

На правах рукописи

Пушкарёв Павел Юрьевич

**МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ОКЕАНА К КОНТИНЕНТУ
(НА ПРИМЕРЕ КАСКАДНОЙ СУБДУКЦИОННОЙ ЗОНЫ)**

Специальность 25.00.10

Геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2002

Работа выполнена на кафедре геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бердичевский М.Н.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Спичак В.В.
кандидат геолого-минералогических наук
Сафонов А.С.

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт геофизических методов разведки
(ГФУП «ВНИИГеофизика»)

Защита диссертации состоится 20 февраля 2002 г. в 14 час. 30 мин. на заседании Диссертационного совета Д.501.001.64 при Московском государственном университете по адресу: Москва, Воробьевы горы, ГЗ МГУ, зона «А», Геологический факультет, ауд. 308.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке геологического факультета МГУ (ГЗ МГУ, зона «А», 6-й этаж).

Автореферат разослан «___» _____ 2002 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
к.т.н., с.н.с.

Б.А. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Глубинные магнитотеллурические исследования (МТ-исследования) основаны на изучении естественного переменного электромагнитного поля Земли. С их помощью можно получить информацию об электропроводности земной коры и верхней мантии океанов и континентов. В свою очередь, глубинная электропроводность позволяет делать выводы о флюидном, температурном режимах и реологии земных недр. Глубинные МТ-исследования являются важной частью комплекса методов глубинной геофизики, особенно в тектонически активных регионах.

Диссертационная работа посвящена как изучению общих закономерностей МТ-исследований, выполненных в области перехода от океана к континенту, так и интерпретации МТ-данных, полученных в Каскадной субдукционной зоне (называемой также зоной субдукции Хуан де Фука), расположенной на северо-западном побережье США.

Прибрежные области характеризуются мощной аномалией МТ-поля, возникающей вследствие резкого горизонтального изменения электропроводности при переходе от океана к континенту. Существенные изменения, по сравнению с внутриконтинентальными областями, претерпевает чувствительность МТ-поля к глубинным слоям и неоднородностям. Понимание этих изменений необходимо для успешной интерпретации МТ-данных, полученных в области перехода от океана к континенту. Это определяет актуальность исследования общих закономерностей прибрежных МТ-зондирований.

Одним из путей к пониманию геотектонического строения и развития Земли является исследование процесса субдукции (т.е. погружения океанической плиты под континентальную). Субдукция сопровождается переносом воды и образованием расплавов, в связи с чем чувствительные к флюидам МТ-зондирования должны относиться к главным инструментам изучения этого процесса.

Крупнейшим проектом, направленным на исследование зоны субдукции, стал международный эксперимент EMSLAB (1985 – 1987 гг.), в рамках которого были получены МТ-данные в Каскадной субдукционной зоне (наиболее детальные исследования были проведены по профилю, названному Линией Линкольн). К сожалению, интерпретация этих данных была проведена либо без учета информативности различных компонент магнитотеллурического поля в прибрежной зоне, либо без достаточного согласия с имеющимися представлениями о геолого-геофизических особенностях региона. В этой связи становится актуальным построение новой геоэлектрической модели Каскадной субдукционной зоны, лишенной этих недостатков.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Целью диссертационной работы является развитие методики интерпретации МТ-данных, полученных в области перехода от океана к континенту. Интерпретация должна учитывать различную чувствительность компонент МТ-поля к элементам глубинного геоэлектрического строения субдукционной зоны. Важнейшим моментом интерпретации является выбор интерпретационной модели, согласующейся со всей геолого-геофизической информацией. С помощью развитой методики должна быть построена новая геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны, расширяющая наши представления о процессе субдукции и о глубинном геолого-тектоническом строении субдукционных зон.

ЗАДАЧИ РАБОТЫ.

1. Двумерное моделирование береговых искажений МТ-кривых и анализ чувствительности компонент МТ-поля к основным элементам глубинного строения субдукционной зоны.
2. Критический анализ известных геоэлектрических моделей Каскадной субдукционной зоны.
3. Распознавание трехмерных искажений МТ-кривых, полученных в этой зоне, и их анализ с помощью пленочного моделирования.
4. Разработка методики двумерной инверсии МТ-данных, полученных в зоне перехода от океана к континенту.

5. Построение интерпретационной модели, учитывающей априорную геолого-геофизическую информацию о Каскадной субдукционной зоне.
6. Двумерная бимодальная инверсия МТ-данных и построение новой геоэлектрической модели изучаемого региона.

В работе используются следующие понятия. Импеданс – МТ-характеристика, определяемая из соотношения между горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей. Типпер – МТ-характеристика, определяемая из соотношения между вертикальной и горизонтальными компонентами магнитного поля. ТЕ-мода и ТМ-мода – части двумерного МТ-поля, связанные с токами, текущими соответственно вдоль и вкрест геоэлектрических структур.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

1. В зоне перехода от океана к континенту наибольшей чувствительностью к глубинным проводящим структурам обладает ТЕ-мода. При этом ТМ-мода позволяет определять интегральное сопротивление литосферы океана и верхней коры континента, а также степень кондуктивной связи между коровыми структурами. Таким образом, наиболее полную информацию о геоэлектрическом строении прибрежной зоны дает бимодальная инверсия.
2. Региональные изменения суммарной продольной проводимости верхнего слоя в Каскадной субдукционной зоне имеют квазидвумерный характер.
3. Зоны перехода от океана к континенту характеризуются сложным глубинным строением, и объем априорной информации может быть недостаточен для построения адекватной интерпретационной модели. Поэтому инверсию следует проводить в режиме проверки гипотез, используя такую геометрию геоэлектрических границ, при которой возможен свободный выбор любой из гипотез в процессе автоматической инверсии.
4. При инверсии МТ-данных, полученных в прибрежной зоне, основным результатом может быть получен по типперу, низкочастотные значения которого свободны от влияния приповерхностных неоднородностей. При этом импеданс и его трансформанты будут выполнять контролирующую и

детализирующую функции. Наиболее эффективен трехуровневый алгоритм инверсии, основанный на раздельной инверсии: 1) типпера, 2) продольных МТ-кривых и 3) поперечных МТ-кривых, с построением на последнем этапе обобщенной модели. Полученная с помощью этого алгоритма новая геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны согласуется с современными представлениями о геотектоническом строении региона и его термодинамике и обеспечивает невязки, которые не превышают погрешностей измерений и двумерной аппроксимации среды.

5. В результате интерпретации МТ-данных под Каскадной вулканической дугой выделена субвертикальная проводящая зона, пронизывающую кору и мантию. Низкое сопротивление этой зоны объясняется наличием в ней расплавов.
6. Построенная геоэлектрическая модель свидетельствует о том, что флюиды в средней и нижней частях коры имеют глубинное происхождение, а не затянута под континент в процессе субдукции.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. В ходе проведенных исследований получены следующие новые научные результаты:

- изучена чувствительность различных компонент МТ-поля к элементам геоэлектрического строения прибрежных зон, а также исследована эффективность их двумерной инверсии;
- развита методика интерпретации прибрежных МТ-данных, основанная на режиме проверки гипотез и на трехуровневом алгоритме инверсии компонент МТ-поля с приоритетом типпера и с построением на последнем этапе обобщенной модели;
- построена новая геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны, дающая представление о ее флюидном и термальном режимах.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Разработанная методика интерпретации МТ-данных может быть применена при исследовании прибрежных зон в различных регионах мира. Многие рассмотренные в работе приемы могут оказаться полезными при изучении внутриконтинентальных

областей. Полученные методические результаты могут использоваться при анализе сейсмической опасности, а также при прогнозе месторождений полезных ископаемых и геотермальных ресурсов.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ. При построении геоэлектрической модели Каскадной субдукционной зоны использованы МТ-данные, полученные в рамках проекта EMSLAB (Wannamaker et al, 1989). При сборе априорной информации о регионе рассмотрено большое число отечественных и зарубежных публикаций.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД. Автором выполнено двумерное моделирование и двумерная инверсия синтетических данных с целью изучения чувствительности МТ-поля и эффективности двумерной инверсии МТ-данных. Собрана априорная геолого-геофизическая информация, относящаяся к Каскадной субдукционной зоне. Построена карта суммарной продольной проводимости верхнего слоя этого региона и выполнено математическое пленочное моделирование для изучения искажений, создаваемых региональными неоднородностями этого слоя. Выполнен анализ и инверсия МТ-данных по Линии Линкольн. Построена геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные положения диссертации докладывались: на Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам “Ломоносов”, Москва, 1999; на Международной конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика-99”, Санкт-Петербург, 1999; на Международной геофизической конференции, посвященной 300-летию горно-геологической службы России, Санкт-Петербург, 2000; на Международной конференции молодых ученых, специалистов и студентов “Геофизика-2001”, Новосибирск, 2001; на семинаре “Deep Electromagnetic Soundings of the Mantle Around the Teisseyre-Tornquist Zone”, Belsk Duzy, Poland, 2001.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликованы 7 работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, общим объемом 162 машинописных страницы, содержит 62 рисунка, 16 таблиц и список литературы из 80 наименований, в том числе 44 иностранных.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, номер проекта 99-05-64758.

Автор признателен всем, кто помогал ему в этой работе, и кто способствовал его профессиональному развитию: В.К. Хмелевскому, А.Г. Яковлеву, К. Новожинскому, В.Ю. Семенову, И.М. Варенцову, Е.Ю. Соколовой, Н.А. Пальшину, В.А. Кузнецову, Б.П. Петрухину, И.Н. Модину, В.А. Шевнину, В.А. Куликову, В.П. Бубнову.

Особую благодарность автор выражает научному руководителю М.Н. Бердичевскому за постоянную помощь и поддержку при постановке задач и при преодолении трудностей, за большое внимание к работе и за воспитание диссертанта, как специалиста.

Огромную помощь при выполнении данной работы оказал Л.Л. Ваньян. В частности, под его руководством была выполнена работа по пленочному моделированию МТ-поля. Его советы и доброе отношение помогли автору разобраться в той сложной области геоэлектрики, которая связана с геолого-геофизическим истолкованием результатов, и пробудили интерес ко многим важным научным проблемам. К сожалению, Леонид Львович так и не увидел окончательных результатов этой работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. Геолого-геофизическая изученность

Каскадной субдукционной зоны.

В первой главе проведено обобщение геологической, сейсмической, гравиметрической, геотермической и другой информации о регионе, а также рассмотрены современные представления о его геотектоническом строении и развитии.

Каскадная субдукционная зона находится на западном побережье Северной Америки. Она представляет собой район, в котором происходит субдукция океанической микроплиты Хуан де Фука под континентальную Северо-Американскую плиту.

Спрединговый хребет, в котором образуется плита Хуан де Фука, располагается на небольшом (~ 500 км) расстоянии от берега, поэтому возраст этой плиты невелик (менее 10 млн. лет). При этом современная скорость субдукции также сравнительно мала и составляет примерно 4 см/год (Хаин и Ломизе, 1995).

Происхождение основных геологических структур региона связано с процессом субдукции и сопровождающим его вулканизмом. Все эти структуры имеют меридиональное простирание. Двигаясь с запада на восток, в океане можно выделить: абиссальную котловину плиты Хуан де Фука, сложенный уплотненными осадками аккреционной призмы континентальный склон и покрытый рыхлыми осадками шельф. На континенте состоящий из вулканогенно-осадочных пород Береговой хребет сменяется заполненной мощной толщей осадков долиной реки Вилламет, еще восточнее простираются сложенные вулканическими и вулканогенно-осадочными породами Каскадные горы (вначале более древние – Западные Каскады, затем более молодые – Высокие Каскады), а далее начинаются покрытые лавами внутриконтинентальные плато (Кинг, 1961; Хаин, 1971).

Рассмотренные структуры почти полностью скрывают древнее (дотретичное) основание континента, сформировавшееся в результате аккреции (присоединения к материку) множества террейнов (прежде самостоятельных литосферных блоков - океанических поднятий, островных дуг, частей других материков). В центральной части Каскадной субдукционной зоны (территория штата Орегон) прибрежная часть основания сложена породами террейна Силеция (Khain et al, 1988).

Отличительной особенностью центральной части Каскадной субдукционной зоны является отсутствие сейсмичности (Kelly and Crosson, 1984). В связи с этим поверхность погружающейся под континент плиты Хуан де Фука по данным сейсмологии здесь проследить не удастся. Однако в северной и южной частях зоны субдукции сейсмичность высока, и поверхность океанской плиты прослеживается до глубины ~ 100 км, при этом угол ее наклона не превышает $\sim 45^\circ$. По данным сейсмотомографии, в районе штата Орегон океаническая плита, также начинающая субдуцироваться полого, на глубинах $\sim 40 - 80$ км изгибается и далее погружается под углом $\sim 70^\circ$ (Weaver and Michaelson, 1985).

До глубины ~ 50 км поверхность субдуцирующей плиты можно проследить по результатам сейсмических исследований с искусственными источниками (Trehu et al, 1994). По данным метода преломленных волн (МПВ) мощность континентальной коры под Каскадными горами была оценена в ~ 45 км (Leaver et al, 1984). При этом в средней коре был выделен, хотя и не очень надежно, слой пониженных скоростей (Stanley et al, 1989).

По гравиметрическим данным была построена плотностная модель Каскадной субдукционной зоны (Романюк и др., 2001), дополнившая сейсмические данные значениями плотностей пород, и позволившая таким образом уточнить их петрологический состав.

На основе измерений теплового потока и температурного градиента, а также другой информации, составлено прогнозное распределение температур в земной коре и верхней мантии изучаемого региона (Романюк и др., 2001). Его

основными особенностями являются понижение температуры вблизи субдуцирующей под континент плиты Хуан де Фука и повышение температуры в субвертикальной области под вулканической дугой Высоких Каскадных гор.

По результатам донных частотных электромагнитных зондирований, выполненных в Тихом океане (Ваньян, 1997), были определены сопротивления пород, слагающих верхнюю и нижнюю части океанической коры.

Рассмотренные геолого-геофизические данные о регионе представляют собой априорную информацию, необходимую для успешной интерпретации МТ-данных.

ГЛАВА 2. Существующие геоэлектрические модели

Каскадной субдукционной зоны.

Во второй главе выполнен критический обзор известных геоэлектрических моделей региона, полученных главным образом при интерпретации данных проекта ЭМСЛАБ.

Поскольку результаты интерпретации существенно зависят от степени учета различных компонент МТ-поля, описаны основные свойства этих компонент (Бердичевский и др., 1997). Показано, что распространенный среди американских геофизиков подход (Wannamaker, 1999), опирающийся на использование данных только ТМ-моды, может привести к сильным искажениям глубинного геоэлектрического строения. Существенно, что глубинные структуры лучше проявляются в ТЕ-моды.

Рассмотрена интерпретация МТ-зондирований, выполненных в регионе до проведения проекта ЭМСЛАБ. Основными результатами этих зондирований являются обнаружение проводящих структур в земной коре и изучение строения вулканогенно-осадочного чехла (Stanley et al, 1989).

Описаны работы по проекту ЭМСЛАБ, в рамках которого были, в частности, выполнены измерения МТ-поля по субширотному профилю (Линия Линкольн), включающему континентальную и океаническую части, и

пересекающему все геологические структуры центральной части Каскадной субдукционной зоны (Booker and Chave, 1989).

Обсуждается двумерная сглаженная модель, полученная вдоль Линии Линкольн (Jiracek et al, 1989). Эта модель свидетельствует о том, что сглаживающая инверсия не является оптимальным средством для изучения сложно построенных горизонтально-неоднородных сред. Характеризуя приповерхностную часть разреза, она не дает геологически осмысленного представления о его глубинной части.

Наиболее известны три двумерные геоэлектрические модели региона: модель А (Wannamaker et al, 1989), модель В (Vanyan et al, 1989), модель С (Варенцов и др., 1996). Общими недочетами, характерными для всех этих моделей, являются отсутствие анализа чувствительности различных компонент МТ-поля к изучаемым структурам и недостаточный анализ трехмерных искажений, необходимый для оценки ошибок инверсии, обусловленных отклонением двумерной модели от реальных трехмерных структур. Частными недостатками моделей являются: для модели А (рис. 1,а) - отсутствие информации о строении континентальной мантии, очевидно, связанное с игнорированием данных ТЕ-моды; для модели В – чрезмерная схематичность, обусловленная сильным осреднением МТ-данных; для модели С (рис 1,б) – невысокая детальность информации о глубинном строении, связанная с малым числом степеней свободы модели, и слабое отражение современных представлений о субдукции и магматизме региона, обусловленное недостаточным учетом априорной геолого-геофизической информации.

Проанализированы результаты интерпретации площадных данных, полученных в Каскадной субдукционной зоне: карта глубинной электропроводности (Gough et al, 1989), построенная путем качественного анализа данных, и трехмерная модель региона (Жданов и Спичак, 1992), полученная с учетом упомянутой модели А и другой априорной информации.

ГЛАВА 3. Анализ синтетических кривых МТЗ

вблизи океанического берега.

В третьей главе приведены результаты математического моделирования. Выполнен анализ синтетических МТ-кривых, полученных в прибрежной зоне, исследованы их искажения, определена чувствительность двух мод МТ-поля к глубинным структурам, рассмотрена эффективность инверсии МТ-данных.

Эти результаты получены автором с помощью программ для решения прямых и обратных двумерных задач (Golubev and Varentsov, 1994), (Новожинский и Пушкарев, 2001). К последней программе, вычислительная часть которой создана К. Новожиным в Институте геофизики Польской АН, диссертантом был разработан графический интерфейс.

Изучен береговой эффект, обусловленный резким изменением электропроводности при переходе от океана к континенту и искажающий МТ-кривые, полученные на расстояниях до 100 км от берега и более. Наиболее ярко береговой эффект проявляется в ТМ-моду. В этом случае значительная часть сильного океанского тока перетекает в континентальный чехол, завышая значения поперечных кажущихся сопротивлений на континенте.

Для оценки чувствительности МТ-зондирований построен ряд моделей области перехода от океана к континенту. Базовой являлась модель с континентальным разрезом, не содержащим проводников в коре и мантии. Она последовательно усложнялась путем добавления в континентальный разрез: 1) корового проводящего слоя (как бесконечно протяженного, так и конечной длины); 2) погружающегося под континент проводника, имитирующего флюидонасыщенную поверхность субдуцирующей плиты (как не связанного, так и соприкасающегося с коровым проводящим слоем); 3) проводящей астеносферы (как бесконечно протяженной, так и конечной длины, а также отделенной от океанической астеносферы высокоомным промежутком).

В качестве меры влияния того или иного элемента модели рассматривались расхождения кривых для моделей, характеризующихся наличием и отсутствием рассматриваемого элемента. Показано, что

чувствительность ТМ-моды к коровым проводящим структурам в прибрежной зоне выше, чем во внутриконтинентальных областях. Это объясняется тем, что часть мощного океанического тока затекает в коровые структуры континента, и этому явлению не могут помешать даже высокоомные породы коры, которые в зонах, удаленных от берега, обычно экранируют коровые проводники. При этом чувствительность ТЕ-моды к коровым проводникам и проводящей астеносфере остается существенно более высокой, чем чувствительность ТМ-моды. ТМ-мода, однако, лучше позволяет оценить степень связи погружающегося под континент проводника с коровым проводником, а также сопротивление верхней коры. Таким образом, подтверждена необходимость бимодальной интерпретации прибрежных МТ-зондирований.

Эффективность инверсии различных МТ-данных, полученных в прибрежной зоне, изучалась путем инверсии синтетических МТ-зондирований. Наиболее важным результатом, полученным нами в ходе этого исследования, явилась демонстрация возможности успешного восстановления геоэлектрической структуры континентальной земной коры и верхней мантии по компонентам типпера.

ГЛАВА 4. Пленочное моделирование МТ-поля в Каскадной субдукционной зоне.

В четвертой главе рассмотрены результаты математического моделирования, выполненного автором для изучения трехмерных эффектов, вызванных влиянием региональных приповерхностных неоднородностей.

Для решения этой задачи применялось пленочное моделирование, заключающееся в расчете МТ-поля на поверхности слоистой среды, перекрытой тонким слоем (пленкой). Пленка характеризуется суммарной продольной проводимостью (S), меняющейся по площади. В проведенных опытах пленка аппроксимировала океаническую воду и донные осадки, а также вулканогенно-осадочный чехол на континенте.

Карта суммарной продольной проводимости (S) приповерхностной толщи была составлена на основе батиметрических данных, результатов морских и наземных геологических и сейсмических исследований, а также МТ-данных по Линии Линкольн. Она покрыла площадь порядка $1000 \times 1000 \text{ км}^2$, охватив при этом Каскадную субдукционную зону и рифтовый хребет Хуан де Фука.

На полученной карте основные изменения значений S происходят в широтном направлении. В океане, в районе хребта Хуан де Фука, значения S составляют $7000 - 8000 \text{ См}$, а восточнее, в пределах абиссальной котловины, увеличиваются до $9000 - 10000 \text{ См}$, и далее убывают по мере приближения к берегу. На суше значения S меняются более резко: в прибрежной полосе, отвечающей Береговому хребту, они составляют $100 - 150 \text{ См}$, в заполненной осадками долине Вилламет - достигают 350 См и более, в Западных Каскадах - понижаются до $10 - 20 \text{ См}$, а в Высоких Каскадах, где развиты проводящие вулканогенные породы, - снова повышаются, достигая местами 100 и более См .

Для расчета МТ-поля применялась программа (Зингер и Файнберг, 1985). Для удобства работы с этой программой диссертантом была создана графическая оболочка, облегчающая ввод данных, автоматизацию счета и анализ результатов.

Наибольший интерес представляет анализ искажений МТ-кривых, полученных вдоль Линии Линкольн. Кривые зондирования, рассчитанные в точках этого профиля, сравнивались с локально-нормальными кривыми и с их двумерными аналогами.

Результаты моделирования свидетельствуют, что океанические МТ-кривые не испытывают существенных искажений, вызванных влиянием трехмерных региональных приповерхностных неоднородностей. На суше, в пределах Берегового хребта, долины Вилламет и Западных Каскад, эти искажения также проявляются слабо. Более или менее существенные региональные трехмерные эффекты наблюдаются лишь в Высоких Каскадах, причем продольные кривые здесь искажены меньше, чем поперечные.

ГЛАВА 5. Анализ наблюдаемых МТ-данных по Линии Линкольн.

Пятая глава посвящена анализу МТ-данных по Линии Линкольн, выполненному автором для выявления трехмерных искажений, а также для оценки уровня неинтерпретируемого шума и локализации основных аномалий.

Рассматривались результаты 15-ти длиннопериодных и 39-ти короткопериодных континентальных зондирований. Для устранения случайных выбросов была выполнена сплайн-аппроксимация частотных зависимостей компонент тензора импеданса и матрицы типпера.

Были построены частотные разрезы основных магнитотеллурических параметров: параметра неоднородности N , параметра асимметрии $skew$, фазочувствительного параметра асимметрии η . Значения параметра N на коротких периодах (до 1 с) почти на всем профиле не превышают 0.2, что говорит о возможности приближенной интерпретации в рамках одномерной модели для восстановления верхней части разреза (включающей вулканогенно-осадочный чехол). На длинных же периодах значения N велики (до 0.5 и более), что свидетельствует о неприменимости одномерной интерпретации длиннопериодных данных. На частотном разрезе параметра $skew$ присутствуют субвертикальные области больших значений (0.2 – 0.8), приуроченные к центральной части Берегового хребта и Каскадным горам, что говорит о влиянии трехмерных неоднородностей. При этом параметр η почти повсеместно не превышает 0.2, свидетельствуя о локальном приповерхностном характере трехмерных неоднородностей. Таким образом, двумерная структура низкочастотного МТ-поля осложнена влиянием локальных трехмерных приповерхностных неоднородностей, которое особенно велико в центральной части Берегового хребта и в Каскадных горах.

Полярные диаграммы тензора импеданса и матрицы типпера ориентированны преимущественно по широте, что говорит о меридиональном простирании основных структур. Это подтверждается характерной для большинства точек ориентацией главных направлений тензора импеданса в широтном и меридиональном направлениях и субширотной ориентацией

индукционных стрелок. Иная картина наблюдается на Береговом хребте и в Каскадных горах, где ориентация полярных диаграмм и главных направлений тензора импеданса становится более хаотичной, что, вероятно, связано с влиянием локальных трехмерных приповерхностных неоднородностей. Важно отметить, что при этом субширотная ориентация полярных диаграмм типпера и индукционных стрелок на низких частотах выдерживается практически на всем профиле, поскольку типпер на низкой частоте освобождается от влияния приповерхностных неоднородностей.

Результаты анализа МТ-данных показали, что практически на всем профиле допустима двумерная инверсия типпера, фаз низкочастотного продольного импеданса, поперечных кажущихся сопротивлений и фаз поперечного импеданса. Продольные кривые кажущегося сопротивления искажены локальными трехмерными неоднородностями и нуждаются в предварительной нормализации.

ГЛАВА 6. Построение глубинной геоэлектрической модели **вдоль Линии Линкольн.**

Шестая глава посвящена двумерной инверсии МТ-данных и построению геоэлектрической модели Каскадной субдукционной зоны. Поскольку эта глава является наиболее важной, рассмотрим ее более подробно.

Вначале остановимся на общих вопросах методики инверсии, касающихся построения интерпретационной модели и определения соотношений между интерпретируемыми компонентами.

Главным этапом построения интерпретационной модели является выбор между непрерывным и кусочно-однородным распределениями сопротивления. В первом случае речь идет о сглаживающей инверсии, во втором – об инверсии в рамках фиксированной геометрии (в настоящее время наблюдается сближение этих подходов, но в данной работе оно не рассматривается).

В результате сглаживающей инверсии строится модель с медленными пространственными изменениями электропроводности. Отличительной чертой

этого подхода является то, что не требуется задавать положение геоэлектрических границ. Этим он привлекателен, и потому весьма популярен. Однако, как показали многочисленные опыты с модельными и наблюдаемыми данными, такой подход дает геофизически осмысленный результат лишь для достаточно простых сред. При наличии нескольких неоднородностей сложной формы, расположенных на различных глубинах, он в лучшем случае может использоваться на предварительном этапе локализации аномалий.

Строение сложно построенных сред может быть изучено с помощью инверсии в рамках фиксированной геометрии модели. В этом случае, правда, возникает необходимость в задании геоэлектрических границ, что представляет существенную трудность при недостатке априорной информации об изучаемых структурах (а при глубинных исследованиях это происходит почти всегда). Поэтому предлагается проводить инверсию в режиме проверки гипотез. На основе геодинамических представлений о строении региона выдвигается ряд гипотез, например, о процессах дегидратации в земной коре и частичного плавления в верхней мантии, о положении и состоянии глубинных разломов и т.д. Здесь возможны два подхода.

А) Для каждой гипотезы строится своя интерпретационная модель и формируется свой стабилизатор. Гипотезы проверяются путем минимизации функционала Тихонова. Наиболее достоверной считается гипотеза, которой отвечает минимальная невязка, достигающая уровня измерительных погрешностей. Такой подход был применен при инверсии МТ-данных, полученных в Байкальской рифтовой зоне (Бердичевский и др., 1999).

Б) Интерпретационная модель строится на сетке, состоящей из блоков, геометрия которых допускает свободный выбор любой из рассматриваемых гипотез. Наиболее достоверная гипотеза выбирается автоматически в процессе минимизации невязки. Этот подход был применен в нашей работе.

Теперь рассмотрим соотношения между интерпретируемыми компонентами. Двумерная инверсия МТ-данных представляет собой многокомпонентную обратную задачу, использующую продольные и

поперечные кажущиеся сопротивления, фазы продольных и поперечных импедансов, вещественные и мнимые типперы. Эти компоненты характеризуются различной чувствительностью к изучаемым структурам и различной устойчивостью к влиянию приповерхностных неоднородностей.

Основная задача данной работы – изучение глубинных проводников зоны субдукции. Как показано в главе 3, ТЕ-мода (типпер и продольный импеданс) более чувствительны к этим структурам, чем ТМ-мода (поперечный импеданс). В то же время ТМ-мода более чувствительна к степени кондуктивной связи между проводящими субдуцируемыми осадками и коровыми проводниками.

С другой стороны важно отметить, что типпер более устойчив к влиянию приповерхностных неоднородностей, чем продольный и поперечный импедансы, поскольку определяется по магнитному полю, которое с понижением частоты освобождается от их влияния. Говоря о свойствах типпера, следует подчеркнуть, что В.И. Дмитриев недавно доказал теорему единственности для двумерной инверсии типпера (типпер и продольный импеданс в двумерной среде информационно эквивалентны).

Очевидно, что в качестве основного источника информации о глубинных проводящих неоднородностях целесообразно рассматривать типпер. Импеданс при этом может играть контролирующую и детализирующую роль. Соответственно, веса компонент МТ-данных при инверсии должны быть распределены следующим образом: $W(Cu) = W(Cv) > W(\varphi^{\parallel}) > W(\varphi^{\perp}) > W(\rho^{\parallel}) > W(\rho^{\perp})$, где Cu и Cv - действительная и мнимая части типпера, φ^{\parallel} и φ^{\perp} - фазы продольного и поперечного импеданса, ρ^{\parallel} и ρ^{\perp} - продольные и поперечные кажущиеся сопротивления (ρ^{\parallel} и ρ^{\perp} обладают наименьшими весами потому, что обычно искажены статическими смещениями). Необходимо оговориться, что такое распределение весов справедливо лишь в случае, когда объектом исследования являются глубинные проводники.

Существует два подхода к решению многокомпонентной обратной задачи:

А) Совместная (параллельная) инверсия всех компонент, которые вводятся в Тихоновский функционал с различными весами в зависимости от их информативности (чувствительности, устойчивости). Этот подход, минимизирующий общую невязку, содержит в себе определенную опасность, поскольку различные компоненты восприимчивы к разным структурам и в разной степени искажены. Их смешивание может усложнить инверсию и ухудшить ее результаты.

Б) Раздельная (последовательная) инверсия различных компонент с весами, определяющими степень доверия к результату инверсии данной компоненты. Опыт отечественной глубинной геоэлектрики показывает, что именно этот подход, основанный на последовательности частичных инверсий и контролирующей невязки различных компонент, обеспечивает наиболее эффективную геологическую интерпретацию МТ-данных.

В.И. Дмитриевым был предложен двухуровневый алгоритм последовательной инверсии данных ТЕ-моды (продольных кажущихся сопротивлений и фаз продольного импеданса) и ТМ-моды (поперечных кажущихся сопротивлений и фаз поперечного импеданса). При этом на уровне ТМ-моды инверсия стабилизируется близостью к решению, полученному на уровне ТЕ-моды. На уровне ТЕ-моды получается информация о глубинных проводящих зонах, а на уровне ТМ-моды – об осадочном чехле и интегральном сопротивлении верхней коры или литосферы.

В работах (Бердичевский и др., 2000; Рыбин, 2001) описан трехуровневый алгоритм, включающий также этап инверсии действительной и мнимой частей типпера, предшествующий инверсии данных ТЕ-моды и ТМ-моды. Трехуровневый алгоритм опробован авторами как на модели, так и на МТ-данных, полученных в горах Киргизского Тянь-Шаня (Трапезников и др., 1997). Этот алгоритм открывает возможность для нормализации продольных кривых кажущегося сопротивления, искаженных влиянием приповерхностных неоднородностей. Нормализация осуществляется путем приведения

низкочастотных ветвей этих кривых к синтетическим кривым, отвечающим модели, полученной по типперу на первом уровне.

Этот алгоритм применен нами для инверсии МТ-данных, полученных в Каскадной зоне субдукции. На каждом уровне решались следующие задачи:

- Уровень 1 (инверсия действительной и мнимой частей типпера) – построение базисной модели, содержащей глубинные проводники, и нормализация продольных кривых кажущегося сопротивления. Построенная базисная модель передается на уровень 2 в качестве начального приближения .
- Уровень 2 (инверсия фаз продольного импеданса и нормализованных продольных кривых кажущегося сопротивления) – контролирование и детализация базисной модели. Полученная модель передается на уровень 3 в качестве начального приближения.
- Уровень 3 (инверсия фаз поперечного импеданса и поперечных кривых кажущегося сопротивления) – уточнение строения вулканогенно-осадочного чехла, верхней континентальной коры и океанической литосферы, а также гальванической связи между погружающейся под континент плитой и коровыми проводниками.

В трехуровневый алгоритм мы внесли два дополнения.

Во-первых, на основе моделей, полученных последовательно на всех трех уровнях, можно составить обобщенную модель. Сопротивления и геометрия того или иного элемента обобщенной модели выбираются по результатам инверсии наиболее чувствительных к нему компонент. Если невязки при переходе к обобщенной модели возрастают, то ее необходимо отредактировать с помощью контрольной инверсии по всем компонентам. Полученная таким образом модель будет характеризоваться небольшими невязками по всем компонентам, и при этом будет отражать все элементы, даже если они проявляются не во всех компонентах. Следует отметить, что в рамках данного подхода при составлении обобщенной модели можно менять геометрию границ, отбрасывать отдельные элементы или объединять их в более крупные.

Во-вторых, важно выполнять тестирование полученных моделей. Можно, например, сравнить результаты инверсий типперов и фаз продольных импедансов при одном и том же начальном приближении, и в качестве наиболее надежных выделить те элементы моделей, которые проявляются в обеих инверсиях. При анализе обобщенной модели можно последовательно исключать ее содержательные элементы и в качестве надежных выделять те элементы, исключение которых ведет к существенному увеличению невязок.

На основе развитой методики нами была построена новая геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны.

Предварительно с помощью одномерной инверсии короткопериодных кривых МТЗ с учетом геологической и сейсмической информации был построен приближенный геоэлектрический разрез вулканогенно-осадочного чехла до глубины 4 км (применимость одномерной модели на этих глубинах была показана на этапе анализа МТ-данных). Отметим, что результат одномерной интерпретации редактировался в процессе двумерной инверсии.

Далее была выполнена инверсия низкочастотных ($T > 1$ с) МТ-данных с помощью программ (Siripunvaraporn and Egbert, 2000) и (Rodi and Mackie, 2001), позволяющих получить сглаженное двумерное распределение сопротивления. При этом было показано, что в сложных условиях зоны субдукции рутинная одновременная инверсия ТМ- и ТЕ-мод дает геофизически несодержательную мозаичную картину при плохой минимизации невязки. Наиболее интересный результат получен при автономной инверсии данных ТЕ-моды (рис. 2). При этом выделены три глубинные зоны: под океаном (проводящая, отвечающая астеносфере), под берегом (непроводящая) и под Каскадными горами (проводящая, отвечающая нижнекоровым и верхнемантийным структурам).

Основной результат был получен при инверсии низкочастотных ($T > 1$ с) МТ-данных с помощью программы (Varentsov, 1999) в рамках двумерной модели с фиксированной геометрией.

Стартовая геоэлектрическая модель вдоль Линии Линкольн приведена на рис. 3. В этой модели строение вулканогенно-осадочного чехла континента

получено путем приближенной одномерной интерпретации короткопериодных кривых. Мощность океанической водной толщи задана по батиметрическим данным, мощности осадков на дне океана, в аккреционной призме и на шельфе определены на основе геологических и сейсмических данных. Сопротивление океанической коры получено на основе результатов донных частотных зондирований. Глубина до океанической астеносферы задана в соответствии с прогнозной геотермической моделью. Сопротивление глубинных горизонтов океанического разреза примерно отвечает существующим геоэлектрическим моделям региона. Поверхность погружающейся под континент океанической плиты построена по сейсмическим данным. Сопротивлениям блоков, образующих океанический разрез, а также вулканогенно-осадочный чехол и верхнюю кору континента, приданы небольшие доверительные интервалы.

Нижняя кора и верхняя мантия континента разбиты на блоки таким образом, чтобы здесь могли проявиться: коровый проводник, астеносферный проводящий слой и субвертикальная зона под Каскадами, отвечающая области повышенных температур в прогнозной геотермической модели. На поверхности субдуцирующей плиты введен слой, который может содержать флюид. Начальные сопротивления всех этих блоков составляют 1000 Ом·м, что отвечает отсутствию перечисленных элементов разреза. При этом сопротивления обладали большими интервалами неопределенности.

Инверсия МТ-данных осуществлялась в соответствии с рассмотренным выше алгоритмом трехуровневой инверсии. На последнем этапе на основе моделей, полученных на всех трех уровнях, была составлена обобщенная геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны (рис. 4). Данная модель была протестирована путем замены основных проводящих структур на высокоомные и анализа соответствующих изменений невязок. При этом было показано, что все элементы модели определены достаточно надежно.

Отметим основные особенности полученной модели:

1. Континентальный разрез содержит следующие проводящие структуры: слой в нижней коре, астеносферный слой и субвертикальную зону под

вулканической дугой Высоких Каскад. Коровый проводник, вероятно, содержит флюид, образовавшийся при дегидратации. Природа электропроводности астеносферного слоя и субвертикальной зоны, скорее всего, объясняется наличием расплавов.

2. В интервале глубин до 40 км четко выделяется погружающийся под континент проводник, вероятно, обусловленный наличием флюидов океанического и, возможно, дегидратационного происхождения. На больших глубинах он не обладает проводимостью, достаточной для надежного определения его свойств. Между погружающимся под континент и коровым континентальным проводниками имеется область повышенного сопротивления, свидетельствующая, что коровый проводник не связан с флюидами субдуцирующей плиты и имеет глубинное происхождение.

Очевидно, что получена новая информация о строении Каскадной субдукционной зоны, помогающая составить представление о ее флюидном режиме. Выделение флюидов из верхней части субдуцирующей плиты, по-видимому, связано с несколькими механизмами. Сначала на глубинах 10 - 20 км под действием возрастающего литостатического воздействия выделяется свободная вода, содержащаяся в микропорах и микротрещинах. Затем на глубинах 30 – 40 км, где температура достигает 400 °С, начинаются реакции дегидратации минералов, таких как тальк, серпентин, хлорит и др. Наконец, на глубинах свыше 75 км может начинаться переход базальта в эклогит, а на глубинах свыше 90 км – распад амфиболитов и роговой обманки (все эти процессы сопровождаются выделением флюида). Флюиды, выделяемые на небольших глубинах, скорее всего мигрируют по зоне контакта между континентальной и субдуцирующей океанической плитами. На больших глубинах флюиды могут поглощаться перидотитами мантии (реакция серпентинизации). Под вулканической дугой флюиды нарушают равновесное состояние вещества и вызывают “мокрое” плавление. Расплавы мигрируют вверх, к земной поверхности, в результате чего образуется вулканическая дуга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенных исследований могут быть сформулированы следующим образом:

1. Выполнен модельный анализ МТ-поля в области перехода от океана к континенту.

Изучены характерные для прибрежной зоны искажения МТ-кривых. Основным искажающим эффектом является перераспределение мощного поперечного океанического тока, приводящее к завышению значений поперечного кажущегося сопротивления на континенте, и занижению этих значений – в океане.

Исследована чувствительность МТ-поля к геоэлектрическим структурам прибрежной зоны. Выяснено, что основную информацию о глубинных проводящих неоднородностях содержит ТЕ-мода, а ТМ-мода позволяет получить ответ на важный вопрос о степени кондуктивной связи между погружающимся под континент и субгоризонтальным коровым проводниками. Таким образом, показана необходимость бимодальной инверсии прибрежных МТ-данных.

Пробные инверсии синтетических МТ-данных продемонстрировали высокую эффективность инверсии типпера для выделения проводящих структур в коре и мантии.

2. Обоснована возможность проведения двумерной инверсии МТ-данных по Линии Линкольн.

С целью изучения трехмерных искажений, вызванных региональными приповерхностными неоднородностями, была составлена пленочная модель Каскадной субдукционной зоны, характеризующая интегральную проводимость океанической воды и осадков, а также континентального чехла. Результаты пленочного моделирования показали, что трехмерные искажения рассматриваемого типа более или менее сильно проявляется лишь в Высоких Каскадах, на остальных же участках ими можно пренебречь.

Анализ наблюдаемых МТ-данных, полученных вдоль Линии Линкольн, показал, что на низких частотах МТ-поле имеет двумерную структуру, осложненную трехмерными искажениями, связанными с влиянием локальных приповерхностных неоднородностей. Наиболее сильно такие искажения проявляются на Береговом хребте и в Каскадных горах.

3. Изучены два основных вопроса методики двумерной инверсии МТ-данных: о построении интерпретационной модели и об информационных соотношениях между различными компонентами.

Сделан вывод о том, что сглаживающая инверсия может применяться при изучении простых сред или на предварительном этапе выделения основных аномалий, а при построении геоэлектрической модели сложно построенной среды предпочтительнее проводить инверсию в рамках модели с фиксированной геометрией. При этом положение геоэлектрических границ следует задавать на основе геотектонических гипотез о строении среды.

Предложено рассматривать типпер в качестве основного источника информации о глубинных проводящих структурах, а импеданс использовать для подтверждения и детализации решения, полученного по типперу. Последовательной инверсии компонент МТ-данных отдано предпочтение в сравнении с одновременной инверсией. Трехуровневый алгоритм инверсии адаптирован к условиям зоны субдукции и дополнен этапами построения обобщенной модели и ее тестирования.

Развитая методика двумерной инверсии МТ-данных применена для построения геоэлектрической модели Каскадной субдукционной зоны.

4. Получена новая геоэлектрическая модель Каскадной субдукционной зоны. Она построена с использованием всех основных геолого-геофизических сведений о регионе и с учетом различной чувствительности компонент МТ-поля к геоэлектрическим структурам. Поэтому новая модель лучше, чем существующие модели других авторов, согласуется с современными представлениями о геотектоническом строении региона, обеспечивая при этом хорошее соответствие модельных и наблюдаемых данных.

Основным новым элементом полученной модели является глубинная субвертикальная проводящая зона под Каскадной вулканической дугой, низкое сопротивление которой объясняется наличием расплава.

Другой важной чертой модели является достаточно надежно выделенная область повышенного сопротивления, разделяющая субдуцирующий и коровый проводники, и позволяющая говорить, что непосредственная связь корового проводника с флюидами, затягиваемыми под континент, отсутствует.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Бердичевский М.Н., Пушкарёв П.Ю., Ваньян Л.Л. “Анализ МТ-данных в зоне субдукции Хуан де Фука.” Тезисы докладов Международной геофизической конференции, посвященной 300-летию горно-геологической службы России. СПб, 2000, с. 68-69.
2. Ваньян Л.Л., Бердичевский М.Н., Пушкарёв П.Ю. “Астеносфера в свете электромагнитных данных.” Вестник ОГГГГН РАН, 2001, № 2 (17).
3. Казурова Н.Р., Пушкарёв П.Ю. “Математическое моделирование магнитотеллурических зондирований в сложных геоэлектрических условиях.” Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых и специалистов “Геофизика-99”. СПб, 1999, с. 47-48.
4. Новожинский К., Пушкарёв П.Ю. “Анализ эффективности программ для двумерной инверсии магнитотеллурических данных.” Физика Земли, 2001, № 6, с. 72-85.
5. Пушкарёв П.Ю. “Интерпретация МТ-данных в зоне субдукции Хуан де Фука.” Тезисы докладов Международной конференции молодых ученых, специалистов и студентов “Геофизика-2001”. Новосибирск, 2001, с. 70-72.
6. Пушкарёв П.Ю. “Математическое моделирование магнитотеллурических исследований проводящих зон в земной коре.” Материалы Международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам “Ломоносов”, выпуск 5. Москва, 2000, с. 165.
7. Berdichevsky M.N., Dmitriev V.I., Vanyan L.L., Golubtsova N.S., Pushkarjev P.Ju. “Deep Geoelectric Studies of the Earth’s Crust and Upper Mantle and Some Results Obtained in the Mountains of Tien Shan and in the Juan de Fuca Subduction Zone.” Deep Electromagnetic Soundings of the Mantle Around the Teisseyre-Tornquist Zone. Abstracts of the NATO Advanced Research Workshop Held at Belsk Duzy, Poland, May 30 – June 2, 2001. p. 12 – 13.

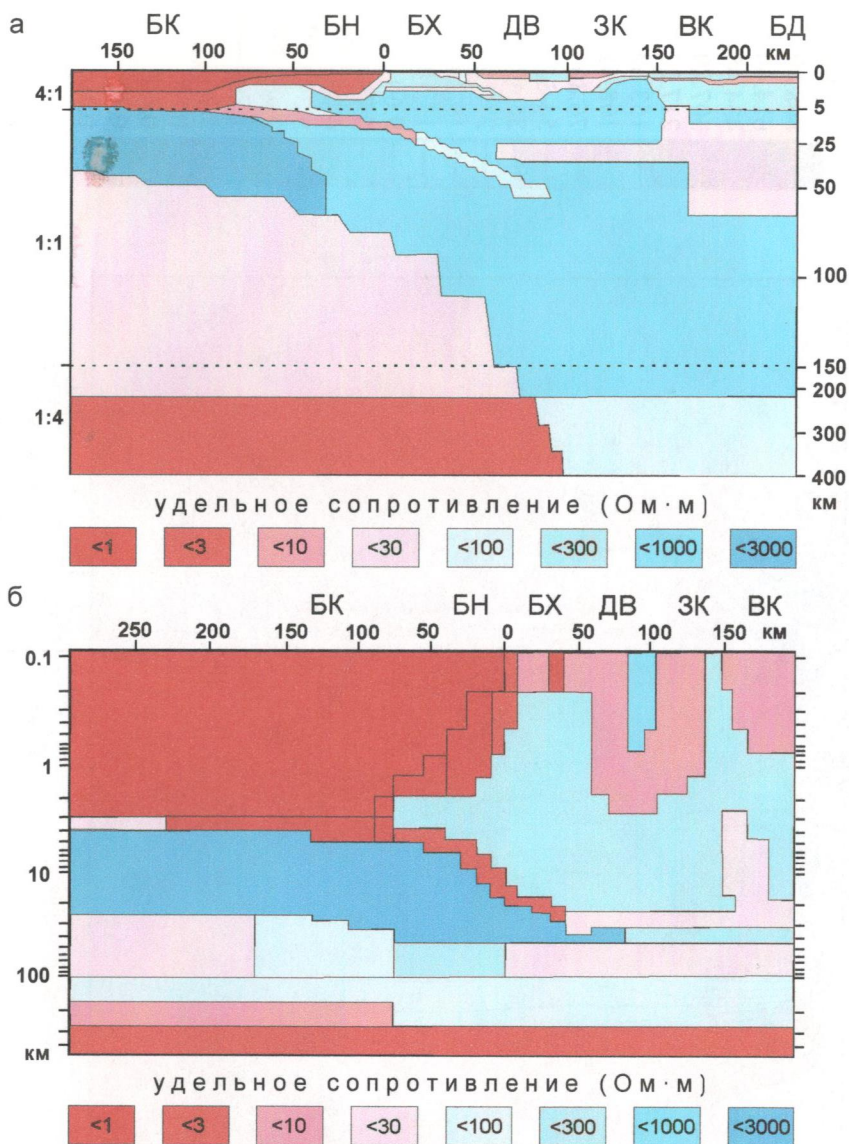


Рис. 1. Геоэлектрические разрезы вдоль Линии Линкольн.
 а - модель Ф. Ваннамейкера с соавторами (по Р.Е. Wannamaker et al, 1989).
 б - модель И.М. Варенцова с соавторами (по И.М. Варенцов и др., 1996).
 БК - Бассейн Каскадия; БН - Бассейн Ньюпорт; БХ -Береговой Хребет; ДВ - Долина Вилламет; ЗК - Западные Каскады; ВК - Высокие Каскады; БД - Бассейн Дешутс.

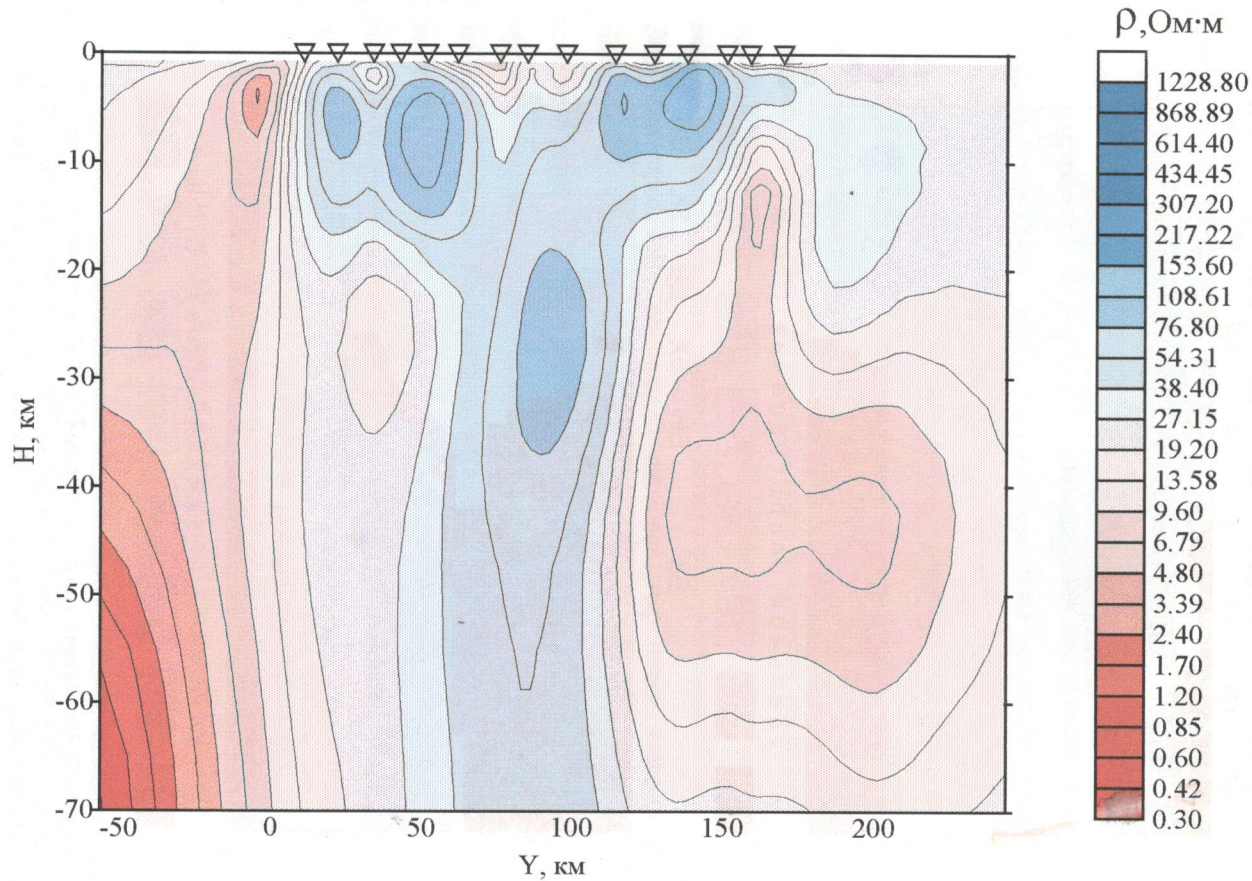


Рис. 2. Сглаженная модель, полученная в результате двумерной инверсии ТЕ-моды.

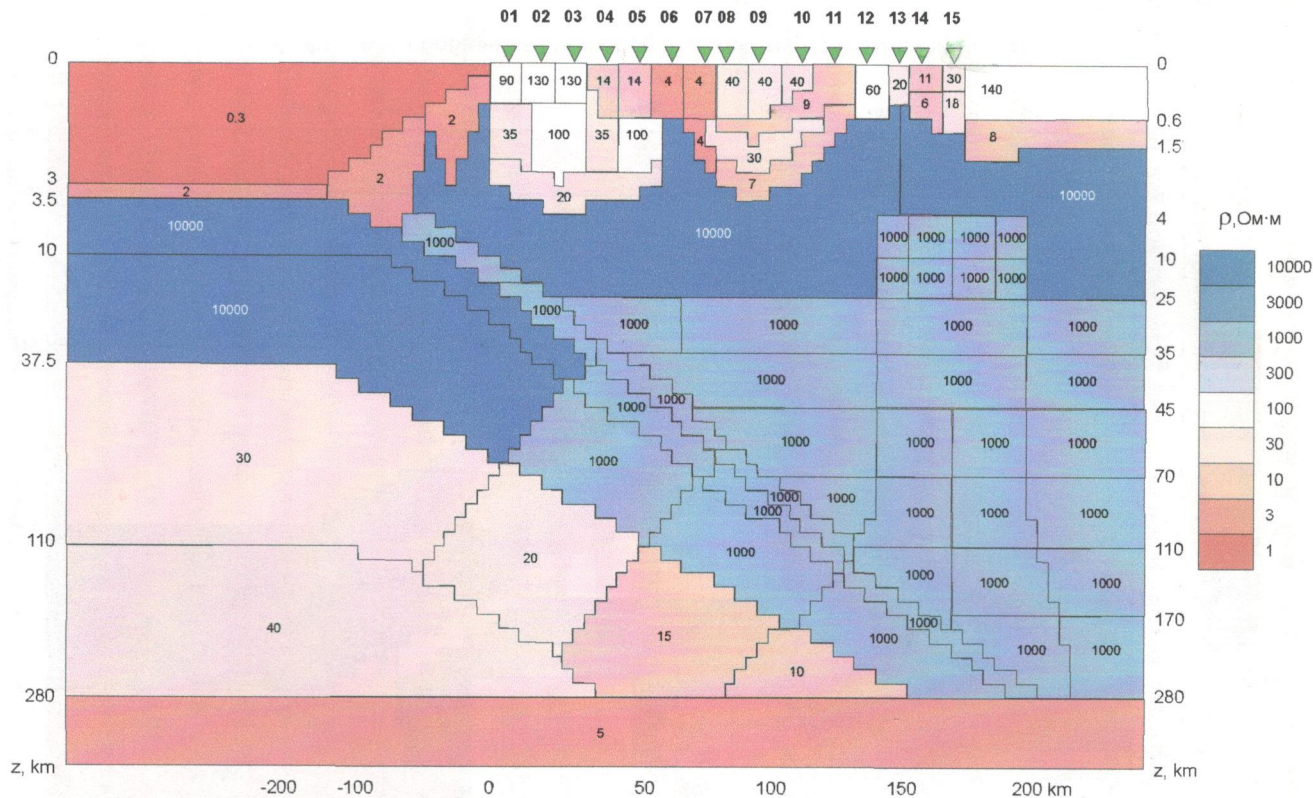


Рис. 3. Априорная модель для двумерной инверсии МТ-данных по Линии Линкольн.

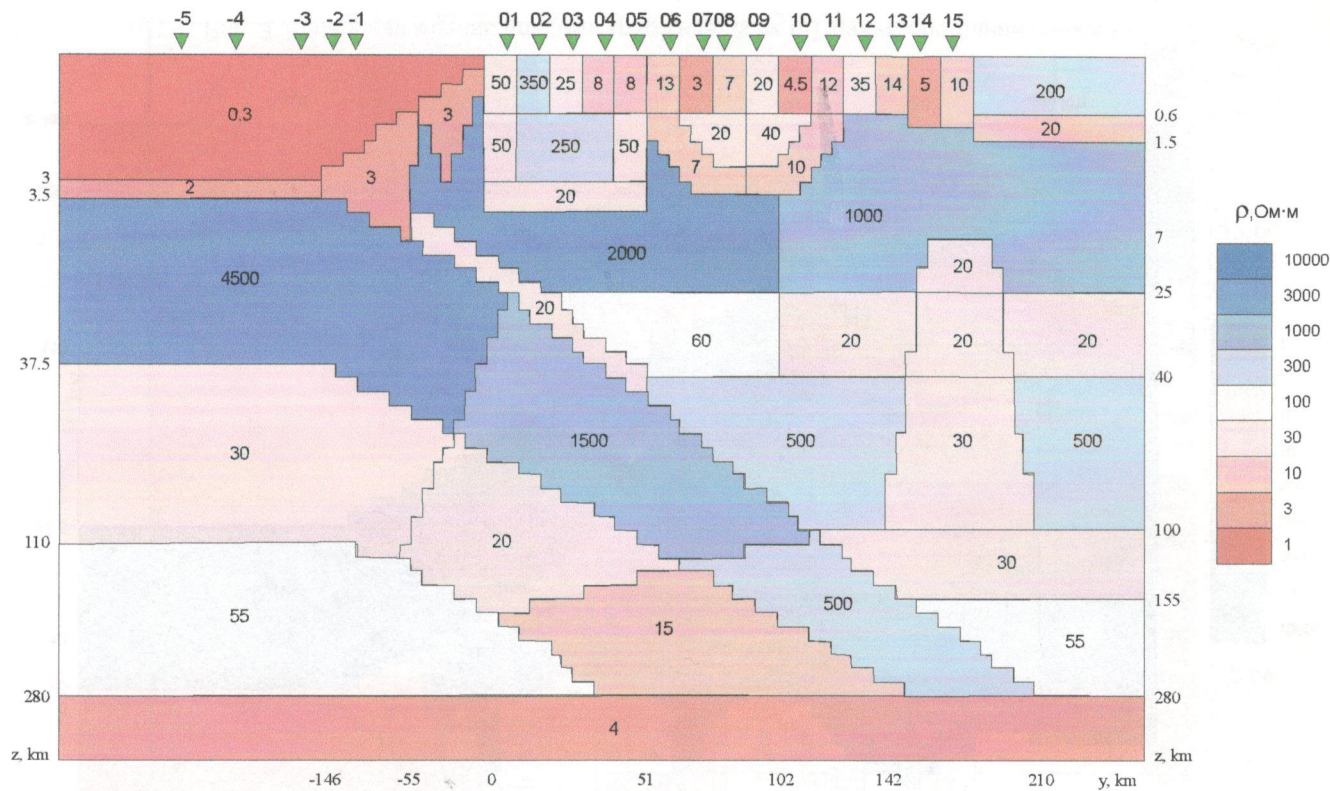


Рис. 4. Итоговая обобщенная геоэлектрическая модель по Линии Линкольн.