Работы молодых ученых

УДК [550.834.8+550.837.211] (571.62) DOI: 10.31431/1816-5524-2021-2-50-84-94

ОПЫТ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО И МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА УЧАСТКЕ СЕВЕРНОГО ФЛАНГА ЦЕНТРАЛЬНОГО СИХОТЭ-АЛИНСКОГО РАЗЛОМА

© 2021 В.В. Пупатенко[1], К.С. Рябинкин[1], А.К. Бронников[1], А.Л. Верхотуров[2]

[1]Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, Хабаровск, Россия, 680000; pvv2.dv@gmail.com
[2]Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия, 680000

Представлены результаты исследования строения земной коры на участке северного фланга Центрального Сихотэ-Алинского разлома (ЦСАР) методами микросейсмического зондирования (МСЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ). Построены и интерпретированы геоэлектрический разрез по данным МТЗ и разрез относительных скоростей поперечных волн по данным МСЗ на глубину до 9 км и протяженностью 42 км. Основные блоки, их границы, разломные зоны и некоторые зоны аномалий, выделенные методами МТЗ и МСЗ, практически совпадают. Зона ЦСАР выражена узкой субвертикальной зоной пониженных скоростей и представляет собой границу между блоками высокого сопротивления. Полученные данные свидетельствуют о непроницаемости разломной зоны в районе исследований. В 6 км к северо-западу от зоны ЦСАР выделена похожая структура, которая прослеживается на вдвое большую глубину (до 20 км). Сделан вывод о перспективности комплексирования методов МСЗ и МТЗ для изучения строения земной коры в разломных зонах.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, микросейсмическое зондирование, Центральный Сихотэ-Алинский разлом.

ВВЕДЕНИЕ

Сихотэ-Алинский орогенный пояс (САОП) — одна из крупнейших активных геотектонических структур на Дальнем Востоке России. В его пределах располагается ряд крупных глубинных разломов, наиболее протяженным из которых является Центральный Сихотэ-Алинский разлом (ЦСАР). Сейсмическая опасность разлома достаточно велика (Николаев и др., 1989), что подтверждается палеосейсмологическими исследованиями на его южном и северном флангах (Овсюченко и др., 2018; Олейников, Олейников, 2001, 2009). При этом причины слабой геодинамической активности и сейсмического «молчания» разлома в течение последних 150 лет пока остаются неизвестными.

Исследование глубинного строения зон основных разломов геофизическими методами и интерпретация полученных данных необходимы для определения геодинамической активности разломных зон, изучения феномена сейсмического затишья и достоверной оценки сейсмической опасности территории. Комплексирование геофизических методов — один из способов преодоления неоднозначности решения обратной задачи и построения более точных и обоснованных моделей среды.

В работе приведены результаты исследования участка северного фланга ЦСАР методами микросейсмического и магнитотеллурического зондирований. Комплексирование указанных методов проведено впервые для двух разрезов с практически полным пространственным совпадением.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ

Достаточно полную информацию о геологическом строении и геофизической изученности САОП можно найти, например, в работах (Геодинамика..., 2006; Каплун, 2017). Приведем кратко только некоторые сведения, в первую очередь относящиеся к ЦСАР.

САОП ограничен с севера Пауканским и Лимурчанским разломами, отделяющими его от Монголо-Охотского орогенного пояса, с запада от Бурея-Ханкайскогоорогенного пояса его отделяют Арсеньевский, Алчанский, Куканский разломы. На юге и востоке САОП ограничен водами Японского моря и Татарского пролива, а по данным (Салун, 1978) его граница проходит вдоль Восточно-Сихотэ-Алинского и Монеронского разломов. Вдоль восточной окраины САОП протягивается Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс. Западная и северо-западная границы частично перекрыты Восточно-Азиатским грабеновым поясом, включающим Среднеамурский осадочный бассейн (Варнавский, Малышев, 1986) (рис. 1).

ЦСАР — крупнейший и наиболее протяженный глубинный разлом САОП. Это левый сдвиг протяженностью не менее 1000 км с амплитудой до 200 км, прослеживающийся от залива Петра Великого на юге Приморского края до р. Амур (Геологическая..., 1999; Забродин и др., 2015). Северное продолжение ЦСАР – Лимурчанский разлом, доходит как минимум до побережья Охотского моря на севере Хабаровского края (Геодинамика..., 2006). По другим представлениям, ЦСАР делится Тумнинским поперечным разломом на два участка: южный — непосредственно Центральный Сихотэ-Алинский разлом с северо-северо-восточным направлением и северный — меридиональный Нижнеамурский разлом (Салун, 1978). Как левый сдвиг ЦСАР начал формироваться не позднее юры (Забродин и др., 2015). Наиболее значительные перемещения по разлому приходятся на интервал времени от юры до палеоцена (Забродин и др., 2015).

В районе исследований проводились гравиметрическая и магнитная съемка вдоль профиля глубинного сейсмического зондирования Литовко — Иннокентьевский (Потапьев, 1977, 1980), также имеется несколько профилей,

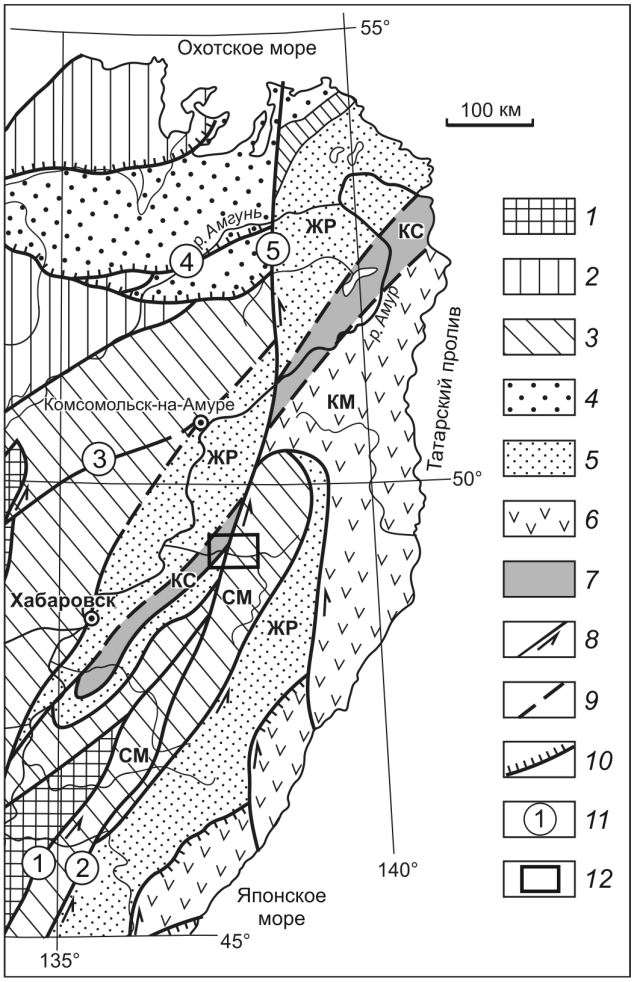

Рис. 1. Фрагмент тектонической схемы Сихотэ-Алинского орогенного пояса и прилегающих территорий, по (Геодинамика..., 2006). *1* — докембрийские и раннепалеозойские кратоны и супертеррейны, *2* — палеозойские террейны; *3–4* — юрские террейны (фрагменты): *3* — аккреционных призм (СМ — Самаркинский), *4* — приконтинентального турбидитового бассейна; *5–7* — раннемеловые террейны — фрагменты: *5* — приконтинентального синсдвигового турбидитового бассейна (ЖР — Журавлевско-Амурский), *6* — баррем-альбской островодужной системы (КМ — Кемский), *7* — альбской аккреционной призмы (КС — Киселевско-Маноминский); *8–9* — левые сдвиги: *8* — основные, *9* — второстепенные; *10* — надвиги; *11* — основные разломы: 1 — Арсеньевский, 2 — Центральный Сихотэ-Алинский, 3 — Курский, 4 — Пауканский, 5 — Лимурчанский; *12* — местоположение сейсмического профиля и участка геоэлектрического профиля.

Fig. 1. Fragment of the tectonic map of the Sikhote-Alin orogenic belt and adjacent areas, by (Geodynamics..., 2006): *1* — Precambrian and Early Paleozoic cratons and superterranes, *2* — Paleozoic terrane; *3–4* — Jurassic terranes (fragments): *3* — fragments of accretionary prisms (SM—Samarka), *4* — near-continental turbidite basin; *5–7* — fragments of Early Cretaceous terranes: *5* — near-coninental synstrike-slip turbidite basin (ZHR—Zhuravlevka-Amur), *6* — Barremian-Albian island-arc system (KM — Kema), *7* — Albian accretionary prism (KS — Kiselevka-Manoma); *8–9* — left-lateral strike-slip faults: *8* — major, *9* — minor; *10* — thrust faults; *11* — main faults: 1 — Arsenyev, 2 — Central Sikhote-Alin, 3 — Kur, 4 — Paukan, 5 — Limurchan; *12* — locatioin of the seismic profile and the segment of the geoelectric section.

отработанных методом обменных волн землетрясений (МОВЗ) (Кузнецов, 1998, 2001), и профилей, выполненных методом магнитотеллурического зондирования (МТЗ) (Каплун, 1998; Николаев и др., 2000; Поспеев, 1987).

САОП на всем протяжении характеризуется пониженными значениями регионального гравитационного поля. Земная кора под САОП относится к переходному типу (Потапьев, 1980), ее толщина по данным ГСЗ составляет 36 км и уменьшается до 34 км под побережьем Татарского пролива и до 30 км под Среднеамурским осадочным бассейном (Потапьев, 1980).

Результаты МТЗ, полученные в различных частях северной части САОП и различных тектонических обстановках, показывают, что земная кора в среднем обладает высокими сопротивлениями от 1000 Ом·м и характеризуется сильной трехмерной неоднородностью. Выделяется несколько уровней проводимости литосферы, которые связаны с различными объектами, отождествляемыми с зонами деструкции и частичного плавления (Каплун, Бронников, 2017).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полевые работы методом МТЗ были проведены за два летних сезона 2013-2014 гг. по профилю с. Троицкое — с. Лидога — п. Ванино (Каплун, 2017; Каплун, Бронников, 2017). Весь профиль включал 57 пунктов зондирований со средним расстоянием около 5 км. Длина профиля составила около 315 км при расстоянии между начальным и конечным пунктами 270 км. Положение рассматриваемого участка профиля в районе ЦСАР показано на рис. 1 и 2. Профиль представляет собой ломаную линию, соединяющую точки МТЗ.

Во время работ использовалась аппаратура канадской фирмы «Phoenix Geophysics»: измерительная станция MTU5 и индукционные датчики магнитных компонент электромагнитного поля AMTC-30 (от 10000 Гц до 1 Гц) и MTC-50H (от 1000 Гц до 0.00002 Гц). Регистрировались колебания в диапазоне частот от 0.001 Гц до 10000 Гц. Более подробно исходные данные и методика обработки и инверсии данных МТЗ приведена в статье (Каплун, Бронников, 2017). Приведем некоторые необходимые сведения, в том числе о кривых МТЗ и параметрах базовой модели.

Форма амплитудных кривых МТЗ рассматриваемого участка профиля (рис. 3) изменяется с северо-запада на юго-восток относительно плавно. На большей части кривых выделяется восходящая левая ветвь, максимум в центральной части и ниспадающая правая ветвь. Уровни сопротивлений поперечных и продольных кривых близки. В пункте 30 наблюдается пологое залегание продольных и поперечных кривых. Начиная с пункта 3 происходит постепенное увеличение уровня сопротивлений обеих кривых с локальными максимумами в пунктах 22 и 48.

Расчет магнитовариационных параметров неоднородности Nmv и асимметрии skewmv, магнитотеллурического параметра неоднородности Nmt и параметров асимметрии Свифта skewS и Бара skewB был проведен в работе (Каплун, Бронников, 2017), в том числе и для исследуемого участка профиля. Анализ параметров показывает, что на изучаемом участке профиля среда может рассматриваться как симметричная двумерная в диапазоне от 10000 Гц до 0.1–1 Гц, а для более низких частот — как ассиметричная трехмерная. Поскольку обработка велась по всему профилю в целом (57 точек) и на всем диапазоне частот, использовалась трехмерное моделирование, которое на рассматриваемом участке идентично двумерному. Инверсия была проведена в программе ModEM (Egbert, Kelbert, 2012; Kelbert et al., 2008, 2014). Для расчета использовались данные импеданса в диапазоне частот от 0.001 Гц до 10000 Гц. В качестве базовой использовалась модель полупространства с сопротивлением 500 Ом·м. Для учета влияния моря в восточной части модели был добавлен блок мощностью 544 м и сопротивлением 0.3 Ом·м. Горизонтальная сетка состояла из массива 88×32 ячеек с шагом в основной части 5 км, вертикальная — из 23 слоев с шагом, увеличивающимся в 20.5 раз, начиная с 544 м.

Метод микросейсмического зондирования (МСЗ) — один из пассивных сейсмических методов, в котором изучаются вариации спектрально-амплитудных характеристик низкочастотных микросейсмических колебаний (Горбатиков и др., 2008; Горбатиков, Цуканов, 2011; Жостков и др., 2015). В его основе лежит зависимость между амплитудой поверхностных волн Рэлея некоторой частоты и скоростью распространения поперечных волн в среде. Каждой длине волны Рэлея соответствует некоторая глубина, на которой влияние скоростных неоднородностей на амплитуду волны максимально. В методе МСЗ используются вертикальные записи низкочастотных микросейсм (периоды от 1 с до 10–30 с), поскольку, во-первых, микросейсмическое поле на сравнительно небольших масштабах может считаться однородным, а во-вторых, основной вклад в вертикальные колебания вносит именно фундаментальная мода волн Рэлея, вклад высших мод волн Релея, волн Лява и объемных волн несущественен.

Метод МСЗ появился и развивался как эмпирический. Впоследствии его справедливость была подтверждена сначала результатами численного моделирования (Горбатиков, Цуканов,

2011; Цуканов, Горбатиков, 2015), а после и теоретически (Яновская, 2017). Появление результатов моделирования и развитие теоретической базы принципиально не изменили первоначальные эмпирические предпосылки МСЗ, а также связанные с ними технологии полевых измерений и обработки результатов.

Метод МСЗ позволяет получить глубинные разрезы относительных значений скоростей поперечных волн, т.е. отклонений скоростей от некоторой средней региональной модели. Они могут использоваться для качественной геологической интерпретации и наилучшим образом подходят для выделения субвертикальных неоднородностей. Получаемые разрезы характеризуются горизонтальным разрешением в 0.25–0.3 длины волны (Горбатиков, Цуканов, 2011; Цуканов, Горбатиков, 2015; Яновская, 2017), что в несколько раз превышает возможности фазовых методов (Горбатиков, Цуканов, 2011; Жостков и др., 2017). Изолированные неоднородности остаются различимы даже если они имеют размер менее 0.1 от длины волны (Горбатиков, Цуканов, 2011).

Полевые работы методом МСЗ проводились в июне 2017 г. по профилю с. Лидога — п. Ванино, т.е. по тому же профилю, где выполнялись измерения методом МТЗ, но только на протяжении 45 км, в районе пересечения профилем ЦСАР (рис. 2). Использовались три комплекта сейсмического оборудования: широкополосные сейсмометры REFTEK 151-120 и регистраторы REFTEK 130-01. Измерения производились последовательно на всех 45 точках профиля со средним шагом в 1 км. При построении профиля были использованы 33 точки (рис. 3), в десяти из которых измерения проводились в течение 10–12 часов в ночное время суток, а на остальных — от полутора до трех часов. Для учета изменений микросейсмического поля во времени использовались непрерывные записи с базовой станции, которая располагалась в непосредственной близости от места измерений.

Обработка измерений сводилась к расчету спектров, их корректировке на записи, полученные базовой станцией, и пересчету значений спектральной частоты в значения глубины. В результате получена двумерная модель вариаций скоростей поперечных волн.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Построенный геоэлектрический разрез приведен на рис. 4*а*. Профиль пересекает ЦСАР

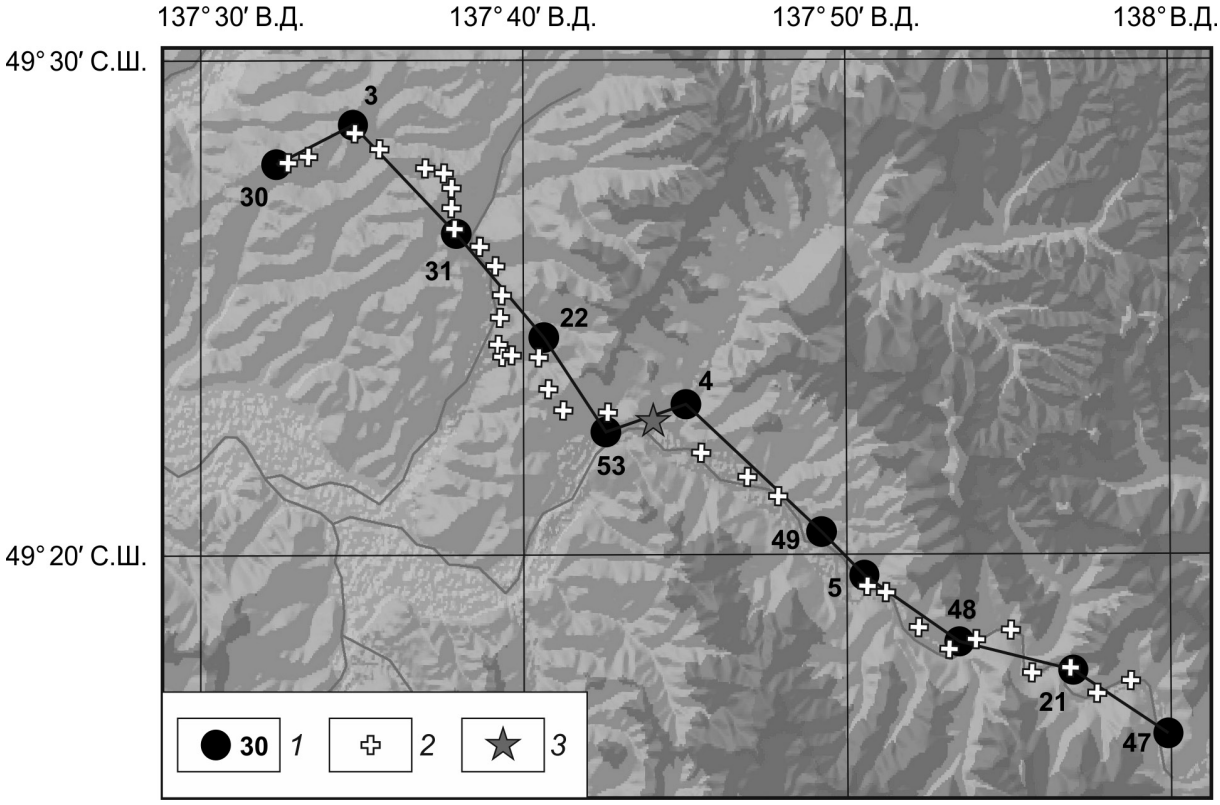

Рис. 2. Положение точек зондирований магнитотеллурическим и микросейсмическим методами: *1* — точки МТЗ и их номера; *2* — точки МСЗ; *3* — базовая станция МСЗ.

Fig. 2. Location of the magnetotelluric and microseismic soundings points: *1* — MTS points with their numbers; *2* — MSS points; *3* — MSS base station.

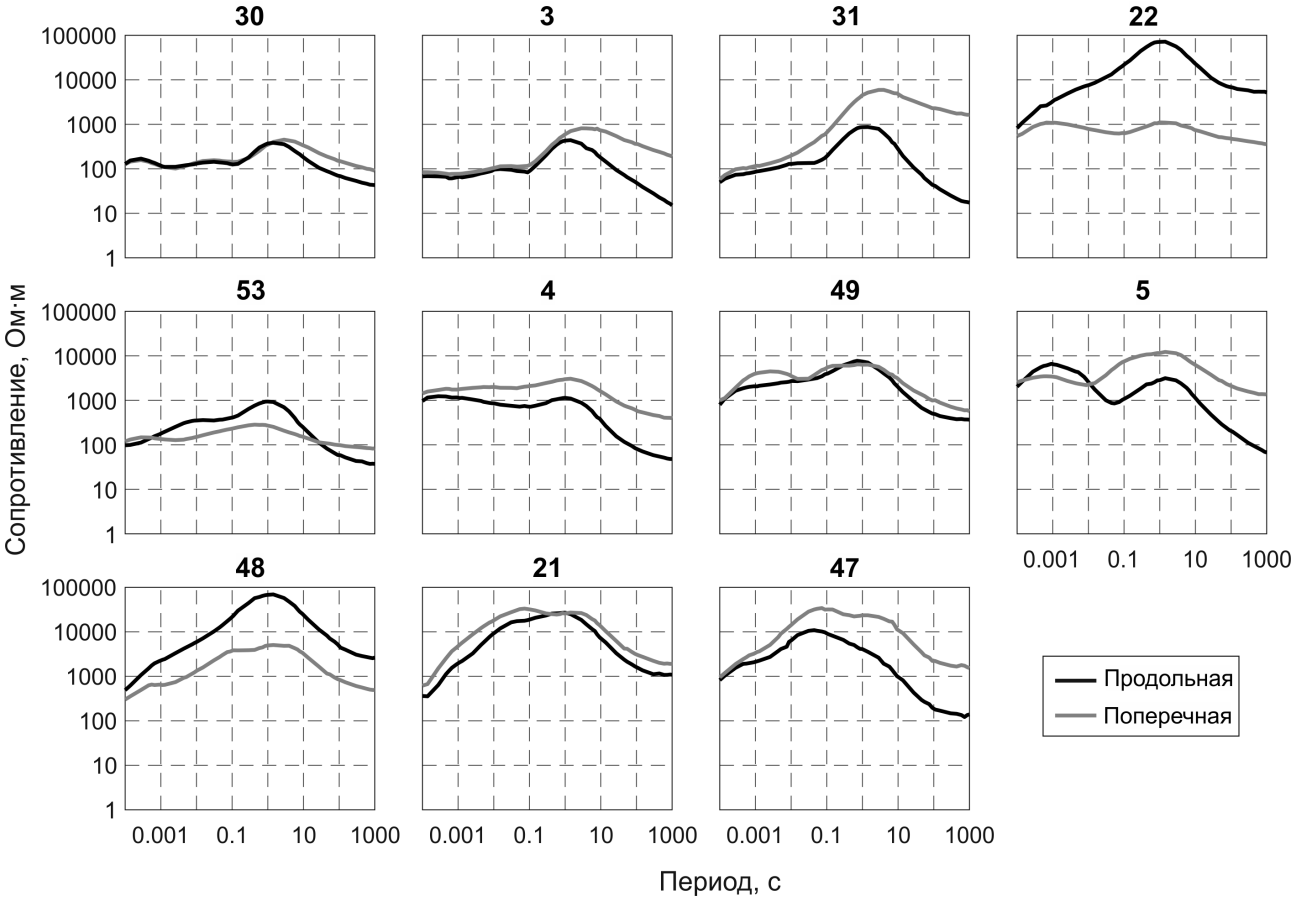

Рис. 3. Амплитудные кривые МТЗ рассматриваемого участка профиля.

Fig. 3. Amplitude MTS curves for the considered part of the profile.

на 12.5 км (Забродин и др., 2015). На скоростном сейсмическом разрезе, полученном методом МСЗ (рис. 4*б*), цветом показаны относительные спектральные амплитуды после корректировки временных вариаций. Меньшие значения соответствуют зонам повышенных скоростей поперечных волн, большие — зонам пониженных скоростей. Сейсмический профиль «привязан» к геоэлектрическому, а каждая его точка была спроецирована на трассу геоэлектрического профиля.

Геоэлектрический разрез отчетливо делится на три части. Границей между первыми двумя частями является участок зоны ЦСАР, который состоит из блоков высокого сопротивления до 9000 Ом·м. В верхней части этой зоны выделяется блок низкого сопротивления (200–400 Ом·м), уходящий с поверхности до глубины 2.4 км. Северо-западней зоны ЦСАР разрез представлен наклонным слоем низкого сопротивления (50–300 Ом·м), и подстилающим его высокоомным слоем (от 1000 до 10000 Ом·м). Средняя часть разреза состоит из блоков высокого сопротивления. В ней выделяются два слоя, разделенные наклонной границей: верхний слой сложен блоками сопротивлением в несколько тысяч Ом·м, сопротивление нижележащих уровней разреза превышает 30000 Ом·м и увеличивается с глубиной.

Юго-восточная часть разреза представлена высокоомным слоем с сопротивлением свыше 40000 Ом·м, уменьшающимся до 30000 Ом·м на поверхности. Согласно геологической карте (Геологическая..., 1999), этот участок разреза соответствует Анюйскому выступу — структуре, сложенной высокометаморфизированными породами (Крук и др., 2014), что, по всей видимости, и является причиной столь высоких для земной коры сопротивлений. Северо-западная граница этого блока вертикальна на глубинах от 4 км, а ближе к поверхности наклонена на юго-восток. Юго-восточная граница блока субвертикальная и резкая, прослеживается до глубины 6 км.

В сейсмическом разрезе выделяется ряд элементов. Во-первых, это зона ЦСАР, проявляющаяся достаточно узкой зоной пониженных скоростей на 12–13.5 км разреза, но только на глубинах более 4 км. Вторая аналогичная зона расположена северо-западнее (6–7 км) и, вероятно, не связана с известными, даже второстепенными разломами. Эта зона также проявляется на

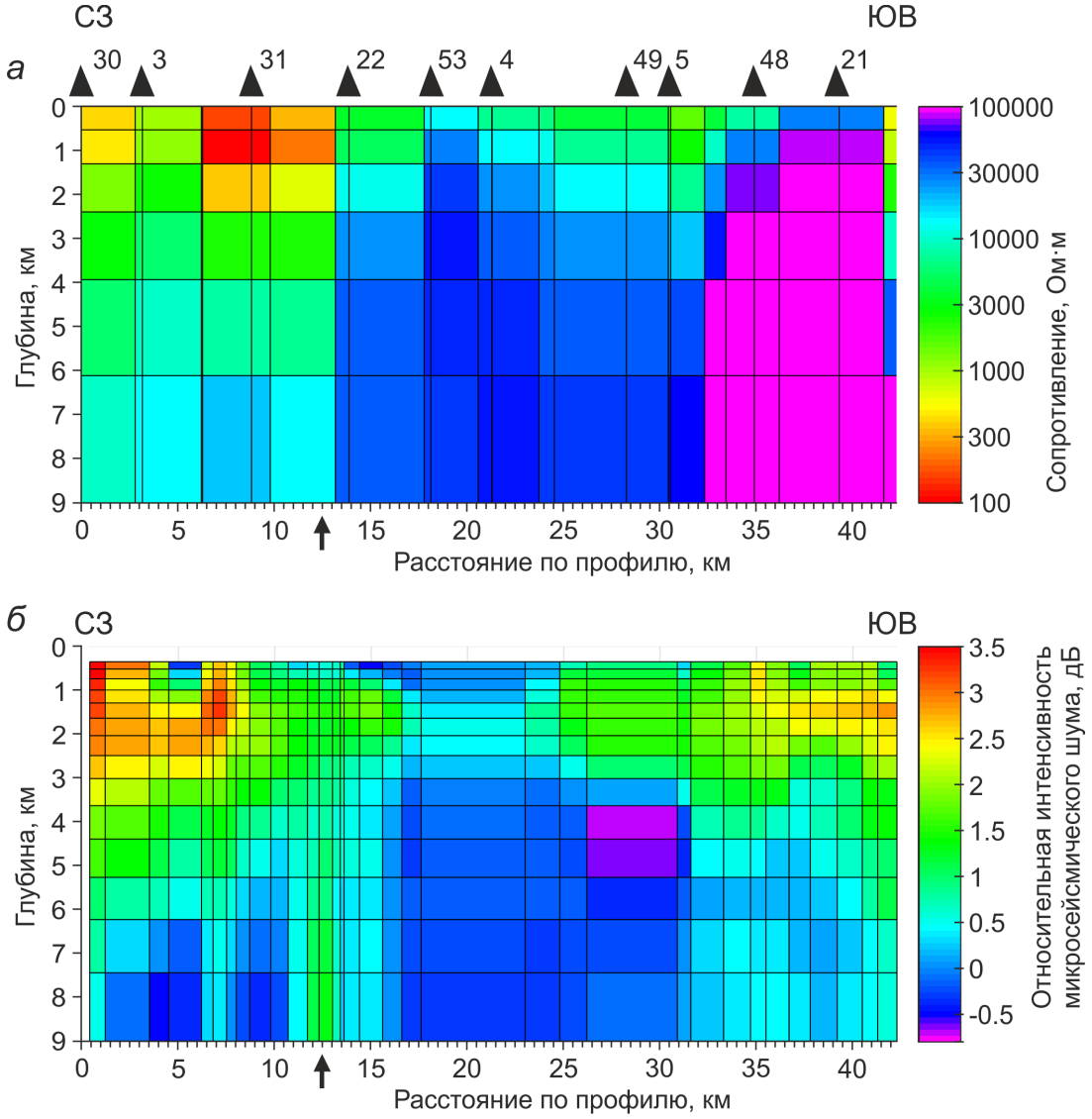

Рис. 4. Геофизические разрезы по профилю с. Лидога — п. Ванино в районе Центрального Сихотэ-Алинского разлома (положение разлома показано стрелками): *а* — геоэлектрический разрез, построенный по результатам трехмерного моделирования данных МТЗ (треугольники — точки МТЗ); *б* — сейсмический разрез относительных скоростей поперечных волн, построенный по данным микросейсмических зондирований (большим значениям соответствуют низкие скорости и наоборот).

Fig. 4. Geophysical sections along the profile Lidoga — Vanino near Central Sikhote-Alin Fault (shown by arrows): *a* — geoelectric section, constructed according to the results of 3D modeling of MTS data (triangles are MTS spots); *b* — seismic section of the relative velocities of P-waves, constructed according to microseismic sounding data (larger values correspond to low velocities and vice versa).

глубинах до 3 км как зона наименьших по всему разрезу скоростей и доходит до северо-западного края разреза. На глубине более трех километров наблюдаются градиенты скоростей поперечных волн: скорость медленно понижается при удалении от ЦСАР, одновременно увеличиваясь с глубиной. К юго-востоку от ЦСАР наблюдается локальный скоростной максимум на глубинах 0.4–1 км, граница которого, понижаясь, соединяется с продолжением вышеуказанного градиента приблизительно на 20 км профиля.

В центральной части сейсмического разреза (17–31 км) ряд точек не прошли контроль качества, в основном из-за неудачного выбора мест установки сейсмостанций. В результате, разрез в центральной части построен по малому количеству точек (5 вместо ожидаемых 12–15) и его пространственное разрешение невысокое. В этой зоне на глубинах 3–9 км расположен относительно однородный высокоскоростной блок с максимальными скоростями на глубине 4–5 км. Юго-восточная граница этого блока наблюдается на 31.5 км разреза, а верхняя граница имеет наклон на юго-восток. Эта граница продолжается, хотя и не так явно, до края разреза. Ниже ее располагается практически однородная

зона повышенных скоростей. На последних 5 км разреза на глубинах 1–2 км отмечается локальная низкоскоростная аномалия.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На построенных сейсмическом и геоэлектрическом разрезах выделяются одни и те же основные блоки, хотя есть некоторые отличия в положении их границ и небольших локальных аномалий. Так, высокоскоростному блоку в центральной части разреза МСЗ соответствует блок высоких сопротивлений, их границы достаточно точно совпадают. Северо-западная часть разрезов характеризуется одинаковым направлением осей градиентов сопротивления и скорости. Низкоскоростной поверхностной аномалии на 6–7 км разреза соответствует зона низких сопротивлений.

В юго-восточной части геоэлектрического разреза отсутствуют элементы, соответствующие локальной низкоскоростной аномалии, фиксируемой на 36–42 км разреза на глубинах 1–2 км. Верхняя и юго-восточная границы блока с сопротивлением более 40000 Ом·м практически никак не выражены на разрезе МСЗ.

Определяемое по сейсмическим и геоэлектрическим данным место пересечения профиля и Центрального Сихотэ-Алинского разлома совпадает. При этом из-за большего размера блоков в инверсии данных МТЗ присутствует неопределенность порядка 2 км. На геоэлектрическом разрезе участок ЦСАР не выделяется вертикальной зоной низких сопротивлений, а представляет собой границу между блоками, сопротивление которых отличается на соответствующих глубинах в 4–15 раз. На сейсмическом разрезе присутствует вертикальная зона пониженных скоростей, однако само понижение скорости невелико и прослеживается только на глубинах от 4 км.

Исходя из современных карт разломной тектоники (Забродин и др., 2015), профили пересекают только зону ЦСАР. Область пониженных скоростей на 6–7 км разреза МСЗ может быть интерпретирована как второстепенный разлом, ранее не отмеченный на картах. Возможно, эта зона является ветвью ЦСАР или расположенного западнее Маноминского разлома. На геоэлектрическом разрезе также выделяется контраст сопротивлений, хотя и более слабый. Как следует из разреза МТЗ, построенного по тем же исходным данным на большую глубину (рис. 5), зона ЦСАР как граница между блоками отчетливо прослеживается лишь до глубины 9 км, в то время как граница, выделенная на 6–7 км разреза, отчетливо прослеживается до глубины 20 км, а на глубинах в 4–9 км представляет собой узкую зону более низких, чем в соседних блоках, сопротивлений. Других элементов, которые могут быть интерпретированы как зоны разломов, в изученных разрезах нет.

В настоящее время исследованный участок ЦСАР является фактически асейсмичным, так же, как и практически весь ЦСАР (Сафонов, 2018) (здесь и далее Лимурчанский разлом как продолжение ЦСАР к северу от р. Амур не рассматривается).

Современные каталоги землетрясений содержат только три землетрясения с магнитудой M ⩾ 4,

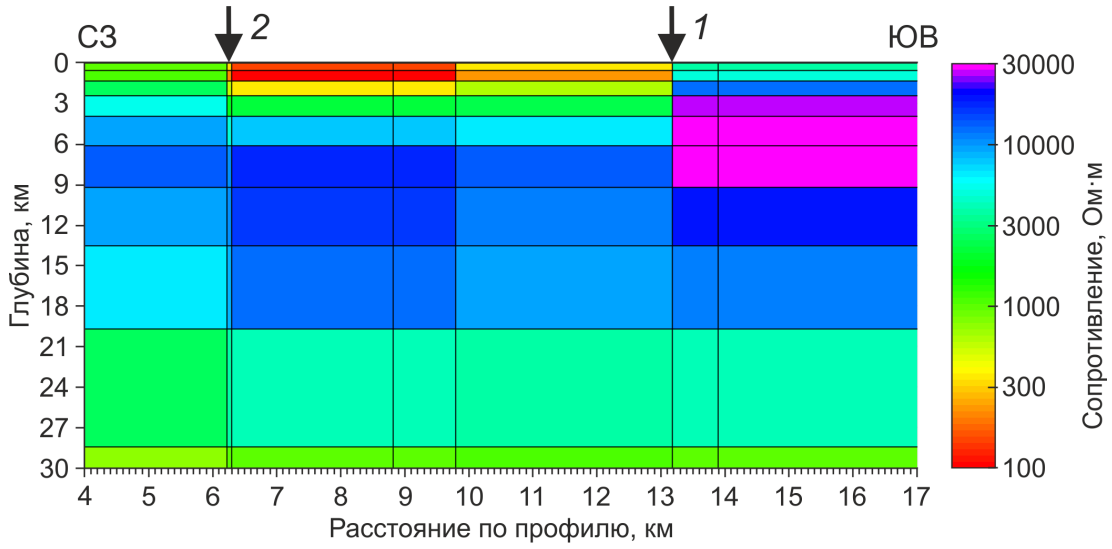

Рис. 5. Фрагмент северо-западной части геоэлектрического разреза до глубины 30 км: *1* — положение Центрального Сихотэ-Алинского разлома; *2* —аномальная структура.

Fig. 5. North-west part of the geoelectric section down to a depth of 30 km: *1* — location of the Central Sikhote-Alin Fault; *2* — anomalous structure.

которые теоретически могут быть связаны с зоной ЦСАР, однако ни одно из них не произошло в северной (>47.5° с.ш.) части разлома (Сафонов, 2018). Все сейсмические станции за весь период инструментальных наблюдений располагались на значительном удалении от северной части ЦСАР. По этой причине здесь никогда не регистрировались без пропусков землетрясения с магнитудой ниже 2.6–3.2 (Левин и др., 2008), и информация о слабой сейсмичности территорий, прилегающих к северной части ЦСАР практически отсутствует. Во время проведения полевых работ методом МСЗ были зарегистрированы только несколько землетрясений с эпицентральными расстояниями более 300 км. При этом, исходя из графиков повторяемости землетрясений для Приамурья (Левин и др., 2008; Сафонов, 2018), вероятность за шесть суток зафиксировать хотя бы одно локальное землетрясение была низкой.

Разломная зона ЦСАР, начиная с глубины 2 км, сейсмически монолитна и не насыщена глубинными флюидами. Это следует из отсутствия зоны низких сопротивлений (по данным МТЗ) и небольшого понижения скоростей поперечных волн (по данным МСЗ). Учитывая имеющиеся сведения о современной сейсмической активности в зоне ЦСАР и невысокую современную геодинамическую активность (Shestakov et al., 2011), полученные нами данные позволяют вслед за (Каплун, 2017) утверждать, что этот разлом в районе исследований в настоящее время непроницаем и, вероятно, является «залеченным».

Аналогичная ситуация ранее отмечалась в других регионах Земли, например, при исследовании разлома Тинтина (Tintina fault) на западе Канады (Audet et al., 2016; Zelt et al., 2006). Разлом Тинтина — правосторонний сдвиг, уходящий в мантию, протяженностью более 1900 км, с величиной смещения до 2000 км в палеозое-мезозое и более 400 км в палеоцене. На геоэлектрических разрезах зона разлома Тинтина представляет собой субвертикальный блок высокого сопротивления (до 10000 Ом·м) (Ledo et al., 2002, 2004), а прослеживаемые на трех разрезах низкоомные (1–50 Ом·м) аномалии интерпретируются как рудные тела (Ledo et al., 2002). С учетом низкой для этого региона современной сейсмичности разлом Тинтина считается «залеченным» (Ledo et al., 2004).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов обработки и совместной интерпретации измерений, выполненных методами микросейсмического и магнитотеллурического зондирований в Северном Сихотэ-Алине на одном из участков ЦСАР, можно сделать следующие выводы:

Методами МСЗ и МТЗ в целом одинаково выделяются основные блоки, некоторые зоны аномалий и положение зоны ЦСАР.

Разломная зона на исследованном участке ЦСАР выражена субвертикальной областью пониженных скоростей поперечных волн (на глубине 4–9 км) и как граница между блоками, сопротивление которых отличается в 4–15 раз, но без обособленной области низких сопротивлений (на глубинах от 0 до 9–13 км).

В шести километрах к северо-западу от ЦСАР выделена структура, сходная с зоной ЦСАР. Она прослеживается на вдвое большую глубину (до 20 км), чем ЦСАР и включает узкую зону небольшого понижения скоростей. Указанная структура может быть интерпретирована как разломная зона, не отмеченная на геологических картах, возможно, ветвь ЦСАР или Маноминского разлома.

Полученные данные о геофизическом строении исследованного участка ЦСАР не противоречат наблюдаемой незначительной современной сейсмической активности в северной части ЦСАР и свидетельствуют о непроницаемости разломной зоны в районе исследований, возможно о «залеченности» данного участка ЦСАР.

Полученные результаты иллюстрируют важность комплексирования геофизических методов при исследовании строения земной коры. Каждый использованный нами метод привносит свою часть в общую картину внутреннего строения исследованной области, в то время как оба метода заверяют и дополняют друг друга, позволяя более обоснованно и надежно подходить к интерпретации получаемых результатов. Именно использование пространственно идентичных сейсмического и геоэлектрического разрезов в данном случае позволило выделить предполагаемую разломную структуру на 6–7 км профиля и сделать вывод о непроницаемости разломной зоны исследованного участка ЦСАР. Комплексирование методов МСЗ и МТЗ видится перспективным для изучения строения земной коры в разломных зонах.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН. Полевые работы методом микросейсмического зондирования и обработка микросейсмических данных выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект 16-17-00015). Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (Сорокин и др., 2017). Авторы признательны организатору и руководителю полевых работ методом МТЗ В.Б. Каплуну, В.Г. Быкову — за ценные замечания и рекомендации.

Список литературы [References]

Варнавский В.Г., Малышев Ю.Ф. Восточно-Азиатский грабеновый пояс // Тихоокеанская геология. 1986. № 3. С. 3–13 [*Varnavsky V.G., Malyshev Yu.F.* East Asia graben belt // Tikhookeanskaya Geologiya. 1986. № 3. P. 3–13 (in Russian)].

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.М. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с. [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East: in 2 books / Ed. A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book 1. 572 p. (in Russian)].

Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. М-б 1:2500000. Объяснительная записка / Под ред. Л.И. Красного, А.С. Вольского, И.А. Васильева, Тэн Юньбяо, Сюй Яньцян, Ван Ин. СПб., Благовещенск, Харбин, изд-во ВСЕГЕИ, 1999. 135 с. [Geological map of Priamurye and adjacent territories. Scale 1:2500000. Explanatory note / Ed. L.I. Krasny, A.S. Volsky, I.A. Vasilyeva, Teng Yunbiao, Xu Yanqiang, Wang Ying. Saint Petersburg, Blagoveshchensk, Harbin: Publishing house «VSEGEI», 1999. 135 p. (in Russian)].

Горбатиков А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84 [*Gorbatikov A.V., Stepanova M.Yu., Korablev G.E.* Microseismic field affected by local geological heterogeneities and microseismic sounding of the medium // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2008. V. 44. Iss. 7. P. 577–592. https://doi.org/10.1134/S1069351308070082].

Горбатиков А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Исследование возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112. https://doi.org/10.1134/S0002333711040077 [*Gorbatikov A.V., Tsukanov A.A.* Simulation of the Rayleigh waves in the proximity of the scattering velocity heterogeneities. Exploring the capabilities of the microseismic sounding method // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2008. V. 47. Iss. 4. P. 354–369. https://doi.org/10.1134/S1069351311030013].

Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2(26). С. 11–19 [Zhostkov R.A., Presnov D.A., Sobisevich A.L. Evolution of the method of microseismic sounding // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2015. № 2(26). P. 1–19 (in Russian)].

Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л. Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 1. С. 72–75. https://doi.org/10.7868/S036767651701029X [*Zhostkov R.A., Presnov D.A., Shurup A.S., Sobisevich A.L.* Comparative study of deep structures by means of passive microseismic sounding and seismic tomography. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. V. 81. Iss. 1. P. 64–67. https://doi.org/10.3103/S1062873817010294].

Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с. [*Zabrodin V.Yu., Rybas O.V., Gilmanova G.Z.* Fault tectonics of the Russian Far East mainland. Vladivostok: Dalnauka, 2015. 132 p. (in Russian)].

Каплун В.Б. Предварительные результаты глубинных магнитотеллурических зондирований по профилю п.Облучье–оз.Гасси (Хабаровский край) // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 122–135 [*Kaplun V.B.* Preliminary results of deep magnetotelluric sounding carried out along the Obluchye-Lake Gassi profile (Khabarovsk Territory) // Tikhookeanskaya Geologiya. 1998. V. 17. № 2. P. 122–135 (in Russian)].

Каплун В.Б. Строение верхней части земной коры вдоль профиля с.Троицкое–с.Лидога–п.Ванино (Северный Сихотэ-Алинь) по данным аудиомагнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 2. С. 70–85 [*Kaplun V.B.* Upper Crustal Structure along the Troitskoe–Lidoga–Vanino Profile (Northern Sikhote-Alin Region) Based on AMT Sounding Data // Russian Journal of Pacific Geology. 2017. V. 11. Iss. 2. P. 134–147. https://doi.org/10.1134/S181971401702004X].

Каплун В.Б., Бронников А.К. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии Северного Сихотэ-Алиня по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 4. С. 18–37 [*Kaplun V.B., Bronnikov A.K.* Geoelectric Section of the Crust and Upper Mantle of the Northern Sikhote-Alin from Magnetotelluric Sounding Data // Russian Journal of Pacific Geology. 2017. V. 11. Iss. 4. P. 151–169. https://doi.org/10.1134/S1819714017040042].

Крук Н.Н., Симаненко В.П., Голозубов В.В. и др. Геохимические особенности пород Анюйского метаморфического купола (Сихотэ-Алинь): состав протолитов и возможная природа метаморфизма // Геохимия. 2014. № 3. С. 249–266. https://doi.org/10.7868/S0016752514010038 [*Kruk N.N., Simanenko V.P., Golozubov V.V. et al.* Geochemistry of rocks in the Anuymetamorphic dome, Sikhote-Alin: composition of the protoliths and the possible nature of metamorphism // Geochemistry International. 2014. V. 52. P. 229–246. https://doi.org/10.1134/S0016702914010030].

Кузнецов В.Е. Глубинное строение и современная геодинамика Приамурья // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 2. С. 61–67 [*Kuznetsov V.Ye.* Deep structure and geodynamics of Priamurie // Tikhookeanskaya Geologiya. 1998. V. 17. № 2. P. 61–67 (in Russian)].

Кузнецов В.Е. Признаки современной геодинамической активности северной периферии Амурской литосферной пластины (по данным МОВЗ) // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26–29 сентября 2000 г. / Под ред. Ф.Г. Корчагина. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001.С. 40–49. [*Kuznetsov V.Ye.* Principles of recent geodynamic activity of the Northern Periphery of the

Amur lithospheric Plate from MOVZ data// Problemy geodynamiki i prognoza zemletryaseniy. I Rossiysko-Yaponskiy seminar, Khabarovsk, 26–29 Sentyabrya 2000 g. / Ed. F.G. Korchagin. Khabarovsk: ITiG FEB RAS, 2001. P. 40–49 (in Russian)].

Левин Б.В., Ким Чун Ун, Нагорных Т.В. Сейсмичность Приморья и Приамурья в 1888–2008 гг. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 6. С. 16–22 [*Levin B.W., Kim Chun Un, Nagornykh T.V.* Seismicity of Primorye and Priamurye regions in 1888–2008 // Vestnik FEB RAS. 2008. № 6. P. 16–22 (in Russian)].

Николаев В.В., Врублевский А.А., Ахмадулин В.А., Кузнецов В.Е. Геодинамика и сейсмическое районирование материковой части Дальнего Востока. Владивосток: ДВО РАН, 2000. 90 с. [*Nikolaev V.V., Vrublevsky A.A., Akhmadulin V.A., Kuznetsov V.E.* Geodynamics and seismic zoning of a continental part of the Far East. Vladivostok: FEB RAS, 2000. 90 p. (in Russian)].

Николаев В.В., Семенов Р.М., Оскорбин Л.С. и др. Сейсмотектоника и сейсмическое районирование Приамурья / Отв. ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, 1989. 128 с. [*Nikolaev V.V., Semenov R.M., Oskorbin L.S., et al.* Seismotectonics and seismic zoning of the Amur region / Ed. V.P. Solonenko. Novosibirsk: Science, 1989. 128 p. (in Russian)].

Овсюченко А.Н., Трофименко С.В., Новиков С.С. и др. Задачи прогноза сейсмической опасности территории Нижнего Приамурья: палеосейсмологический и сейсмологический аспекты // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 2. С. 59–75. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-2-59-75 [*Ovsyuchenko A.N., Novikov S.S., Trofimenko S.V. et al.* The problems of seismic risk prediction for the territory of the Lower Amur Region: paleoseismogeological and seismological analysis // Russian Journal of Pacific Geology. 2018. V. 12. Iss. 2. P. 135–150. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-2-59-75].

Олейников А.В., Олейников Н.А. Геологические признаки сейсмичности и палеосейсмогеология Южного Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2001. 185 с. [*Oleinikov A.V., Oleinikov N.A.* Geological signs of seismicity and paleoseismogeology of Southern Primorye. Vladivostok: Dalnauka, 2001. 185 p. (in Russian)].

Олейников А.В., Олейников Н.А. Палеосейсмогеология. Владивосток: Дальнаука, 2009. 164 с. [*Oleinikov A.V., Oleinikov N.A.* Paleoseismogeology. Vladivostok: Dalnauka, 2009. 164 p. (in Russian)].

Поспеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии по профилю Чара-Ванино // Тихоокеанская геология. 1987. № 6. С. 109–113. [*Pospeev A.V.* Electrical conductivity of the Earth's crust and mantle along the Chara-Vanino profile // Tikhookeanskaya Geologiya. 1987. №. 6. P. 109–113 (in Russian)].

Потапьев С.В. Авиасейсмические исследования земной коры. М.: Наука, 1977. 170 с. [*Potapiev S.V.* Air seismic studies of the earth's crust. Moscow: Science, 1977. 170 p. (in Russian)].

Потапьев С.В. Соотношение поверхностной и глубинной структуры земной коры Приамурья и Приморья // Глубинное строение литосферы Дальневосточного региона: По геофиз. данным / Отв. ред. В.В. Онихимовский, И.К. Туезов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 43–53. [*Potapiev S.V.* The ratio of the surface and deep structure of the earth's crust of the Amur and Primorye regions // Deep structure of the lithosphere of the Far East region: According to geophysical data / Resp. ed. V.V. Onikhimovsky, I.K. Tuezov. Vladivostok: Far Eastern Scientific Center USSR Academy of Sciences, 1980. P. 43–53 (in Russian)].

Салун С.А. Тектоника и история развития Сихотэ-Алинской складчатой системы. М.: Недра, 1978. 183 с. [*Salun S.A.* Tectonics and history of the development of the Sikhote-Alin folded system. Moscow: Nedra, 1978. 183 p. (in Russian)].

Сафонов Д.А. Сейсмическая активность Приамурья и Приморья // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 2. С. 104–115. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.2.104-115 [*Safonov D.A.* Seismic activity of the Amur region and Primorye // Geosystemy Perekhodnykh Zon. 2018. V. 2. № 2. P. 104–115 (in Russian)].

Сорокин А.А., Макогонов С.В., Королев С.П. Информационная инфраструктура для коллективной работы ученых Дальнего Востока России // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2017. № 12. С. 14–16. [*Sorokin A.A., Makogonov S.V., Korolev S.P.* Information infrastructure for collective work of scientists of the Russian Far East //Nauchno-tekhnicheskaya informatcsiya. Seriya 1: Organizatsciya i metodika informatscionnoy raboty. 2017. №. 12. P. 14–16 (in Russian)].

Уткин В.П. Сдвиговый структурный парагенезис и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 21–43. [*Utkin V.P.* Shear structural paragenesis and its role in continental rifting of the East Asian margin // Russian Journal of Pacific Geology. 2013. V. 7. Iss. 3. P. 167–188. https://doi.org/10.1134/S181971401303007X].

Цуканов А.А., Горбатиков А.В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–102. https://doi.org/10.7868/S0002333715040122 [*Tsukanov A.A., Gorbatikov A.V.* Microseismic sounding method: implications of anomalous Poisson ratio and evaluation of nonlinear distortions // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2015. V. 51. Iss. 4. P. 548–558. https://doi.org/10.1134/S1069351315040126].

Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2017. № 6. С. 18–23. https://doi.org/10.7868/S0002333717060072 [*Yanovskaya T.B.* On the theory of the microseismic sounding method // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2017. V. 53. Iss. 6. P. 819–824. https://doi.org/10.1134/S1069351317060076].

Audet P., Sole C., Schaeffer A.J. Control of lithospheric inheritance on neotectonic activity in northwestern Canada? // Geology. 2016. V. 44. №. 10. P. 807–810. https://doi.org/10.1130/G38118.1.

Egbert G.D., Kelbert A. Computational recipes for electromagnetic inverse problems // Geophysical Journal International. 2012. V. 189. № 1. P. 251–267. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05347.x.

Kelbert A., Meqbel N., Egbert G., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. V. 66. P. 40–53. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010.

Kelbert A., Egbert G.D., Schultz A. Non-linear conjugate gradient inversion for global EM induction: resolution studies // Geophysical Journal International. 2008. V. 173. № 2. P. 365–381. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03717.x.

Ledo J., Jones A.G., Ferguson I.J. Electromagnetic images of a strike-slip fault: The Tintina fault–Northern Canadian // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. №. 8. P. 66-1–66-4. https://doi.org/10.1029/2001GL013408.

Ledo J., Jones A.G., Ferguson I.J., Wolynec L. Lithospheric structure of the Yukon, northern Canadian Cordillera, obtained from magnetotelluric data // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2004. V. 109. № B04410. P. 1–15. https://doi.org/10.1029/2003JB002516.

Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H. et al. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations // Geophysical Journal International. 2011. V. 184. № 2. P. 529–540. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x.

Zelt C.A., Ellis R.M., Zelt B.C. Three-dimensional structure across the Tintina strike-slip fault, northern Canadian Cordillera, from seismic refraction and reflection tomography // Geophysical Journal International. 2006. V. 167. № 3. P. 1292–1308. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03090.x.

EXPERIENCE OF COMPLEX MICROSEISMIC AND MAGNETOTELLURIC SOUNDING ON THE NORTHERN PART OF THE CENTRAL SIKHOTE-ALIN FAULT

V.V. Pupatenko[1], K.S. Ryabinkin[1], A.K. Bronnikov[1], A.L. Verkhoturov[2]

[1]Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, 680000
[2]Mining Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, 680000

We present the results of a study of the crustal structure of the northern part of the Central Sikhote-Alin Fault (CSAF) by methods of microseismic sounding (MSS) and magnetotelluric sounding (MTS). A geoelectric section based on MTS data and a section of relative velocities of P-waves according to MSS data were constructed and interpreted at a depth of up to 9 km and a length of 42 km. The main blocks, their boundaries, fault zones and some anomaly zones identified by microseismic and magnetotelluric sounding practically coincide. The CSAF zone is expressed by a narrow subvertical zone between high resistivity blocks. The data obtained indicate that the fault zone in the study area is impermeable. A similar structure was identified 6 km northwest of the CSAF zone, which can be traced to twice the depth (up to 20 km). It is concluded that the combination of microseismic and magnetotelluric sounding methods is promising for studying the structure of the Earth's crust in fault zones.

Keywords: magnetotelluric soundings, microseismic sounding, Central Sikhote-Alin fault.

Поступила в редакцию 20.03.2021
После доработки 28.05.2021
Принята в печать 28.06.2021