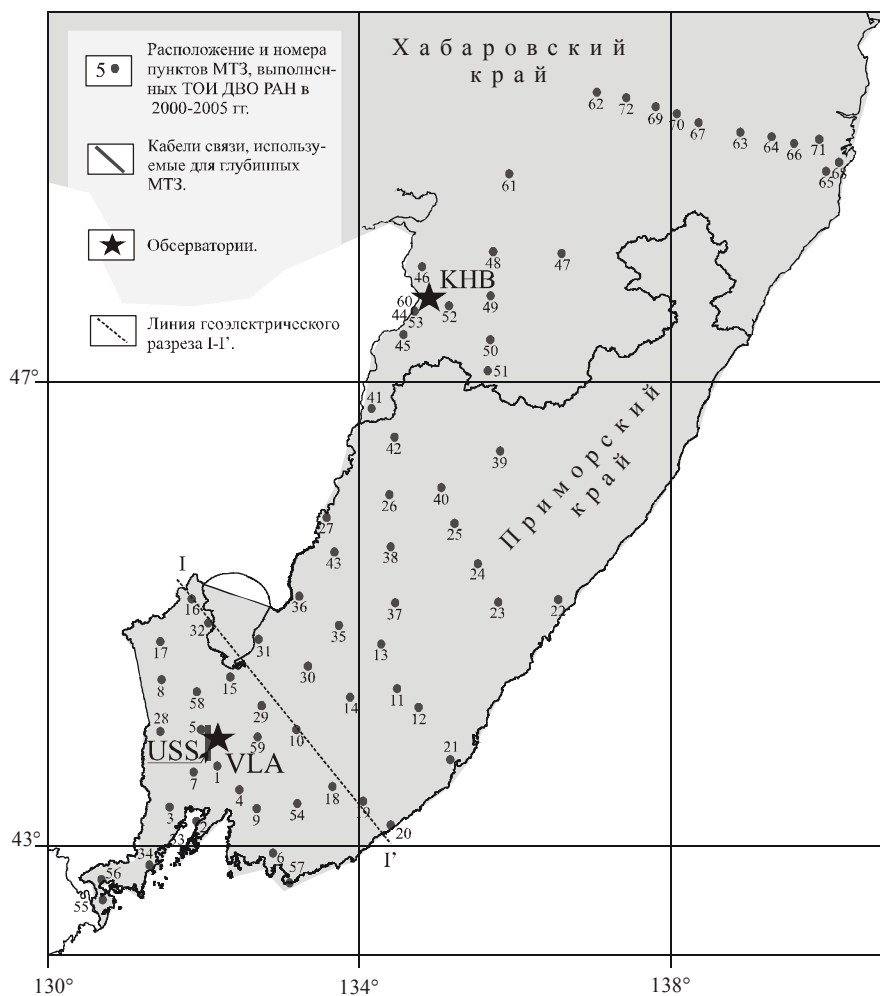
### ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные методы (ЭМ) зондирования в настоящее время широко применяются для изучения глубинного строения сейсмоактивных районов [1, 3]. Высокая разрешающая способность ЭМ по выделению и трассированию электропроводящих крутопадающих плоскостей, аппроксимирующих флюидонасыщенные глубинные разломы, была теоретически обоснована и изучена методами численного математического моделирования [2]. Это обоснование послужило стимулом для более детального исследования разломов, выделяемых по данным редкой сети МТЗ во многих районах России. На Сахалине и в Приморье [9, 11, 12] в процессе детализации МТЗ установлено, что аномальное поведение кажущегося сопротивления отражает более сложную геоэлектрическую структуру разломов, чем это принималось в моделях. Одним из важнейших свойств геоэлектрического строения приразломной зоны является анизотропия электропроводности. Последняя возникает вследствие эшелонированного развития систем разрывов по трещинам сжатия и растяжения, рассекающих, в том числе, глубинные интервалы, в которых протекание реакций гидратации и дегидратации определяется петрологическими, литологическими и термобарическими условиями среды. Вопросам геоэлектрической природы таких зон, их геологической интерпретации, выявлению связей с сейсмичностью посвящена настоящая работа.

### МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы положены результаты магнитотеллурических исследований, проведенных в центральной и южной частях Сихоте-Алиня в период с 2001 по 2005 гг. Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева ДВО РАН. В принятой нами методике МТЗ теллурическое и магнитное поля регистрировались отдельно. Теллурическое поле регистрировалось непрерывно, в каждом полевом пункте наблюдения в течение двух – трех суток, с шагом дискретизации 1 с (в отдельных случаях – 0.1 с). В качестве датчиков теллурического поля использованы диполи длиной 1–1.5 км, проложенные в направлении север–юг (ось X) и запад–восток (ось Y). Вариации геомагнитного поля регистрировались на обсерватории VLA (с. Горнотаёжное) и КНВ (с. Забайкальское). На обсерваториях были установлены магнитостатические датчики  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  компонент геомагнитного поля, обеспечивающие чувствительность 0.01 нТл. Регистрация выполнялась на цифровой носитель в режиме мониторинга с шагом дискретизации 1с. Синхронизация теллурических и магнитных записей осуществлялась с применением кварцевых часов и GPS приёмников. Ошибка синхронизации составляла от десятых долей до первых секунд.

Преобразование электрических сигналов, поступающих с датчиков поля, к цифровому виду производилось при помощи 24-битного аналогово-циф-



**Рис. 1.** Схема изученности территории электромагнитными методами зондирования.

VLA – обсерватория “Владивосток”;  
 КНВ – обсерватория “Хабаровск”;  
 USS – участок кабеля “РОС-ТЕЛЕКОМ”.

рового преобразователя Е-24. Это устройство позволило при всех уровнях электрических и магнитных возмущений работать без компенсации постоянной составляющей поля на чувствительности не менее 5 мкВ.

В 2004 году организован опорный пункт наблюдений МТЗ в г. Уссурийске, где в качестве приемного электрического диполя использован фрагмент телекоммуникационного кабеля связи «Ростелеком» длиной 26 км. Время регистрации вариаций магнитотеллурического поля, продолжительностью около 1 года, позволило получить опорную кривую МТЗ в диапазоне периодов до  $3 \cdot 10^5$  с.

Схема расположения пунктов МТЗ показана на рис. 1. В каждом пункте наблюдений получены кривые кажущегося сопротивления:  $\rho_{xy}$  – для меридионального направления,  $\rho_{yx}$  – для широтного направления. Обработка полевых наблюдений осуществлялась на основе блока программ, разработанных Дмитриевым И.В. и обеспечивающих надежные построения кривых кажущегося сопротивления в диапазоне периодов от 10 до 5000 с.

## ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ

Известно, что кажущееся сопротивление по направлению простирания и вкrest геоэлектрических сооружений наиболее отчетливо отражает их электропроводящую структуру [7]. Поскольку заранее не всегда удаётся выбрать оптимальное направление ориентировки измерительной системы, то обычно прибегают к процедуре пересчета кривых кажущегося сопротивления из направлений регистрации в так называемые “главные направления”. Два обстоятельства препятствуют использованию такой процедуры:

1. Район исследований находится в области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского складчатых поясов [5], где возможно не одно, а несколько “главных” направлений простирания геоэлектрических сооружений, наложенных друг на друга.

2. Как показали экспериментальные работы, заключавшиеся в регистрации и обработке теллурического поля в направлениях север–юг, запад–восток, а также в промежуточных азимутах юго-восток–северо-запад и юго-запад–северо-восток, пересчеты

кажущегося сопротивления из-за сильного влияния приповерхностных неоднородностей осуществляются с большими погрешностями.

Следовательно, пересчет кривых МТЗ в главные направления представляется нецелесообразным. Как будет показано далее, районирование кривых МТЗ, полученных в направлениях регистрации, позволяет выделять протяженные геоэлектрические структуры и отождествлять их с геологическими образованиями.

Совокупность кривых  $\rho_{xy}$  можно разделить на четыре семейства, внутри которых четко сохраняется конформность (рис. 2). Для семейства 1а и 1б определяющим признаком является нисходящий характер в длиннопериодных частях и различие, связанное с особенностями в верхней части разреза. Кривые  $\rho_{xy}$ , принадлежащие к одному семейству, регистрируются на территории обширных районов (рис. 3а). Совокупность широтных кривых  $\rho_{yx}$  (рис. 2) разделяется на два семейства. К первому (I), отнесены кривые, на которых в длиннопериодных частях ярко выражены нисходящие ветви. Они аналогичны меридиональным кривым 1а, 1б. Кривые  $\rho_{yx}$ , отличающиеся слабым наклоном, отнесены к семейству II. Семейства I и II фиксируются в обособленных, сравнительно широких зонах, простирающихся в субширотном направлении (рис. 3б).

### ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

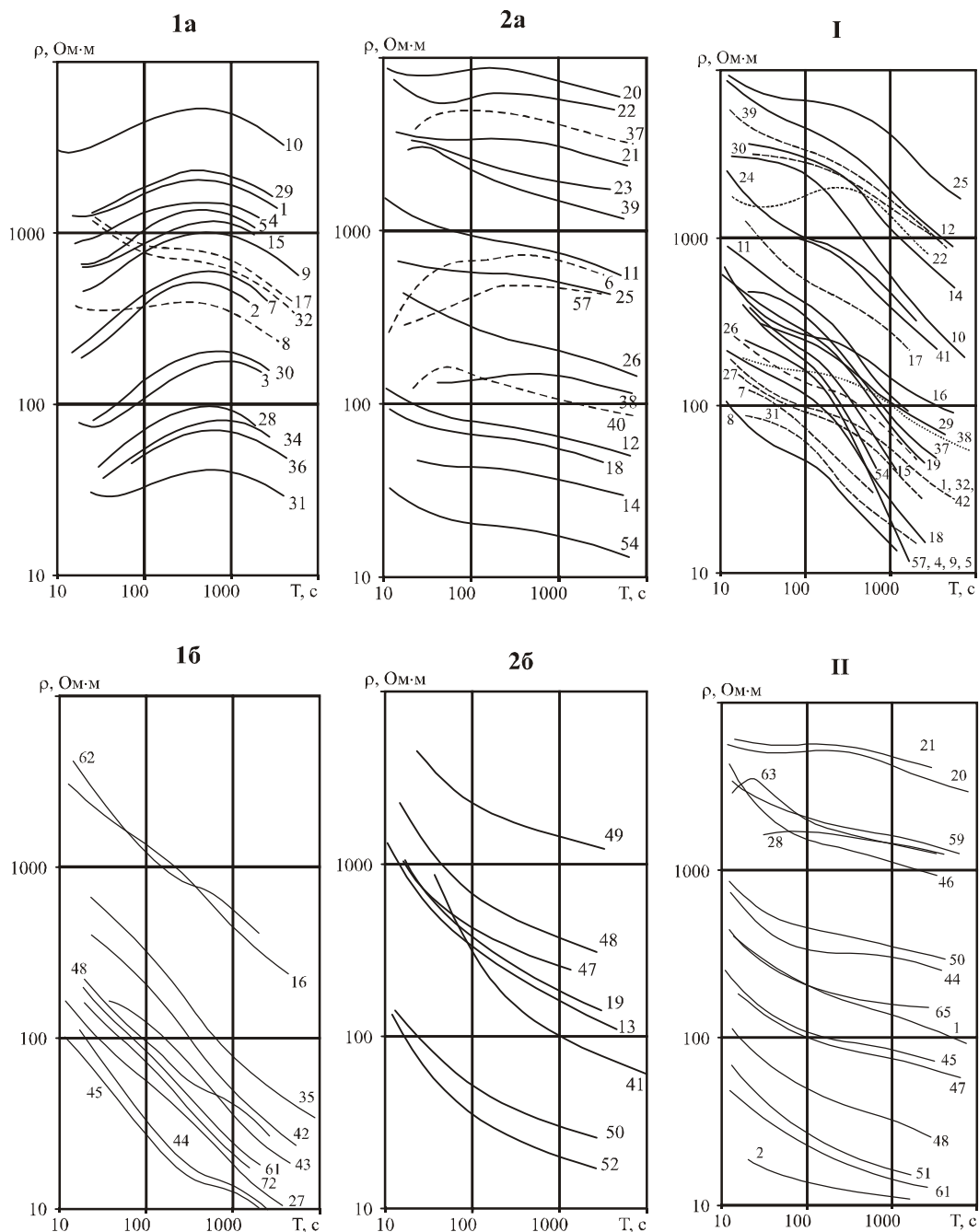
Во всех геоэлектрических районах кривые  $\rho_k$  при постоянстве формы меняются по уровню кажущегося сопротивления более чем в 1000 раз. Это связывается с искажающим влиянием неоднородностей электрического сопротивления приповерхностного слоя. Формальная количественная интерпретация индивидуальных кривых неминуемо приведет к грубым ошибкам в оценке параметров разреза. В этих условиях целесообразен анализ основных черт геоэлектрической модели Сихотэ-Алинской складчатой зоны, обеспечивающий закономерное поведение формы кривых МТЗ.

Обратимся к рис. 4, на котором показан характер сочленения осреднённых по выделенным геоэлектрическим районам кривых МТЗ с опорной кривой USS, полученной в результате длительной (12 мес.) регистрации вариаций на отрезке телефонного кабеля "РОСТЕЛЕКОМ" длиной 26 км, проходящем через г. Уссурийск в меридиональном направлении. На опорной кривой в диапазоне периодов от 1000 до 10000 с прослеживается перегиб, отождествляемый с низкоомным слоем. Моделирование разреза по различным программам [8, 11] ус-

тойчиво указывает на присутствие в разрезе относительно низкоомного слоя ( $\rho \approx 50-80$  Ом·м) на глубине 180 км. Этот слой мы вслед за многими авторами трактуем как электропроводящую астеносферу. Выше залегает относительно высокоомная литосфера ( $\rho \approx 1000-5000$  Ом·м). Как меридиональные кривые семейств 1а и 1б, так и широтные семейства I хорошо сочленяются с опорной кривой в интервале периодов более 1000 с. В зонах 1б и I, вследствие отсутствия проводящих образований в литосфере (в том числе и в земной коре), кровля астеносферы фиксируется наиболее отчётливо. В зоне 1а она частично экранирована проводящими образованиями в земной коре.

Наиболее значительный экранирующий эффект проявляется в зонах 2а, 2б и II, где осреднённые кривые сочленяются с опорной только на периодах более 10000 с. Численное моделирование указывает, что в этих районах развиты низкоомные ( $\rho \approx 50-80$  Ом·м) образования в интервале глубин 30-90 км. Главным свойством этих образований является анизотропия электрического сопротивления: если проводник фиксируется в меридиональном направлении, то в широтном наблюдаются высокие сопротивления, и наоборот. Лишь в областях пересечения зон возможно проявление проводящих свойств в обоих направлениях.

Анизотропия электропроводности хорошо согласуется с представлениями об эволюции разломных зон в литосфере [13], согласно которым развитие сдвиговых зон происходит во времени через заложение многочисленных мелких разрывов, ориентированных под определёнными углами к магистральному шву. Системы таких разрывов, заполненные глубинными флюидами, образуют своеобразные анизотропно-проводящие тела, формирующие специфические кривые МТЗ. На рис. 5 показано, как анизотропно-проводящие комплексы пород трассируют известные по другим геолого-геофизическим данным глубинные разломы [4, 8]. При этом магнитотеллурические зондирования, в отличие от других методов, указывают на то, что переработка литосферного вещества происходит до глубин не менее чем 90 км. Наиболее мощными геоэлектрическими аномалиями выражены разломы северо-восточного направления: Комиссаровский, Алчанский, Западно-Сихотэ-Алинский, Самаркинский, Прибрежный [5]. Эти направления хорошо согласуются с генеральным направлением крупнейшей в регионе сдвиговой системы Тан-Лу. Характерно также и то, что геоэлектрические аномалии, связанные с перечисленными разломами, ограничиваются с востока Центрально-Сихоте-Алинским разло-



**Рис. 2.** Семейства кривых МТЗ.

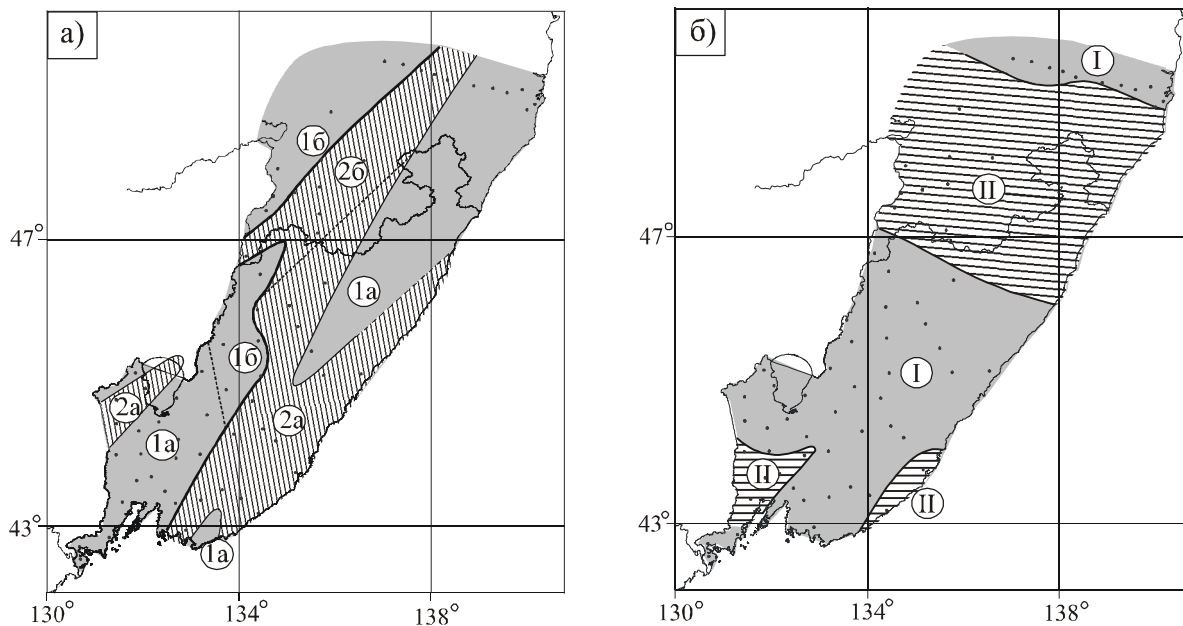
1а, 1б, 2а, 2б – в меридиональном направлении тока; I, II – в широтном направлении тока.

мом. Движения по системе разнонаправленных разломов определяет некоторые особенности трещинообразования в земной коре.

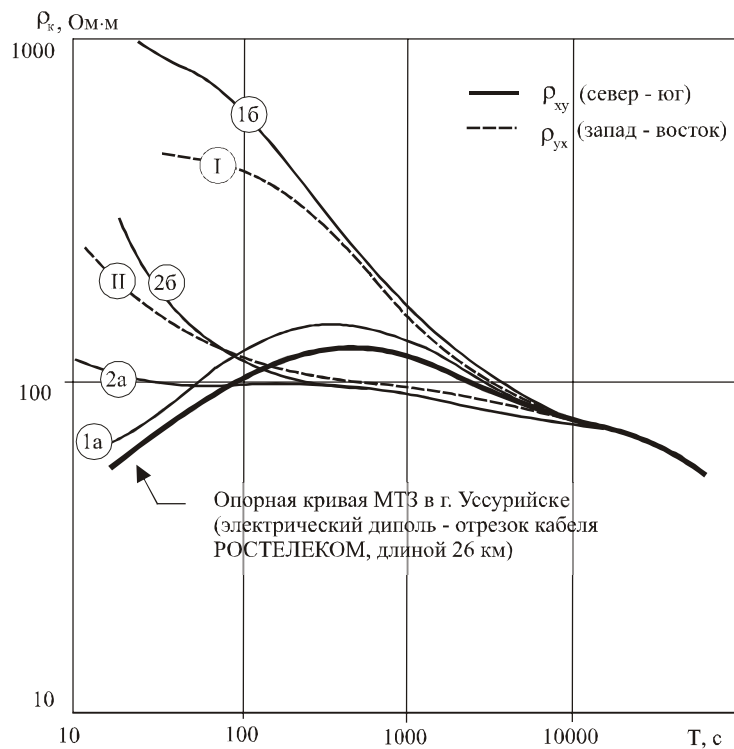
### ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПРИМОРЬЯ И СЕЙСМИЧНОСТЬ

На геоэлектрическом разрезе по профилю точек МТЗ 16–20 в южной части Приморья (рис. 6) показаны

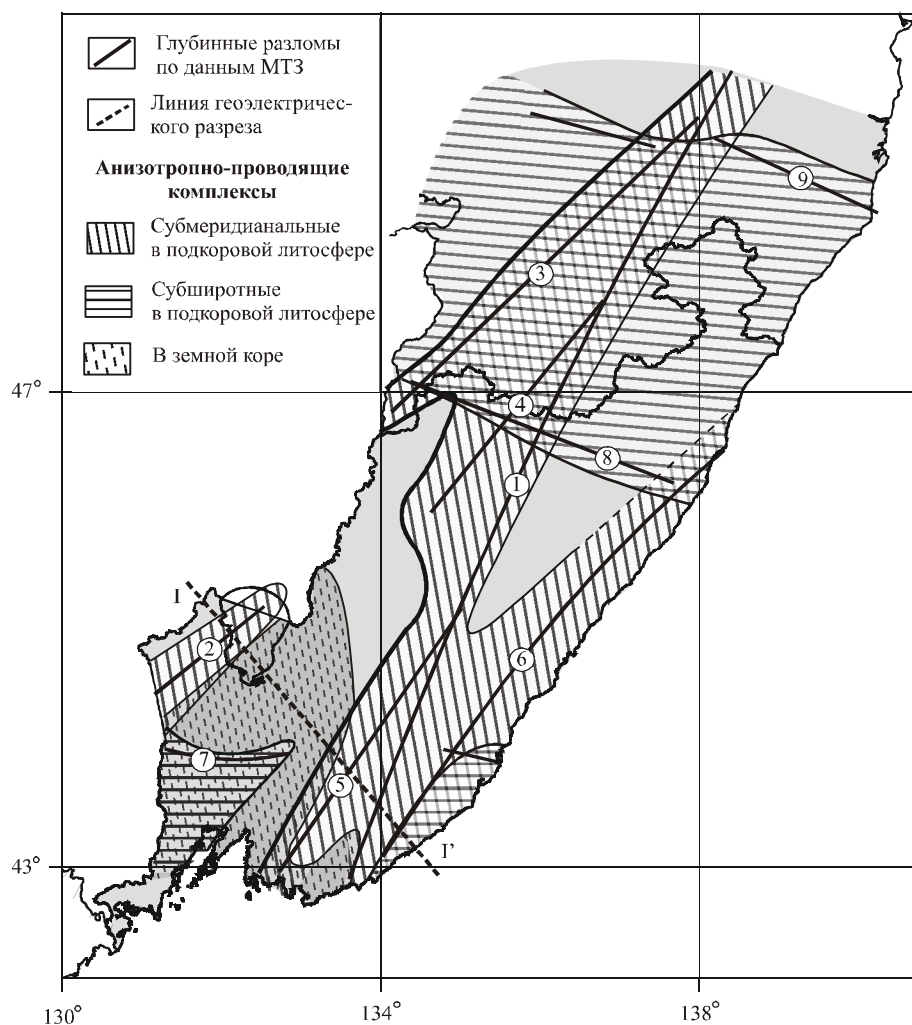
результаты интерпретации данных МТЗ. Относительно хорошо проводящая астеносфера залегает на глубине 150–170 км. Её кровля резко воздымается в юго-восточном направлении в сторону Японского моря, достигая в прибрежной части глубин порядка 100 км [10]. В этом же направлении отмечается уменьшение удельного электрического сопротивления и увеличение суммарной продольной проводи-



**Рис. 3.** Зоны расположения семейств меридиональных (а) и широтных (б) кривых МТЗ. Номера зон соответствуют номерам семейств на рис. 2.



**Рис. 4.** Характер сочленения средних по зонам кривых МТЗ с опорной кривой USS.



**Рис. 5.** Схема глубинных разломов и аномалии кажущегося сопротивления.

1 – Центрально-Сихотэ-Алинский; 2 – Комиссаровский; 3 – Алчанский; 4 – Западно-Сихотэ-Алинский; 5 – Самаркинский; 6 – Прибрежный; 7 – Южно-Сихотэ-Алинский; 8 – Бикинский; 9 – Совгаванский.

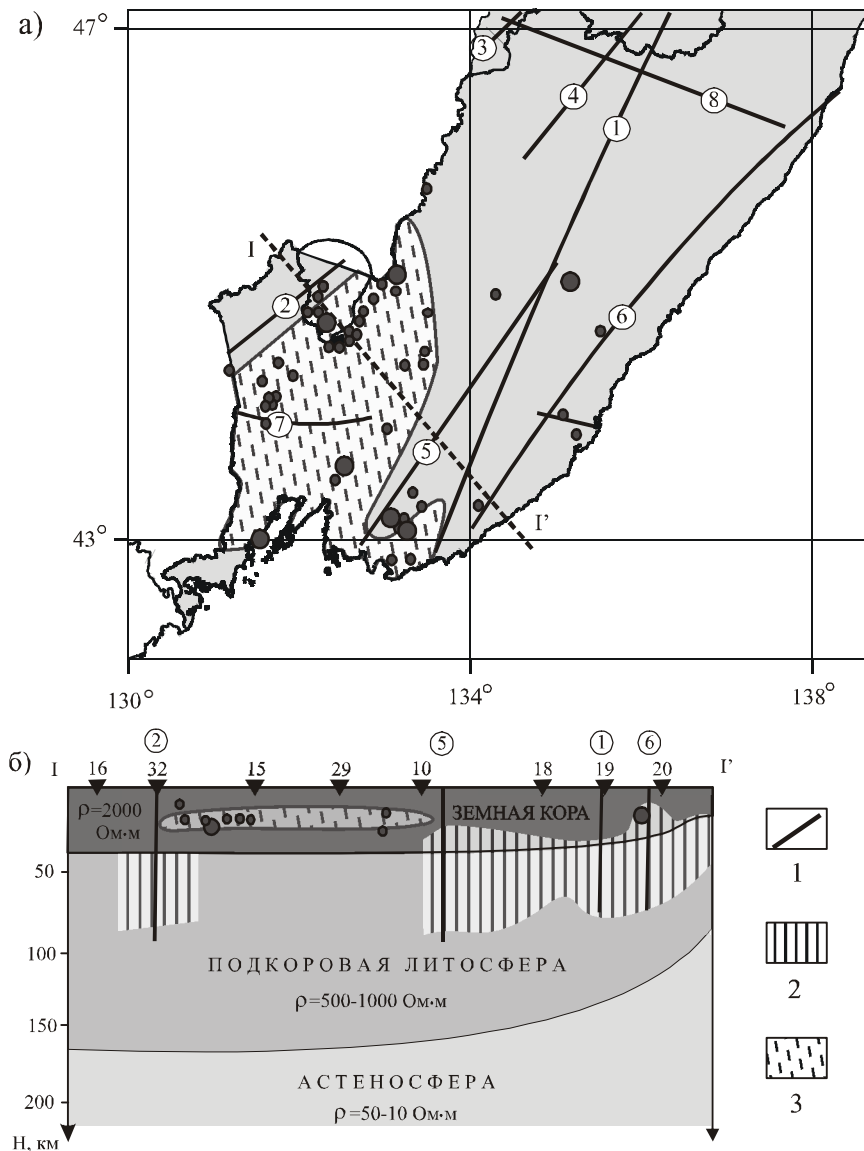
мости. Астеносферу перекрывает относительно высокоомная литосфера ( $\rho \approx 500\text{--}1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Подошва земной коры (по данным Р.Г. Кулинича и др. 2005) ведёт себя согласно с кровлей астеносферы – воздымается в юго-восточном направлении. В земной коре электрическое сопротивление несколько выше, чем в подкоровой литосфере, и достигает значений 2000–5000 Ом·м.

Магистральные швы глубинных разломов образуют в подкоровой литосфере зоны анизотропной проводимости (рис. 6б). В районе пункта МТЗ № 32 Комиссаровский разлом трассируется анизотропными образованиями в интервале глубин 35–90 км. Направление максимальной проводимости север-юг составляет угол около  $50^\circ$  к направлению магистрального шва. В районе точек МТЗ № 18, 19, 20 фиксируется объединенная анизотропная зона, связанная с Самаркиным, Центрально-Сихотэ-Алинским и Прибрежным глубинными разломами. Кровля ани-

зотропно-проводящего комплекса вторгается в земную кору, достигая глубин 15 км (пункты МТЗ № 10, 20).

Важным элементом геоэлектрической структуры земной коры является анизотропия электрического сопротивления, развитая на участках, заключенных между глубинными разломами (рис. 6а).

На участке профиля, расположенном между Комиссаровским и Самаркиным глубинными разломами, выделяется анизотропно-проводящая зона, развитая в земной коре в интервале глубин 7–20 км. Направление трещиноватости субмеридиональное. Сопротивление вдоль направления трещиноватости падает до 15–30 Ом·м, а суммарная продольная проводимость достигает значений 300 См. В плане аналогичная зона зафиксирована также между Самаркиным и Центрально-Сихотэ-Алинским глубинными разломами (пункт МТЗ № 57, рис. 1). Отмеченные зоны в земной коре можно рассматривать как облас-



**Рис. 6.** Положение очагов коровых землетрясений относительно элементов геоэлектрической модели. а – в плане (условные обозначения на рис. 5); б – в разрезе. 1 – магистральные швы глубинных разломов; 2 – анизотропно-проводящие комплексы в подкоровой литосфере; 3 – анизотропно-проводящий комплекс в коре; 4 – очаги землетрясений; 5 – линия разреза Γ-Γ'; 6 – положение пунктов МТЗ.

ти повышенной трещиноватости, образованные в процессе развития кулисообразно расположенных литосферных разломов, известных в литературе под названием дуплексов [13]. В дуплексах растяжения развиваются отрывы, сбросы, косоориентированные сдвиги, которые заполняются глубинным флюидом и благодаря этому приобретают анизотропную проводимость.

Сопоставляя пространственное положение очагов коровых землетрясений Приморья с элементами глубинной геоэлектрической структуры (рис. 6), можно сделать следующие выводы:

– пространственное положение очагов коровых землетрясений контролируется, в основном, анизотропно-проводящим комплексом в средней части земной коры;

– единичные очаги коровых землетрясений тяготеют к магистральным швам глубинных разломов. Но и в этих случаях верхнемантийный анизотропно-проводящий комплекс внедряется в земную кору до глубин 15 км (например, Прибрежный разлом).

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

На основе магнитотеллурических зондирований получены новые данные о геоэлектрической структуре Приморья, которые свидетельствуют о том, что в ней представлены как горизонтальные, так и крутопадающие границы. Глубинные разломы отличаются особой анизотропно-проводящей структурой, благодаря чему могут надёжно трассироваться по результатам интерпретации МТЗ. Впервые выделены анизотропно-проводящие комплексы в земной коре.

Расположение в зоне сочленения литосферных разломов позволяет рассматривать их как своеобразную трещинную систему дуплексов, развивающихся в процессе эволюции сдвиговых систем. Показано, что не сами магистральные швы, а образованные ими дуплексы контролируют сейсмическую активность. В отсутствие дуплексов глубинные разломы чаще всего асейсмичны. Естественно предположить, что трещинные системы дуплексов и заполняющий их флюид могут быть весьма чувствительны к изменениям литосферного напряжения, возникающего в процессе движения литосферных блоков. Образование новых трещин, как и их закрытие, может существенно изменить анизотропно-проводящие характеристики дуплекса и тем самым отразиться в изменении кажущегося сопротивления. Следовательно, электромагнитный мониторинг по профилю эталонных пунктов МТЗ представляется важной и своевременной задачей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-05-64457-а.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беляевский В.В., Мухин П.А., Басов М.Д. Возможности геоэлектрики при изучении тектоники Тянь-Шаня (на примере Кызыл-Кумов) // Геотектоника. 1994. № 2. С. 17–24.
2. Бердичевский М.Н., Булычев А.А., Гайнанов А.Г. Геофизические модели флюидонасыщенных зон литосферы и астеносферы // Вест. МГУ. 1994. Сер. 4. Геология. № 2. С. 17–24.
3. Бердичевский М.Н., Борисова В.П., Голубцова Н.С. Опыт интерпретации МТ-зондирований в горах Малого Кавказа // Физика Земли. 1996. № 4. С. 99–117.
4. Изосов Л.А., Коновалов Ю.И. Западно-Сихотэ-Алинский окраинно-континентальный вулканический пояс и его тектоническая позиция в Западно-Тихоокеанской зоне перехода континент – океан. Владивосток: Дальнаука, 2005. 315 с.
5. Карсаков Л.П., Чжао Чуньцын, Малышев Ю.Ф. Новая российско-китайская тектоническая карта // Фундаментальные проблемы геологии и тектоники Северной Евразии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал 2 ГЕО. 2001. С. 28–29.
6. Кузнецов В.А., Никифоров В.М., Старжинский С.С. Роль глубинных разломов при изучении литосферы Японского моря с использованием подводного кабеля Находка–Наоэцу // Физика Земли. 2001. № 4. С. 74–76.
7. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 182 с.
8. Назаренко Л.Ф., Бажанов В.А. Геология Приморского края. В 3-х частях. ГГП Приморская ПСЭ, Дальневосточ. геол. ин-т ДВО РАН, Владивосток 1989.
9. Никифоров В.М., Старжинский С.С. О влиянии вертикальных проницаемых зон на повышение чувствительности МТ-зондирований на Сахалине // Тихоокеанский океанологический институт. Материалы годичной сессии 1994 г., Владивосток, 1997. С. 172–181.
10. Никифоров В.М., Старжинский С.С., Дмитриев И.В. и др. Геоэлектрическая структура тектоносферы юга Дальнего Востока и некоторые особенности ТЕ-моды в сверхнизкочастотном диапазоне // Второй Всероссийский симпозиум Сейсмоакустика переходных зон. Владивосток, 2001. С. 43–49.
11. Никифоров В.М., Пальшин Н.А., Старжинский С.С., Кузнецов В.А. Трёхмерный береговой эффект в Приморье // Физика Земли. 2004. № 8. С. 56–69.
12. Старжинский С.С. О геоэлектрическом разрезе Южного Приморья по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 1983. № 3. С. 88–90.
13. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Бордняков С.А. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: СО Наука. 1991. 262 с.

Поступила в редакцию 10 января 2006 г.

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

*V.M. Nikiforov, I.V. Dmitriev, S.S. Starzhinskiy*

#### Deep geoelectrical structure and seismicity of Primorye (Far East)

The results of magnetotelluric soundings carried out in the Primorye territory are discussed. The deep geoelectrical structure is shown to be formed both by subhorizontal and steeply dipping interfaces. The latter are interpreted as deep-seated faults. In the junction zones of en echelon faults duplexes can develop, which due to filling-in of fractures with deep fluids acquire anisotropic electrical conductivity. Crustal earthquake foci are spatially and, probably, genetically related to such crustal rock complexes.

**Key words:** magnetotelluric sounding, resistivity anisotropy, deep faults, duplexes, seismic activity.