

**СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ ЮЖНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ
ПО ПРОФИЛЮ Г. ДАЛЬНЕРЕЧЕНСК – С. РОЩИНО – П. ПЛАСТУН ПО ДАННЫМ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ**

В.Б. Каплун, А.К. Бронников

ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000; e-mail: kaplun@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 05 марта 2018 г.

Проведены магнитотеллурические зондирования в широком частотном диапазоне от 10^4 до 10^{-3} Гц в 55 пунктах наблюдения по профилю г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун со средним шагом около 5 км вкрест простираения Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП). В результате интерпретации построен геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии до глубины 150 км. На геоэлектрическом разрезе выделена земная кора переменной мощности 20–40 км, с электрическим сопротивлением (ЭС) свыше 1000 Ом·м, состоящая из блоков с различным ЭС, границами между которыми являются субвертикальные и наклонные зоны низких ЭС от десятков до первых сотен Ом·м. В земной коре и верхней мантии выделено три зоны аномально низкого ЭС. Верхняя мантия имеет неоднородное строение. Наиболее низкие значения ЭС отмечаются на глубинах 40–80 км под западной и восточной частями САОП. В диапазоне глубин 80–150 км выделяется область повышенного электрического сопротивления 300–500 Ом·м, протягивающаяся от побережья в западном направлении под Ханкайский супертеррейн. Эта область трактуется как остатки плиты древней зоны субдукции, в которой выделено два канала пониженного ЭС, связываемые со слэб-виндоу. Сопоставлены результаты по северной и южной частям САОП, определены их сходство и различия.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, глубинное строение, земная кора, верхняя мантия, глубинные разломы, Южный Сихотэ-Алинь.

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные исследования методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) являются продолжением работ, выполняемых с целью изучения строения и электрических характеристик литосферы Сихотэ-Алиня. Предыдущие исследования, выполненные по профилю г. Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [7], расположенному к югу в 100–150 км, показали, что земная кора имеет блоковое строение с высокими значениями электрического сопротивления (ЭС) свыше 1000 Ом·м и переменной мощностью от 20 до 50 км, в основном совпадающей с мощностью земной коры, полученной по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [3]. По данным МТЗ наибольшая мощность слоя высокого ЭС земной коры до 50 км выделяется под Ханкайским супертеррейном и Восточно-Сихотэ-Алинским вулканическим поясом. Границами между блоками земной коры являются зоны низких ЭС. Всего выделено пять зон низкого

ЭС. Эти зоны связываются в основном со второстепенными разломами, которые трактуются зонами растяжения, надвига и рудной минерализации. Основные разломы располагаются в блоках высокого ЭС, что связывается со сжатием, в результате которого произошла гранитизация земной коры. Внутрикоровых слоев низкого ЭС выделено не было. Вероятно, их распространение имеет локальный характер. Верхняя мантия Южного Сихотэ-Алиня имеет сложное строение. Объекты с повышенным ЭС в верхней мантии интерпретируются как остатки древней субдуцирующей плиты, что согласуется с сейсмологическими и петрологическими данными. Выявлено, что над областями высокого ЭС уровень и интенсивность сейсмичности выше, чем над областями низкого ЭС.

Целью наших исследований было детальное изучение строения земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня методом магнитотеллурического зондирования с регистрацией электромагнитного поля

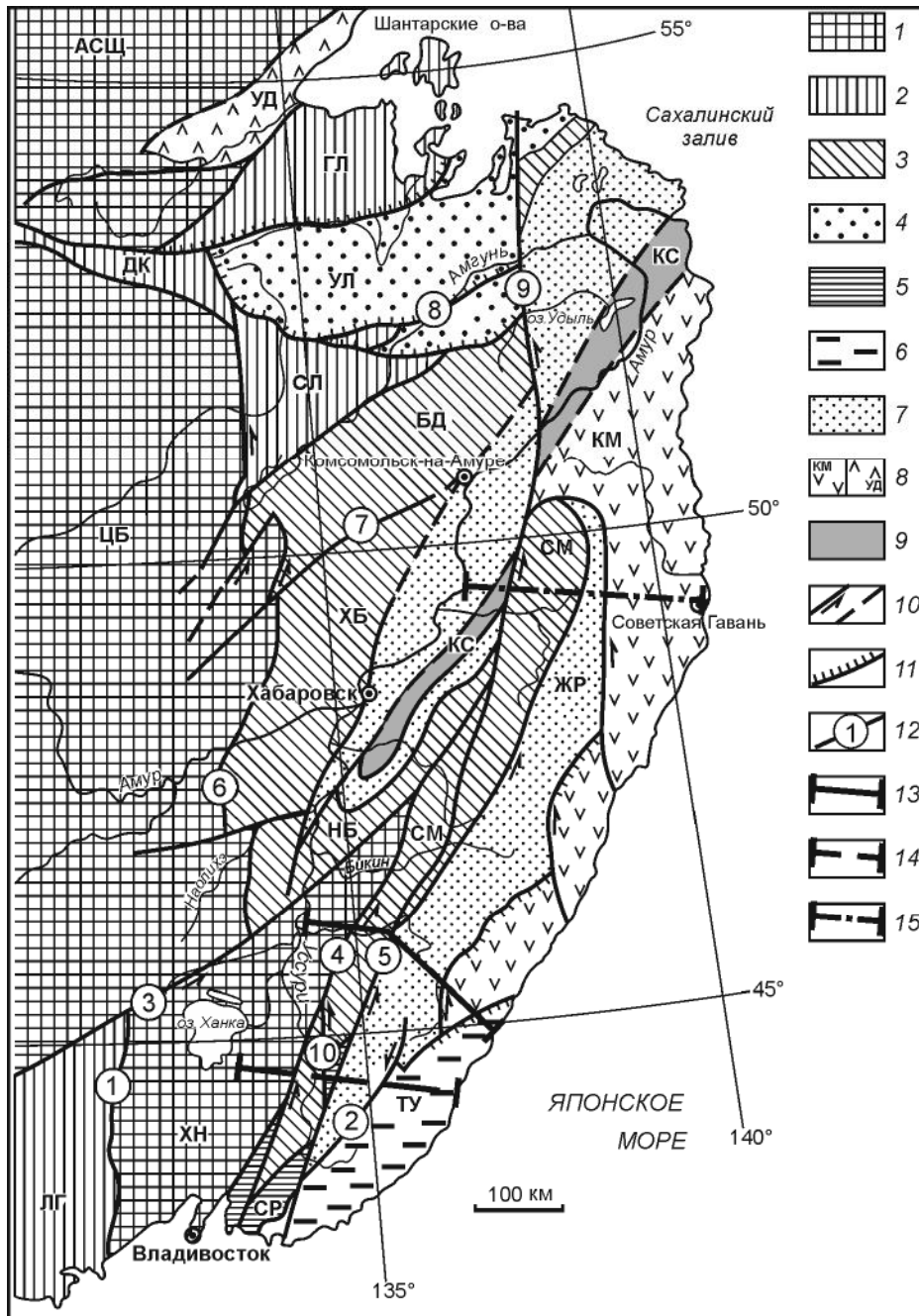


Рис. 1. Тектоническая схема Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий, по [2], с расположением профиля исследований.

1 – докембрийские и раннепалеозойские кранты и супертеррейны: АСЦ – Алдано-Становой щит, ЦБ – Цзямусы-Буреинский, ХН – Ханкайский; 2 – палеозойские террейны: ДК – Джагдинско-Кербинский, ГЛ – Галамский, СЛ – Сулукский, ЛГ – Лаоелин-Гродековский; 3, 4 – юрские террейны: 3 – фрагменты аккреционных призм (СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский, ХБ – Хабаровский, БД – Баджальский), 4 – приконтинентального турбидитового бассейна (УЛ – Ульбанский); 5 – фрагменты докембрийского-раннепалеозойского континента, включенные в структуры юрской аккреционной призмы и испытавшие вместе с ними цикл син- и постаккреционных преобразований (СР – Окраинско-Сергеевский комплекс Самаркинского террейна); 6–9 – раннемеловые террейны – фрагменты: 6 – неокомской аккреционной призмы (ТУ – Таухинский), 7 – приконтинентального син-сдвигового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский), 8 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский, УД – Удской), 9 – альбской аккреционной призмы (КС – Киселевско-Маноминский); 10 – левые сдвиги; 11 – надвиги; 12 – основные разломы: 1 – Западно-Приморский, 2 – Фурмановский, 3 – Мишань-Фушуньский (Алчанский), 4 – Арсеньевский, 5 – Центральный Сихотэ-Алинский, 6 – Куканский, 7 – Курский, 8 – Пауканский, 9 – Лимурчанский, 10 – Меридиональный; 13 – профиль МТЗ данных исследований г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун; 14 – профиль МТЗ г. Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [8]; 15 – профиль МТЗ с. Троицкое – с. Лидога – п. Ванино [7].

в широком частотном диапазоне $10 \text{ кГц} \div 0.001 \text{ Гц}$. В результате планировалось построить геоэлектрический разрез литосферы, определить электрические характеристики земной коры и верхней мантии, выявить зоны аномальных сопротивлений, выяснить их природу и связи с геодинамикой региона, провести сопоставление с ранее выполненными исследованиями.

Район исследований расположен в южной части Сихотэ-Алинь-Северо-Сахалинского орогенного пояса [2]. В связи с тем, что исследования не затрагивают территории о. Сахалин, в дальнейшем будем использовать сокращенное название – Сихотэ-Алинский орогенный пояс (САОП).

Тектоническое строение и геофизическая изученность САОП подробно были описаны в предыдущей статье [7] и здесь не рассматриваются. Положение профиля исследований, относительно тектонических структур САОП, показано на рис.1. Профиль начинается на севере Ханкайского супертеррейна, пересекает его восточную границу, проходящую по Арсеньевскому разлому, простирается на восток до с. Рошино, далее поворачивает на юго-восток, пересекает САОП, почти вкрест его простирания, и оканчивается на побережье Японского моря.

Измерения электромагнитного поля проводились с использованием цифровой 24-разрядной электроразведочной станции MTU-5A с магнитными индукционными датчиками МТС-30 и МТС-50, производства фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада), в широком частотном диапазоне от 10^4 Гц до $4 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$ по той же методике, что и в работе [7]. На профиле г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун, длиной 285 км, выполнено 55 зондирований со средним шагом между пунктами наблюдения 5 км. Время регистрации электромагнитного поля Земли на пункте наблюдения в основном составляло 18–19 часов. Обработка полевых данных осуществлялась с использованием программного пакета SSMT2000 фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада). Окончательная обработка полевых материалов осуществлялась в камеральных условиях программой Corrector (ООО «Северо-Запад», г. Москва) для удаления выбросов отдельных значений и сглаживания импедансных кривых МТЗ.

АНАЛИЗ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На рис. 2 показаны меридиональные и широтные амплитудные кривые МТЗ по профилю г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун. Кривые лежат в широком диапазоне сопротивлений от 0.01 до 10 000 Ом·м, и их форма значительно варьирует вдоль профиля. Форма меридиональных кривых, в отличие от широтных, меняется более плавно. Практически на всех меридиональных кривых отмечается

максимум в районе 1 с, минимум в диапазоне от 10 до 100 с и правая пологозалегающая или слабовосходящая ветвь. Форма широтных кривых часто резко отличается от формы меридиональных и довольно значительно варьирует вдоль профиля. Основные различия в форме кривых отмечаются на периодах свыше 0.1 с. Такое поведение амплитудных кривых свидетельствует о неоднородном строении геоэлектрического разреза вдоль профиля.

Для определения стратегии интерпретации данных МТЗ использованы магнитовариационный и магнитотеллурические тесты, предложенные в работе [1]. Для этого были рассчитаны магнитовариационные параметры неоднородности (N_{mv}) и асимметрии ($skew_{mv}$), магнитотеллурические параметры неоднородности (N_{mt}), асимметрии Свифта ($skew_s$) и Бара ($skew_B$). Параметр неоднородности (N) позволяет оценить степень горизонтальной геоэлектрической неоднородности, а параметр асимметрии ($skew$) – степень отклонения среды от двухмерно-однородной или осесимметричной. Пороговыми значениями, характеризующими среду как горизонтально-однородную, были приняты величины для $N_{mv} = 0.05$, для $skew_{mv} = 0.2$, для N_{mt} , $skew_s$ и $skew_B$ – равные 0.15 [1]. В случае двухмерности среды величина параметров N и $skew$ находится в диапазоне $0.15 \div 0.3$, а в случае трехмерности среды – превышает значение 0.3. Расчеты показали, что параметр асимметрии $skew_{mv}$ определяется неустойчиво, т.к. величины реальной и мнимой частей вектора Визе-Паркинсона $\|ReW\|$ и $\|ImW\| < 0.1$. Результаты расчетов остальных параметров представлены на рис. 3.

Магнитовариационный параметр неоднородности (N_{mv}) геоэлектрического разреза (рис. 3 а) имеет в основном значения более 0.05. Меньшие значения наблюдаются лишь под отдельными пунктами наблюдения на частотах свыше 10 Гц.

Распределение значений магнитотеллурических параметров неоднородности (N_{mt}) (рис. 3 б) показывает, что на частотах ниже 10 Гц геоэлектрический разрез представляет собой трехмерную структуру, а на частотах выше 10 Гц имеет сложное чередование структур различной размерности.

Характер распределения значений магнитотеллурического параметра асимметрии Бара ($skew_B$) (рис. 3 в) показывает, что геоэлектрический разрез на частотах менее 10 Гц характеризуется как асимметричная трехмерная среда, а на частотах выше 10 Гц близка к осесимметричной, осложненной наличием локальных двухмерных и трехмерных объектов.

Распределения значений магнитотеллурического параметра асимметрии Свифта ($skew_s$) (рис. 3 г) имеет сложный характер и показывает, что геоэлектриче-

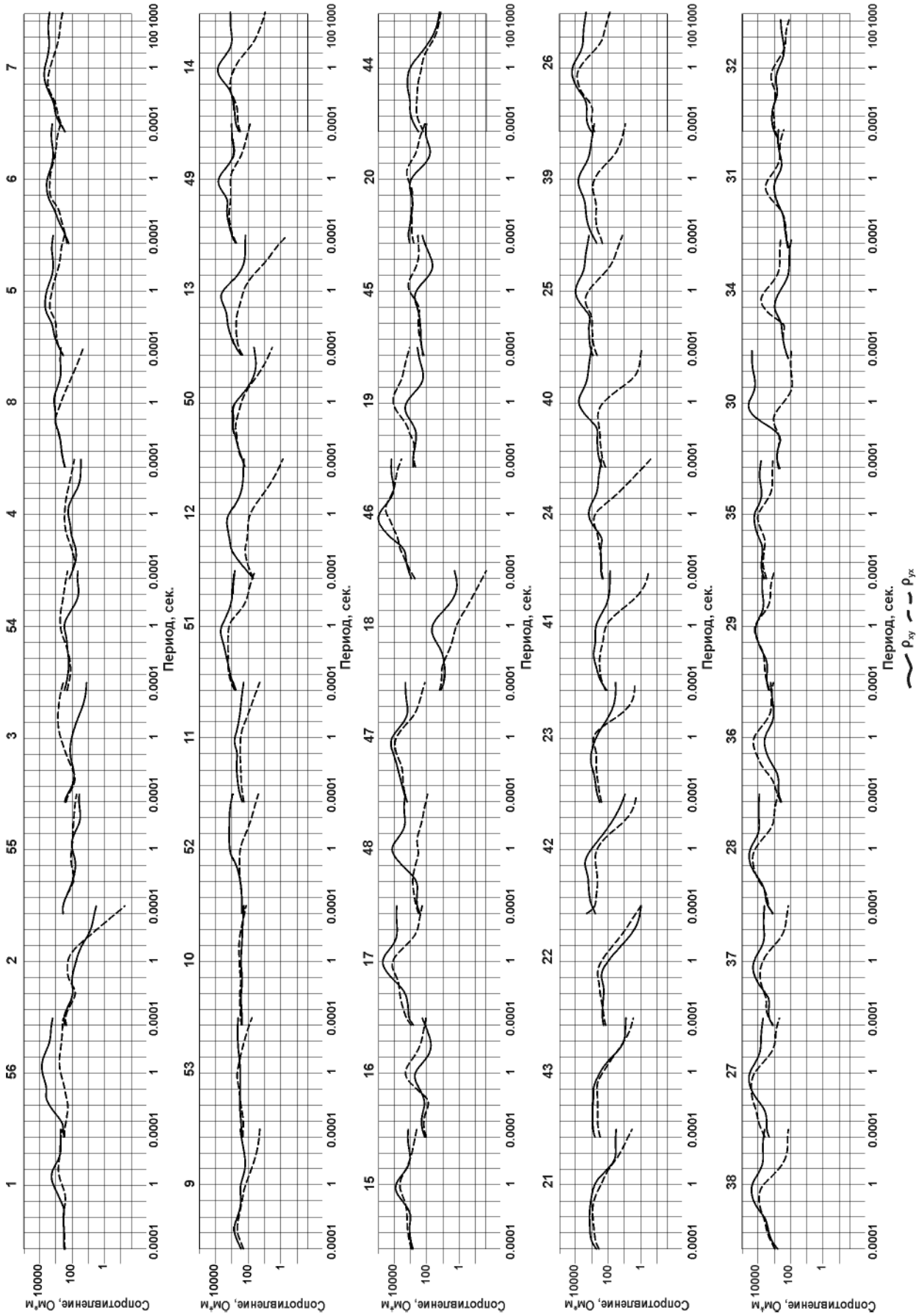


Рис. 2. Амплитудные кривые МТЗ профиля г. Дальнереченск – с. Рощино – п. Пластун; ρ_{xy} – меридиональная, ρ_{yx} – широтная

ский разрез во всем диапазоне частот представляет собой чередование объектов различной размерности и асимметрии.

Анализ амплитудных кривых и параметров неоднородности и асимметрии показал, что геоэлектрический разрез профиля характеризуется наличием одномерных, двумерных и трехмерных объектов, неравномерно распределенных по всей его области.

БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ

Профиль исследований начинается на континенте и, протягиваясь на 285 км, заканчивается на побережье Японского моря. Контакт горных пород суши с морской водой, имеющих ЭС от сотен Ом·м до сотен тысяч Ом·м и 0.3–0.4 Ом·м, соответственно, может вызывать сильную магнитотеллурическую аномалию, называемую «береговым эффектом». Суть этого явления заключается в закономерном завышении по оси сопротивлений уровня поперечной кривой на длинных периодах при приближении к береговой линии. Это отклонение может достигать нескольких порядков и проявляться на расстоянии свыше 100 км. Из рассмотрения поведения кривых по профилю (рис. 2) подобного явления не наблюдается. В работах [6, 7] также отмечалось отсутствие влияния берегового эффекта на поведение амплитудных кривых МТЗ при глубинах моря от 100–200 м до 3 км.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Для интерпретации данных МТЗ профиля г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун использовалась программа 3D инверсии ModEM [12]. В качестве базовой модели было выбрано однородное полупространство сопротивлением 500 Ом·м.

Параметры сетки были следующими: 38 ячеек по оси X шириной 5 км, 53 ячейки по оси Y шириной 5 км и 28 ячеек по оси Z с плавно повышающейся мощностью слоев. При интерпретации было использовано три подхода. При первом подходе расчеты производились только по импедансу, при втором – одновременно использовался типпер и импеданс, а при третьем – сначала производился расчет с использованием данных типпера, а затем импеданса. Для расчета брался основной и дополнительный импеданс с 55 точек зондирования в диапазоне от 0.0001 с до 1000 с. Всего сетка периодов состояла из 50 значений, при этом на каждую декаду приходилось 6. Уровень ошибки для основного импеданса – 5 % от $|Z_{xy} \cdot Z_{yx}|^{1/2}$, для дополнительного – 50 %. При первом подходе в результате расчета была получена модель со среднеквадратической ошибкой (rms), равной 3.39.

Для учета влияния Японского моря в правую часть модели был добавлен слой низкого ЭС (0.3 Ом·м). Мощность слоя плавно увеличивалась от 50 м до 2 км. Расстояние от ближайшей точки профиля до данной неоднородности 931 м. Среднеквадратическая ошибка для данной модели составила 3.76.

При втором подходе инверсия проводилась для исходной модели с однородным полупространством сопротивлением 500 Ом·м, содержащим слой, аппроксимирующий Японское море. По результатам расчетов была получена модель с rms = 3.8.

При третьем подходе расчет был разбит на два этапа. На первом этапе базовая модель, учитывающая влияние Японского моря, была рассчитана, используя только данные типпера. Среднеквадратическая ошибка составила 4.48. На втором этапе результирующая модель предыдущего шага была взята в качестве базовой, а в качестве исходных данных инверсии использовался импеданс. Среднеквадратическая ошибка итоговой модели составил 2.65.

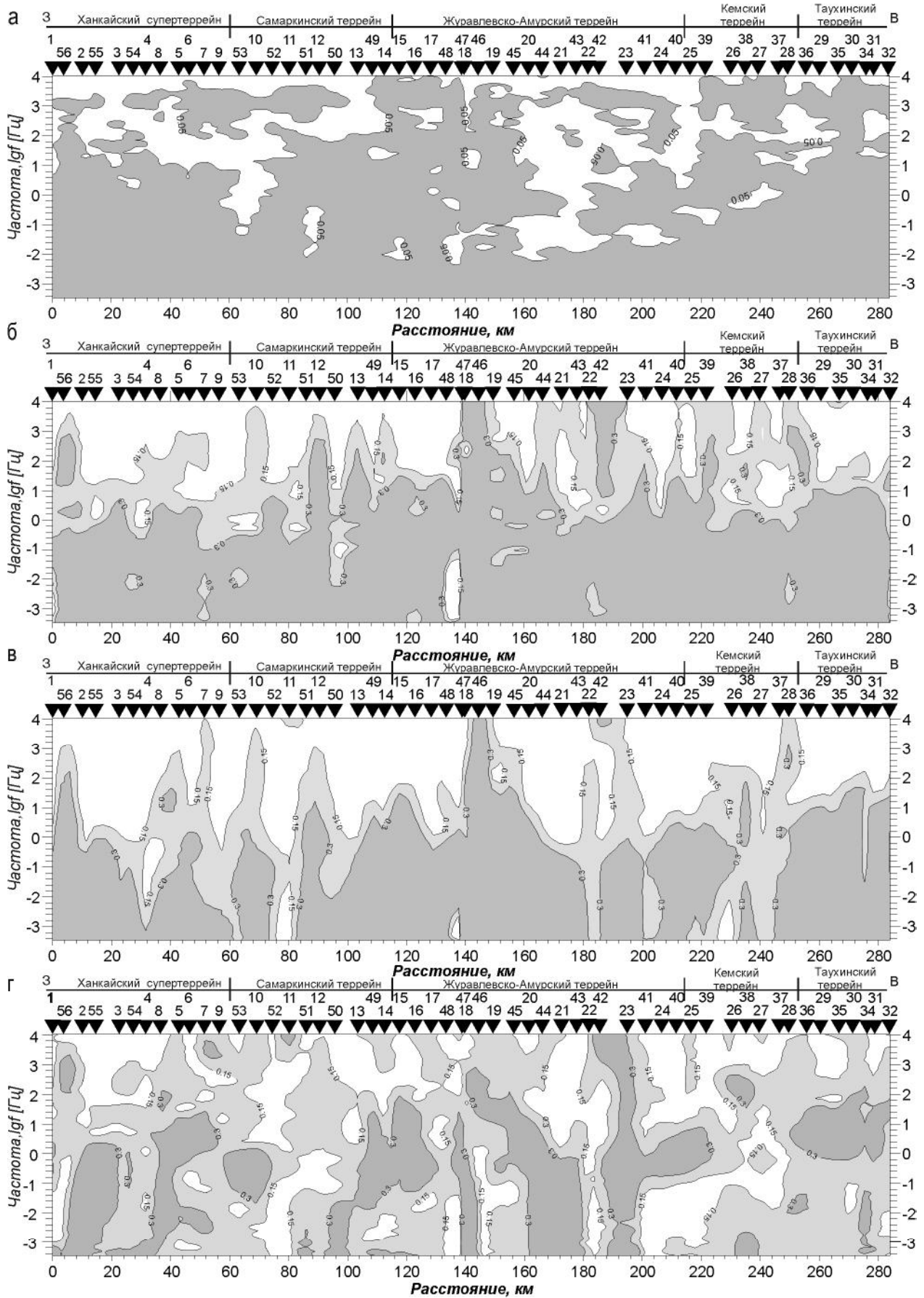
Сопоставление моделей, полученных при трех подходах к интерпретации исходных данных МТЗ, показал, что при третьем подходе полученная модель более дифференцирована по выделению проводящих объектов и лучше согласуется с тектоническим строением региона.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геоэлектрический разрез профиля г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун (рис.4) построен в одинаковых горизонтальном и вертикальном масштабах до глубины 150 км и представляет собой сложнопостроенную модель литосферы, на которой выделяются области высокого, повышенного и низкого ЭС. Наиболее высокое ЭС свыше 1000 Ом·м наблюдается в верхней части геоэлектрического разреза мощностью от 20 до 40 км, что согласно данным ГСЗ, соответствует земной коре, мощность которой в пределах профиля варьирует от 32 до 40 км [3]. Наибольшая мощность земной коры наблюдается под центральной частью САОП в районе Центрального Сихотэ-Алинского разлома (ЦСАР), которая уменьшается в сторону побережья и под Ханкайский супертеррейн. Нижняя часть геоэлектрического разреза, глубже 40 км, сопоставляется с верхней мантией и характеризуется сложным распределением ЭС от первых десятков Ом·м до нескольких сотен Ом·м.

Земная кора

Геоэлектрический разрез земной коры имеет неоднородное строение как по латерали, так и на глубину, состоит из нескольких блоков, имеющих различное электрическое сопротивление (ЭС) и раз-



деленных зонами низкого или пониженного ЭС. При рассмотрении с запада на восток можно выделить три блока. Первый блок относится к Ханкайскому супертеррейну и состоит из двух более мелких блоков, разделенных зоной низких ЭС менее 50 Ом·м, погружающейся в западном направлении до глубины 50 км. Эта зона совпадает со Среднеханкайским разломом, разделяющим западную Матвеевскую и восточную Малиновскую структурно-формационные зоны Ханкайского супертеррейна [4, 5], обозначена цифрой 1 на рис. 4 и названа Среднеханкайской зоной низкого электрического сопротивления. На поверхности разлом выглядит как плутоническая зона шириной 10–20 км, она разбита на множество блоков, испытавших значительные вертикальные смещения. О тектонической раздробленности, а, следовательно, и проницаемости разлома свидетельствует огромное количество даек разного состава, чередующихся с вмещающими породами. На профиле Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [7] Среднеханкайский разлом не выделялся как зона низких ЭС, а наоборот расположен в блоке высокого ЭС. Это может свидетельствовать об изменении проницаемости различных его частей. Кроме этого отмечается изменение направления его падения – на юге оно восточное, а на севере – западное. Подобное изменение направления падения плоскости разломов характерно для южной части САОП, что отражено на сейсмогеологических разрезах профилей ГСЗ Спасск-Дальний – бух. Зеркальная и Бикин – Великая Кема [3], где западное падение разломных зон на первом разрезе сменяется на восточное на втором.

Блок земной коры, соответствующий Матвеевской зоне, имеет мощность около 30 км и ЭС, не превышающие 20 тыс. Ом·м. Блок земной коры, соответствующий Малиновской зоне, имеет мощность около 20 км и ЭС, не превышающие 10 тыс. Ом·м. Таким образом, видно, что Ханкайский супертеррейн имеет гетерогенное строение. Подобное явление было отмечено и на профиле Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [7].

Восточная граница Ханкайского супертеррейна совпадает с Арсеньевским разломом, который отделяет его от САОП, выделяется на геоэлектрическом разрезе вертикальной зоной пониженного ЭС.

В САОП выделяются два крупных неоднородных блока высокого ЭС, разделенных хорошо выраженной зоной низкого ЭС менее 50 Ом·м в районе

пунктов МТЗ № 42÷43, слабо наклоненной в западном направлении и уходящей на глубину 30–40 км. Эта зона в нижней части земной коры и верхней мантии протягивается в восточном направлении вплоть до границы с Восточно-Сихотэ-Алинским вулканическим поясом (ВСАВП), обозначена на рис. 4 цифрой 3 и названа Верхне-Большеуссурской. Граница между блоками расположена в пределах Журавлевско-Амурского террейна и не связана ни с одним из показанных на геологической карте [4, 5] глубинным разломом.

Первый блок, расположенный между Арсеньевским разломом и проводящей зоной № 3, связывается с Хунгари-Татибинским вулканическим поясом [2]. Он имеет в центральной части земной коры блок высокого ЭС свыше 20 тыс. Ом·м, разделенный зоной низких и пониженных ЭС, связанной с Самаркинским разломом. Этот блок характеризуется повышенной до 40 км мощностью области высокого ЭС, превышающего 1000 Ом·м, и подстилаемой его зоной повышенных ЭС 450÷1000 Ом·м, погружающихся в верхнюю мантию в восточном направлении. В его пределах располагается Центральный Сихотэ-Алинский разлом, который не выделяется на геоэлектрическом разрезе как зона низких ЭС, характерных для разломных зон, что свидетельствует об его низкой флюидопроницаемости. Подобное явление было отмечено и на профиле Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [7]. Вероятно, что ЦСАР на современном этапе развития находится в процессе регионального сжатия. В результате этого произошло переплавление пород соседних с ним блоков земной коры и образование крупных гранитоидных полей по обеим его сторонам. Здесь же, в пределах Самаркинского террейна в низах земной коры и верхней мантии, выделяется зона низких ЭС № 2, названная Рощинской.

Второй блок, расположенный в восточной части геоэлектрического разреза от проводящей зоны № 3 до побережья Японского моря, также можно разделить на два, которые имеют свои характерные особенности. Граница между ними проходит по предположительно Фурмановскому разлому [4, 5], который выделяется как зона пониженных ЭС, разделяющая два блока с высокими ЭС свыше 20 тыс. Ом·м. Блок, расположенный к западу от Фурмановского разлома, имеет пониженную мощность около 20 км, подстилается проводящей зоной с ЭС от первых десятков до первых сотен Ом·м и характеризуется хорошо выраженным погружением в западном направлении. Край-

Рис. 3. Разрезы параметров неоднородности и асимметрии.

а – магнитовариационный параметр неоднородности (N_{mv}), б – магнитотеллурический параметр неоднородности (N_{mt}), в – параметр асимметрии Бара ($skew_B$), г – параметр асимметрии Свифта ($skew_S$).

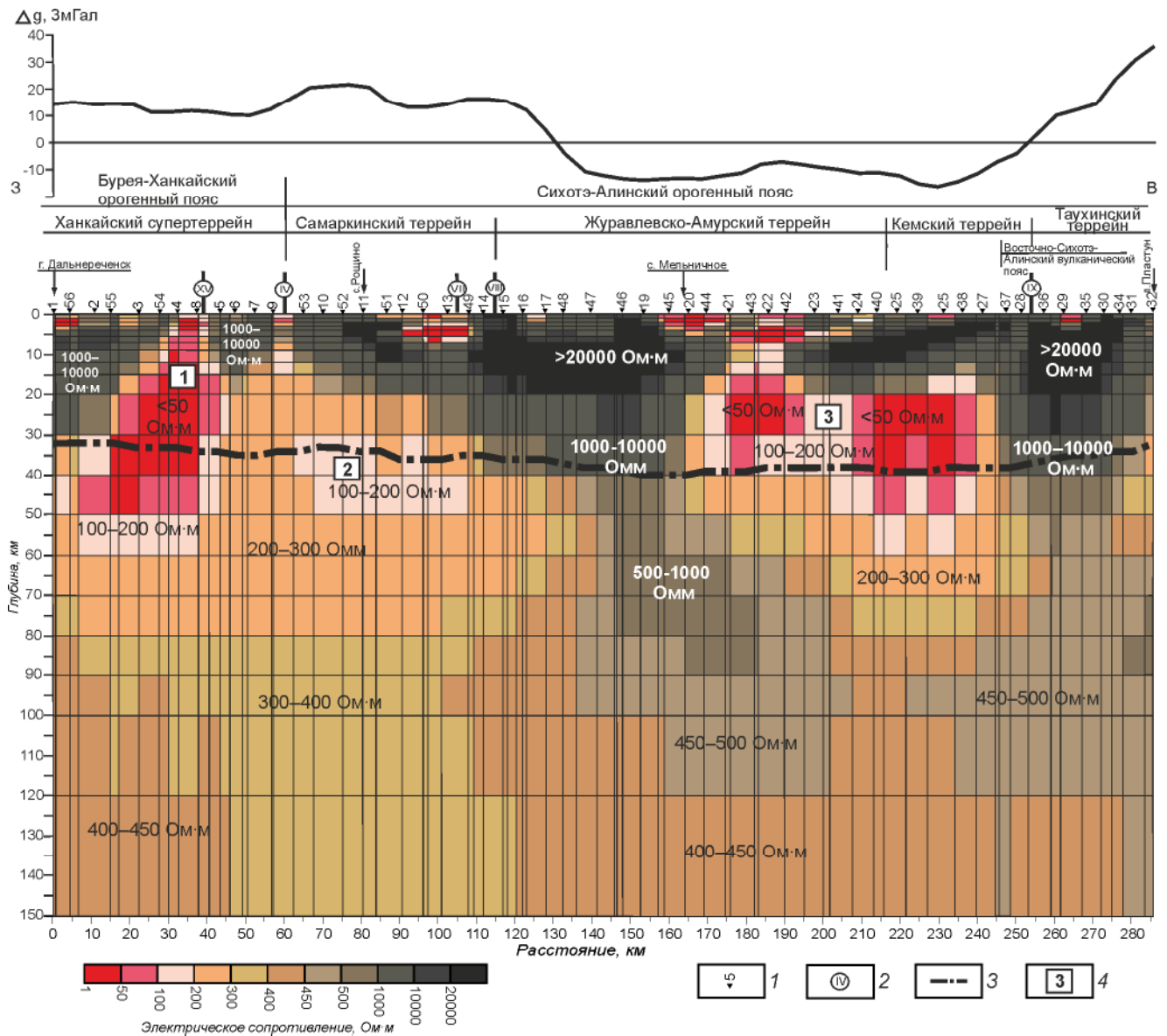


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по профилю г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун, построенный по результатам трехмерной интерпретации.

1 – пункты МТЗ и их номера; 2 – основные разломы: XV – Среднеханкайский, IV – Арсеньевский, VII – Самаркинский, VIII – Центральный Сихотэ-Алинский, IX – Фурмановский, согласно [5]; 3 – подошва земной коры по данным ГСЗ [3], 4 – зоны аномально низкого электрического сопротивления: 1 – Среднеханкайская, 2 – Рошинская, 3 – Верхне-Большеуссурская. Над разрезом показан график аномального гравитационного поля Δg , мГал.

ний прибрежный блок характеризуется высокими ЭС свыше 20 тыс. Ом·м и имеет повышенную мощность до 40 км с ЭС пород свыше 1000 Ом·м.

Представляет интерес поведение аномального гравитационного поля вдоль профиля исследований (рис. 4). С запада на восток примерно до ЦСАР величина поля плавно изменяется то увеличиваясь, то уменьшаясь, имея положительные значения. После ЦСАР величина поля начинает резко уменьшаться и

над серединой блока высокого ЭС принимает отрицательные значения, которые остаются до примерно начала Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (ВСАВП), где оно резко возрастает и принимает положительные значения. Значение аномального гравитационного поля над ВСАВП более чем в два раза выше, чем над Ханкайским супертерреином. Мощность земной коры, по данным ГСЗ [3], под ВСАВП, Ханкайским супертерреином и Самаркинский тер-

рейном примерно одинаковая и составляет около 32–35 км. Электрическое сопротивление под ВСАВП более чем в два раза превышает ЭС под Ханкайским супертеррейном и Самаркинским террейном.

Ханкайский супертеррейн в районе исследования состоит из пород, метаморфизованных в фациях от гранулитовой до зеленосланцевой, и перекрыт и сечется девонскими и каменноугольными морскими и континентальными вулканическими и осадочными породами, средне- и позднепалеозойскими гранитами и позднепермским вулканоплутоническим комплексом. Самаркинский террейн состоит из юрских терригенных образований с аркозовой кластикой, содержащей много аллохтонных пластин, глыб и обломков – фрагментов преимущественно позднепалеозойской и раннемезозойской океанической коры [2]. Гравитационное поле Самаркинского террейна несколько выше, чем Ханкайского супертеррейна, что, вероятно, связано с наличием остатков океанической коры. ВСАВП является наложенной структурой на САОП и, в пределах профиля исследований, представлен сеноманскими эффузивами синанчинского вулканоплутонического комплекса, состоящего из базальтов, андезитов, дацитов и субинтрузивных тел диоритов и габбродиоритов. Более высокие значения аномального гравитационного поля здесь, по отношению к Ханкайскому супертеррейну и Самаркинскому террейну, вероятно, связаны с наличием пород основного состава. Здесь же выделяются блоки высокого ЭС.

В области отрицательных значений аномальное гравитационное поле образует два локальных минимума, один из которых – над областью высокого ЭС в земной коре и повышенного ЭС, протягивающегося в верхнюю мантию, а второй – над областью высокого ЭС в коре, подстилаемой обширной областью низкого ЭС в верхней мантии. Область отрицательных значений охватывает большую часть Журавлевско-Амурского и Кемский террейны. Здесь же наблюдается и наибольшая мощность земной коры 40 км [3]. Журавлевско-Амурский террейн является фрагментом окраинного сдвигового турбидитового бассейна и сложен главным образом аркозовыми песчаниками и алевролитами раннемелового возраста мощностью до 15 км [2]. В его пределах располагается Хунгари-Татибинский вулканический пояс (восточнее ЦСАР), который представлен гранитоидами. Кемский террейн является фрагментом раннемелового задугового бассейна и образован баррем-альбскими терригенными, главным образом флишевыми отложениями с вулканитами преимущественно основного состава. Таким образом, мы видим, что отрицательные значения аномального гравитационного поля расположены как над блоками

высокого ЭС, так и над зонами низкого ЭС, и его поведение слабо связано с электрическими характеристиками разреза.

Рассмотрение геоэлектрического разреза земной коры показывает, что его строение значительно расходится с данными ГСЗ [3], совпадая лишь в отдельных частях. Совпадением можно считать повышенную мощность земной коры и слоя высокого ЭС свыше 1000 Ом·м под центральной частью САОП и их уменьшение под Ханкайским супертеррейном. Основное различие наблюдается в прибрежной зоне, где по данным ГСЗ происходит уменьшение мощности земной коры, а по данным МТЗ – увеличение мощности слоя высокого ЭС.

Верхняя мантия

Геоэлектрический разрез верхней мантии имеет сложное строение. В основании земной коры, аппроксимируемой слоем с ЭС свыше 1000 Ом·м, и до глубины около 80 км располагаются две области низкого и пониженного ЭС от первых десятков Ом·м до 200–300 Ом·м, а глубже залегает область с более высоким ЭС от 300 до 500 Ом·м. Области низкого ЭС разделены зоной повышенных ЭС от 500 до 1000 Ом·м. Еще одна зона повышенного ЭС располагается в 30–40 километровом прибрежном блоке, образуя единую область повышенного ЭС неоднородного строения. Наличие этой области подтверждается результатами МТЗ в южной части Приморья на профиле, начинающемся на Ханкайском супертеррейне (западнее оз. Ханка) и оканчивающемся на побережье Японского моря [10]. Природа ее трактуется нами как остатки плиты древней зоны субдукции и основана на модели развития Восточного Сихотэ-Алиня, предложенной и разработанной в работах [8, 9, 11]. Характер распределения ЭС показывает структуру двух каналов или слэб-виндоу, расположенных в западной и восточной частях профиля, по которым из верхней мантии, с глубин свыше 150 км, поступают материалы, имеющие большую температуру и флюидонасыщенность, что приводит к понижению ЭС. Доказательством этого являются геологические, петрологические, сейсмологические данные и геодинамические построения, согласующиеся с представленной моделью, детально рассмотренные в предыдущих работах [6, 7].

Сравнение геоэлектрических разрезов Северного и Южного Сихотэ-Алиня

Сравнивая геоэлектрические разрезы литосферы Северного [6], Южного [7] Сихотэ-Алиня и настоящей работы, можно отметить как их некоторое сходство, так и различия. На всех трех разрезах, несмотря на значительное расстояние друг от друга, в

верхней части выделяется слой высокого ЭС свыше 1000 Ом·м, который отождествляется с земной корой, имеет мощность от 20 до 50 км и состоит из блоков, разделенных субвертикальными или наклонными зонами низкого ЭС, уходящими в верхнюю мантию. Эти зоны низкого ЭС часто совпадают, но не всегда, с основными разломными зонами. Один из главных разломов САОП, Центральный Сихотэ-Алинский, не выделяется на геоэлектрических разрезах. Границы блоков высокого ЭС редко согласуются с границами террейнов.

Верхний слой высокого ЭС подстилается до глубины 80 км неоднородной проводящей областью с ЭС от первых десятков Ом·м до первых сотен Ом·м. Наиболее сложное строение этой области отмечается на профилях Спасск-Дальний – бух. Зеркальная и настоящей работы, где выделяются зоны повышенного ЭС до 1000 Ом·м.

В основании разрезов залегает область повышенного ЭС 300–500 Ом·м, которая осложнена секущими ее зонами более низкого ЭС. Характерной особенностью всех разрезов является наличие в прибрежной части зоны повышенного ЭС шириной 30–40 км, опускающейся от верхнего блока высокого ЭС в земной коре к нижнему блоку повышенного ЭС в верхней мантии, образуя единую область повышенного ЭС, имеющую, как отмечалось выше, неоднородное строение.

Основной отличительной особенностью геоэлектрических разрезов Северного [6], Южного [7] Сихотэ-Алиния и настоящей работы заключается в том, что первый из них полностью расположен в САОП, а два других частично выходят на Ханкайский супертеррейн.

Ханкайский супертеррейн имеет высокие ЭС от 1000 до 10 000 Ом·м, характеризуется неоднородным строением и состоит из блоков, разделенных разломами с низкими ЭС от первых Ом·м до первых сотен Ом·м. Электрическое сопротивление Среднеханкайского разлома, который является границей между блоками Ханкайского супертеррейна, выходящими на поверхность, и опущенными блоками, перекрытыми структурами деформированного чехла, отличается для различных его частей. На юге в верхней мантии под Ханкайским супертеррейном выделяются области повышенных ЭС от 500 до 1000 Ом·м, которые в его северной части понижаются до 400–450 Ом·м.

Тектоническое строение САОП, при рассмотрении с севера на юг, упрощается, происходит уменьшение числа террейнов, входящих в его состав. Всеми тремя профилями пересечены Самаркинский и Журавлевско-Амурский террейны. Самаркинский

террейн в основном характеризуется повышенными ЭС свыше 10 000 Ом·м, а иногда превышающими 100 000 Ом·м, например, в северной его части на Анюйском выступе. Строение террейна неоднородное и осложнено разломами, которые характеризуются низкими ЭС 50–100 Ом·м. Журавлевско-Амурский террейн характеризуется повышенными ЭС до 50 000 Ом·м, особенно в районах, примыкающих к ЦСАР. Здесь же отмечается и наибольшая мощность блоков повышенного ЭС. Строение его неоднородное и осложнено зонами пониженного ЭС, которые не связаны с основными разломами.

В прибрежной части САОП расположены Кемский и Таухинский террейны, части которых перекрыты ВСАВП. На всех трех разрезах здесь отмечается наличие блоков земной коры высокого ЭС от 5000 и более Ом·м, которые, с понижением сопротивления до 300–500 Ом·м, проникают в верхнюю мантию и протягиваются под континент. Западная граница ВСАВП контролируется субвертикальной зоной пониженного сопротивления в первые сотни Ом·м и, вероятно, связана с глубинными разломами, которые и являлись каналами поступления вещества из верхней мантии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате магнитотеллурических зондирований по профилю, начинающемуся на севере Ханкайского супертеррейна, пересекающему Сихотэ-Алинский орогенный пояс и заканчивающемуся на побережье Японского моря, был построен геоэлектрический разрез литосферы до глубины 150 км.

Земная кора характеризуется высокими значениями ЭС свыше 1000 Ом·м, имеет блоковое строение и переменную мощностью от 20 до 40 км. Границами блоков являются зоны низких или пониженных ЭС, в основном совпадающие с главными разломами. Центральный Сихотэ-Алинский разлом на геоэлектрическом разрезе как зона низких ЭС не выделяется. Выявлена одна граница между блоками, которая не связана с выделенными по геологическим данным разломами (пункты МТЗ 43–42). Природа ее не определена.

В земной коре и верхней мантии выделено три зоны аномально низкого ЭС от первых десятков Ом·м до 100 Ом·м.

В прибрежной зоне выделен блок повышенного ЭС в верхней мантии шириной 30–40 км, соединяющийся с областью повышенного ЭС, лежащей в основании геоэлектрического разреза на глубинах 80–150 км и протягивающейся в западном направлении под континент. Природа ее трактуется как остатки плиты древней зоны субдукции, в которой выделено два канала пониженного ЭС, связываемые со слэб-виндоу.

Сопоставление трех геоэлектрических разрезов литосферы, построенных для северной и южной частей Сихотэ-Алинского орогенного пояса, показало, что земная кора имеет высокое ЭС свыше 1000 Ом·м и блоковое строение, границами между ними являются субвертикальные или наклонные зоны низких ЭС. Эти границы в основном совпадают, но не всегда, с основными разломными зонами. Верхняя мантия южной части САОП имеет более сложное строение, чем северной. В пределах всего САОП на глубине 80–150 км выделяется область повышенного ЭС 300–500 Ом·м, которая имеет неоднородное строение и воздымается к подошве земной коры в прибрежной части САОП. Сопоставление геоэлектрических разрезов с тектоническим строением САОП показывает, что электрические характеристики террейнов изменяются вдоль его простирания, а отчетливо выраженных границ между ними не выявлено.

Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН» г. Хабаровск.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ №16-17-00015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 1–572.
3. Глубинное строение Приморья (по данным ГСЗ). М.: Наука, 1976. 92 с.
4. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Лист L-(52),53; (K-52,53) (оз. Ханка). СПб.: ВСЕГЕИ, 2011.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Лист L-(52), 53; (K-52, 53). оз. Ханка: Объясн. записка. СПб.: Картогр. ф-ка ВСЕГЕИ, 2011. 684 с. + 8 вкл.
6. Каплун В.Б., Бронников А.К. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии Северного Сихотэ-Алиня по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 4. С. 18–37.
7. Каплун В.Б., Бронников А.К. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алиня по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2018. (в печати).
8. Мартынов Ю.А., Ханчук А.И. Кайнозойский вулканизм Восточного Сихотэ-Алиня: результаты и перспективы петрологических исследований // Петрология. 2013. Т. 21, № 1. С. 84–108.
9. Мартынов Ю.А., Голозубов В.В., Ханчук А.И. Мантийный диапиризм в зонах конвергенции литосферных плит // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 5. С. 947–961.
10. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Старжинский С.С. Глубинная геоэлектрическая структура и сейсмичность Приморья (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25, № 4. С. 18–25.
11. Ханчук А.И., Мартынов Ю.А. Тектоника и магматизм границ скольжения океанических и континентальных литосферных плит // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы Всерос. конф. с междунар. участием, г. Владивосток, 20–23 сентября 2011 г. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 45–49.
12. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosci. 2014. V. 66. P. 40–53.

*Рекомендована к печати А.Н. Диденко
после доработки 20.02.2019 г.
принята к печати 24.05.2019 г.*

V.B. Kaplun and A.K. Bronnikov

The crust and upper mantle structure of the Southern Sikhote Alin along the profile Dal'nerechensk – Roshchino – Plastun from magnetotelluric sounding data

Magnetotelluric soundings (MTS) were carried out in a broad frequency range from 104 to 10⁻³ Hz at a total of fifty-five sounding sites spaced about 5 km apart along the profile Dal'nerechensk – Roshchino – Plastun across the strike of the Sikhote Alin Orogenic Belt (SAOB). Based on the results of data interpretation, the crust and upper mantle geoelectric section has been constructed down to a depth of 150 km. The section shows the crust of variable thickness between 20 and 40 km with a resistivity of higher than 1000 Ohm·m, which consists of different-resistivity blocks bordered by the subvertical and inclined low-resistivity zones, from tens to a few hundreds of Ohm·m. Three abnormal resistivity zones were revealed in the crust and upper mantle. The upper mantle structure is nonuniform. Beneath the western and eastern parts of the SAOB, the lowest resistivity values were observed at 40–80 km depths. A high-resistivity zone of 300–500 Ohm·m, stretching in the westerly direction from the coast beneath the Khanka super terrane, was identified in the 80–150 km depth range. This area is treated as remnants of the plate of an ancient subduction zone where two low-resistivity canals are distinguished that are associated with a slab-window. The results obtained for the northern and southern parts of the SAOB are compared and their similarities and dissimilarities are ascertained.

Key words: magnetotelluric soundings, deep structure, Earth's crust, upper mantle, deep faults, southern SikhoteAlin.