

Federal Agency of Mineral Resources (ROSNEDRA)
Russian Academy of Sciences (RAS)
Interregional Centre for Geological Cartography (GEOKART)

*Series of analytical reviews
«Essays for Regional Geology of Russia»*

Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe

Results of Studies under the EUROPROBE Programme

Issue 2

Moscow
GEOKART, GEOS
2006

УДК 553.065
ББК 26.323
С 68

C 68 **Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under the EUROPROBE Programme.** — Moscow: GEOKART: GEOS, 2006. — 736 p. (ROSNEDRA, RAS, GEOKART)
ISBN 5-89118-365-9 (in cloth)

More than one hundred authors from the majority of European countries present the results of geological and geophysical studies conducted in the 1990s in Eastern Europe as part of the international EUROPROBE program. This program provided the framework for several major geophysical experiments: 3D tomography and electromagnetic projects on the Baltic shield; deep seismic studies in the Donets basin, the Urals, and the western part of the Eastern European craton; and a large amount of geological field investigations and laboratory research. This monograph is a summary of results from the above studies and all previous investigations in the lithospheric structure of Eastern Europe.

For geologists and geophysicists of broad specialization.

Tabl. 19. Il. 315. References 1526.

ББК 26.323

Series of analytical reviews «Essays for Regional Geology of Russia»

Issue 2

Editor-in-Chief of the Series:

A.F. Morozov

Deputy Editor-in-Chief:

N.V. Mezhelovsky

Responsible Editor of the Issue:

N.I. Pavlenkova

Editorial Board:

*V.V. Balagansky, S.V. Bogdanova, Iu.M. Varentsov,
R.G. Garetsky, G.S. Gusev, J.S. Daly, D.Gee, S.N. Kashubin,
V.A. Kilipko, S.L. Kostyuchenko, N.V. Mezhelovsky, A.F. Morozov, N.I. Pavlenkova,
A. Perez-Estaun, V.N. Puchkov, V.I. Starostenko, R.A. Stephenson*

Федеральное агентство по недропользованию (РОСНЕДРА)
Российская академия наук (РАН)
Межрегиональный центр по геологической картографии (ГЕОКАРТ)

*Серия аналитических обзоров
«Очерки по региональной геологии России»*

Строение и динамика литосферы Восточной Европы

Результаты исследований по программе EUROPROBE

Выпуск 2

Москва
ГЕОКАРТ, ГЕОС
2006

УДК 553.065
ББК 26.323
С 68

С 68 **Строение и динамика литосферы Восточной Европы. Результаты исследований по программе EUROPROBE.** — М.: ГЕОКАРТ: ГЕОС, 2006. 736 с. (РОСНЕДРА, РАН, ГЕОКАРТ)
ISBN 5-89118-365-9 (в пер.)

Более ста авторов из различных европейских стран представляют результаты геолого-геофизических исследований, проведенных в последнее десятилетие прошлого века в Восточной Европе по международной программе EUROPROBE. По этой программе было выполнено несколько крупных геофизических экспериментов: трехмерные томографический и электромагнитный проекты на Балтийском щите, глубинные сейсмические исследования в Донбассе, на Урале и в западной части Восточно-Европейского кратона, а также большой объем геологических полевых и лабораторных исследований. В монографии обобщены результаты этих и всех предыдущих исследований по структуре литосферы Восточной Европы.

Для геологов и геофизиков широкого профиля.

Табл. 19. Ил. 315. Библ. 1526 назв.

ББК 26.323

**Серия аналитических обзоров «Очерки по региональной геологии России»
Выпуск 2**

Главный редактор серии:
А.Ф. Морозов

Заместитель главного редактора:
Н.В. Межеловский

Ответственный редактор выпуска:
Н.И. Павленкова

Редакционная коллегия выпуска:
*В.В. Балаганский, С.В. Богданова, Ив.М. Варенцов,
Р.Г. Гарецкий, Г.С. Гусев, Дж.С. Дэйли, Д.Джи, С.Н. Кашубин,
В.А. Килипко, С.Л. Костюченко, Н.В. Межеловский, А.Ф. Морозов, Н.И. Павленкова,
А.Перес-Эстаун, В.Н. Пучков, В.И. Старостенко, Р.А. Стифенсон*

ISBN 5-89118-365-9

© РОСНЕДРА, 2006
© ГЕОКАРТ, 2006
© Коллектив авторов, 2006

Глава 1

Проект SVEKALAPKO: Геологические и геофизические исследования Балтийского щита

Редакторы: *В.В. Балаганский, Ив. М. Варенцов,
Дж.С. Дэйли*

1.6. Геоэлектрическая структура верхней мантии Фенноскандии по результатам эксперимента BEAR

*Ив.М. Варенцов, А.А. Ковтун, Т.Корья, Н.А. Пальшин, Е.Ю. Соколова
и рабочая группа BEAR*

В двух предшествующих разделах уже обсуждались некоторые оценки электропроводности верхней мантии Фенноскандии, возникшие на этапах предварительного анализа передаточных операторов эксперимента BEAR и их сопоставления с результатами 3D-моделирования. Наиболее важными представляются указания на избыточную верхнемантийную электропроводность по отношению к модели нормального разреза NS (см. табл. 1) как в среднем по всему массиву зондирований по результатам сопоставления наблюдаемых и 3D-модельных данных [Engels et al., 2002; Varentsov et al., 2002], так и для отдельных групп зондирований по результатам одномерной инверсии МТ данных [Ковтун и др., 2002; Lahti et al., 2005]. Следует, однако, отметить, что результаты одномерной инверсии на верхнемантийных глубинах могут быть искажены как локальными статическими эффектами, так и боковым влиянием коровых токовых систем на удалениях в десятки и первые сотни километров. Результаты же сопоставления наблюдаемых данных с трехмерными расчетами требуют детализации в процессе трудоемкого перебора моделей, либо формализованного решения трехмерной обратной задачи. В данном разделе мы уточним глубинный нормальный разрез BEAR на верхнемантийных глубинах по результатам робастного пространственного осреднения всего массива МТ кривых BEAR и 1D инверсии полученной средней кривой. Затем рассмотрим рациональную постановку задачи 3D инверсии данных BEAR и самые первые результаты ее решения в сопоставлении с ранее полученными 1D оценками. В завершение, перейдем к истолкованию природы избыточной электропроводности в верхней мантии Фенноскандии.

Уточнение глубинного нормального разреза BEAR по результатам пространственного осреднения МТ кривых

В эксперименте BEAR глубинные ЭМ зондирования не сопровождалось, за редким исключением, менее глубинными аудиоМТ наблюдениями в их окрестности для контроля приповерхностных искажений. Поэтому для выявления статических сдвигов кривых кажущегося сопротивления необходимы региональные длиннопериодные реперы. Аналогичные же реперы для фазовых кривых важны для диагностики длиннопериодных искажений, связанных с неоднородностью возбуждения поля в субполярной области эксперимента. Рассматриваемые реперные оценки обычно конструируются по магнитовариационным наблюдениям, свободным на длинных периодах от приповерхностных искажений, и избранным МТ зондированиям. Ряд подобных оценок [Ковтун, 1989; Olsen, 1998; Semenov, 1998; Schmucker, 1999; Ковтун и др., 2002], имеющих отношение к Балтийскому региону, показаны на рис. 50. Последняя из них явно учитывает результаты осреднения избранных кривых BEAR. Для преодоления значительного разброса представленных оценок проведено робастное осреднение их совокупности, давшее достаточно гладкие «центральные» кривые (черные линии на рис. 50).

Далее была предпринята попытка робастного осреднения всей совокупности МТ кривых BEAR. Подобная операция требовала пристального внимания в связи с большой изменчивостью геоэлектрических условий на Балтийском щите. Естественным было применить в этих условиях медианное оцени-

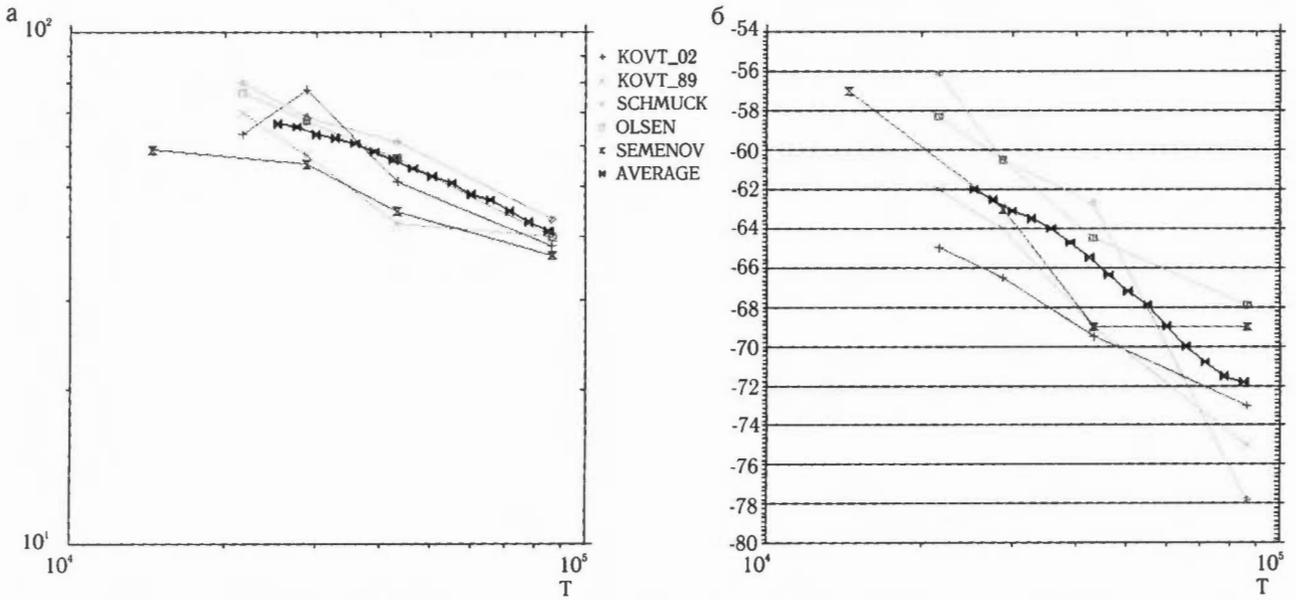


Рис. 50. Кривые кажущегося сопротивления (а, в Ом·м) и фазы импеданса (б, град.) для региональных европейских реперных МТ/МВ данных на периодах суточных гармоник: KOVT_89 [Ковтун, 1989], OLSEN [Olsen, 1998], SEMENOV [Semenov, 1998], SCHMUCK [Schmucker, 1999], KOVT_02 [Ковтун и др., 2002] и их робастного среднего, AVERAGE (жирные черные кривые)

вание, автоматически игнорирующее все крайности и подчеркивающее самые общие («центральные») закономерности в данных. Раздельному медианному осреднению подверглись амплитуды и фазы импедансных компонент в исходной геомаг-

нитной системе координат наблюдения. На рис. 51 совместно показаны «облака» главных (x_u и y_u) компонент кажущегося сопротивления и фазы импеданса, построенные по 44 точкам массива МТ зондирований BEAR.

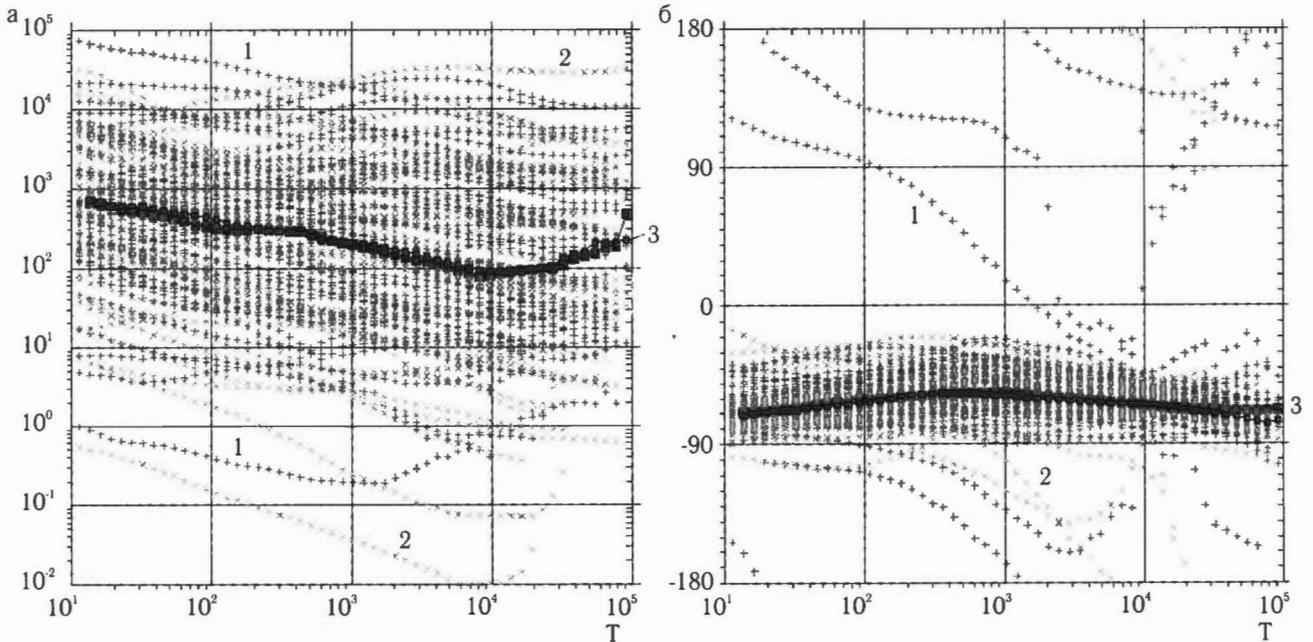


Рис. 51. Множества всех кривых кажущегося сопротивления (а, Ом·м), фазы импеданса (б, град.) для массива BEAR (1 — компонента x_u ; 2 — компонента y_u) и результаты раздельного медианного осреднения кажущихся сопротивлений и фаз (3)

Разброс значений кажущегося сопротивления превышает 7 декад, но медианные средние главных компонент (черные кривые) удивительно хорошо совпадают до периода 3 ч как между собой, так и с показанной на рис. 52 средней оценкой региональных реперов (MTMV_AV). Обе средние кривые кажущегося сопротивления BEAR лежат выше восточноевропейской региональной кривой (SEMENOV), ниже откликов для нормального разреза NS и вблизи откликов для разреза AST. Для периодов 3–6 ч средние кривые кажущегося сопротивления перестают монотонно убывать, а после 6 ч — возрастают. Последние эффекты отражают снижение качества оценивания кажущегося сопротивления в ряде точек BEAR на периодах более 3–6 ч.

Важно, однако, что «облака» фазовых оценок выглядят более плотными, а соответствующие медианные средние кривые двух главных компонент практически совпадают в выбранном масштабе до периодов 6–8 ч (расхождение между ними в этом диапазоне составляет самые первые градусы). Именно фазовые данные представляют наибольший интерес для дальнейшего анализа. Средние фазовые кривые BEAR попадают в интервал разброса реперных оценок на рис. 50, приближаются к уровню максимальных из них по абсолютной величине (а также наиболее близких регионально —

KOVT_89, KOVT_02, SEMENOV) и выходят на уровень средней кривой MTMV_AV на периоде суток (рис. 52).

Осреднение полученных пар медианных кривых (x_u и x_x) кажущегося сопротивления и фазы дало эффективные кривые для всей совокупности МТ данных BEAR, показанные как BEAR_AV на рис. 52 и 53. Для контроля аналогичное медианное осреднение выполнено независимо по северному и южному подмножествам точек BEAR (по 22 точкам в каждом). Соответствующие эффективные фазовые кривые показаны на рис. 53 как BEAR_S и BEAR_N. На периодах после часа все три эффективные фазовые кривые (BEAR_AV, BEAR_S и BEAR_N) совпадают в пределах 2° , а после 3 ч и до суток — 1° . Это наблюдение представляется весьма важным, ибо свидетельствует об отсутствии как заметных эффектов влияния на импедансные фазы неоднородностей субполярных возбудителей поля (при их наличии ожидался бы явный северный тренд), так и о сопоставимой в среднем верхнемантийной структуре северной и южной частей региона BEAR.

Нормальные фазовые кривые NS падают на периодах более 8–12 ч ниже уровня — -75° (см. рис. 52 и 53). При этом нормальный разрез NS не включает аномально проводящих слоев в верхней ман-

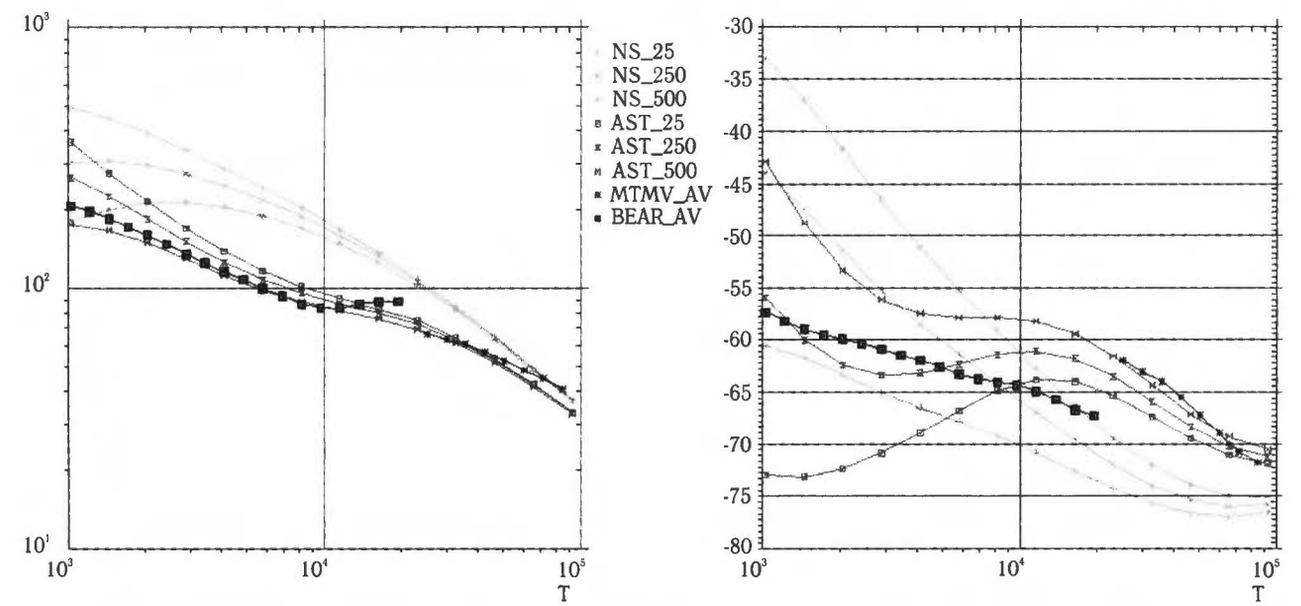


Рис. 52. Кривые кажущегося сопротивления (а, Ом·м) и фазы импеданса (б, град.) для моделей нормального разреза BEAR в разных вариантах
 NS — нормальные модели без «астеносферного» слоя с продольной проводимостью верхнего 10-километрового слоя 25, 250 и 500 См; AST — модели с «астеносферным» слоем, проводимостью 5000 См на глубине 200–300 км и проводимостью 25, 250 и 500 См в верхнем слое. MTMV_AV — средние кривые по европейским МТ/МВ реперам (см. рис. 50) и BEAR_AV — средние кривые для эксперимента BEAR (см. рис. 51)

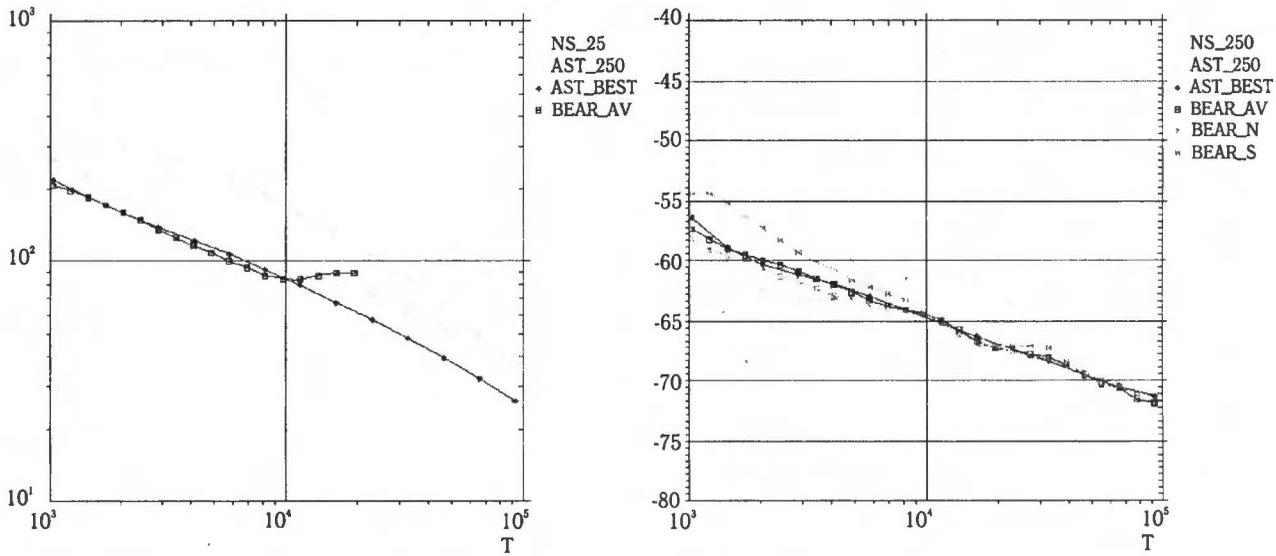


Рис. 53. Кривые кажущегося сопротивления (а, Ом·м) и фазы импеданса (б, град.), средние для массива BEAR BEAR_AV — по всем 44 точкам, BEAR_N — по 22 северным, BEAR_S — по 22 южным точкам; аналогичные кривые для нормальных разрезов BEAR (с рис. 52) и для одномерной модели со «ступенчатым» астеносферным слоем AST_BEST, наилучшим образом аппроксимируют данные BEAR_AV

тии (см. табл. 1), и столь низкий уровень фазы объясняется резким контрастом высокого сопротивления коры с нормальным сопротивлением верхней мантии. Кривые для варианта нормального разреза AST с повышенной проводимостью верхней мантии, как это ни странно на первый взгляд (см. дискуссию в: [Varentsov et al., 2002]), лежат в диапазоне периодов от 3 ч до суток выше кривых NS для «нормальной» мантии. Таким образом, «низкие» фазы диагностируют повышенную верхнемантийную электропроводность лишь на периодах от десятков минут до 2 ч. Эффективная фазовая кривая BEAR_AV по уровню ближе к кривым AST, но отличается от них по форме.

Одномерная инверсия оценки BEAR_AV дала модель AST_BEST (см. табл. 1). Инверсия велась по алгоритму [Варенцов, 2002, 2005] с приоритетом фазовых данных. Фаза импеданса инвертировалась во всем диапазоне периодов 1000–100 000 с, в то время как кажущееся сопротивление учитывалось с увеличенными в 10 раз доверительными интервалами и только до периода 10 000 с. Полученная модель отличается от модели AST плавной (ступенчатой) структурой «астеносферного» слоя. Его верхняя кромка лежит несколько выше (150 км), мощность — в полтора раза больше (150 км), а суммарная продольная проводимость — несколько меньше (4380 См). Кроме того, в данной модели отмечается понижение сопротивления по отношению к нормальным разрезам NS и AST до уровня 8 Ом·м

на глубине 350–500 км и до уровня 3.8 Ом·м на глубине 500–600 км (см. табл. 1). Модельные кривые AST_BEST показаны на рис. 53 и совпадают с кривыми BEAR_AV в пределах самых первых процентов.

Ступенчатая структура проводящего слоя в модели AST_BEST может свидетельствовать как о градиентном изменении электропроводности с глубиной, так и о влиянии на результаты осреднения площадных вариаций положения его верхней кромки и мощности. Градиентное понижение сопротивления на глубине 150–200 км до уровня 30–50 Ом·м отмечается по результатам 1D инверсии многих частных кривых BEAR [Ковтун и др., 2002; рис. 11]. Резкое понижение сопротивления в модели 1D инверсии на глубине порядка 170 км до уровня 10 Ом·м получено в т. В42 (юго-восточная часть Лапландии) [Lahti et al., 2005] с учетом дополнительных АМТ зондирований в ее окрестности. Пониженные значения сопротивления в модели AST_BEST на глубине 350–600 км хорошо соответствуют результатам 1D инверсии по отдельным группам точек BEAR [Ковтун и др., 2002; рис. 9], особенно для блоков в южной части Лапландии, на северо-востоке Карелии, на шведском берегу Ботнического залива и на юго-востоке массива BEAR (Эстония, Финский залив). Низкие фазовые отклики импеданса (~ -70° на периодах 1000–10 000 с) в т. В13, расположенной в средней части шведского Ботнического побережья, полученные с весьма высокой точ-

ностью (см. рис. 35), прямо иллюстрируют этот эффект.

Трехмерная инверсия данных BEAR

Сделанные выше предварительные заключения об избыточной электропроводности верхней мантии Фенноскандии требуют проверки и детализации в ходе 3D инверсии данных BEAR. Программа таких исследований сформулирована в работе [Varentsov et al., 2002] и основана на алгоритме [Варенцов, 2002, 2005]. В этой инверсии на начальном этапе коровая 3D модель VMAR фиксирована, а на фоне нормального разреза верхней мантии поиск избыточной электропроводности ведется в ее аппроксимации 3D финитными функциями — локальными объемными структурами с широкими вариациями интегральной электропроводности, формы и положения, зависящими, однако, всего от 13 параметров каждая. В первых экспериментах четыре финитных функции размещались в верхней мантии в смежных «окнах сканирования» масштаба 400–800 км по горизонтали и глубиной 100–350 км в пределах массива BEAR и его ближней периферии. Параметры финитных функций и сопротивления верхнемантийного горизонтально-слоистого нормального разреза совместно оптимизировались с целью подбора полученных в эксперименте BEAR длиннопериодных (512–16 384 с) фазовых данных импеданса (его фазового тензора) и оценок геомагнитного типпера (на периодах 512–8196 с). Также в среднем подбирались и данные кажущегося сопротивления, учитываемые в виде эффективных оценок с заметно (в 5–10 раз) расширенными доверительными интервалами. На следующем этапе инверсии планируется увеличить число финитных функций в верхней мантии, а также ввести дополнительные окна с финитными функциями для аппроксимации больших невязок данных, связанных с коровыми аномалиями. Подбор на этом этапе 10–15 финитных функций позволит решать обратную задачу с числом оптимизируемых параметров менее 200.

Рассмотрим первые результаты 3D инверсии с четырьмя финитными функциями в самой грубой модели коровой электропроводности VMAR-G80 (с горизонтальным разрешением 80 км). Финитные функции были первоначально размещены в центре СЗ, СВ, ЮЗ и ЮВ квадрантов территории массива

BEAR с горизонтальным размером 560×560 км². Начальная глубина центров финитных функций и их диаметр составили 230 и 160 км, соответственно, а начальная избыточная электропроводность была выбрана меньше нормальной. В процессе инверсии финитные функции расширились до 320–480 км и сдвинулись в ЮВ квадранте — в области Эстонии и Финского залива, на ЮЗ — в Северо-Восточную Швецию и область Ботнического залива, на СЗ — в область Южной Лапландии, на СВ — в Северо-Восточную Карелию. Их средняя мощность составила 100–180 км, глубина верхних кромок — 150–200 км, максимальная продольная проводимость достигла уровня 2400–3800 См, а продольная проводимости нормального разреза на глубине 150–300 км увеличилась до 1600 См со 1000 См в начальной модели. Таким образом, по центрам финитных функций суммарная продольная проводимость слоя на глубине 150–300 км достигла величин 4000–5400 См. Результаты 3D инверсии качественно соответствуют рассмотренным выше одномерным оценкам, но требуют дальнейшего уточнения с увеличением горизонтального разрешения моделей хотя бы до 40 км, введением большего числа финитных функций и анализом расширенных ансамблей инвертируемых данных (как по набору компонент данных, так по числу периодов).

Проект синхронного площадного зондирования BEAR показал возможность проведения детальных ЭМ исследований в субполярных областях вопреки искажающим эффектам неоднородного возбуждения поля. В ходе этого проекта получены важные методические результаты в области помехоустойчивой обработки синхронных ЭМ данных, построения объемных геоэлектрических моделей субконтинентального масштаба и расчета в них всего многообразия ЭМ откликов; приобретен уникальный опыт решения обратных задач. Работы по проекту продолжаются, прежде всего, в области 3D инверсии полученных данных. Идет накопление новых данных и на территории эксперимента BEAR — близится к завершению проект корового АМТ зондирования в Центральной Финляндии (FIRE_MT), начат новый проект ЕММА по более длительному (чем в BEAR) зондированию литосферы Фенноскандии синхронными мини-массивами в пределах отдельных ячеек BEAR. Объемные модели BEAR стали средством интеграции известных и новых региональных геоэлектрических данных.

Выявленная в регионе BEAR избыточная верхнемантийная электропроводность все еще требует пространственной детализации (как по латерали, так и по глубине) и геолого-геофизического истолкования. Новый раунд обсуждений ее природы, учитывающих результаты проекта BEAR, начат в работах [Ковтун и др., 2002; Varentsov et al., 2002; Lahti et al., 2005]. Рассматриваются термические и примесные гипотезы повышения верхнемантийной электропроводности [Kukkonen, Peltonen, 1999; Gordienko, 2001; Kukkonen et al., 2003; Lahti et al., 2005].

В разделе 6.3 настоящей книги В.В. Гордиенко обосновывает выделение (по комплексу геолого-геофизических, причем неэлектромагнитных данных) областей современной активизации в пределах Балтийского щита и его склонов. Эти области хорошо коррелируются с зонами современной седиментации в Ботническом и Финском заливах Балтийского моря, а также в Кандалашской губе Белого моря и распространяются на прилегающие участки суши. В пределах выделяемых зон активизации им допускается существование астенолинз частичного плавления вещества верхней мантии (2–5 %) с мощностью до 75 км и понижением удельного сопротивления до 30 Ом·м. Эти оценки хорошо соответствуют параметрам наиболее проводящего мантийного слоя разреза AST_BEST (см. табл. 1), характеризующего в среднем регион BEAR (мощность 50 км, сопротивление 25 Ом·м), а намеченные зоны активизации коррелируются с положением блоков максимальной верхнемантийной электропроводности (Эстония, Финский залив, запад Ленинградской области, шведский берег Ботнического залива, Южная Лапландия, Северо-Восточная Карелия) по 1D инверсии [Ковтун и др., 2002; Lahti et al., 2005]

и представленным выше первым результатам 3D инверсии.

Возникает вопрос: каково состояние верхней мантии вне намеченных зон активизации? В зонах влияния коровых ЭМ аномалий, затрагивающих около трети пунктов BEAR в целом и большинство из них в южной и центральной частях Финляндии, обоснованно ответить на этот вопрос без детальных решений 3D задач инверсии, а возможно и без дополнительных детализационных ЭМ зондирований, весьма затруднительно. Поэтому на данном этапе исследований трудно сопоставить результаты важнейших площадных геофизических зондирований проекта SVEKALAPKO: сейсмологических (томографический массив в Южной и Центральной Финляндии, см. раздел 1.3) и электромагнитных (синхронный массив BEAR). Однако не возникает и явных противоречий, ибо в первом случае состояние верхней мантии оценивается в пределах массива как нормальное, но с максимальными аномальными эффектами и минимальным разрешением в пограничных областях [Sandoval et al., 2004], а во втором случае даются указания на существенно повышенную электропроводность верхней мантии, но в первую очередь за пределами томографического массива или на его границах. Более того, есть корреляция зон повышения электропроводности верхней мантии и понижения скоростей продольных сейсмических волн в областях Финского и Ботнического заливов и на прилегающих шведских и эстонских территориях.

Исследования в рамках проекта BEAR велись большим международным коллективом в тесном взаимодействии и с плодотворными дискуссиями в ходе регулярных рабочих встреч, как чисто электромагнитных, так и комплексных по всей тематике проекта SVEKALAPKO.