

УДК 550.837

ГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ СЕВЕРНОЙ КАМЧАТКИ

© 2015 г. Ю. Ф. Мороз^{1,2}, О. М. Самойлова¹, Т. А. Мороз¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: morozyf@kscnet.ru

²Геологический институт СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а

Поступила в редакцию 17.10.2014 г.

Рассмотрены методика интерпретации и результаты магнитотеллурического зондирования в комплексе с данными магнитометрии, гравиметрии и другой геолого-геофизической информации. Важное внимание уделяется учету влияния шифт-эффекта и трехмерного берегового эффекта, изученного в пробных моделях с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля. В качестве основных для интерпретации приняты продольные кривые, в меньшей мере подверженные искажениям в низкочастотной области. Поперечные кривые использованы для уточнения электропроводности верхних частей разреза и выделения разломов. В результате инверсии продольных кривых МТЗ получен геоэлектрический разрез, характеризующий структуру электропроводности осадочно-вулканогенного чехла и подстилающего основания. Земная кора содержит проводящий слой, глубина залегания которого меняется от 30 до 15 км. Обсуждается возможная природа выявленных аномалий электропроводности в земной коре и возможная их связь с рудопроявлениями на дневной поверхности.

DOI: 10.7868/S0203030615020066

ВВЕДЕНИЕ

Район исследования расположен за пределами Тихоокеанской зоны субдукции. Сведения о его глубинном строении представляют повышенный научный интерес. Предполагается, что глубинные геоэлектрические разрезы восточного побережья Северной и Южной Камчатки различны. Данная информация имеет значение для вопросов вулканологии и геодинамики. В последние годы вдоль восточного побережья Северной Камчатки предприятиями ООО “Камчатгеология” и ООО “Северо-Запад” выполнены наблюдения методами магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования. Эти зондирования в комплексе с площадными электроразведочными исследованиями, выполненными ранее [Мороз, 1976, 1991] дают возможность уточнить строение осадочно-вулканогенного чехла и получить информацию об электропроводности глубинных частей земной коры.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Профиль МТЗ, МВЗ расположен в прибрежной зоне пролива Литке и залива Корф Берингова моря. Район изучен геологической съемкой [Геология..., 1964], мелкомасштабными гравиметровой и магнитной съемками [Ривош, 1964]. Здесь выполнены региональные площадные исследования ком-

плексом методов теллурических токов (ТТ), магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [Мороз, 1976, 1991]. На Ильпинском полуострове проведены сейсморазведочные работы методом преломленных волн. По данным региональных геофизических исследований получено представление о глубинном строении северо-восточной части Корякско-Камчатской области [Нурмухамедов, Мороз, 2009].

Результаты выполненных исследований дают представление о геологическом строении исследуемой территории. В ее пределах развиты, в основном, терригенные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные образования третичного и четвертичного возраста. Более древние верхнемеловые породы развиты на юго-восточной оконечности Ильпинского полуострова. В тектоническом плане район исследований расположен в Ильпино-Литкенском прогибе, который является северным продолжением Центрально-Камчатского прогиба. Северо-западной границей прогиба является Камчатско-Корякский антиклинорий, представляющий собой крупную пологую антиклинальную структуру, по форме близкую к сводовому поднятию, в ее пределах докайнозойские породы местами выделены отдельными блоками. На юго-востоке прогиб ограничен Восточно-Камчатским антиклинорием, который прослеживается на полуострове Озерном и полуострове

Карагинском, и имеет продолжение на полуостров Говена [Геология..., 1964]. По сейсмологическим данным к юго-восточной границе прогиба приурочен Корякский сейсмический пояс, который образует границу плиты Берингии [Ландер и др., 2010].

Прогиб характеризуется относительно пониженным уровнем гравитационного и магнитного полей. Аномалии повышенной и пониженной интенсивности гравитационного поля отвечают поднятиям и впадинам прогиба. Интенсивные локальные аномалии магнитного и гравитационного поля связываются с интрузивными и эффузивными образованиями. Полученные карты теллурического поля в первом приближении характеризуют тектонику региона. Основной результативной картой теллурической съемки является карта средней напряженности, свидетельствующая о сложном поведении поля ТТ, обусловленного складчато-блоковой тектоникой (рис. 1). На рассматриваемой карте при изменении значений средней напряженности (*E_{ср}*) от 40 до 400 усл. ед. отчетливо выделяются полосы аномально высоких градиентов значений *E_{ср}* северо-восточного и северо-западного простираний, связанных с резким изменением проводимости осадочно-вулканогенной толщи за счет глубинных разломов. По интенсивности теллурического поля и поведению изолиний *E_{ср}* на карте отмечаются аномальные зоны и аномалии относительно повышенных и пониженных значений *E_{ср}*, соответствующие положительным и отрицательным структурным элементам изученной площади. Северо-западная граница прогиба определяется по аномально-высоким градиентам проводимости кайнозойских отложений, связываемых с тектоническим осложнением. В прогибе по опорному геоэлектрическому горизонту выделен ряд структур более высокого порядка, ограниченных тектоническими нарушениями. Структуры только частично захватывают сушу и, в основном, распространены под водами моря. По данным МТЗ, ВЭЗ геоэлектрический разрез представляется в следующем виде.

В верхней части залегают четвертичные рыхлые и осадочно-вулканогенные отложения с удельным электрическим сопротивлением от десятков до тысяч Ом · м, мощностью от десятков до сотен метров. Ниже залегают образования кайнозойского возраста, представленные в прогибах преимущественно терригенными породами. Удельное электрическое сопротивление толщи меняется от 4 до 40 Ом · м, мощность — от 0 до 4 км. В районе Камчатско-Корякского антиклинория широко развиты вулканогенные образования кайнозойского и четвертичного возраста с

удельным электрическим сопротивлением в сотни и тысячи Ом · м мощностью в 1–2 км.

МЕТОДИКА РАБОТ

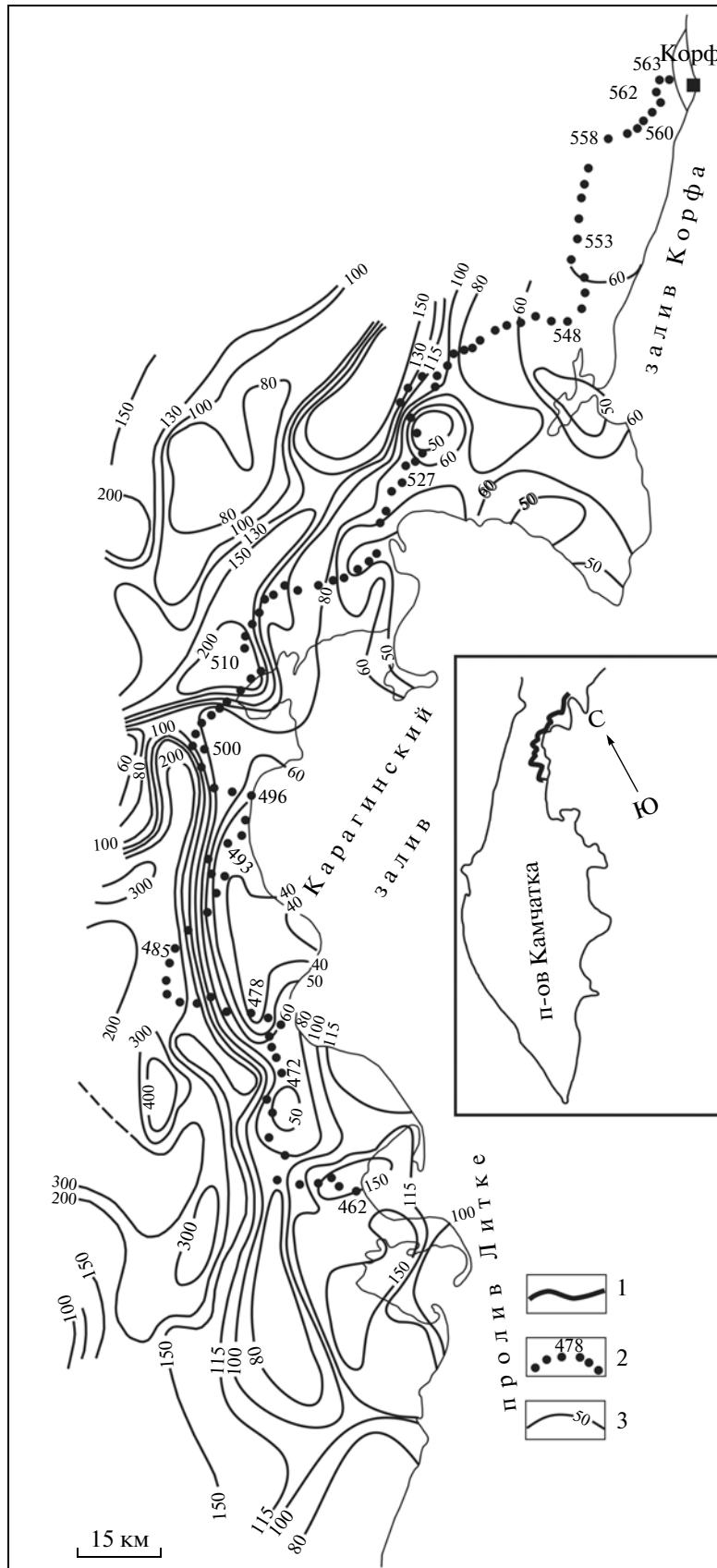
МТЗ и МВЗ выполнены по профилю с шагом 2–5 км. Регистрация магнитотеллурического поля осуществлялась в диапазоне периодов 0.0025–1000 с с помощью станций МТУ-5А производства канадской фирмы “Phoenix Geophysics Ltd”. Для регистрации электротеллурического поля использована пятиэлектродная крестообразная измерительная установка, заземленная слабополяризующимися электродами. Длина электрических линий 80 м, азимут их 30° и 120°. Горизонтальные магнитные датчики укладывались в ямы глубиной около 30 см и сверху присыпались землей. Вертикальные датчики зарывались в землю, а в условиях каменистой почвы устанавливались на треноге. Измерения МТ-поля осуществлялись несколькими станциями МТУ-5, разнесенными на необходимое расстояние. Для подавления промышленных помех использована методика синхронных измерений с использованием удаленной базовой станции. На участках профиля с низким уровнем промышленных помех в качестве базовой станции использовалась станция на одной из точек профиля. Обработка магнитотеллурических данных выполнена предприятием “Северо-Запад” с помощью специальных программ. В результате обработки получены тензоры импеданса и магнитного типпера в диапазоне периодов от 0.0025 до 1000 с и более. Точность определения модулей магнитотеллурических параметров составляет первые проценты, фаз импеданса — первые градусы.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Тензор импеданса дает возможность оценить характер и неоднородности имеет значения первые десяти доли на коротких периодах. На длинных периодах указанный параметр возрастает, что связано с влиянием крупных структур. Параметр асимметрии [Swift, 1967] свидетельствует о том, что на длинных периодах вариаций геоэлектрические неоднородности в первом приближении можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с вытянутостью прогиба в северо-восточном направлении. В основу интерпретации приняты кривые, полученные в главных направлениях. Они в большинстве случаев ориентированы по простиранию и в крест простирания основных структурных зон. В дальнейшем эти кривые будем называть продольными и поперечными.

Рис. 1. Схема средней напряженности теллурического поля и расположения профиля МТЗ.

1 — профиль МТЗ, показанный на вставке; 2 — пункты МТЗ, 3 — изолинии средней напряженности теллурического поля в условных единицах.



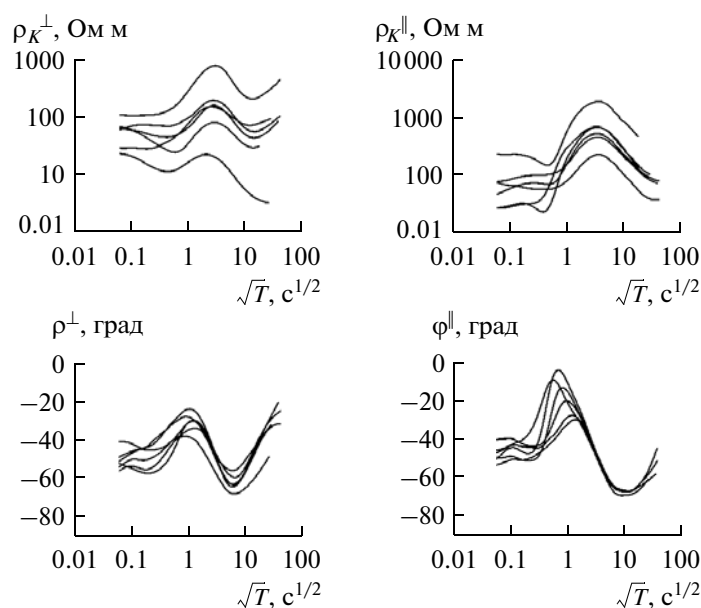


Рис. 2. Семейства продольных и поперечных кривых МТЗ для первого района профиля.

Анализ амплитудных и фазовых кривых свидетельствует о существовании дисперсионных соотношений между ними. Это дает возможность использовать их для совместной интерпретации.

Форма кривых МТЗ отвечает определенному типу геоэлектрического разреза. Следовательно, кривые МТЗ, близкие по своей форме, отражают сходный глубинный геоэлектрический разрез. Этот принцип положен в основу получения обобщенных глубинных геоэлектрических разрезов по профилю МТЗ. Организовав кривые МТЗ, близкие по своей форме в семейства, мы тем самым выделим на профиле районы с различным типом глубинного геоэлектрического разреза.

Первоначально на профиле таких районов было выделено 18. Каждый из них характеризуется своей формой продольных и поперечных кривых. Анализ показывает, что в большинстве случаев амплитудные кривые, сохраняя свою форму, сильно расходятся по уровню сопротивлений. В то же время фазовые кривые расходятся между собой незначительно. Это хорошо видно на рис. 2, где в качестве примера приведено семейство амплитудных и фазовых кривых для одного из районов профиля (МТЗ 462-468). Амплитудные кривые расходятся по уровню сопротивлений в низкочастотной области почти на порядок, а фазовые кривые близки, что свидетельствует о влиянии эффекта ρ (статический сдвиг амплитудных кривых). Эффект связан с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей. Для его ослабления выполнено конформное осреднение амплитудных и фазовых продольных и поперечных кривых МТЗ.

Полученные средние продольные и поперечные амплитудные кривые кажущегося электриче-

ского сопротивления и фазовые кривые импеданса для указанных выше районов изображены на рис. 3. Районы, для которых получены указанные кривые показаны на рис. 4а. Следует отметить, что они в низкочастотной области не свободны от влияния структур приповерхностных частей земной коры. Поэтому, для изучения глубинной электропроводности предпринята еще одна попытка организации полученных средних кривых в семейства близкие по своей форме. Таких семейств организовано восемь. Они соответствуют зонам на профиле, приведенным на рис. 4б. Для зон рассчитаны средние кривые из семейства кривых. Полученные средние продольные и поперечные амплитудные кривые кажущегося электрического сопротивления и фазовые кривые импеданса представлены на рис. 5. Кривые различаются по форме, что связано с геоэлектрической неоднородностью среды. Большинство из них имеют в левой части минимум, отражающий наличие осадочно-вулканогенного чехла пониженного электрического сопротивления. В большей мере минимумы выражены во впадинах, выполненных преимущественно терригенными осадочными отложениями. Максимумы в средней части кривых МТЗ обусловлены слоем земной коры повышенного электрического сопротивления. Большинство кривых в правой части представлены минимумом или нисходящей ветвью, которые могут быть связаны как с глубинным проводящим слоем, так и с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в Беринговом и Охотском морях. Поэтому возникает необходимость изучения в магнитотеллурическом поле берегового эффекта, который на побережье Берингова моря имеет трехмерный характер.

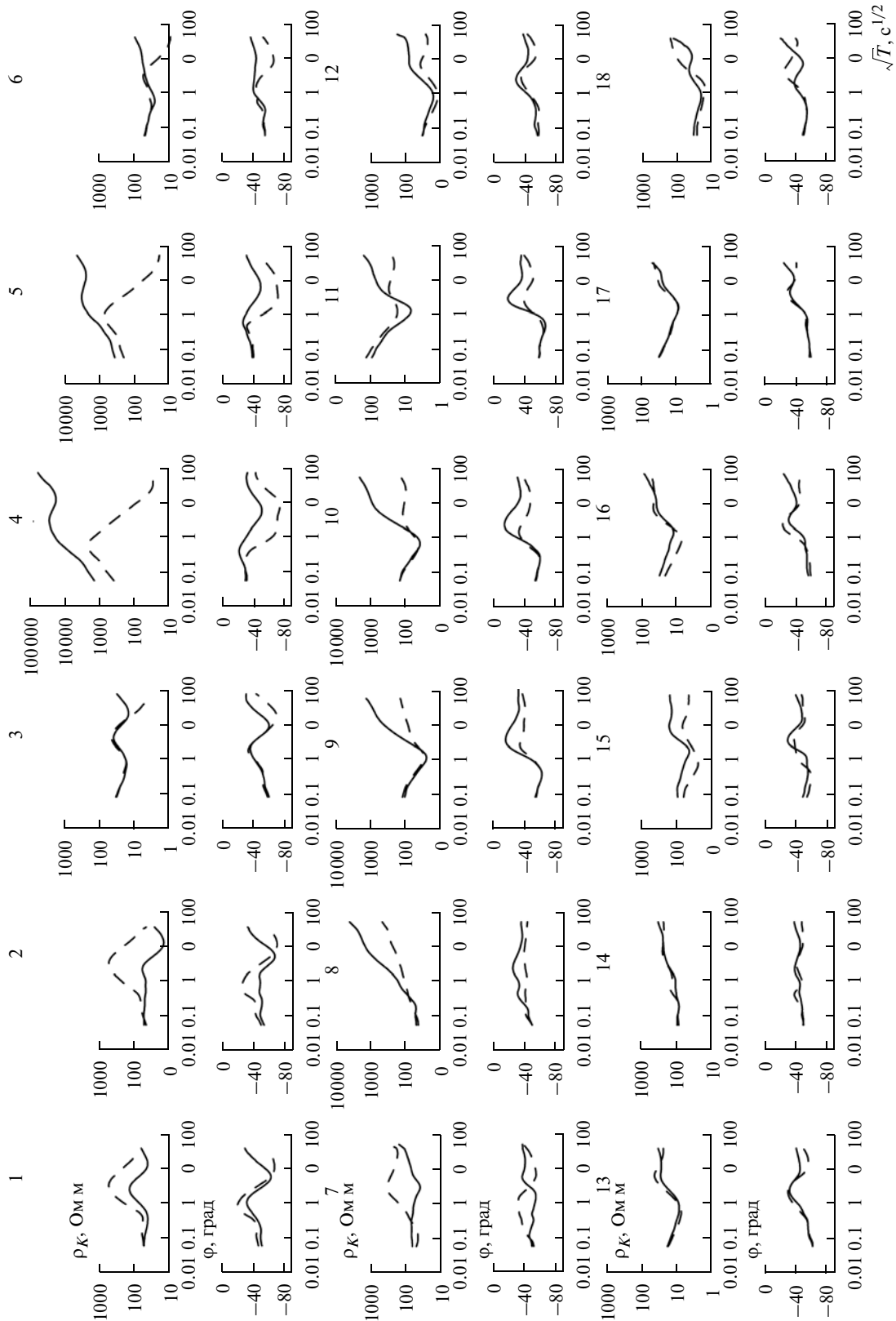


Рис. 3. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ по районам профиля. 1 и 2 – поперечные и продольные кривые МТЗ.

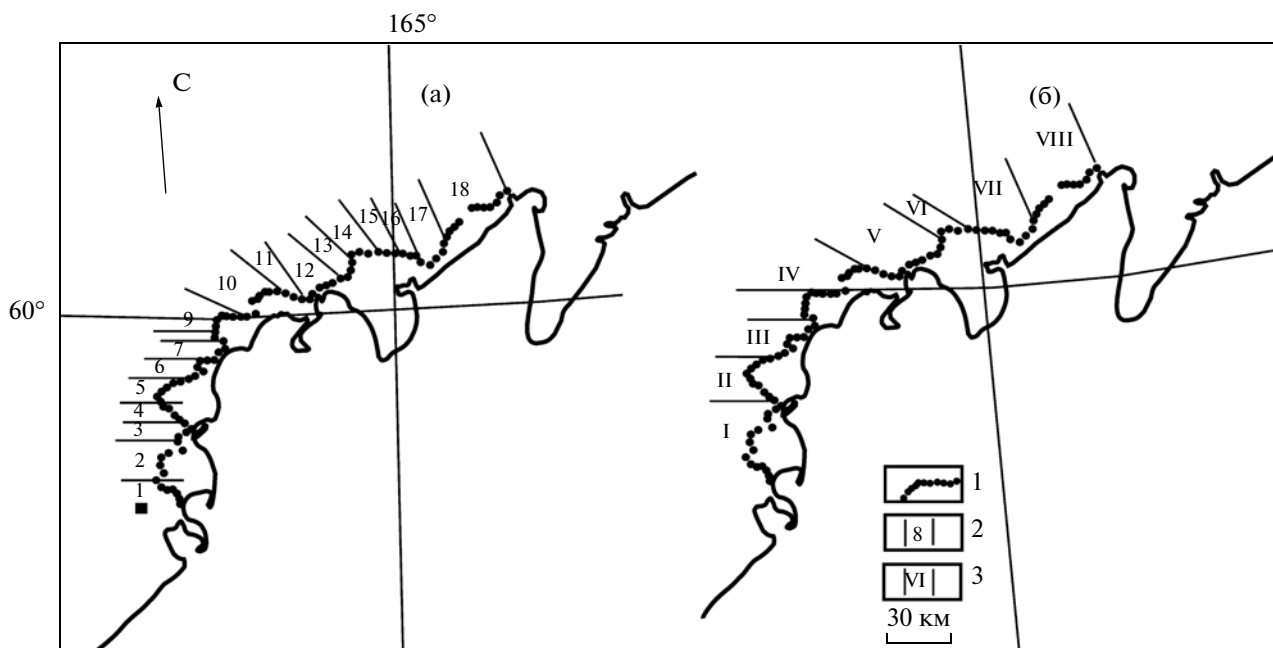


Рис. 4. Схема расположения районов (а) и зон (б), для которых получены средние кривые МТЗ.
1 – пункты МТЗ; 2 – районы; 3 – зоны.

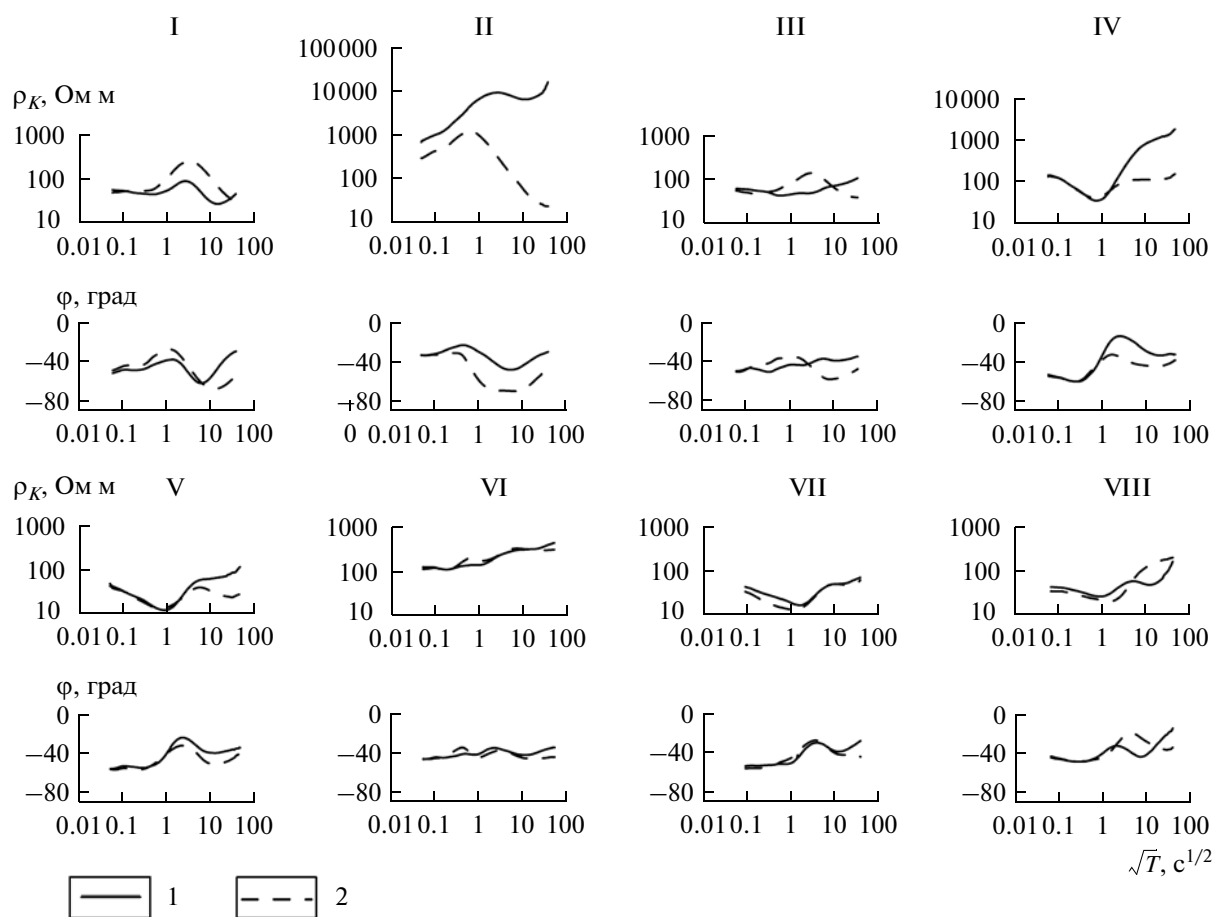


Рис. 5. Средние продольные и поперечные кривые МТЗ по зонам профиля.
1 и 2 – поперечные и продольные кривые МТЗ.

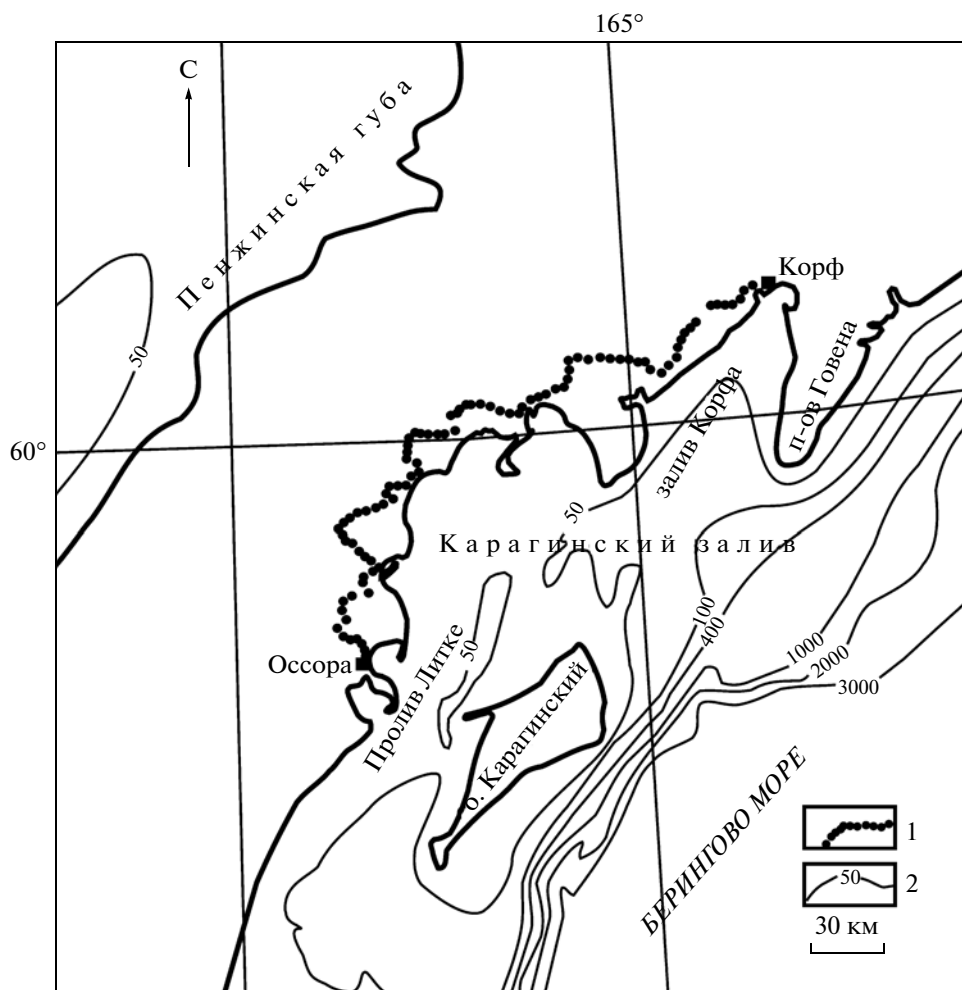


Рис. 6. Фрагмент карты изобат для района северного перешейка Камчатки.
1 — пункты МТЗ; 2 — изобаты в м.

АНАЛИЗ ТРЕХМЕРНОГО БЕРЕГОВОГО ЭФФЕКТА

Профиль МТЗ находится в прибрежной части пролива Литке, Карагинского залива и залива Корфа. Береговая линия имеет сложные очертания из-за небольших полуостровов и заливов. Пункты наблюдений расположены от береговой черты на расстоянии от первых километров до первых десятков километров. Из-за резкого контраста электропроводности суши и морской воды кривые МТЗ могут быть подвержены заметному влиянию берегового эффекта. Оценка его выполнена с помощью трехмерной модели, верхняя часть которой изображена на рис. 6. В модели мощность и удельное электрическое сопротивление осадочно-вулканогенного чехла приняты постоянными, чтобы оценить влияние берегового эффекта независимо от влияния геоэлектрических неоднородностей верхнего слоя. Геоэлектрические параметры верхнего слоя приняты на суше по обобщенным данным МТЗ. Мощность осадочно-вулканогенного чехла составляет 3 км, а

удельное электрическое сопротивление $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Удельное электрическое сопротивление морской воды принято величиной $0.25 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Глубинный электрический разрез является стандартным, т.е. электрическое сопротивление в нем закономерно уменьшается с глубиной.

В результате трехмерного численного моделирования магнитотеллурического поля по программе Макки [Mackie et al., 1994] получены продольная, поперечная и локально-нормальная кривые МТЗ в пунктах наблюдений по профилю. На большинстве пунктов продольные и поперечные кривые кажущегося сопротивления отклоняются от локально-нормальной кривой в низкочастотной области. Кривые МТЗ для выделенных зон приведены на рис. 7а. Заметное отклонение кривых начинается на периодах более 100 с. При этом, продольные кривые по уровню сопротивлений располагаются ниже локально-нормальной кривой. Низкочастотные ветви кривых выражены нисходящей ветвью со слабо выраженными или более заметными минимумами. Попе-

речные амплитудные кривые в низкочастотной области представлены восходящими асимптотическими ветвями. Они слабо реагируют на конфигурацию береговой линии. Продольные кривые заметно меняют свою форму в зависимости от места расположения профиля. В зоне I продольная кривая в низкочастотной области подобна локально-нормальной кривой и расположена ниже нее по уровню сопротивлений. Такое поведение кривой определяется индукционным влиянием электрических токов в проливе Литке, создающим ситуацию близкой к двумерной. В зонах II и III на продольных кривых появляется слабо выраженный минимум за счет индукционного эффекта. При этом кривые в своих правых частях приближаются к локально-нормальной кривой, что обусловлено ослаблением указанного эффекта. В зонах IV–VIII на продольных кривых в низкочастотной области проявляется минимум в более явном виде. Однако продольные кривые на длинных периодах пересекают локально-нормальную кривую и располагаются выше нее по уровню сопротивления, что связано с влиянием трехмерного берегового эффекта.

Следует отметить, что в прибрежной полосе степень проявления берегового эффекта зависит от удаления от береговой линии. Это хорошо видно на рис. 8, где представлены графики отклонений продольных и поперечных значений кажущихся сопротивлений (см. рис. 8б, 8г) и фазы импеданса (см. рис. 8в, 8д) от соответствующих локально-нормальных значений на периоде 900 с. Графики приведены в сопоставлении с графиком зависимости расстояний пунктов наблюдений от береговой черты (см. рис. 8а). Они согласуются по форме. Отклонения продольных и поперечных значений кажущихся сопротивлений и фазы поперечного импеданса заметно возрастают при приближении к береговой черте. Отклонение фазы продольного импеданса слабо реагирует на изменение расстояний до береговой черты. Повышенные ее отклонения в юго-западной части профиля обусловлены индукционным влиянием электрических токов в проливе Литке. Отклонения поперечного сопротивления меняются по профилю от 90 до 250%, а продольного - от 20 до 70%. При этом отклонение фазы поперечного импеданса меняется от 21° до 27°, а продольного от 1°–2° до 12°.

Рассмотрим береговой эффект в модели, содержащей литосферный проводящий слой. Последний был выявлен по данным предшествующих магнитотеллурических исследований. Проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом · м расположен на глубинах 20–30 км. На основании этого в исходную модель введен проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением 20 Ом · м на указанных глубинах. В результате моделирования получены продольная, поперечная и локально-нормальная кривые. Характерные модельные

кривые приведены на рис. 7б. На них в виде минимума на периодах 100–1000 с хорошо выражен глубинный проводящий слой. Продольная кривая отклоняется от локально-нормальной кривой на периоде 400 с, а поперечная кривая – на периоде 100 с. В области низких частот продольная кривая также расположена по уровню сопротивлений выше локально-нормальной кривой.

Обратимся к рис. 8б, 8г, на котором видно, что отклонение значений поперечного кажущегося электрического сопротивления от локально-нормального на периоде 900 с меняется от 80 до 200%, а продольного – от 5 до 30%. При этом отклонение фазы поперечного импеданса меняется от 5° до 14°, а фазы продольного импеданса – от 2° до 11° (см. рис. 8в, 8д).

Таким образом, выполненный анализ показал, что продольные и поперечные модельные кривые в низкочастотной области подвержены сильному влиянию берегового эффекта. Наличие литосферного проводящего слоя приводит к заметному ослаблению берегового эффекта. Отклонение продольных амплитудных кривых от локально-нормальной кривой на периоде 900 с не превышает 30%, а фазы продольного импеданса 14°. О глубинном проводнике можно судить по периоду вариаций, на котором начинает формироваться нисходящая ветвь амплитудной продольной кривой МТЗ. Если на периодах 30–50 с появляется нисходящая ветвь и на фазовой кривой хорошо выражен минимум, то высока вероятность наличия глубинного проводника.

Рассмотрим возможную природу берегового эффекта. Он обусловлен асимметрией токов, индуцированных в океане и на Камчатке. При продольной поляризации поля электрические токи текут в океане вдоль побережья Камчатки. За счет индукционного эффекта в районе профиля магнитное поле возрастает, а электрическое поле в силу закона Ленца убывает. Это приводит к понижению низкочастотных ветвей кривых удельного электрического сопротивления и фазы, и появлению на них минимумов, вызванных береговым эффектом. При поперечной поляризации поля существует кондуктивное взаимодействие токов, которое выражено в их перетекании из одной толщи в другую. Проникновение океанического тока в осадочно-вулканогенный чехол создает в нем избыточный ток, что приводит к появлению ложных восходящих ветвей на поперечных кривых кажущегося электрического сопротивления и фазы импеданса.

КАЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

Результаты трехмерного численного моделирования свидетельствуют о том, что кривые МТЗ до периода 100 с практически не подвержены

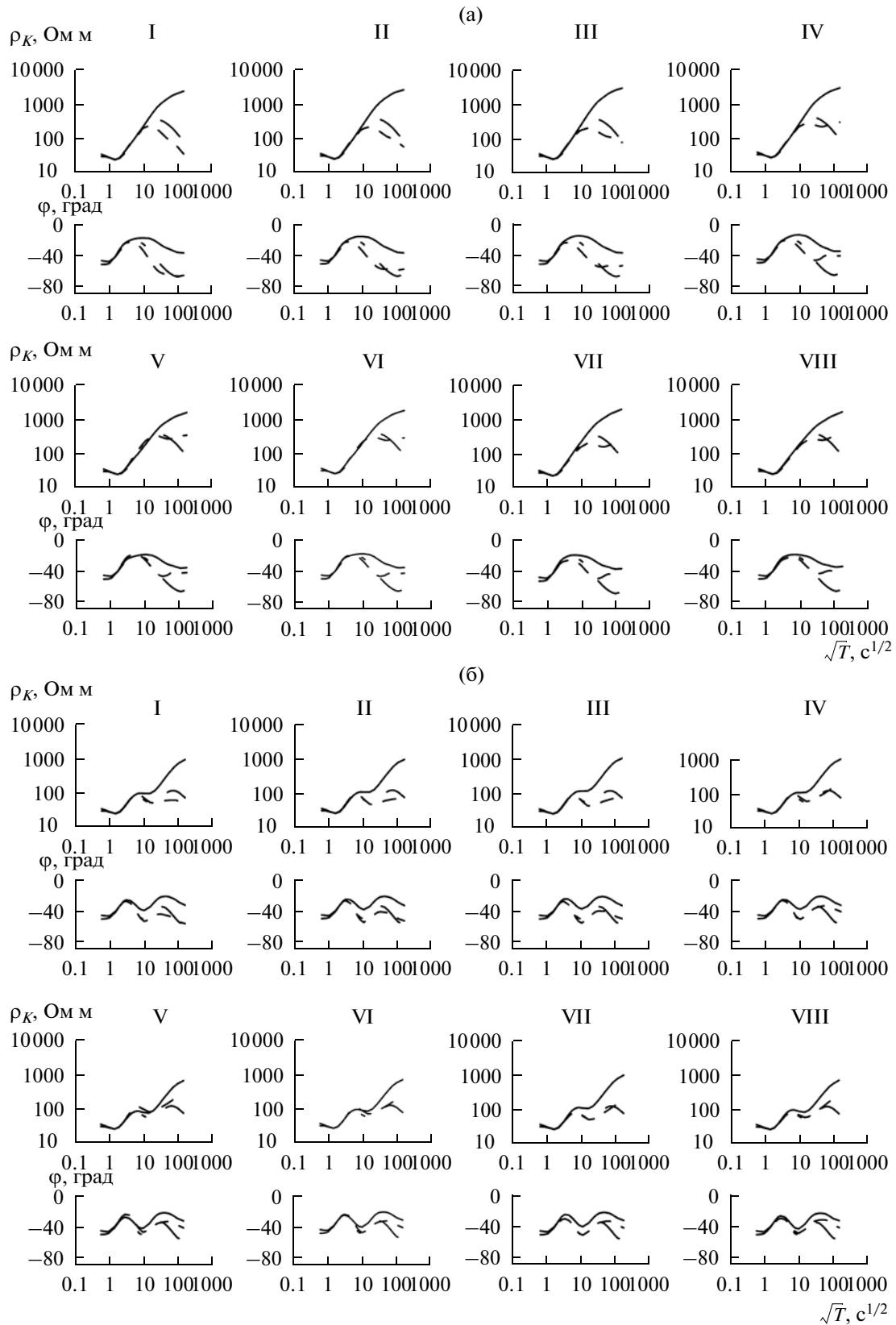


Рис. 7. Кривые МТЗ для стандартной модели (а) и модели с коровым проводящим слоем (б).
 1, 2 и 3 – поперечные, продольные и локально-нормальные кривые МТЗ.

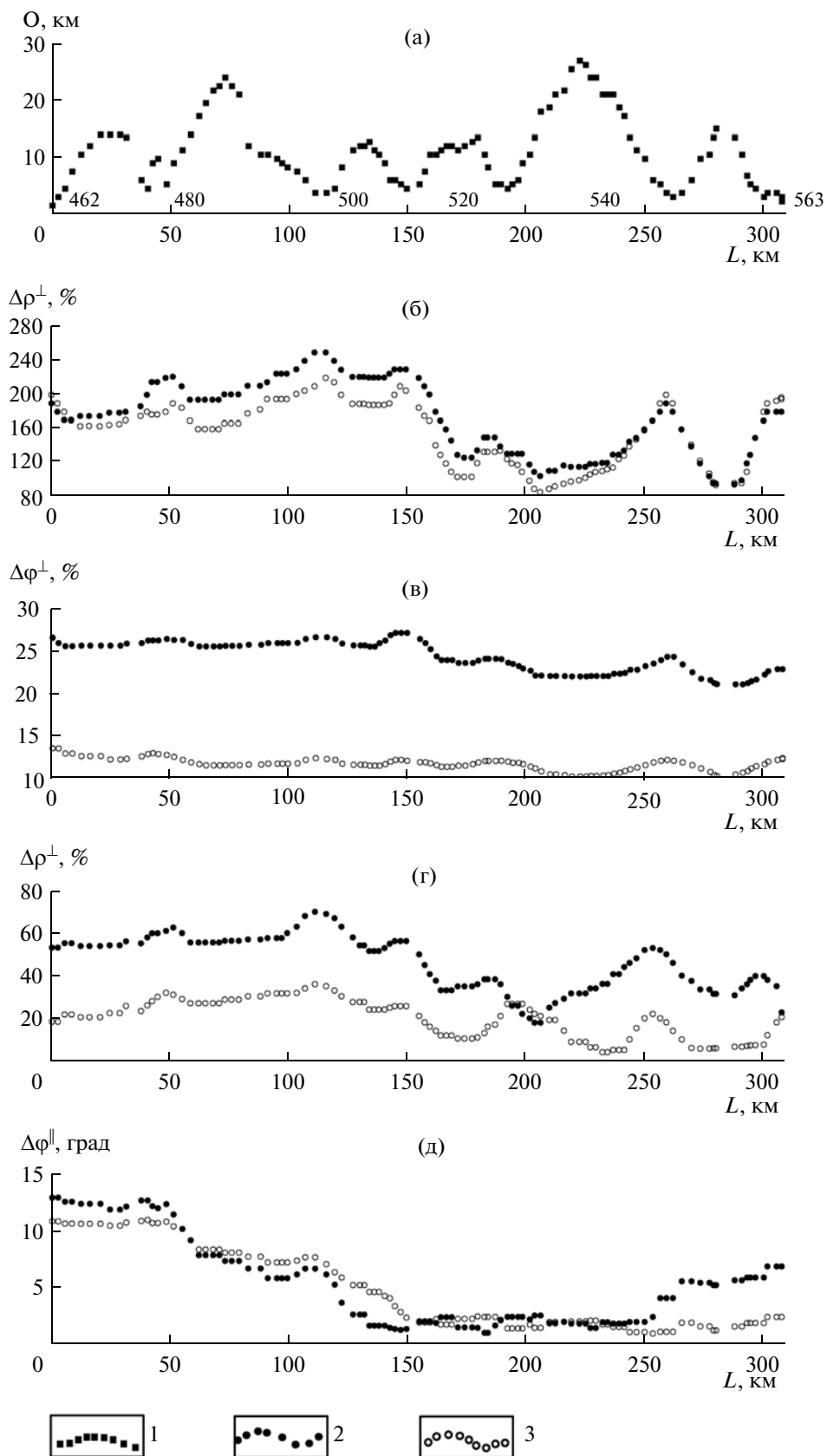


Рис. 8. Графики зависимости расстояний пунктов наблюдения от береговой черты (а), отклонений поперечных и продольных значений сопротивления (б и г соответственно) и фаз импеданса (в и д соответственно).

1 – пункты наблюдения; 2 – отклонения продольных и поперечных сопротивлений и фаз импедансов от локально-нормальных значений для стандартной модели, в процентах; 3 – отклонения продольных и поперечных сопротивлений и фаз импедансов от локально-нормальных значений для модели с коровым проводящим слоем, в процентах.

влиянию берегового эффекта. Средние экспериментальные кривые для выделенных 18 участков профиля в значительной мере свободны от влияния локальных геоэлектрических неоднородностей среды. Данные кривые МТЗ до указанного периода использованы для изучения осадочно-вулканогенного чехла.

Информацию о глубинной электропроводности содержат низкочастотные ветви продольных и поперечных кривых МТЗ. Однако они искажены влиянием берегового эффекта. Так как МТЗ расположены по профилю, ориентированному вдоль побережья Камчатки, то это не дает возможности использовать двумерную инверсию кривых МТЗ в рамках двумерно-неоднородной модели. В качестве первого приближения глубинный геоэлектрический разрез можно получить с использованием формальной интерпретации продольных кривых зон, которые в меньшей мере затронуты влиянием структур северо-восточного простирания. Следует отметить, что согласно численному моделированию, ошибки из-за влияния берегового эффекта при определении параметров литосферного проводящего слоя могут достигнуть 30%. Также необходимо иметь в виду, что продольные кривые не дают возможности однозначно определить удельное электрическое сопротивление высокоомного слоя литосферы. Для этих оценок принимались во внимание поперечные кривые МТЗ. При выделении глубинных разломов использован эффект расхождения продольных и поперечных кривых МТЗ.

Рассмотрим продольные и поперечные кривые зон (см. рис. 5). Они отражают основные особенности глубинного строения. В зоне I продольная и поперечная кривые до периода 100 с близки по форме. В высокочастотной области кривые отражают осадочно-вулканогенный чехол с кажущимся электрическим сопротивлением в первые десятки Ом м. В низкочастотной области кривые имеют нисходящие ветви, характеризующие возрастание электропроводности с глубиной. На поперечной кривой правая ветвь является восходящей, что связано с влиянием берегового эффекта. Нисходящая ветвь в своей правой части выходит в минимум, который хорошо выражен на фазовой кривой. Минимум кажущегося электрического сопротивления свидетельствует о наличии литосферного проводящего слоя. Между проводящим осадочно-вулканогенным чехлом и литосферным проводником существует слой высокого электрического сопротивления. Характерно, что поперечная кривая в этой зоне отличается пониженным уровнем электрического сопротивления высоко-

омного слоя. Это можно объяснить повышенной проницаемостью указанного слоя за счет глубинных проводящих разломов, которые, по-видимому, служили каналами для поступления магматических четвертичных образований, распространенных в районе Тымлатского поднятия.

В зоне II кривые в левой части представлены восходящими асимптотическими ветвями, связанными с высокоомным геоэлектрическим горизонтом. Продольная кривая в низкочастотной области представлена также нисходящей ветвью, выходящей в минимум, который в полной мере выражен на фазовой кривой, что говорит о присутствии литосферного проводящего слоя. Поперечная амплитудная кривая затянута вверх по уровню сопротивлений за счет берегового эффекта. На ней, как и на фазовой кривой, проявился минимум, подтверждающий наличие литосферного проводящего слоя.

В зоне III продольная и поперечная кривые в высокочастотной области близки по уровню сопротивлений. Они характеризуют электропроводность осадочно-вулканогенного чехла. Поперечная кривая в низкочастотной области выражена восходящей асимптотической ветвью, связанной с береговым эффектом. Продольная кривая на периодах более 16 с имеет нисходящую ветвь, отвечающую минимуму на фазовой кривой, которая отражает наличие литосферного слоя повышенной электропроводности.

В IV зоне продольная и поперечная кривые в левой части практически совпадают. На них выражен минимум, отражающий проводящий осадочно-вулканогенный чехол. Расхождение продольной и поперечной кривых начинается с периода 4 с, что обусловлено геоэлектрической неоднородностью верхних частей земной коры. Продольная кривая в низкочастотной области выположена, что может быть связано с наличием глубинного слоя повышенной электропроводности. На это указывает минимум фазовой кривой импеданса. Поперечная кривая в низкочастотной области из-за действия берегового эффекта представлена крутой восходящей ветвью, которая выположена в правой части за счет глубинного слоя повышенной электропроводности.

В V зоне продольная и поперечная кривые совпадают в высокочастотной области. На кривых проявился минимум, характеризующий электропроводность проводящего осадочного чехла. В правой части кривых выражен минимум, связанный с литосферным проводящим слоем. В этой зоне поперечная кривая слабо подвержена влия-

нию берегового эффекта в связи с удаленностью пунктов МТЗ от морского побережья. Литосферный проводящий слой заметно выражен на амплитудной кривой. В большей мере он проявился на фазовой кривой импеданса.

В VI зоне продольная и поперечная кривые близки по уровню сопротивлений. В левой части кривые характеризуют электропроводность осадочно-вулканогенного чехла. На продольной кривой в лучшей мере выражен минимум на периодах в первые секунды, который может быть связан с коровым проводящим слоем. В низкочастотной области продольная и поперечная кривые затронуты береговым эффектом.

В VII зоне кривые МТЗ во многом подобны кривым в V зоне. Отличием является незначительное расхождение продольной и поперечной кривых по уровню сопротивлений в высокочастотной области и практическое совпадение кривых в правой части до периода 400 с. На кривых в низкочастотной области слабо проявился минимум, который может быть связан с литосферным проводящим слоем. Береговой эффект на кривых проявился незначительно из-за удаленности пунктов МТЗ от морского побережья.

В VIII зоне кривые МТЗ в высокочастотной области близки по уровню сопротивлений. Они имеют слабовыраженный минимум, характеризующий осадочно-вулканогенный чехол. В низкочастотной области они принципиально отличаются от кривых других зон. Продольная кривая представлена крутой восходящей ветвью, наклон которой становится положе на периодах 100–900 с. Поперечная кривая имеет крутую восходящую ветвь в правой части, которая отражает влияние берегового эффекта. Восходящая ветвь предваряется минимумом, хорошо выраженным на фазовой кривой. Анализ показывает, что на продольной кривой не проявился литосферный проводящий слой. На поперечной кривой такой слой выражен. Подобная ситуация возможна при наличии в земной коре поперечных проводящих разломов, которые проявятся на поперечных кривых, но будут незаметны на продольной.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ПРОФИЛЮ МТЗ

В результате интерпретации кривых МТЗ составлен глубинный геоэлектрический разрез, представленный на рис. 9. Здесь приведены графики поля силы тяжести и магнитного поля. На геоэлектрическом разрезе показаны разломы по

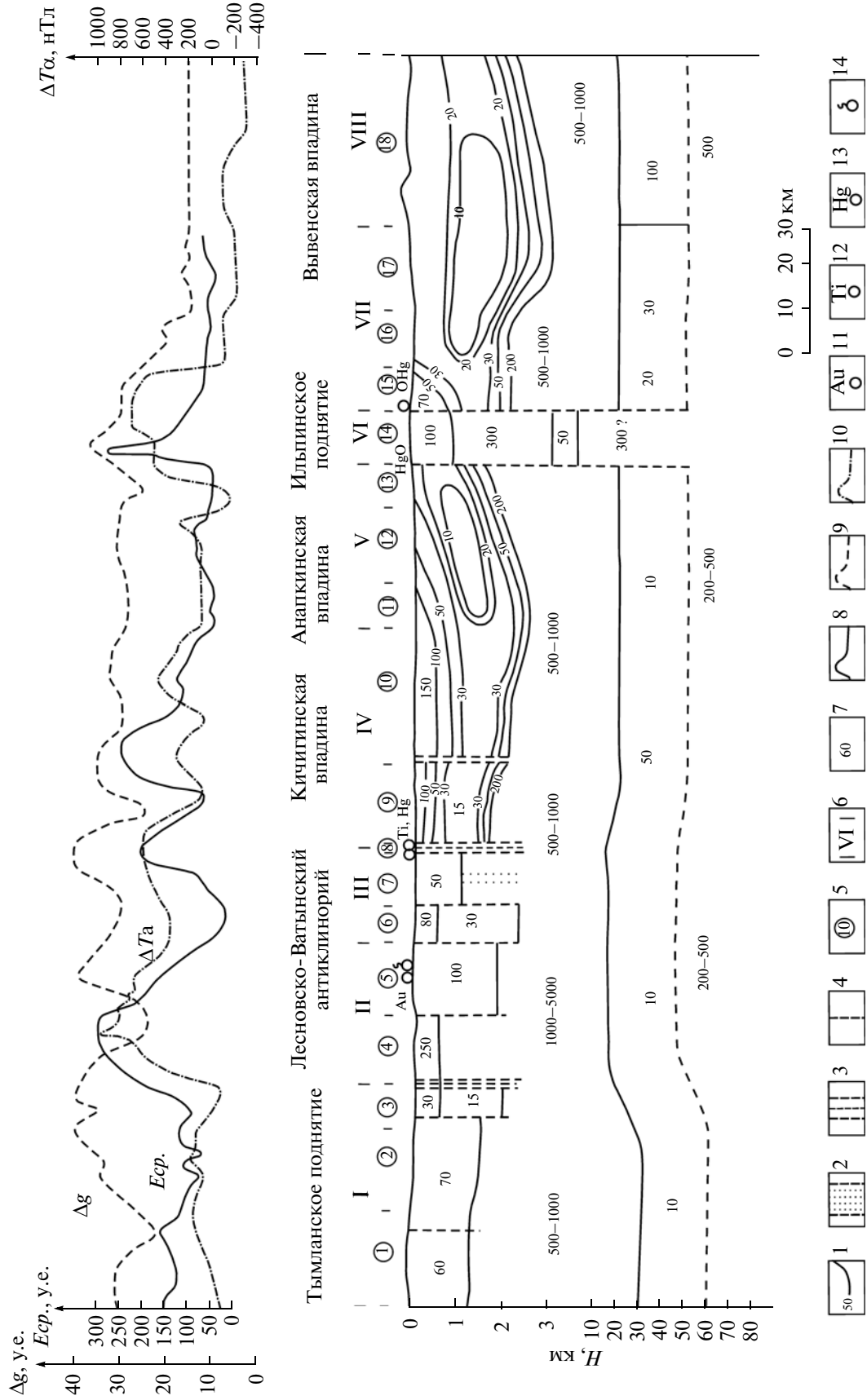
геолого-геофизическим данным, рудопроявления и выходы минерализованных вод [Карта..., 1999]. В геоэлектрическом разрезе верхних частей земной коры выражены структуры Лесновско-Ватынского антиклинория и Ильпино-Литкенского прогиба, разделенные глубинным разломом, выделенным по геофизическим данным. Лесновско-Ватынский антиклинорий, судя по карте средней напряженности теллурического поля, был пересечен профилем МТЗ дважды. Глубинный разлом выделен по полосе сильного градиента напряженности теллурического поля и интенсивным аномалиям гравитационного и магнитного полей.

Лесновско-Ватынский антиклинорий характеризуется сложным строением. Структура верхних частей земной коры выражена в виде блоков с различной электропроводностью. Блоки ограничены тектоническими нарушениями, выделенными по геофизическим данным, и находят отражение в геофизических полях. Блоки повышенной электрического сопротивления характеризуются повышенной интенсивностью гравитационного и магнитного полей, что свидетельствует о насыщенности разреза магматическими породами. Блоки с относительно повышенной электропроводностью отличаются слабой интенсивностью магнитного поля и пониженной напряженностью поля силы тяжести, что можно объяснить преобладанием в блоках терригенных толщ или повышенной пористостью вулканогенных слабомагнитных пород, насыщенных минерализованными водами.

Ильпино-Литкенский прогиб является северным продолжением Центрально-Камчатского прогиба. Границы его – Центрально-Камчатский и Восточно-Камчатский антиклинорий, последний из которых прослеживается на полуострове Озерном и острове Говена [Геология..., 1964]. Северо-западная граница прогиба, как мы уже отмечали, достаточно четко обнаруживается по аномально высоким градиентам напряженности теллурического поля, которые связывают с тектоническим осложнением. Значительная часть прогиба скрыта водами Берингова моря. Мощности кайнозойских отложений, слагающих северо-западный борт прогиба меняется от 1.5 до 3 км при соответствующем изменении их среднего продольного электрического сопротивления от 10 до 250 Ом · м. В теллурическом и гравитационном полях прогиб выражен аномалиями пониженной интенсивности. В магнитном поле проявились положительные и отрицательные аномалии, свидетельствующие о наличии в разрезе вулканогенных образований. Наряду

Рис. 9. Глубинный геоэлектрический разрез.

1 – изолинии удельного электрического сопротивления в Ом м; 2 – зоны повышенной проницаемости; 3 – зоны глубинных разломов; 4 – разломы; 5 – районы, выделенные после первого этапа осреднения; 6 – зоны, выделенные после второго этапа осреднения; 7 – удельное электрическое сопротивление в Ом · м; 8 – график средней напряженности теллурического поля; 9 – график поля силы тяжести; 10 – график магнитного поля; 11 – проявления золота; 12 – проявления титана; 13 – проявления ртути; 14 – естественные проявления подземных пресных вод (источники).



ду с этим отмечаются интенсивные возмущенные аномальные изменения магнитного, гравитационного и теллурического полей, отражающие наличие разломов.

Профилем МТЗ пересечены структуры прогиба, выявленные по опорному высокоомному геоэлектрическому горизонту, отождествляемому с докайнозойским комплексом пород. К ним относятся: Тымлатское и Ильпинское поднятия, Анапкинская, Кичигинская и Вывенская впадины.

Тымлатское поднятие характеризуется преимущественно увеличенным удельным электрическим сопротивлением кайнозойской толщи, составляющим 60–70 Ом · м. В зоне глубинного разлома на границе Лесновско-Ватынского антиклинория удельное электрическое сопротивление понижается до 15–30 Ом · м. Повышенное электрическое сопротивление в районе поднятия, по-видимому, связано с присутствием в кайнозойской толще вулканогенных образований. На это указывает повышенная интенсивность отрицательного магнитного поля и повышенная напряженность гравитационного поля, а также интрузии четвертичного и неогенового возрастов, закартированные геологической съемкой на дневной поверхности. Повышенная электропроводность кайнозойской толщи в зоне глубинного разлома можно объяснить присутствием в разрезе терригенных пород или вулканогенных образований повышенной пористости, насыщенных минерализованными растворами. Толща повышенной электропроводности характеризуется аномалией пониженной напряженности теллурического и гравитационного полей. Здесь магнитное поле выражено интенсивной аномалией магнитного поля, что связывается с присутствием в разрезе вулканогенных пород с повышенной магнитной восприимчивостью.

Анапкинская впадина характеризуется повышенной электропроводностью осадочно-вулканогенного чехла, в разрезе которого преобладают терригенные породы с удельным электрическим сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом · м. Мощность кайнозойской толщи во впадине меняются от 1.5 до 3 км. В юго-западной части впадины выделяется разлом, вероятно, насыщенный магматическими породами. Разлом выявлен по эффекту расхождения кривых МТЗ. Он находит отражение в повышенной напряженности теллурического, гравитационного и магнитного полей. Анапкинская впадина в северо-восточной части отличается спокойным поведением геофизических полей, что свидетельствует о слабой насыщенности разреза вулканогенными образованиями.

Ильпинское поднятие характеризуется повышенным удельным электрическим сопротивлением осадочно-вулканогенного чехла за счет насыщенности разреза вулканогенными образованиями. В средней части поднятия выделяется

приподнятый блок, ограниченный разломами. Он сложен толщей пород, включающих интрузивные и эффузивные магматические образования. Это отражается в аномальном поведении теллурического, магнитного и гравитационного полей. На дневной поверхности в районе данного блока закартированы выходы диоритов и габбро-диоритов неогенового возраста.

Вывенская впадина сложена кайнозойскими породами с удельным электрическим сопротивлением 10–50 Ом · м. Повышенная проводимость осадочного чехла впадины обусловлена преобладанием в разрезе терригенных пород, обладающих повышенной пористостью и насыщенных минерализованными водами. Впадина отличается спокойным поведением гравитационного, магнитного и теллурического полей. Отрицательный уровень магнитного поля впадины свидетельствует о наличии в верхней части разреза вулканогенных образований.

В литосфере выделен слой повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом · м. Мощность слоя приблизительно оценивается в 30 км. Однозначно можно судить лишь о поведении кровли слоя. Она максимально приподнята под Лесновско-Ватынским антиклинорием. Здесь глубина кровли располагается на глубине примерно 15 км. В юго-западном направлении, под Тымлатским поднятием, глубина кровли погружается до 30 км. Под Анапкинской впадиной, Ильпинским поднятием и юго-западной частью Вывенской впадины глубина кровли слоя составляет около 20 км. В северо-восточной части Вывенской впадины проводящий слой в явной форме на кривых не выражен. По-видимому, здесь удельное электрическое сопротивление слоя заметно возрастает и поэтому он не проявился на кривых МТЗ.

Природу литосферного проводящего слоя сопротивлением в первые десятки Ом · м можно связать с наличием высокоминерализованных растворов, а также с электропроводящими сульфидными образованиями. Согласно [Смирнов, Сугробов, 1980] региональный тепловой поток в районе профиля оценивается в 80 мВт/м². По данному тепловому потоку температуры на глубинах 20–30 км составляют 500–600 °С. Как известно, многие породообразующие минералы в составе пород земной коры могут содержать кристаллизационную воду или группу ОН (слюды, хлорит, роговая обманка, амфиболит и т.д.). Так например породы фации зеленых сланцев содержат до 4%, амфиболитовой – 1–2%, гранулитовой – 0.35% [Файф и др., 1981; Белоусов, 1986]. В результате регионального метаморфизма при температурах 400–800 °С протекают процессы дегидратации, и выделяется вода, которая занимает межгранулярное пространство, образующееся за счет уплотнения минералов после выделения воды. При высоких давлениях и температурах вода об-

ладает высокой растворяющей способностью, что приводит к образованию высокоминерализованных растворов, существующих при высоких температурах [Равич, 1971]. Обогащение пород жидким электролитом приводит к резкому уменьшению электрического сопротивления на несколько порядков. Грубые оценки показывают, что достаточно сотых-десятых долей процента относительно объема флюида в связанных каналах, чтобы обеспечить уменьшения сопротивления горных пород до первых десятков — единиц Ом · м [Ваньян, Хайдман, 1996]. Можно предполагать, что одной из причин возникновения литосферного слоя является наличие жидкой фазы. Также не исключено, что в отдельных частях проводящего слоя определенную роль играют скопления электропроводящих минералов.

На геоэлектрическом разрезе показаны известные рудопроявления и выходы минерализованных источников в районе профиля МТЗ (см. рис. 9). Рудопроявления золота, титана и ртути приурочены к Лесновско-Ватынскому синклинию и Ильпинскому поднятию. В районе этих структур земная кора содержит разломы, которые могут проникать в нижние части земной коры до проводящего слоя. По ним гидротермальные растворы и магматические расплавы поднимаются в осадочно-вулканогенный чехол. Высокоминерализованные растворы, проникая вверх, охлаждаются и из них выделяются различные рудные компоненты, заполняющие трещины в горных породах. В результате этого в зонах наиболее активного влияния гидротермальных растворов и магматических расплавов в приповерхностных частях разреза образуются рудные узлы. В таких зонах, сложенных вулканогенными породами, рудные компоненты часто не образуют связанных каналов. Поэтому в верхних частях земной коры они характеризуются повышенным электрическим сопротивлением. Блоки вулканогенных пород отличаются повышенной плотностью. Это находит отражение в виде аномалий повышенной напряженности гравитационного поля и аномалий возмущенного магнитного поля (районы 5 и 14).

Выявленная связь глубин залегания литосферного проводящего слоя, разломов, геоэлектрических неоднородностей осадочно-вулканогенного чехла и геофизических полей с размещением рудопроявлений цветных и благородных металлов на поверхности представляет важный критерий прогноза рудных месторождений. Наибольший интерес представляют районы, где литосферный проводящий слой приближен к дневной поверхности и геоэлектрические неоднородности верхних частей земной коры характеризуются аномальным поведением гравитационного и магнитного полей. Данный критерий может служить дополнительным признаком для выявления рудных месторождений на региональном и поисковом этапах исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ магнитотеллурических параметров свидетельствует о том, что геоэлектрические неоднородности среды на низких частотах можно аппроксимировать в качестве двумерных, что связано с вытянутостью основных тектонических зон в северо-восточном направлении. В основу интерпретации положены кривые МТЗ по главным направлениям, которые в большинстве случаев ориентированы по простиранию и вкрест простирания тектонических зон.

Продольные и поперечные кривые подвержены влиянию локальных геоэлектрических неоднородностей в виде шифт-эффекта. Для его погашения выполнено конформное осреднение кривых МТЗ. Полученные средние кривые использованы для изучения осадочно-вулканогенного чехла. Однако эти кривые не свободны от влияния крупных геоэлектрических неоднородностей верхних частей земной коры. Поэтому, для изучения глубинной электропроводности выполнен еще один этап осреднения кривых близких по форме в низкочастотной области. Большинство продольных кривых в правой части имеет минимум или нисходящую ветвь, которые могут быть связаны с влиянием литосферного проводящего слоя и берегового эффекта.

Он изучен в пробных трехмерных моделях с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля. Анализ показал, что наличие литосферного проводящего слоя приводит к заметному ослаблению берегового эффекта. Отклонение продольных амплитудных кривых от локально-нормальной кривой на периоде 900 с не превышает 30%, а фазы продольного импеданса 14°. О глубинном проводнике можно судить по периоду вариаций, на котором начинает формироваться нисходящая ветвь, а на фазовой кривой хорошо выражен минимум.

Глубинный геоэлектрический разрез получен в результате формальной интерпретации средних продольных кривых. Поперечные кривые использованы для уточнения геоэлектрической модели. При выделении глубинных разломов принимались во внимание другие геолого-геофизические данные. В геоэлектрическом разрезе верхних частей земной коры выражены структуры Лесновско-Ватынского антиклинория и Ильпино-Литкенского прогиба, разделенные глубинным разломом. Антиклинорий отличается сложным строением. Структура верхних частей земной коры выражена в виде блоков с различной электропроводностью. Блоки повышенного электрического сопротивления связываются с насыщенностью разреза магматическими породами. Блоки с относительно повышенной электропроводностью можно объяснить преобладанием в разрезе терригенных толщ или повышенной пористостью вулканогенных пород. В геоэлектрическом разрезе прогиба выделены Тымлатское и Ильпинское поднятия, Анапкинская и Вывенская впадины.

Поднятия характеризуются повышенным электрическим сопротивлением, связанным с преобладанием в надпорной толще вулканогенных образований. Впадины прогиба отличаются пониженным электрическим сопротивлением осадочно-вулканогенной толщи, обусловленным заметным присутствием в ее разрезе терригенных пород.

В литосфере выделен слой повышенной электропроводности с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом · м. Кровля слоя находится на глубинах 20–30 км. В районе Лесновско-Ватынского антиклинория она приближается к дневной поверхности до глубины 15 км. Природа литосферного проводящего слоя связывается с наличием высокоминерализованных растворов, а также с электропроводящими сульфидными образованиями. Предполагается, что по разломам гидротермальные растворы и магматические расплавы из литосферного слоя проникают в приповерхностные разрез и образуют рудные узлы. Это подтверждается рудопроявлениями цветных и благородных металлов в районе Лесновско-Ватынского антиклинория и Ильпинского полуострова. Выявленные особенности в структуре электропроводности литосферы и размещении рудопроявлений цветных и благородных металлов на поверхности представляют повышенный интерес для разработки критериев прогноза рудных месторождений.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке ДВО РАН (проект № 14-III-B-08-200).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белоусов В.В.* Земная кора и верхняя мантия материков. М.: Наука, 1986. 124 с.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. Москва: Научный мир, 2009. 677 с.
- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д.* О природе электропроводности консолидированной коры // *Физика Земли*. 1996. № 4. С. 5–11.
- Геология СССР. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1964. 733 с.
- Карта полезных ископаемых Камчатской области. Масштаб 1 : 500 000 / Под ред. Литвинова А.Ф., Патоки М.Г., Марковского Б.А. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. Л. VII.
- Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И.* Сейсмическая история Корякского нагорья и афтершоковый процесс Олюторского землетрясения 20(21) апреля 2006 г. $M_w = 7.6$ // *Вулканология и сейсмология*. 2010. № 2. С. 16–30.
- Мороз Ю.Ф.* Результаты исследований Восточной Камчатки комплексом методов электроразведки ТТ, МТЗ, ВЭЗ // *Геология и геофизика*. 1976. № 10. С. 140–144.
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Нурмухамедов А.Г., Мороз Ю.Ф.* Глубинное строение северо-восточной части Корякско-Камчатской складчатой области по данным региональных геофизических исследований // *Геофизический журнал*. 2009. № 3. Т. 31. С. 1–10.
- Равич М.И.* Фазовые равновесия в некоторых водосолевых системах при повышенных температурах и давлениях // Экспериментальное моделирование природных процессов. М.: Наука, 1971. С. 112–118.
- Ривов Л.А.* Геомагнитная характеристика главных тектонических структур востока СССР переходной зоны от Азиатского континента к Тихому океану и абиссальному дну последнего // *Геология и геофизика*. 1964. № 5. С. 38–51.
- Смирнов Я.Б., Сугробов В.М.* Земной тепловой поток в Курило-Камчатской и Алеутской провинциях // *Вулканология и сейсмология*. 1980. № 1. С. 16–31.
- Файф У., Прайс Н., Томпсон А.* Флюиды в земной коре. М.: Мир, 1981. 435 с.
- Bahr K.* Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // *Geophysics*. 1988. V. 62. P. 119–127.
- Mackie K.L., Smith J.T. and Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // *Radio Science*. 1994. № 4. P. 923–935.
- Swift C.M.* A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation. Cambridge, 1967. 223 p.

Electric Conductivity at Depth: The Southern Coast of North Kamchatka

Yu. F. Moroz^{a, b}, O. M. Samoilova^a, and T. A. Moroz^a

^a Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, bul'var Piipa 9, 683006 Russia

e-mail: morozyf@kscnet.ru

^b Geological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 6a ul. Sakhyanovoi, Ulan-Ude, 670047 Russia

Received October 17, 2014

Abstract—This paper considers the method of interpretation of, and results from, magnetotelluric soundings when integrated with data from magnetometry, gravimetry, and other geological and geophysical data. Stress is placed on incorporating the shift effect and the 3-D coast effect, which was studied in tentative models using numerical modeling of the magnetotelluric field. The interpretation is based on longitudinal curves, which are less subject to distortions at low frequencies. Transverse curves were used to obtain more accurate resistivities in the upper section and to identify faults. Longitudinal MTS curves were inverted to derive a geoelectric section that characterizes the resistivities in the sedimentary–volcanogenic cover and in the underlying rocks. The Earth's crust contains a conductive layer that lies at varying depths, between 30 and 15 km. We discuss a possible origin for crustal resistivity anomalies and their possible relationship to ore occurrences at the ground surface.