

А. А. Ковтун, Т. Корья, С. А. Вагин, И. Л. Варданянц, Н. П. Легенькова, М. Ю. Смирнов, Н. И. Успенский

МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ КОРЫ И МАНТИИ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО ЩИТА НА ГЕОТРАВЕРСЕ SVEKALAPKO

В соответствии с международным проектом SVEKALAPKO, задачей которого является комплексное изучение строения литосферы Балтийского щита, нами проводятся магнитотеллурические исследования электропроводности коры и мантии в расширенном интервале периодов на продолжении профиля SVEKA, который идет с юга Финляндии в северо-восточном направлении до пересечения с границей России севернее г. Костомукша [1]. На территории России продолжение профиля, получившего название SVEKA-2, выходит к берегу Белого моря. Зона сочленения Карельского и Беломорского геоблоков, которую пересекает профиль, представляет большой интерес с точки зрения изучения тектонического развития Балтийского щита. Строение района сочленения двух геоблоков по сей день вызывает много дискуссий [2–5].

Положение профиля SVEKA-2 показано на рис. 1, там же дана схема блокового строения района, приведенная в монографии [6].

Ранее вблизи профиля SVEKA-2 проводились магнитотеллурические зондирования по редкой сети пунктов институтом Геологии Карельского филиала РАН в длиннопериодном интервале (10–1000 с), что позволило составить представление о распределении сопротивления начиная с глубины более 40 км [7]. И только на территории Карельского геоблока, прилегающей к границе с Финляндией, нами и независимо финскими геофизиками было проведено несколько АМТ-МТ зондирований, позволяющих изучить распределение сопротивления по глубине, начиная со 100–200 м до 300 км [8]. Эти пункты зондирований показаны на рис. 1 черными кружками с сокращенным названием ближайшего населенного пункта.

Магнитотеллурические исследования в восточной части профиля SVEKA-2

Летом 1997 г. нами были проведены магнитотеллурические исследования в восточной, наименее изученной, части профиля SVEKA-2. Сделаны АМТ зондирования с шагом 5 км на участке от Белого моря (пос. Лоухи) до пос. Пяозерск. Всего выполнено 19 зондирований. Через каждые 20 км проводились зондирования в расширенном интервале периодов от 0,001 до 10000 с. Пункты зондирований, выполненных в 1997 г., показаны на рис. 1 черными кружками с цифрами.

При проведении зондирований в АМТ-МТ интервале периодов использовалась новая магнитотеллурическая станция МТС-97, разработанная С. А. Вагиным, и станция АМТ, созданная ранее Н. И. Успенским. Эти станции связаны единым цифровым устройством и общей программой обработки цифровых данных, созданными М. Ю. Смирновым [9–11]. Программа обработки позволяет по единой методике провести оценку компонент тензора импеданса и других магнитотеллурических и

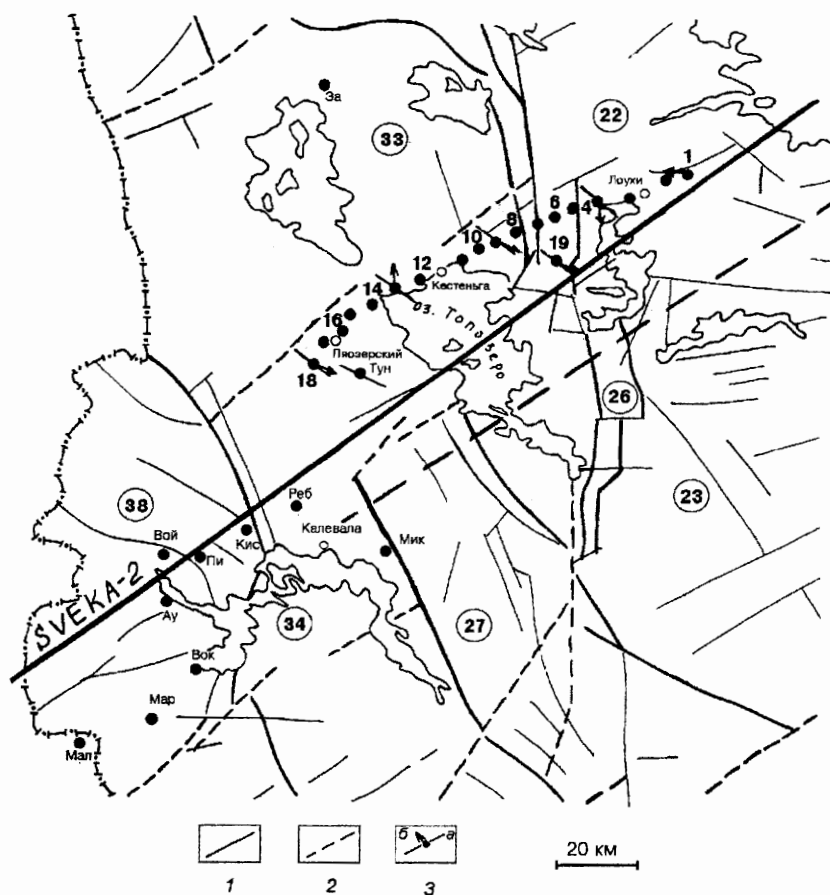


Рис. 1. Положение профиля SVEKA-2 и пунктов зондирования в расширенном интервале периодов (черные кружки).

Схема блокового строения в районе геотраверса SVEKALAPKO. Нумерация блоков III порядка взята в соответствии с [6]; 1 — продольные зоны мантийных разломов, являющихся границами геоблоков, пловных зон и блоков II порядка; 2 — продольные и поперечные коровые и мантийные зоны разломов, разделяющие блоки III порядка; 3 — направление больших осей импедансных диаграмм (а) и магнитных векторов индукции (б).

магнитовариационных параметров в интервале периодов 0,001–10000 с. Станция хорошо зарекомендовала себя в полевых условиях и позволила быстро и эффективно получить большой экспериментальный материал. Вследствие высокого уровня помех все же не удалось уверенно построить кривые зондирования вблизи пос. Лаули и в пункте 13.

Интерпретация данных проводилась в квазидвумерном приближении. Для всех пунктов строились кривые зондирования по осям неоднородности среды. Интерпретировались “продольные” кривые зондирования. Выбор “продольных” кривых осуществлялся на основе анализа геолого-геофизических данных и требования близости кривой зондирования в области больших периодов к глобальной магнитовариационной кривой. Эта методика хорошо зарекомендовала себя ранее при анализе данных

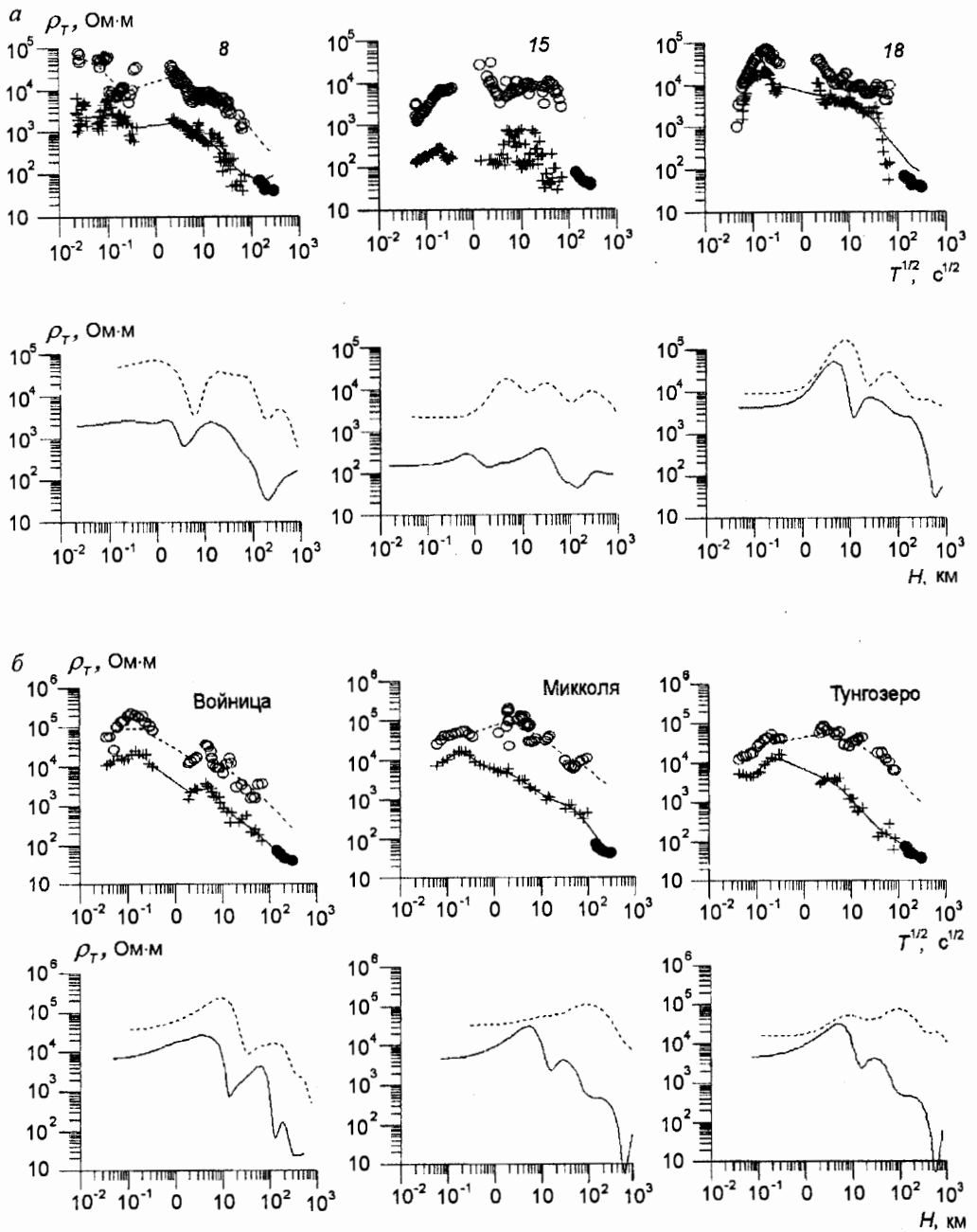


Рис. 2. Примеры максимальных и минимальных кривых зондирований (а) и их одномерной интерпретации (б) Пяозерский-Лоухи и профилю Калевала-Вокнаволок.

Черные кружки — точки глобальной магнитовариационной кривой.

зондирования на Балтийском щите вдоль меридионального профиля Териберка — Ковдор — Суоярви — Выборг [8].

На рис. 2, а представлены максимальные и минимальные кривые зондирования для отдельных пунктов профиля Лоухи — Пяозерск. Характерной особенностью кривых зондирования во всех пунктах является большое расхождение максимальных и минимальных кривых зондирования и устойчивое положение уровня максимальных кривых: максимальные кривые в пунктах 4, 9, 13, 18, 19 в области больших периодов ($T > 10$ с) практически совпадают и идут выше глобальной кривой в области суточных вариаций, что позволяет считать их “поперечными”. Наилучшим образом согласуются с глобальной кривой минимальные кривые, которые мы и примем за “продольные”.

Интерпретация “продольных” кривых проводилась в рамках градиентной среды по программе МЭЛ [12]. Кривые зондирования дополнялись участком глобальной магнитовариационной кривой в интервале суточных вариаций. В дальнейшем по данным синхронных наблюдений в интервале периодов 10–100000 с, которые будут проведены летом 1998 г. в 49 пунктах на территории Балтийского щита, удастся построить региональную магнитовариационную кривую и проверить, насколько выбранные нами “продольные” кривые близки к региональной магнитовариационной кривой зондирования, построенной для Балтийского щита. Примеры одномерной интерпретации минимальных кривых приведены на рис. 2, б. Там же приведены результаты интерпретации “поперечных” кривых (штриховые линии).

Практически во всех пунктах по результатам интерпретации наблюдается различие в сопротивлении верхней части коры при двух поляризациях поля. По “поперечным” кривым, которым соответствует северо-западное направление большой оси полярной импедансной диаграммы (угол $120 - 140^\circ$ с магнитным меридианом), среднее сопротивление достигает $10^4 - 10^5$ Ом·м. По “продольным” кривым — $100 - 1000$ Ом·м. Столь большое различие в сопротивлении верхней части коры и устойчивое направление осей неоднородности говорит об особенностях тектонического строения района и, скорее всего, о существовании системы трещиноватости северо-восточного простирания. Делать выводы о различии строения и сопротивления по “поперечным” и “продольным” кривым на больших глубинах по результатам одномерной интерпретации довольно опасно, поскольку “поперечные” кривые явно искажены “S-эффектом”, что несомненно приведет к неверным оценкам как величины сопротивления на большой глубине, так и к смещению положения границ.

На рис. 3 показано распределение удельного сопротивления ρ , точнее $\log \rho$, по глубине вдоль профиля Лоухи — Пяозерский по данным одномерной интерпретации “продольных” кривых. Как показывает практика, интерпретация в двумерном приближении “продольных” кривых не приводит к серьезному изменению модели в верхней части разреза. Обычно при двумерной интерпретации исчезают ложные аномалии вблизи проводящих объектов, трактуемые нами как хорошо известный “индукционный эффект”, и ложные аномалии под проводящим телом, являющиеся отражением “эффекта грабена” [13]. Поэтому разрезы, построенные по одномерной интерпретации, полезны при проведении экспресс-анализа. Резкие изменения положения изолиний $\log \rho$ в близко расположенных пунктах профиля на большой глубине свидетельствуют о неучтенном влиянии трехмерности среды или о погрешностях магнитотеллурического метода, вызванных горизонтальной неоднородностью первичного поля.

Отметим ряд особенностей в полученном распределении сопротивления.

Участок профиля между Тикшозерской (блок 26 на рис. 1) и Восточно-

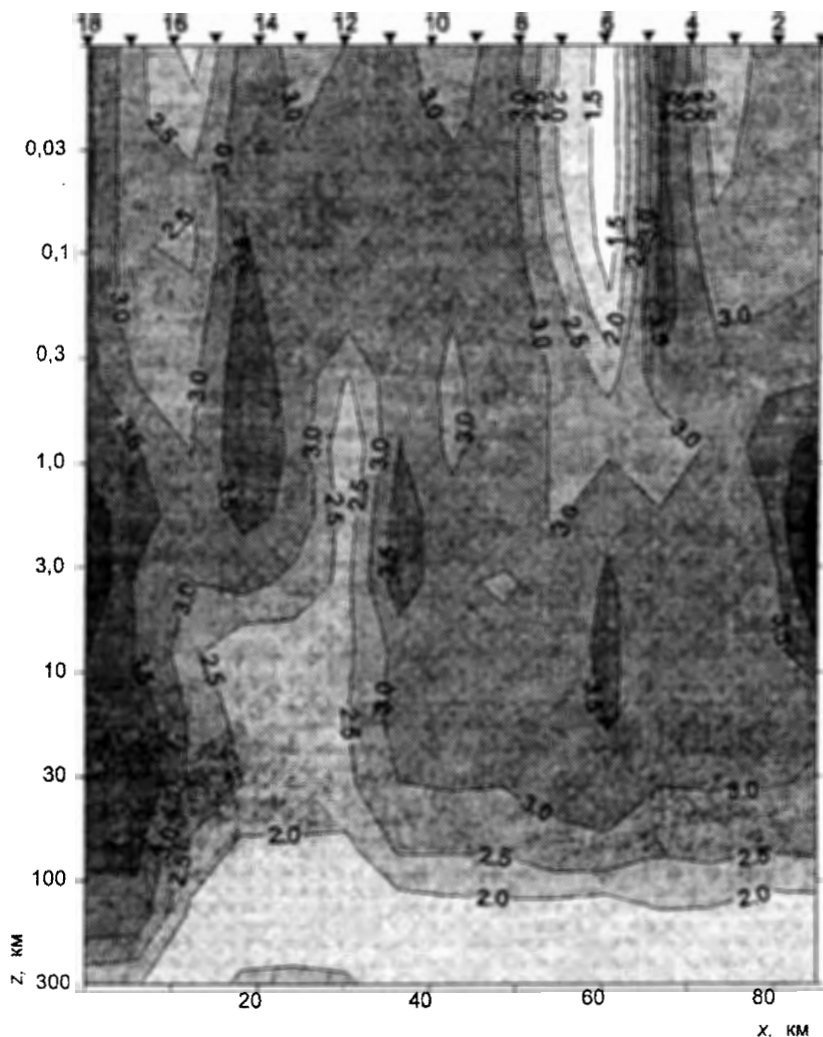


Рис. 3. Геоэлектрический разрез по профилю Пяозерский–Лоухи по результатам одномерной интерпретации “продольных” кривых.

Положение пунктов зондирований показано треугольниками на верхней горизонтальной оси.

Карельской мобильно-проницаемыми зонами имеет сложное строение верхней части коры. На этом участке выделяется примерно пять областей пониженного сопротивления, уходящих на глубину до 1–2 км. Наибольшее понижение сопротивления, до десятков ом-метров, отмечается в пределах Тикшозерской мобильно-проницаемой зоны (пункты 5–7). Еще одна проводящая область расположена севернее Восточно-Карельской мобильно-проницаемой зоны (пункты 12–16). Здесь приповерхностные аномалии соединяются проводящими каналами с коровой аномалией, расположенной на глубине 6–12 км. Продольная проводимость толщи пониженного сопротивления достигает 60–80 См. Эта аномалия находит отражение в поведении магнитовариационных векторов. В интервале периодов от 10 до 400 с векторы ориентированы в пунктах 9 и 13 в противоположных направлениях (см. рис. 1).

пунктах 9 и 13 в противоположных направлениях (см. рис. 1).

Практически на всем профиле сопротивление коры уменьшается с глубины 20–30 км, где оно в большинстве пунктов близко к 100 Ом·м, и достигает минимального значения 100 Ом·м на глубине 150–200 км. Положение минимума можно грубо связать с нижней границей “астеносферы”, поскольку дальше сопротивление возрастает. Поднятие этой границы в области коровой аномалии скорее всего связано с “S-эффектом”.

Для более тщательного изучения строения мантии на этих глубинах необходимо в первую очередь расширить интервал регистрируемых периодов до суточных вариаций и при интерпретации учесть трехмерный характер неоднородности среды.

Анализ данных МТЗ в западной части профиля SVEKA-2

Используя данные АМТ-МТ зондирования, полученные ранее Т. Корья (Финляндия) и нами, можно уже сейчас составить представление о распределении сопротивления до глубины 300 км в западной части профиля SVEKA-2. Назовем его условно Вокнаволок — Калевала. Несмотря на то, что расстояние между отдельными пунктами достигает 20 км, построенный геоэлектрический разрез в общих чертах будет отражать основные закономерности в поведении сопротивления по профилю. Новые данные, которые предполагается получить в дальнейшем на отдельных участках профиля с шагом 5 км в АМТ диапазоне, позволят лишь уточнить строение верхней части разреза.

При построении геоэлектрического разреза по профилю Вокнаволок — Калевала использовались результаты одномерной интерпретации “продольных” кривых зондирования, дополненных участком глобальной магнитовариационной кривой в области суточных вариаций. На рис. 4 приведено распределение сопротивления по глубине, там же дано поведение продольной проводимости верхних 20 км коры по результатам интерпретации “продольных” и “поперечных” кривых зондирования. На профиле выделяются блоки третьего порядка — Войницкий и Куйтозерский (блоки 38 и 34 на рис. 1). На Войницком блоке продольная проводимость 20 км коры достигает наибольших значений (20–40 См по результатам интерпретации “продольных” кривых и всего несколько сименсов по “поперечным” кривым). На Куйтозерском блоке продольная проводимость 20 км коры не превышает 5 См по “продольным” кривым и 0,5 См по “поперечным”. Кора Войницкого блока обладает меньшим сопротивлением.

Большое расхождение значений продольной проводимости по “поперечным” и “продольным” кривым скорее всего связано с анизотропией коры, вызванной преимущественным направлением разломов и трещиноватости на этом участке профиля. По-видимому, верхняя часть коры Куйтозерского блока является менее разрушенной, чем кора Войницкого блока. Сопротивление на Войницком блоке уменьшается начиная с глубины 3 км, на Куйтозерском блоке — с 10 км.

Имеется большая корреляция между величиной продольной проводимости верхней части коры и положением границы проводящей мантии, за которую можно условно выбрать положение изолинии $\rho = 100$ Ом·м ($\log \rho = 2$). Ее среднее положение соответствует глубинам 150–200 км. Подъем границы проводящей мантии до глубины 50–60 км наблюдается под Войницким блоком, где продольная проводимость увеличивается до 20–40 См, что может быть истолковано как S-эффект, вызванный неполным снятием влияния трехмерности среды. На Войницком блоке расхождение кривых в области больших периодов невелико, что также может служить признаком существования в этом районе трехмерной неоднородности верхней части разре-

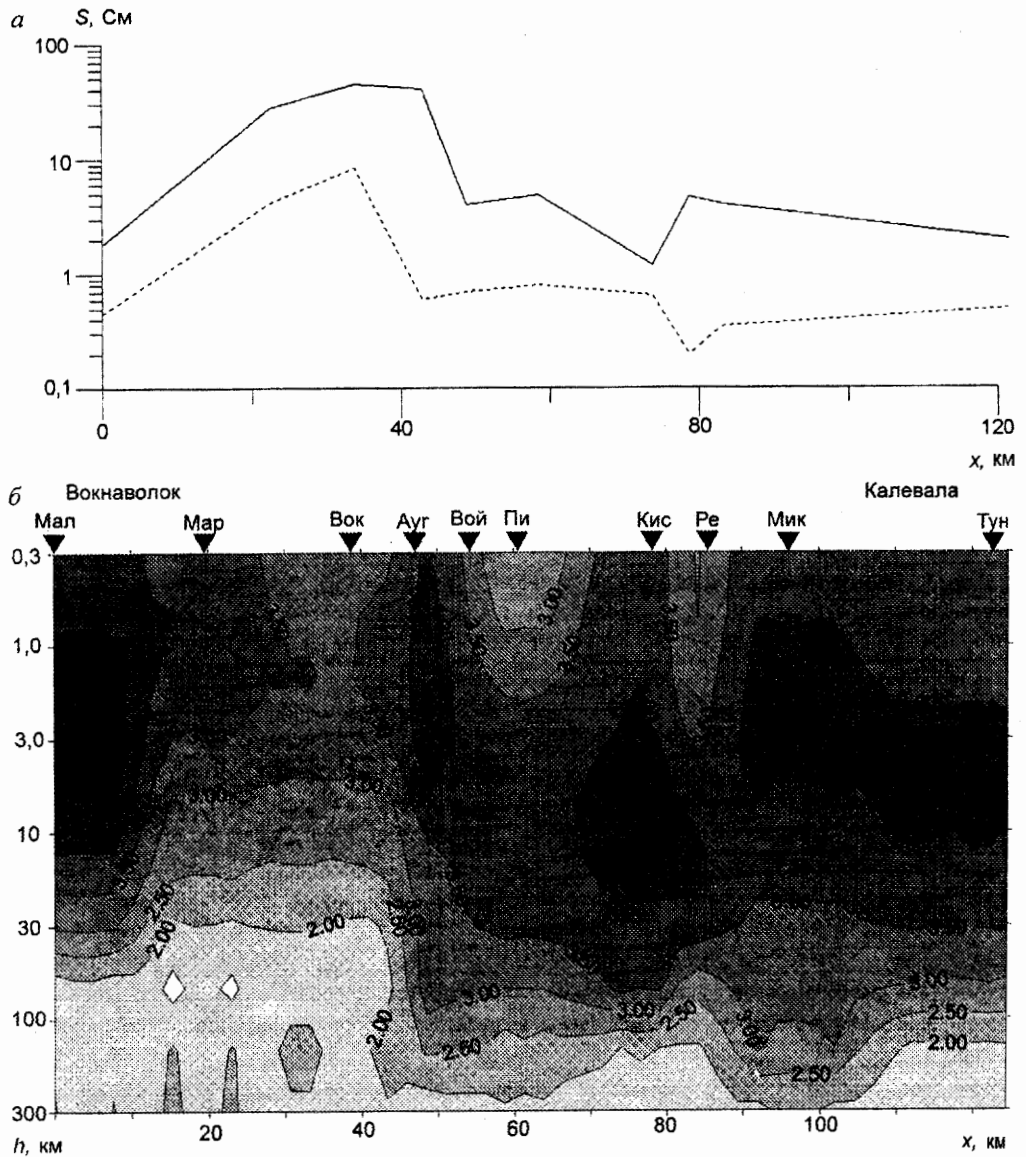


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по данным одномерной интерпретации "продольных" кривых и поведение продольной проводимости верхних 20 км коры по профилю Вокнаволоок — Калевала.

а — распределение продольной проводимости: 1 — по "продольным", 2 — по "поперечным" кривым; б — распределение сопротивления по глубине по результатам интерпретации "продольных" кривых.

за. Для решения этой задачи необходимо также провести дополнительные АМТ-МТ зондирования по площади на Войницком блоке и прилегающей территории.

В заключении сформулируем основные выводы.

Магнитотеллурические зондирования в расширенном интервале периодов на про-

филе SVEKA-2 позволяют выявить ряд особенностей в строении коры и мантии Балтийского щита. Получены представления о распределении проводящих областей в коре. Особый интерес представляет выделяемая по МТЗ область пониженного сопротивления в верхней мантии. Положение минимума сопротивления на глубине 150–200 км можно условно связать с положением подошвы астеносферы.

Анализ результатов зондирований показал, что для подтверждения полученных выводов о строении литосферы на профиле SVEKA-2 необходимо провести дополнительные зондирования по площади на трех участках профиля, где имеются признаки влияния трехмерной неоднородности верхней части разреза. Кроме того, необходимо увеличить за счет устранения влияния неоднородности первичного поля точность магнитотеллурического метода, расширить интервал регистрируемых периодов в область суточных вариаций, проверить гипотезу о возможности использования глобальной магнитовариационной кривой зондирования на Балтийском щите. Перечисленные проблемы по проекту SVEKALAPKO предполагается решить в ближайшие три года.

Указатель литературы

1. Korja T., Koivukoski K. B. Crustal conductor along the SVEKA profile in the Fennoscandian (Baltic) Shield, Finland // *Geophys. J. Int.* 1994. N 116. P. 173–197.
2. Глебовицкий В. А., Миллер Ю. В., Другова Г. М. и др. Структура и метаморфизм Беломорско-Лапландской коллизионной зоны // *Геотектоника*. 1995. № 6.
3. Лобач-Жученко С. Б., Чекулаев В. П., Степанов В. С. и др. Беломорский пояс — позднеархейская аккреционно-коллизионная зона Балтийского щита // *Докл. РАН*. 1998. Т. 358. № 2.
4. Слабунов А. И. Врхнеархейская Керетская гранит-зеленокаменная система Карелии // *Геотектоника*. 1993. № 5.
5. Григорьева Л. В., Шинкарев Н. Ф. О геодинамической природе зоны сочленения Беломорит и Карелит // *Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 7*. 1997. Вып 3.
6. Металлогения восточной части Балтийского щита / Под ред. А. В. Сидоренко и Т. В. Библиной. Л.: Недра, 1980. 247 с.
7. Голод М. И., Клубуков Б. Н., Гришин А. С. Глубинная электропроводность Карельской части Балтийского щита // *Глубинная электропроводность Балтийского щита*. Кар. ф-л АН СССР. 1986. С. 7–18.
8. Вагин С. А., Смирнов М. Ю. Магнитотеллурическая станция МТС-97 // *Геофизический вестник*. 1998. № 2. С. 11–20.
9. Смирнов М. Ю., Успенский Н. И. Обработка МТ-информации цифровой АМТ-станцией // *Геофизическая аппаратура*. 1998. № 101. С. 74–80.
10. Ковтун А. А., Вагин С. А., Варданянц И. Л., Коквина Е. Л., Успенский Н. И. Магнитотеллурические исследования строения коры и мантии восточной части Балтийского щита // *Изв. РАН. Физика Земли*. 1994. № 3. С. 32–36.
11. Смирнов М. Ю. Обработка магнитотеллурических данных с использованием робастных статистических процедур // *Наст. сб.* С. 198–205.
12. Porokhova L. N., Kharlamov M. M. The solution of the one-dimension inverse problem for induction soundings by an efficient linearization technique // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1990. Vol. 60. P. 68–79.
13. Ковтун А. А., Легенькова Н. П. Ложные аномалии при одномерной интерпретации кривых МТЗ // *Изв. РАН. Физика Земли*. 1995. № 9. С. 77–83.

Работа выполнена по проекту SVEKALAPKO при финансовой поддержке РФФИ, грант 97-05-65488.