

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.386 + 551.594

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ОТКЛИКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА БАЛТИЙСКОМ ЩИТЕ***

В.В. Плоткин, А.Ю. Белинская, П.А. Гаврыш

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

Используется вариант обработки данных синхронных площадных наблюдений регионального магнитотеллурического зондирования с учетом нелокальности отклика латерально неоднородной среды на ее возбуждение произвольным электромагнитным полем. С помощью синтетических моделей показано, что за счет накопления информации в повторных наблюдениях как с изменяемым, так и с фиксированным положением пунктов сети, можно повысить качество восстановления исходной тестовой неоднородности. Изучено влияние выбираемых размеров полигона на результаты обработки региональных данных предложенным алгоритмом.

Получены предварительные результаты обработки описываемым методом реальных данных проекта BEAR. Отмечена корреляция между расположением максимумов кажущегося электрического сопротивления и глубин поверхности Мохо. На полученных картах латеральных распределений кажущегося электрического сопротивления проявляются тектонические границы между Лапландско-Кольской, Карельской и Свекофеннской провинциями.

Региональное магнитотеллурическое зондирование, латеральная неоднородность, электропроводность, синхронные площадные данные, нелокальные функции отклика, Балтийский щит.

NONLOCAL RESPONSE FUNCTIONS: APPLICATION TO PROCESSING BEAR DATA

V.V. Plotkin, A.Yu. Belinskaya, P.A. and Gavrysh

It has been suggested that regional array MTS data be processed with an algorithm based on the nonlocal response of laterally heterogeneous subsurface to an arbitrary electromagnetic excitation. The algorithm is tested with synthetic models which show that the inversion quality can be improved by accumulation of information through repeated measurements, at either changing or fixed array configurations. Besides the array configuration, the inversion quality depends on the selected size of the survey area. The choice of the area size defines the inversion conditions in terms of choice between the magnetic and electric mode for correlation of electromagnetic potentials. The algorithm has been applied to data acquired during the BEAR Project in the Fennoscandian shield. Preliminary results indicate a spatial correlation between conductivity minimums and Moho depth maximums. The apparent resistivity maps obtained with the suggested algorithm highlight the boundaries between the Lapland—Kola, Karelia, and Svecofennia tectonic provinces.

Regional magnetotelluric soundings; apparent resistivity; lateral heterogeneity of conductivity; synchronous array data; nonlocal response function; Fennoscandian shield

ВВЕДЕНИЕ

Если первичное поле естественного источника и свойства среды заметно изменяются по латерали, обработка региональных магнитотеллурических данных в рамках модели Тихонова—Каньяра существенно усложняется [Рокитянский, 1981; Жданов, 1986; Бердичевский и др., 1995]. При выполнении международного проекта BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research [Korja, 1998]) по изучению пространственного распределения электропроводности Балтийского щита получены уникальные синхронные данные на массиве магнитотеллурических и магнитовариационных станций, расположенных на большой площади [Varentsov et al., 2002; Lahti et al., 2005]. Это наряду с традиционными методами обработки [Egbert, 2002; Варенцов и др., 2003] позволяет применить метод, учитывающий нелокальность электромагнитного отклика [Плоткин и др., 2007].

* В работе использованы экспериментальные данные, полученные участниками Рабочей группы международного проекта BEAR (Baltic Electromagnetic Array Research).

Можно использовать факт, что электромагнитное поле внутри произвольного объема полностью определяется распределением на его поверхности тангенциальных компонент либо электрического, либо магнитного полей. Решение обратной задачи осуществляется с помощью согласования друг с другом поверхностных распределений упомянутых тангенциальных компонент в процессе поиска пространственного распределения электропроводности в объеме. Был разработан соответствующий алгоритм обработки данных [Плоткин и др., 2008] и начато его тестирование.

Данная работа посвящена дальнейшему изучению влияния выбора положения пунктов в сети наблюдений и размеров полигона на качество восстановления тестовой модели латерально неоднородной среды, а также изложению первых предварительных результатов, полученных с помощью обработки предлагаемым алгоритмом реальных данных проекта BEAR.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЛГОРИТМА И ЕГО ТЕСТИРОВАНИЕ

Алгоритм и некоторые результаты его тестирования с применением синтетических данных описаны в работе [Плоткин и др., 2008], поэтому здесь дается лишь краткая характеристика метода. Вначале с помощью БПФ (быстрое преобразование Фурье) рассчитываются временные спектры на всех пунктах сети. Затем выполняется пространственная аппроксимация данных на всю площадь региона. Для каждой из регистрируемых компонент используется представление двумерными рядами Фурье. Электромагнитное поле внутри объема и на его поверхности представляется двумя модами. Вводятся потенциалы магнитного и электрического полей обеих мод. Получены уравнения для этих потенциалов. В трехмерном случае моды связаны друг с другом. В целях сокращения вычислений используется приближение плавной неоднородности среды. Поле электрической моды в этом случае находится методом возмущений. Наблюдаемые распределения компонент электромагнитного поля пересчитываются в значения введенных потенциальных функций и их вертикальных производных на поверхности исследуемого объема. Эти значения согласовываются в процессе поиска пространственного распределения электропроводности в объеме методами оптимизации.

Проведено тестирование разработанного алгоритма на синтетических моделях неоднородности среды, в том числе с привлечением реально наблюдаемых в проекте BEAR вариаций компонент электромагнитного поля. Преимущество предлагаемого способа обработки данных в том, что он не предполагает использования какой-либо модели источника поля при наличии площадных наблюдений. Для осуществления тестирования следует лишь задать данные о наборах компонент поля. Чтобы по возможности приблизиться к условиям реального эксперимента, нами использовались данные по вертикальной компоненте магнитного поля, полученные в одном из сеансов проекта BEAR. Затем для тестовой модели неоднородности и заданного расположения станций вычислялись синтетические данные по остальным компонентам электромагнитного поля.

При тестировании алгоритма использовалась модель латерально неоднородной среды. Сами значения кажущейся электропроводности по порядку величины также соответствовали их диапазону, характерному для Балтийского щита. Модель бралась в виде кольцевой области с увеличенной электропроводностью в центральной части полигона. С помощью разработанной нами точной программы рассчитывались введенные электромагнитные потенциалы. По ним вычислялись синтетические входные данные некоторого предполагаемого эксперимента. Далее проводилась их обработка описываемым алгоритмом с целью проверки возможностей восстановления исходной неоднородности.

Изучение влияния плотности пунктов в сети на результаты восстановления тестовой неоднородности было начато в работе [Плоткин и др., 2008]. Оно показало, что с увеличением плотности сети качество восстановления тестовой неоднородности возрастает. В ходе дальнейших исследований при поиске наилучшего расположения пунктов в сети установлено, что целенаправленный выбор расположения станций (в частности, равномерное расположение по окружностям вокруг центра полигона и т. п.) к каким-либо успехам не приводит. При удачном случайном расположении станций результаты оказывались лучше. Замечено, что увеличение количества станций на некоторой части полигона, способствует восстановлению тестового распределения в этом месте.

Недостаточное количество станций и реально существующие помехи не позволяют получить полную информацию о пространственных изменениях электропроводности внутри исследуемого объема. В частности, ранее в работе [Плоткин и др., 2008] было показано, что при расположении и количестве станций, соответствующих условиям одного из сеансов эксперимента BEAR (синхронные данные имелись на 32 пунктах сети), по достигнутым результатам можно говорить лишь об отдаленном сходстве исходного и восстановленного распределений электропроводности. Поэтому нами изучались различные варианты накопления информации в повторных наблюдениях.

С использованием синтетических данных в последующих тестах было установлено, что усреднение результатов обработки повторных наблюдений с малым количеством станций, но каждый раз с изменяемым их расположением, приводит к улучшению качества восстановления исходной тестовой неодно-

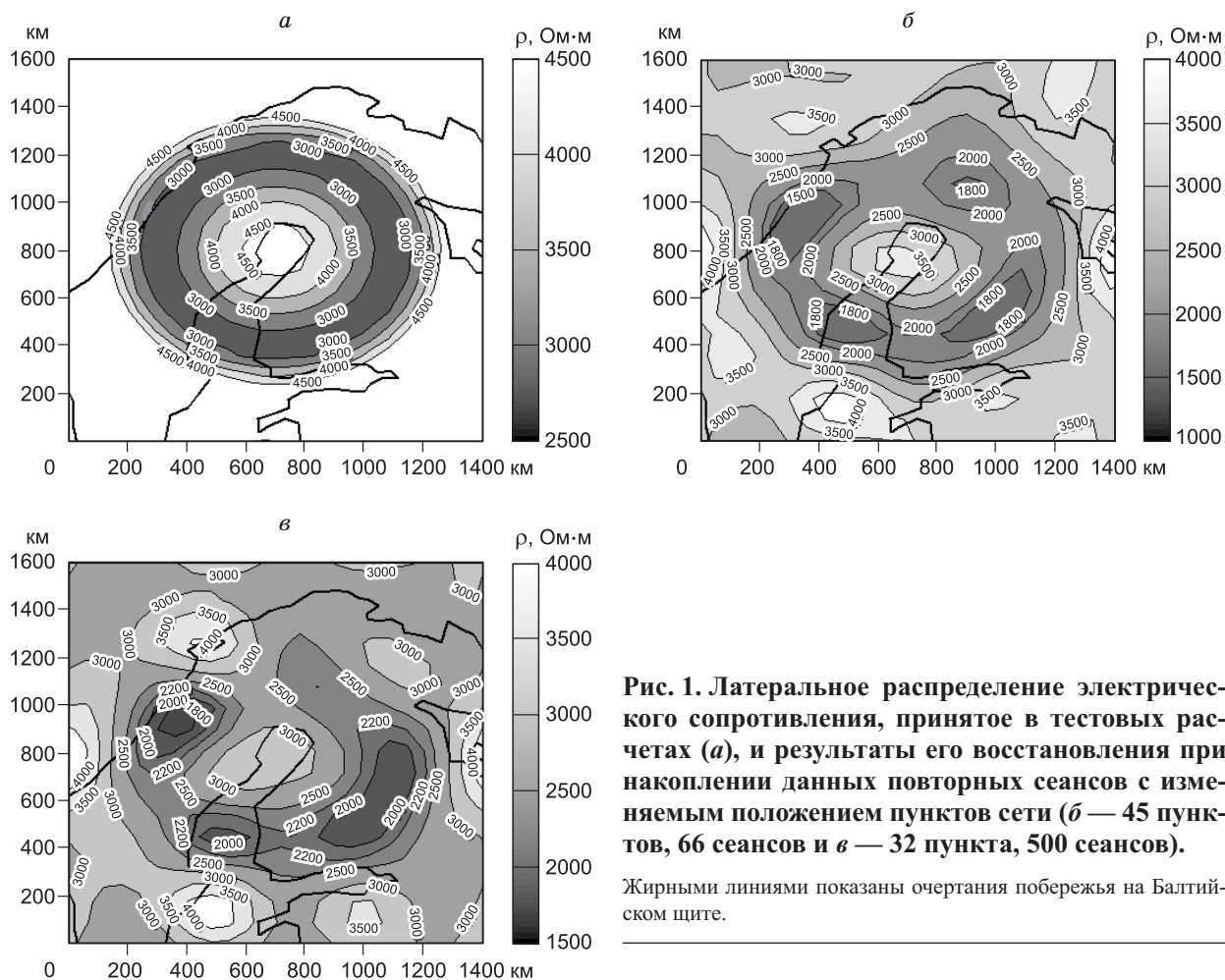


Рис. 1. Латеральное распределение электрического сопротивления, принятое в тестовых расчетах (а), и результаты его восстановления при накоплении данных повторных сеансов с изменяемым положением пунктов сети (б — 45 пунктов, 66 сеансов и в — 32 пункта, 500 сеансов).

Жирными линиями показаны очертания побережья на Балтийском щите.

родности. Для примера на рис. 1 показано исходное тестовое распределение электрического сопротивления (а) и результаты его восстановления с помощью накопления информации в повторных сеансах с новыми случайными расположениями пунктов сети (б — 45 пунктов, 66 сеансов и в — 32 пункта, 500 сеансов). Размеры полигона соответствовали условиям реализации проекта BEAR.

Может возникнуть сомнение, не являются ли при малом количестве пунктов наблюдения получаемые карты неоднородности лишь отражением их имеющегося расположения. Можно ли оценить вклад расположения пунктов в результирующую карту электрического сопротивления? В связи с этим нами изучалась возможность накопления информации и при неизменном расположении пунктов сети за счет усреднения получаемых результатов по множеству интервалов наблюдения (т. е. фактически по множеству изменяющихся источников поля). Также использовались синтетические входные данные для тестовой модели латеральной неоднородности электрического сопротивления как при случайном выборе положения станций, так и для реальной ситуации проекта BEAR. В качестве исходных данных вновь брались спектры по вертикальной компоненте магнитного поля (либо случайным образом, либо из набора последовательных сеансов эксперимента BEAR). Восстановление тестовой неоднородности в условиях реального расположения пунктов проекта BEAR с привлечением наблюдаемых данных по вертикальной компоненте магнитного поля подтвердило возможность накопления полезной информации о неоднородности за счет усреднения по различным интервалам наблюдений и при фиксированном положении пунктов сети. На рис. 2 показаны результаты восстановления тестовой неоднородности при таком варианте накопления информации по 200 сеансам.

Ранее [Плоткин и др., 2008] было также отмечено, что в одном сеансе влияние помех можно устранить усреднением получаемых результатов по нескольким соседним временным периодам.

Размеры полигона при обработке эксперимента выбираются, вообще говоря, произвольно, поэтому изучалось влияние выбираемых размеров полигона на результаты обработки региональных данных предложенным алгоритмом. Использовались синтетические входные данные для заданной тестовой модели латеральной неоднородности электрического сопротивления. Они получены с помощью точных численных расчетов потенциалов электромагнитного поля по схеме, аналогичной описанной в работе

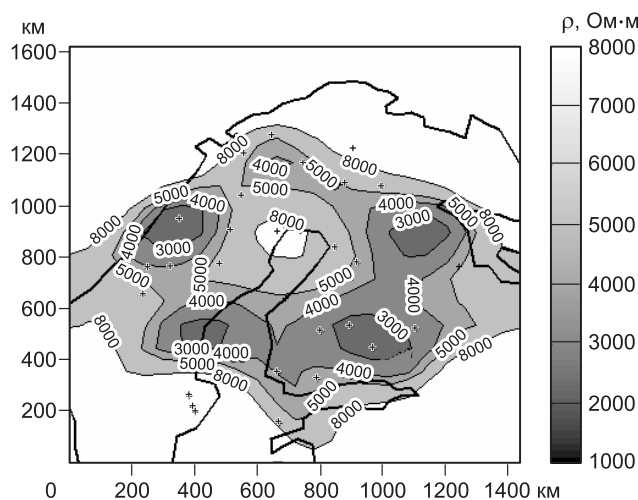


Рис. 2. Восстановление тестового распределения электрического сопротивления при накоплении данных повторных сеансов с неизменным положением пунктов сети.

Крестиками показаны пункты наблюдений проекта BEAR.

[Плоткин, 2004] для случая сферических координат. Эти потенциалы, вычисленные на равномерной сетке, представлялись двумерными рядами Фурье с максимальным порядком пространственных гармоник, равным 3. С помощью таких рядов можно было определять значения компонент поля (входные экспериментальные данные) при любом расположении пунктов сети.

Восстановление латеральной зависимости тестовой неоднородности с помощью предлагаемого

алгоритма производилось при отличающихся размерах полигона и с разными наборами аппроксимирующих тригонометрических функций. Чтобы не учитывать влияние количества пунктов в сети наблюдений, она выбиралась достаточно плотной. Установлено, что с точки зрения качества пространственной аппроксимации экспериментальных данных по компонентам поля при заданном количестве пунктов сети существуют оптимальные размеры полигона. В изученных ситуациях увеличение или уменьшение размеров полигона на первые доли процента не приводило к заметным отличиям восстановленного латерального распределения электрического сопротивления от исходного. Фактически менялись лишь размеры пространственного «окна», через которое «наблюдалась» неоднородность. Однако с дальнейшим увеличением отклонений размеров полигона от первоначальных до единиц процентов искажения становились заметными. Для сравнения на рис. 3 показаны результаты восстановления тестовой неоднородности с использованием данных 90 станций с тем же порядком функций 3, их количеством 49 и исходными размерами полигона (а) и данных 150 станций с другим порядком функций 4, их количеством 81 и с увеличенными размерами полигона (б).

При отклонениях размеров полигона более чем на 5% «восстановленное» латеральное распределение лишь в общих чертах напоминало исходный контур тестовой неоднородности электрического сопротивления. Дело в том, что с ростом отклонений размеров полигона от первоначальных наборы с одним и тем же количеством тригонометрических функций все хуже аппроксимировали входные экспериментальные значения компонент поля на пунктах сети. Тем самым увеличивались погрешности в исходных данных (электромагнитных потенциалах) для решения обратной задачи исследуемым алгоритмом. При больших отклонениях эти погрешности маскировали полезный сигнал о тестовой неоднородности в компонентах (и потенциалах для обратной задачи). При повышении порядка тригонометрических функций и их количества для улучшения качества аппроксимации возникала также необходимость увеличить количество пунктов на полигоне и плотность сети. Оптимальный набор обсуждаемых параметров для полигона при обработке реальных данных может быть определен по падению величин невя-

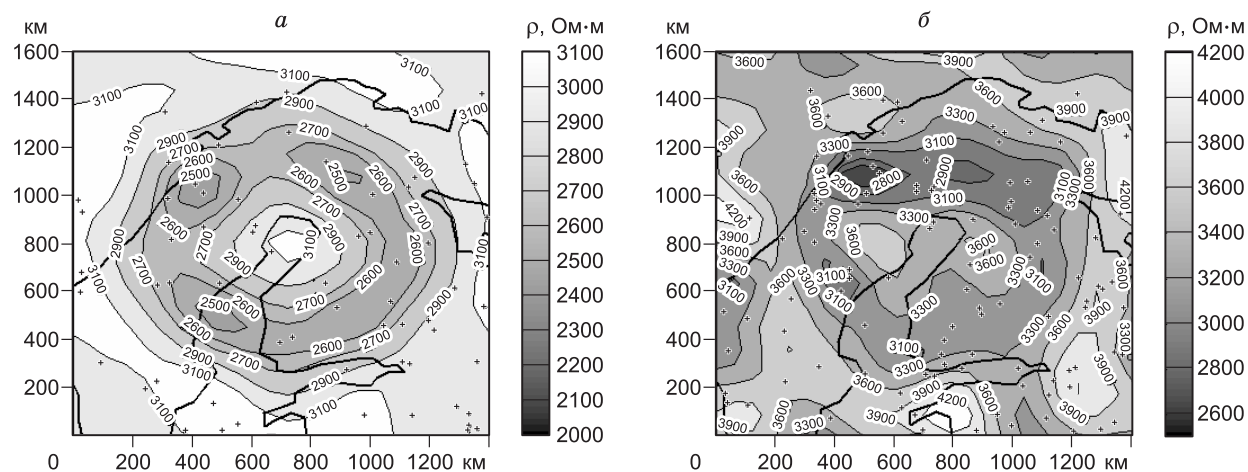


Рис. 3. Восстановление тестового распределения электрического сопротивления при расчетных (а) и увеличенных на 1% (б) размерах полигона.

зок при постановке и решении обратных оптимизационных задач. Обработка реальных данных проекта BEAR с различными размерами полигона также подтвердила сказанное. Как будет показано далее, выбором размеров полигона фактически определяются условия поиска модели латеральной неоднородности электрического сопротивления. При разных размерах полигона согласование электромагнитных потенциалов может производиться с преимуществом магнитной или электрической моды.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ BEAR

Получены предварительные результаты обработки описываемым методом реальных данных проекта BEAR. Был взят промежуток времени с 19 июня по 3 июля 1998 г. с наибольшим количеством синхронно работавших пунктов наблюдений продолжительностью около 14 сут (600 тыс. отсчетов через 2 с). Записи с большим количеством пропусков (больше 20 %) отбраковывались, короткие пропуски в данных заполнялись с помощью линейной интерполяции. В итоге удалось оставить для последующей обработки 32 пункта с синхронной регистрацией данных по вариациям всех компонент магнитного поля и 24 пункта по вариациям горизонтальных компонент электрического поля. Размеры полигона выбирались в соответствии с условиями реализации проекта BEAR (в большинстве случаев 1440 км на север и 1620 км на восток с центральной точкой 64° с.ш. и 25° в.д.).

При анализе указанных данных вначале изучались характеристики региона в целом. Обсуждаемый алгоритм не включает в обработку средние по региону (по пунктам) значения компонент электромагнитного поля, т. е. поле плоской волны. По таким средним значениям горизонтальных компонент отдельно можно вычислить, пользуясь традиционными методиками, кажущееся сопротивление всего региона в целом в зависимости от временного периода (кажущееся сопротивление нормально-глубинного разреза региона). В данной работе средние по региону значения компонент поля находились сначала по каждому из нескольких имеющихся двухчасовых сеансов. Затем проводилось усреднение полученных амплитудных спектров компонент для региона в целом по всем двухчасовым сеансам. Определялось, на каких временных периодах средние по региону горизонтальные компоненты магнитного поля превышают его вертикальную компоненту, т. е. справедливо приближение вертикально падающей плоской волны и модель Тихонова—Каньяра для всего региона в целом. Далее полученные зависимости от временного периода амплитудных спектров горизонтальных компонент аппроксимировались полиномами второй степени. По этим аппроксимациям определялось сглаженное кажущееся сопротивление всего региона в зависимости от временного периода для обоих отношений (E_x/H_y и E_y/H_x). Установлено, что на временных периодах (30—2000 с) полученные сглаженные зависимости кажущихся сопротивлений для обоих отношений существенно не отличаются (рис. 4), что и говорит о возможности определения по этим данным нормального глубинного (горизонтально-однородного слоистого) разреза всего региона в целом, а также об отсутствии анизотропии кажущейся электропроводности.

Далее при изучении нормального глубинного разреза использовалась низкочастотная асимптотика зависимости кажущегося сопротивления от временного периода для определения глубины идеально проводящего основания [Жданов, 1986]. Установлено, что глубина основания находится предположительно в диапазоне 200—300 км, со средним значением 250 км. Последующее определение нормального глубинного разреза с большим количеством слоев указывает на существование множества эквивалентных решений. Необходимо весьма точное знание зависимости кажущегося сопротивления от временного периода для сужения класса эквивалентных решений.

Рассматривался также вариант зондирования на суточной временной гармонике ($T = 86400$ с). С этой целью предлагаемым алгоритмом обработан интервал длительностью 13 сут. Здесь было принято во внимание, что выбор размеров полигона фактически определяет горизонтальные волновые числа, которыми описывается исследуемое электромагнитное поле. Чтобы выполнить известное условие частотного зондирования [Рокитянский, 1981] на суточном временном периоде, необходимо уменьшить

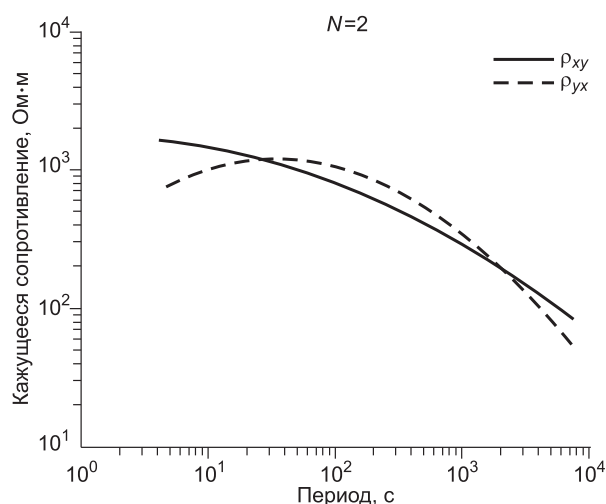


Рис. 4. Усредненное по двухчасовым интервалам кажущееся сопротивление Балтийского щита в зависимости от периода, вычисленное по отношениям E_x/H_y и E_y/H_x и сглаженное полиномами второй степени.

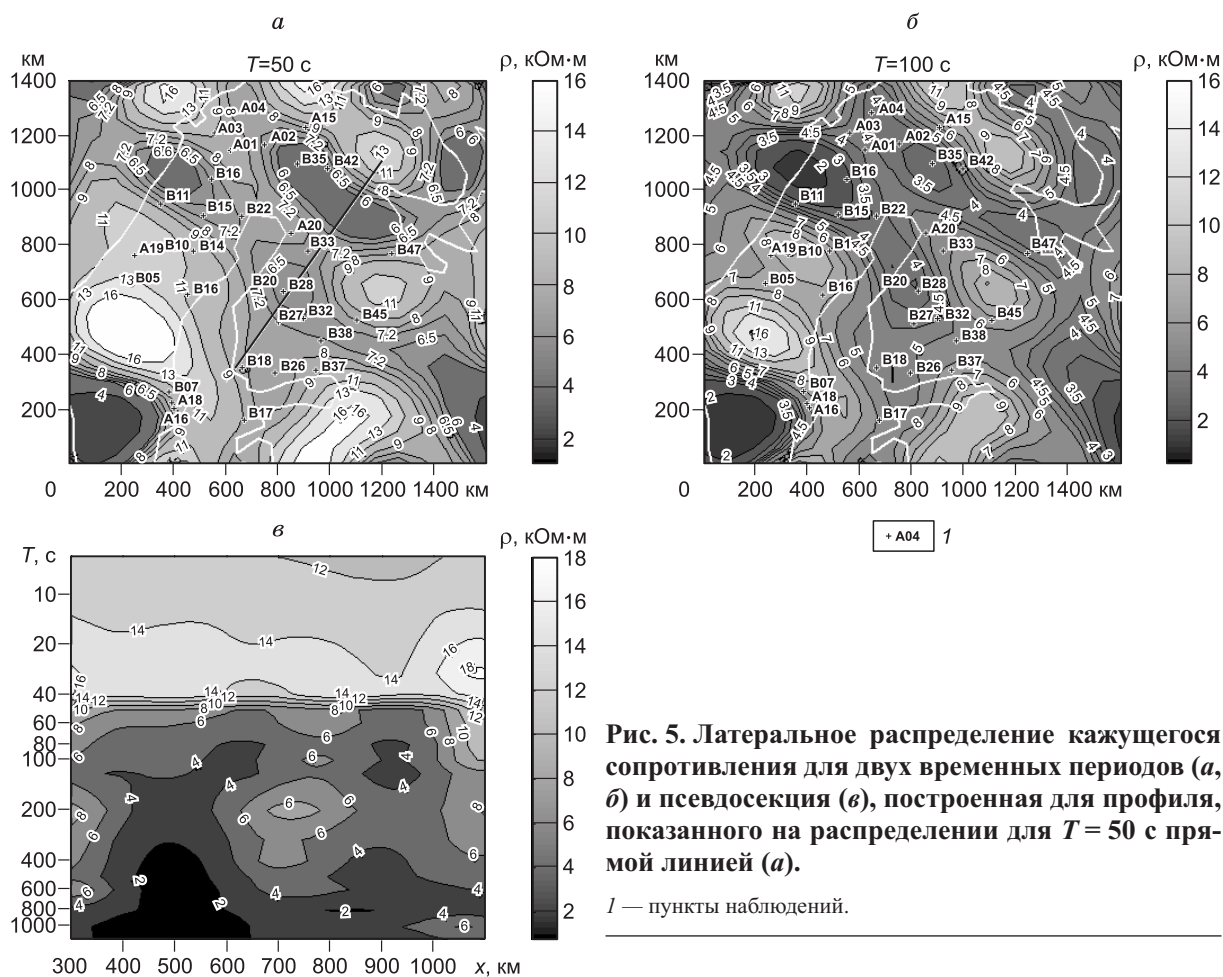


Рис. 5. Латеральное распределение кажущегося сопротивления для двух временных периодов (*а*, *б*) и псевдосекция (*в*), построенная для профиля, показанного на распределении для $T = 50$ с прямой линией (*а*).

l — пункты наблюдений.

горизонтальные волновые числа. Поэтому при обработке данных на суточном временном периоде размеры полигона увеличены (4320 км на север и 4860 км на восток). Латеральная неоднородность электрического сопротивления в этих условиях в центральной части полигона практически не определяется. Среднее значение кажущегося сопротивления в разных вариантах получается 35—50 Ом·м, что вполне согласуется с глобальной кривой кажущегося сопротивления Земли. Можно отметить, что подгонка модельных параметров электрического сопротивления при указанных увеличенных размерах полигона на суточном временном периоде осуществляется главным образом за счет согласования компонент магнитного поля магнитной (TE) моды.

На более коротких временных периодах (10—1000 с) для достижения большей детальности использовались меньшие размеры полигона (1440 км на север и 1620 км на восток и близкие к ним). При этом условие частотного зондирования для высокоомных пород Балтийского щита выполняется хуже, и среднее по региону значение кажущейся электропроводности лишь слабо зависит от соотношения компонент магнитного поля TE моды. Подгонка латеральной модели электрического сопротивления в такой ситуации осуществляется в основном за счет согласования компонент электрического поля электрической (TM) моды, порождаемой латеральной неоднородностью среды. Величина базового значения электропроводности σ_0 на картах неоднородности практически не сказывается, так как электрическая мода по амплитуде определяется только относительными латеральными производными

$\frac{1}{\sigma} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial x, \partial y} \right|$ [Плоткин и др., 2008]. Тот или иной выбор σ_0 приводит к изменению количества итераций, необходимых для сходимости к средней по региону величине кажущейся электропроводности.

В ходе обработки строились карты латерального распределения кажущегося электрического сопротивления в зависимости от временного периода. С целью проверки и поиска наименьших значений невязок обработка повторялась при нескольких размерах полигона. В итоге было получено несколько латеральных распределений кажущегося электрического сопротивления при оптимальных размерах полигона. В качестве примера на рис. 5, *а* и *б* приведены такие карты для временных периодов 50 и 100 с. Прямой на рис. 5, *а* показан профиль, для которого по всем полученным картам построен «глубинный» разрез кажущегося сопротивления.

щихся сопротивлений в зависимости от временных периодов (псевдосекция). Эта псевдосекция приведена на рис. 5, в, где положение на профиле определяется его проекцией на ось *OX*, направленную на север.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Балтийский щит (Fennoscandian shield) является наиболее крупным выступом древнего кристаллического фундамента Восточно-Европейской платформы площадью около 1 млн км² (рис. 6, [SVEKALAPKO Research, 1999]). С юго-запада он ограничен системой разломов, представляющих линию Торнквиста—Тейссера [Строение..., 1993]. На юго-востоке поверхность щита полого погружается под рифейские и более молодые отложения Русской плиты. Северная граница щита по системе разломов Карпинского проходит вдоль Мурманского побережья. Здесь происходит резкое ступенчатое погружение кристаллического фундамента под отложения чехла Баренцевоморской плиты. На северо-западе периферия щита перекрыта складчатыми каледонидами.

Возраст пород, слагающих литосферу Балтийского щита, увеличивается в направлении с юго-запада на северо-восток. Он состоит из кристаллических пород протерозоя и архея. Внутренняя структура Балтийского щита сформирована главным образом в свекокарельскую—позднесвекокарельскую тектонические эпохи [Трипольский и Шаров, 2004]. В ее составе в направлении с юго-запада на северо-восток различают главные геотектонические провинции: Дальсландскую, Свекофеннскую, Карельскую и Лапландско-Кольскую. Эти провинции отличаются составом и строением слагающих их пород, геологической историей.

На территории Балтийского щита осадки представлены преимущественно рыхлыми моренными отложениями [Строение..., 1993]. Их продольная проводимость в Карело-Кольском регионе изменяется в небольших пределах (0.01—0.05 См). Только в Южной Карелии, в зоне сочленения щита и платформы, мощность четвертичных отложений достигает 100 м, а их продольная проводимость — 1 См. На остальной территории Карелии и Кольского полуострова мощность рыхлых отложений колеблется в пределах 10—20 м при среднем сопротивлении от нескольких сот до тысяч Ом на метр.

В зоне сочленения протерозойской Свекофеннской и архейской Карельской провинций геолого-геофизическими методами хорошо прослеживается Ладожско-Ботническая зона шириной до 100 км [Строение..., 1993]. Она представляет собой одну из важных структур Балтийского щита. В геофизических полях Ладожско-Ботническая зона во многом подобна линии Тейссера—Торнквиста. Эта зона контролирует размещение различных месторождений полезных ископаемых.

Менее выразительна зона сочленения Лапландско-Кольской и Карельской провинций. Эта зона трасируется не только на территории Балтийского щита, но и к югу на Восточно-Европейской платформе.

Упомянутые основные тектонические границы между Лапландско-Кольской, Карельской и Свекофеннской провинциями схематически отображены на рис. 6 жирными линиями (штрихами показано предполагаемое положение границы). Эти границы проявляются и на полученных в данной работе картах латеральных распределений кажущегося электрического сопротивления на временных периодах 50 и 100 с (см. рис. 5, а, б). Недостаточное количество пунктов регистрации не позволяет пока более детально изучить картину шовных зон между основными провинциями, их локализацию, мелкую структуру, ширину, глубинное строение и т.д. Можно говорить лишь о повышенной электропроводности горных пород, заполняющих эти разломные зоны.

Интересно сравнить также указанные карты латеральных распределений электри-

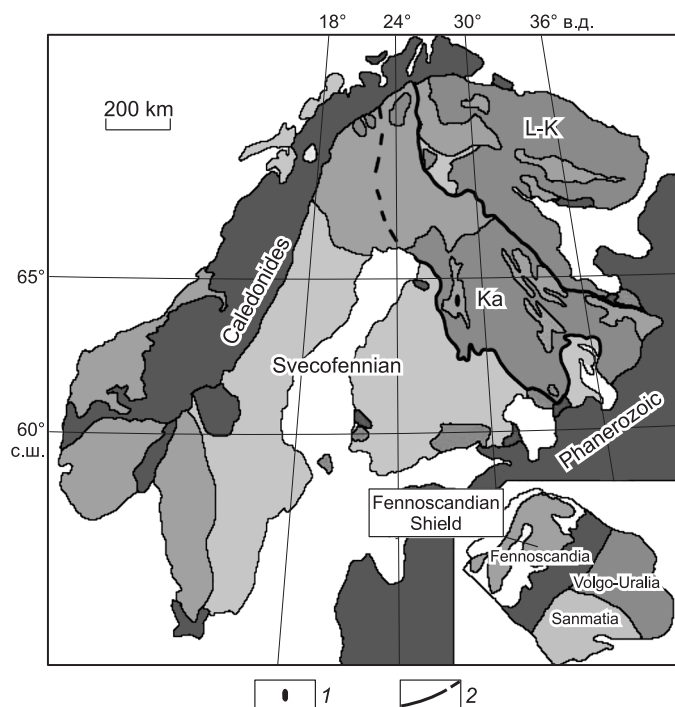


Рис. 6. Упрощенная геологическая карта Балтийского щита [SVEKALAPKO Research, 1999].

L-K, Ka — Лапландско-Кольская и Карельская провинции. 1 — палеопротерозойские офиолиты, 2 — границы главных провинций.

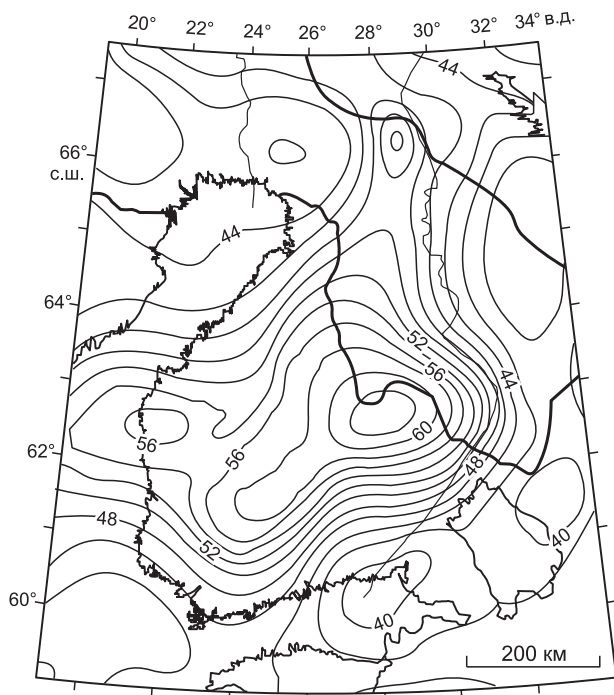


Рис. 7. Изолинии толщины (км) земной коры (тонкие линии) и основные тектонические границы (жирные линии) для исследуемого региона [Sandoval et al., 2003].

ческого сопротивления с полученной сейсмическими методами картой распределения глубин поверхности Мохо на Балтийском щите (рис. 7) из работы [Sandoval et al., 2003]. Намечается некоторая корреляция между расположением максимумов электрического сопротивления и максимумов глубин поверхности Мохо. Она особенно заметна в местах ее наиболее глубокого понижения (до 60—65 км) вблизи Ладожско-Ботнической зоны, в районе Выборгского массива гранитов рапакиви (глубины поверхности Мохо около 40 км) и в районе (вблизи западного побережья Ботнического залива (погружение поверхности Мохо до 56 км). Это представляется важным, поскольку латеральные распределения границы Мохо и глубинной электропроводности имеют различную природу. В соответствии с принципом изостазии граница поверхности Мохо глубже в зонах с большей нагрузкой на мантию из-за

наличия там избыточных масс. Электропроводность определяется, в частности, поведением проводящих флюидов. Происходит ли выдавливание флюидов из упомянутых зон или фильтрация и количество флюидов в них как-то зависят от плотности пород, пока неясно. Не исключено также, что в основании земной коры вблизи поверхности Мохо возникает проводящий слой и наблюдается его сопутствующее понижение в местах максимумов глубин поверхности Мохо.

Следует отметить, что, по сейсмическим данным, мощность земной коры увеличивается и на профилях, пересекающих упомянутые шовные зоны [Строение..., 1993]. Однако на картах электрического сопротивления эти зоны отмечены пониженными значениями. Кажущуюся несогласованность можно объяснить латеральным увеличением электропроводности внутри всей толщи шовных зон, компенсирующим эффект понижения проводящего слоя в основании земной коры. Это, в частности, подтверждается картами интегральной электропроводности верхних слоев Балтийского щита на глубинах до 10 км, приведенными в [Lahti et al., 2005], а также характером распределения кажущихся сопротивлений на псевдо-секции (см. рис. 5, в).

ВЫВОДЫ

На синтетических моделях латеральной неоднородности среды и поля показано, что обработка синхронных площадных данных регионального МТЗ с учетом нелокальности электромагнитного отклика позволяет повысить качество восстановления исходных распределений за счет накопления информации в повторных наблюдениях как с изменяемым, так и с фиксированным положением при ограниченном количестве пунктов в сети.

Установлено, что для качественной пространственной аппроксимации экспериментальных данных по компонентам поля в пунктах сети существуют оптимальные размеры полигона. Оптимальный размер полигона при обработке реальных данных может быть определен по падению величин невязок при постановке и решении обратных оптимизационных задач. Выбором размеров полигона фактически определяются условия поиска модели латеральной неоднородности электропроводности. При разных размерах полигона согласование электромагнитных потенциалов может производиться с преимуществом магнитной или электрической моды.

Получены предварительные результаты обработки описываемым методом реальных данных проекта BEAR. Отмечена корреляция между расположением максимумов кажущегося электрического сопротивления и максимумов глубин поверхности Мохо. Основные тектонические границы между Лапландско-Кольской, Карельской и Свекофеннской провинциями на полученных картах латеральных распределений кажущейся электропроводности проявляются ее повышенными значениями. Это можно объяснить латеральным увеличением электропроводности внутри всей толщи шовных зон.

При написании статьи авторы использовали экспериментальные данные, полученные участниками Рабочей группы международного проекта BEAR, и признательны А.А. Жамалетдинову и всем участни-

кам Рабочей группы за предоставленную возможность работать с этими данными. Авторы также благодарят А.И. Ковтун, С.А. Вагина, рецензентов А.В. Поспеева и Н.Н. Неvedрову за внимание к работе и полезные советы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-05-00007).

ЛИТЕРАТУРА

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Кузнецов В.А. Бимодальная двумерная интерпретация магнитотеллурических зондирований // Физика Земли, 1995, № 10, с. 3—19.

Варенцов Ив.М., Соколова Е.Ю. Рабочая группа проекта BEAR. Диагностика и подавление авроральных искажений передаточных операторов электромагнитного поля в эксперименте BEAR // Физика Земли, 2003, № 4, с. 21—48.

Жданов М.С. Электроразведка. М., Недра, 1986, 316 с.

Плоткин В.В. Электромагнитное поле в неоднородном шаре (трехмерный случай) // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (9), с. 1154—1167.

Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А., Губанов А.И. Применение нелокальных функций отклика при глобальном электромагнитном зондировании // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (11), с. 1241—1251.

Плоткин В.В., Белинская А.Ю., Гаврыш П.А., Губанов А.И. Эффект нелокальности электромагнитного отклика при региональном магнитотеллурическом зондировании // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (11), с. 1150—1162.

Рокитянский И.И. Индукционные зондирования Земли. Киев, Наукова Думка, 1981, 296 с.

Строение литосферы Балтийского щита. Результаты исследований по Международным геофизическим проектам / Ред. Н.В. Шаров. М., Национальный геофизический комитет РАН, 1993, 166 с.

Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов Северного полушария Земли по сейсмическим данным. Петрозаводск, КНЦ РАН, 2004, 159 с.

Egbert G.D. Processing and interpretation of electromagnetic induction array data // Surv. Geophys., 2002, v. 23, № 2—3, p. 207—249.

Korja T. BEAR — Baltic Electromagnetic Array Research // EUROPROBE News, 1998, № 12. <http://www.geofys.uu.se/eprobe/Publicat/news12/news12.html>

Lahti I., Korja T., Kaikkonen P., Vaittinen K. Bear Working Group. Decomposition analysis of the BEAR magnetotelluric data: implications for the upper mantle conductivity in the Fennoscandian Shield // Geophys. J. Int., 2005, v. 163, № 3, p. 900—914.

Sandoval S., Kissling E., Ansgore J., SVEKALAPKO Seismic Tomography Working Group. High-resolution body wave tomography beneath the SVEKALAPKO array: I. A priori three-dimensional crustal model and associated travelttime effects on teleseismic wave fronts // Geophys. J. Int., 2003, v. 153, № 1, p. 75—87.

SVEKALAPKO Research // <http://www.geofys.uu.se/eprobe/Projects/svekalap/> Svekalap.htm 1999. Uppsala, Sweden.

Varentsov Iv.M., Engels M.; Korja T., Smirnov M.Yu. The generalised geoelectric model of Fennoscandia: a challenging database for long period 3D modelling studies within the Baltic Electromagnetic Array Research (BEAR) // Физика Земли, 2002, № 10, с. 64—105.

*Рекомендована к печати 26 декабря 2008 г.
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию
11 июля 2008 г.*