

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЛИТОСФЕРЫ ХАНКАЙСКОГО МАССИВА ПО ПРОФИЛЮ С. ПОЖАРСКОЕ–П. ШКОТОВО ПО ДАННЫМ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ

В.Б. Каплун, А.К. Бронников

ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000; e-mail: kaplun@itig.as.khb.ru

Поступила в редакцию 27 мая 2020 г.

По результатам магнитотеллурических зондирований, выполненных по профилю, пересекающему Ханкайский массив с севера на юг, построен геоэлектрический разрез литосферы до глубины 150 км. Изучено строение земной коры и верхней мантии массива. Выявлено, что Ханкайский массив делится на северную и южную части, граница между которыми проходит по северному ограничению Спасской зоны. Южная часть массива характеризуется более высокими электрическими сопротивлениями в верхней части разреза и верхней мантии. В северной части массива выделено две обширные области низкого электрического сопротивления, расположенных под южными границами Матвеевской и Нахимовской зон, проникающих из верхней мантии к земной поверхности. Проведено сопоставление полученных результатов с данными сейсморазведки и гравиметрии, которое показало их близкое прямое или опосредованное соответствие.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, глубинное строение, земная кора, верхняя мантия, глубинные разломы, Ханкайский массив, Дальний Восток России.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья является продолжением исследований, выполняемых с целью изучения глубинного строения Сихотэ-Алинской складчатой системы (САСС) и сопредельных территорий. В предыдущие годы нами были проведены магнитотеллурические зондирования (МТЗ) в широком частотном диапазоне от 10 кГц до 10^{-3} Гц на трех профилях, которые начинались на Ханкайском массиве и пересекали САСС вкост его простирания [13–15]. Данные исследования проведены в пределах Ханкайского массива с целью изучения его глубинного строения и увязывания между собой результатов ранее выполненных работ.

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Ханкайский массив расположен в юго-западной части Приморского края и с севера и востока граничит с Сихотэ-Алинской складчатой системой (САСС) [9] (рис. 1). Северная граница массива проходит по Алчанскому разлому, а восточная имеет сложное строение и представлена Арсеньевским, Партизанским, Кривинским и Центральным Сихотэ-Алинским разломами. Массив имеет гетерогенное строение и

состоит из нескольких блоков докембрийского возраста – Матвеевская, Нахимовская, Кабаргинская, Спасская, Вознесенская, Гродековская, Сергеевская зоны, которые «сшиты» или перекрыты структурами деформированного чехла. В связи с этим границы между зонами выделены условно за исключением Матвеевской, Нахимовской и Кабаргинской, где последняя разделяет Матвеевскую и Нахимовскую зоны, протягиваясь в близширотном направлении.

Матвеевская зона находится в северной части массива и сложена среднерифейскими гнейсами, сланцами и мрамором. Породы смяты в складки разной амплитуды и размерности. Крупные складки имеют длину до 20 км при ширине 4–6 км, наклон слоев в среднем 40–50°. Матвеевская зона на севере перекрыта вулканитами алчанской свиты.

Кабаргинская зона в структурном плане представляет грабен-синклиналь, ограниченную с севера и юга разрывами. Сложена она карбонатными, карбонатно-терригенными и терригенными отложениями. Северное крыло грабен-синклинали имеет сравнительно простое строение с устойчивым моноклиналильным падением пластов на юг (40–50°).

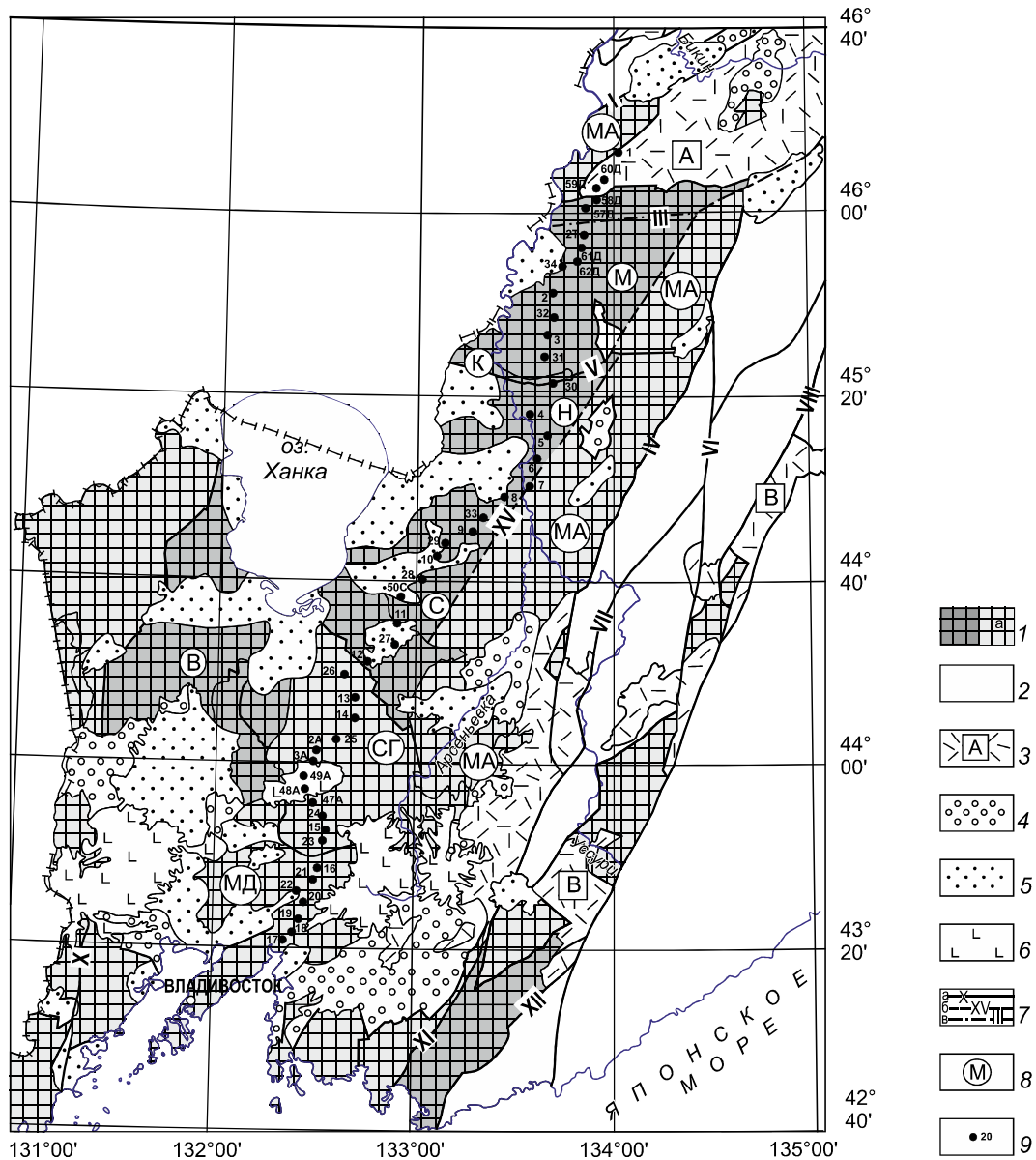


Рис. 1. Тектоническая схема Ханкайского массива и сопредельных территорий, по [8], с пунктами магнитотеллурических зондирований.

1 – Ханкайский массив, в том числе: а – структуры деформированного чехла Ханкайского массива; 2 – Сихотэ-Алинская складчатая система; 3 – окраинно-континентальные вулканические структуры: А – Алчанский ареал, В – Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс; 4 – наложенные меловые впадины; 5 – кайнозойские континентальные впадины; 6 – покровы платобазальтов; 7 – разрывные нарушения (а – достоверные, б – предполагаемые, в – скрытые): I – Алчанский, III – Дальнереченский, IV – Арсеньевский, V – Кабаргинский, VI – Меридиональный, VII – Самаркинский, VIII – Центральный, X – Западно-Приморский, XI – Партизанский, XII – Кривинский, XV – Среднеханкайский; 8 – наименование зон Ханкайского массива: М – Матвеевская, Н – Нахимовская, К – Кабаргинская, С – Спасская, В – Вознесенская, МА – Малиновская, СГ – Синегорская, МД – Муравьевско-Дунайская, 9 – пункты МТЗ.

Нахимовская зона занимает центральную часть массива, на юге перекрыта терригенно-карбонатными образованиями Спасской зоны, восточная граница, как и в Матвеевской зоне, условная. В структурном плане зона представлена двумя мигматит-гнейсовыми куполами — Шмаковским и Свягинским,

смятыми в складки субширотного и северо-западного, редко субмеридионального простирания и большей частью перекрытыми неогеновыми и четвертичными отложениями.

Спасская зона расположена южнее Нахимовской и сложена кембрийскими кремнисто-терри-

генно-карбонатными и силурийской молассоидной формациями. Складчатость простая линейная, с углами падения слоев 40–60° в центральных частях зоны до типичных брахиформных структур с углами падения слоев 20–30° в краевых частях. При общем северо-западном простирании структур на флангах оно меняется до широтного и близмеридионального.

Вознесенская зона располагается в юго-западной части Ханкайского массива, с запада граничит с Гродековским гранитным массивом, с востока перекрыта каменноугольными вулканитами, а с юга и севера – кайнозойскими отложениями. Сложена раннекембрийскими терригенно-карбонатными формациями. Степень дислоцированности пород значительно выше, чем в Спасской зоне – складки линейные, узкие и крутые (до 90°), часто опрокинутые, осложненные надвигами и взбросами. Простирание складок северо-западное на юге зоны и меридиональное на севере.

Ханкайский массив со всех сторон окружен зонами, сложенными формациями, характерными для активных окраин континентов. Они представляют собой краевые части массива, интенсивно переработанные и перекрытые терригенно-вулканогенными формациями, и интродуцированы гранитоидами палеозойских и мезозойских этапов тектоно-магматической активизации. Кристаллический докембрийский фундамент в этих зонах наблюдается фрагментарно, в виде отдельных небольших блоков. В пределах профиля выделяются Малиновская, Синегорская и Муравьевско-Дунайская зоны.

ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ

Гравитационное поле массива имеет в целом положительные значения. Форма аномалий гравитационного поля, соответствующих кристаллическому фундаменту, изометрическая или слабо вытянутая в субширотном и СЗ направлениях. Позднепалеозойские и мезозойские структуры характеризуются полосовыми аномалиями силы тяжести различной амплитуды СВ направления. Магнитное поле имеет мозаичный характер и варьирует в диапазоне ± 50 –100 нТл. Магнитные аномалии различной интенсивности и изрезанности, как положительных, так и отрицательных значений, часто образуют зоны СВ направления. Контакты разновозрастных структур характеризуются собственной морфологией гравитационного, а иногда и магнитного полей или отмечаются аномальными зонами линейного характера [16].

На основе интерпретации гравитационного поля было выявлено три уровня сосредоточения плоских тел, отвечающих границам глубинных слоев. Первый уровень (3.6–5.9 км), вероятно, отвечает поверхно-

сти древнего структурного этажа. Структурный план первого уровня совпадает с простиранием верхнепалеозойских складчатых дислокаций. На втором уровне (7.5–13.5 км) наблюдается поворот структурных элементов в широтном направлении в южной части массива до глубинного разлома Белый, протягивающегося в широтном направлении севернее г. Спасск-Дальний. Структура рельефа третьего уровня (18–28 км) ортогональная – широтная в южной части и меридиональная – в северной [26].

По результатам гравитационного моделирования по профилям ГСЗ и МОВЗ юга Дальнего Востока построена схема площадного распределения плотностных неоднородностей [3]. На Ханкайском массиве выделено четыре блока, которые разделены промежуточными блоками, представляющими из себя интенсивно раздробленные гранитоиды. В южной части массива, южнее Южно-Сихотэ-Алинского разлома и вдоль разлома Белый, выделены зоны «базификации» земной коры. Вдоль разлома Белый выделена зона разуплотнения в земной коре, уходящая на восток и соединяющаяся с подобной зоной вдоль Центрального Сихотэ-Алинского разлома.

Ханкайский массив пересечен двумя профилями ГСЗ, один в субмеридиональном направлении – Кировский–Зарубино, второй в субширотном – Спасск-Дальний–бух. Зеркальная [7]. Мощность земной коры изменяется от 34 км в центральной части массива до 30 км в южной части. Массив делится на два блока – северный и южный, граница между которыми проходит по разлому Белый, где происходит воздымание подошвы коры северного блока на 2 км. Северная часть массива характеризуется стабильным строением земной коры, в южной части мощность изменяется закономерно и постепенно. Границы разных типов строения земной коры не всегда совпадают с границами структурно-фациальных зон. Мощность «базальтового» слоя в северном блоке составляет 10–14 км, а в южном – 16–20 км. «Гранитно-метаморфический» слой выступает на дневную поверхность в пределах северного и части южного блоков. Глубинные разломы обычно находятся в зонах резкого изменения глубин до поверхности Мохоровичича. Система глубинных разломов делит земную кору на блоки наиболее низких порядков. Изопахиты земной коры Ханкайского массива имеют СЗ направление и совпадают с направлением ориентировки его геологических структур. В основании земной коры возможно существование слоя пониженной скорости мощностью 3–5 км. Плотностные модели, построенные по сейсмическим профилям, показали, что плотность верхней мантии под Ханкайским массивом меньше, чем под сопредельной с ней Сихотэ-Алинской складчатой системой.

По результатам МТЗ, выполненных в северной части массива, был выделен слой пониженного сопротивления на глубине 30–80 км, погружающийся с севера на юг под Ханкайский массив [11].

Согласно данным МТЗ [20], Ханкайский массив характеризуется анизотропным строением. На нем выделено несколько зон в низах земной коры и в подкоревой литосфере. В средней части земной коры выделяется анизотропно-проводящий комплекс [19]. Геоэлектрический разрез литосферы имеет высокие электрические сопротивления – 2000–10000 Ом·м в земной коре и 500–1000 Ом·м – в литосферной мантии. На глубине свыше 160 км залегает астеносфера с сопротивлениями 5–10 Ом·м.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Магнитотеллурические зондирования выполнены по профилю с. Пожарское – п. Шкотово со средним шагом 10 км (рис. 1). В южной и северной частях профиля шаг между пунктами наблюдения составил 5 км. В состав профиля вошли пункты ранее выполненных профилей [13–15]. Общее количество зондирований 47, длина профиля 390 км. Регистрация электромагнитного поля велась магнитотеллурической станцией MTU-5A в широком частотном диапазоне с использованием двух типов индукционных датчиков МТС-30 и МТС-50 производства фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада). Линии раскладывались по компасу в направлениях: север-юг – Ех, восток-запад – Еу. Длина электрических диполей равнялась 100 м. Время регистрации на пункте наблюдения в диапазоне от 1 Гц до 10 кГц составляло 35–40 минут, а в диапазоне $400 \div 0.0001$ Гц в основном – 18–19 часов. Обработка полевых данных осуществлялась с использованием программного пакета SSMT2000 фирмы Phoenix Geophysics Ltd (Канада). Окончательная обработка полевых материалов осуществлялась в камеральных условиях с использованием программы Corractor (ООО «Северо-Запад», г. Москва) для удаления выбросов отдельных значений и сглаживания импедансных кривых МТЗ. В результате были построены амплитудные кривые (рис. 2).

Форма кривых довольно разнообразна и меняется вдоль профиля. Отмечаются значительные расхождения широтной и меридиональной кривых, что свидетельствует о неоднородности геоэлектрического разреза. Это подтверждается анализом результатов магнитовариационного и магнитотеллурического тестов [2], которые показали, что верхнюю часть разреза, зондируемую на частотах свыше 1 Гц, можно интерпретировать как одномерную среду с наличием локальных двух- и трехмерных неоднородностей, а нижняя часть разреза представляет собой трехмер-

ную среду. Это же подтверждают значения азимутов ориентации больших осей (главных направлений) импедансных диаграмм под точками зондирования (Z-strike) [28] в зависимости от периода регистрации (рис. 3). На рисунке видно, что ориентация больших осей, рассчитанная от направления на географический север, значительно варьирует как вдоль профиля, так и с изменением частоты. Тем не менее, на рисунке можно выделить несколько участков с близкими направлениями ориентации больших осей. В северной части профиля выделяется Алчанский вулканический ареал, который на высоких частотах примерно до 100 Гц характеризуется северной ориентацией, в диапазоне от 100 до 1 Гц преобладает северо-восточная ориентация, а на более низких частотах – северо-западная.

Матвеевская и Муравьевско-Дунайская зоны Ханкайского массива характеризуются в основном преобладанием меридиональной ориентации больших осей импедансных диаграмм. Центральная часть массива, заключенная между двумя вышеупомянутыми зонами, имеет сложное распределение азимутов ориентации больших осей импедансных диаграмм. В верхней части разреза в основном преобладают направления от северного до восточного. В диапазоне частот 10–0.1 Гц в основном преобладают направления от севера до запада. Ниже 0.1 Гц наблюдается сложная картина чередования областей с направлениями от -90 до +90 градусов. Таким образом, поведение кривых и магнитотеллурических параметров неоднородности и асимметрии свидетельствует о сложном глубинном строении Ханкайского массива.

БЕРЕГОВОЙ ЭФФЕКТ

Профиль исследований проходил с СВ на ЮЗ примерно на расстоянии около 200 км от восточной береговой линии и своей южной частью закончился на побережье. Признаком проявления берегового эффекта является расхождение продольной и поперечной амплитудных кривых при приближении к береговой линии, которое может достигать нескольких порядков, и разворот реальных векторов типпера, в редакции Визе, в направлении от моря при приближении к береговой линии.

На юге Дальнего Востока береговой эффект впервые был обнаружен в 1964 г. при изучении вариаций переменного магнитного поля Земли [4, 5]. Также было сделано предположение, что отсутствие этих аномалий связано с особенностями глубинного геоэлектрического строения района исследований. Расстояние, на котором действовал береговой эффект, оценивалось в 250–300 км [17]. В последующем, про-

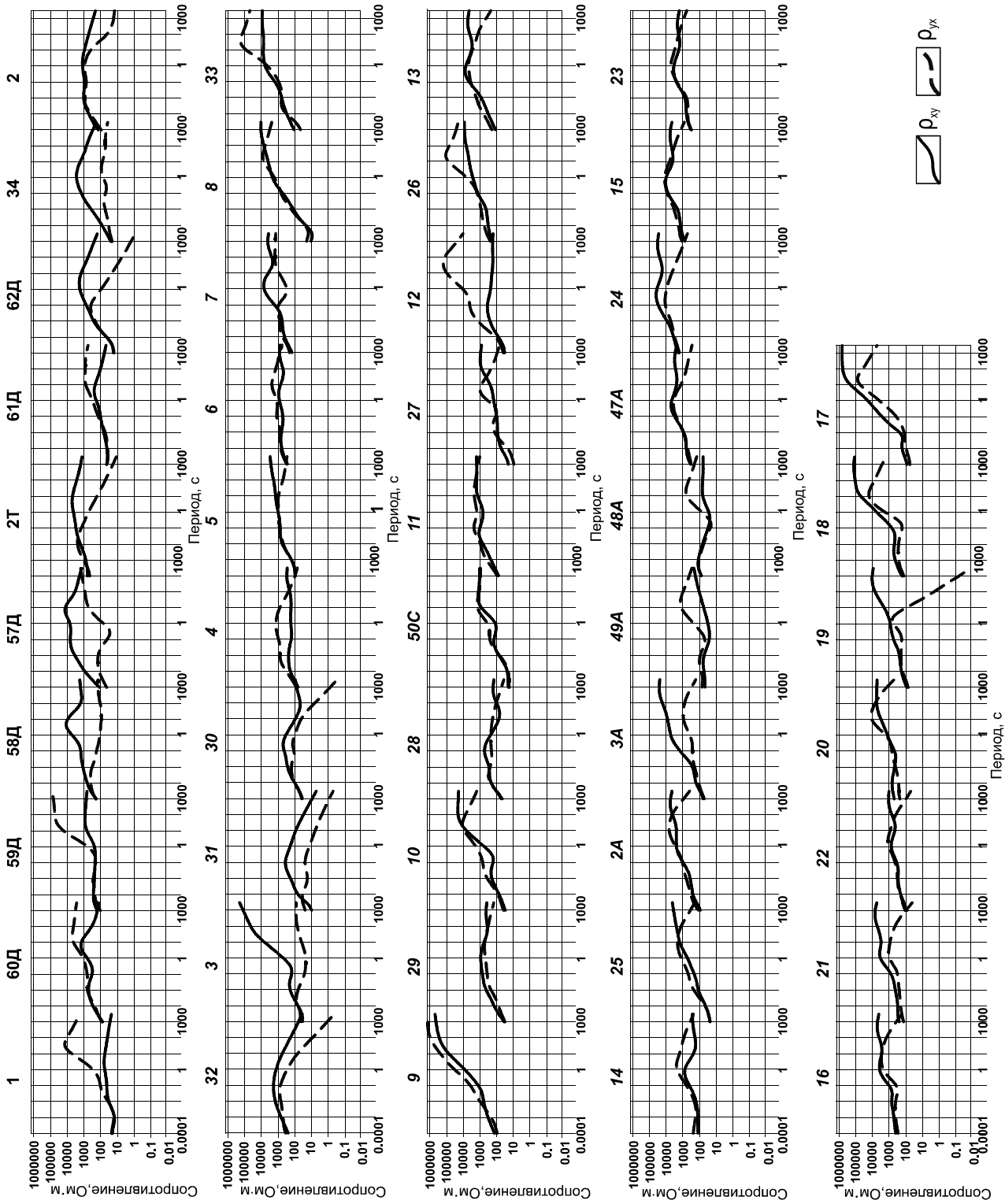


Рис. 2. Амплитудные кривые МТЗ профиля с. Пожарское – п. Шкотово.

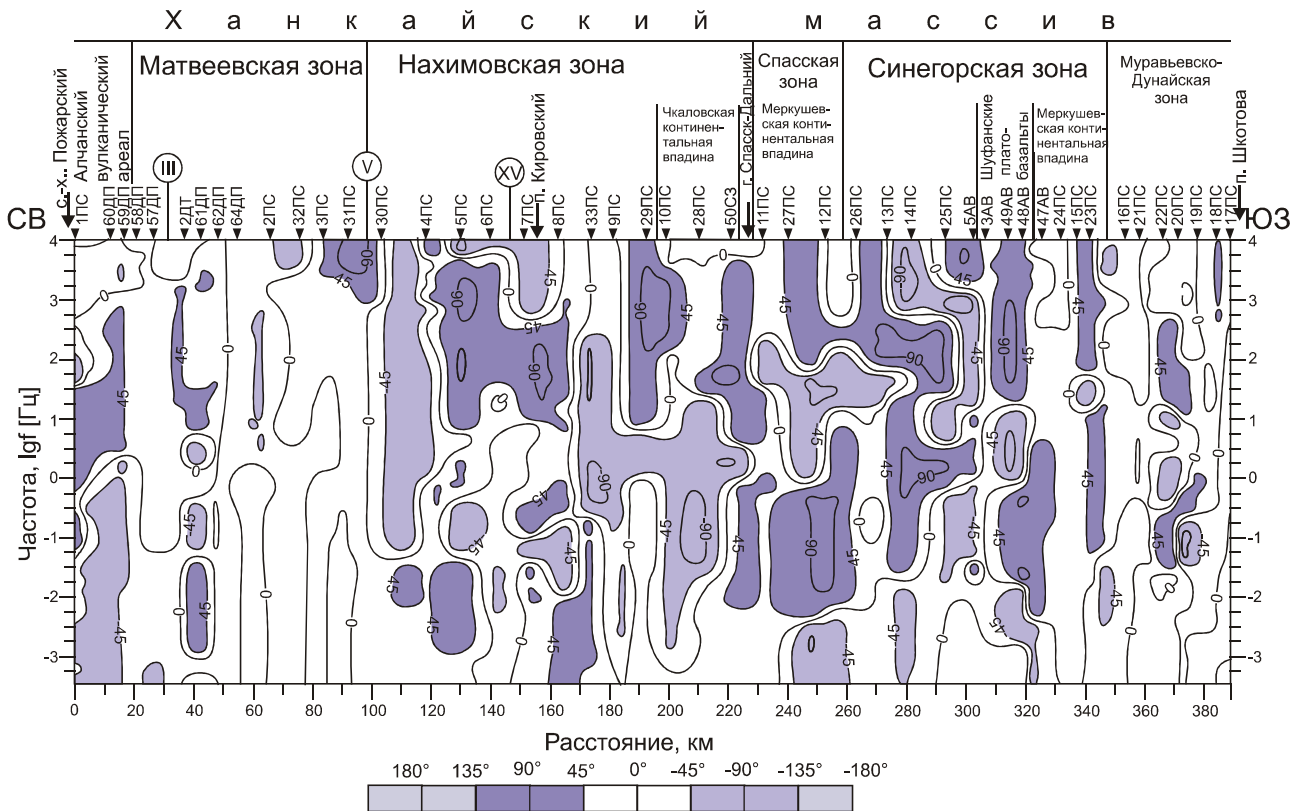


Рис. 3. Частотное распределение направления ориентации больших осей (главных направлений) импедансных диаграмм по профилю.

явление берегового эффекта было отражено в работах [18, 21, 22, 24,]. Экспериментальные данные, физическое и численное моделирование показали, что интенсивность берегового эффекта зависит от расстояния пункта наблюдения до берега моря, его глубины, формы береговой линии, периода электромагнитных вариаций, параметров геоэлектрического разреза.

При рассмотрении амплитудных кривых профиля настоящих исследований (рис. 2) подобного явления не наблюдается. Например на пунктах №18 и №17, отстоящих от берега на расстояние 10 и 5 км, соответственно, при приближении к морю наблюдается совместное увеличение уровня кажущегося сопротивления, а расхождение кривых на периодах свыше 10 с связано с неоднородным строением геоэлектрического разреза. Подобное явление в поведении амплитудных кривых наблюдалось и на других выполненных нами профилях, оканчивающихся на побережье [12–15]. Эффект слабого проявления берегового эффекта был выявлен в работе [1], который связывался с высокими электрическими сопротивлениями суши, не позволяющими проникать морским токам на континент.

Тем не менее, наличие моря, водная масса которого имеет электрическое сопротивление равное 0.3-0.4

Ом·м и является крупным объектом, предполагает его влияние на результаты измерений электромагнитного поля при магнитотеллурических зондированиях, вызванное взаимодействием токов, текущих в море и на суше. В связи с этим были построены индукционные стрелки вещественного вектора типпера, в согласении Визе, для различных периодов, которые указывают направление от проводника (рис. 4). Из рис. 4 видно, что на ближайших к побережью пунктах на коротких периодах 5 и 10 с наблюдается хаотичное поведение векторов, на периодах свыше 54 с направление векторов становится перпендикулярно континентальному склону. На рис. 5 показано распределение азимутов вещественного вектора типпера по профилю в зависимости от периода, из которого видно, что в основном наблюдается хаотичное поведение векторов. Тем не менее, на рис. 5 можно выделить две зоны в диапазоне свыше 10 с, в которых наблюдается устойчивое направление векторов. Первая зона протягивается от начала профиля до примерно п. Кировский, а вторая начинается примерно после Спасской зоны и протягивается почти до побережья. В первой зоне векторы располагаются в диапазоне от 135 до 225 градусов, а во второй – от 45 до 135 градусов. В центральной части профиля наблюда-

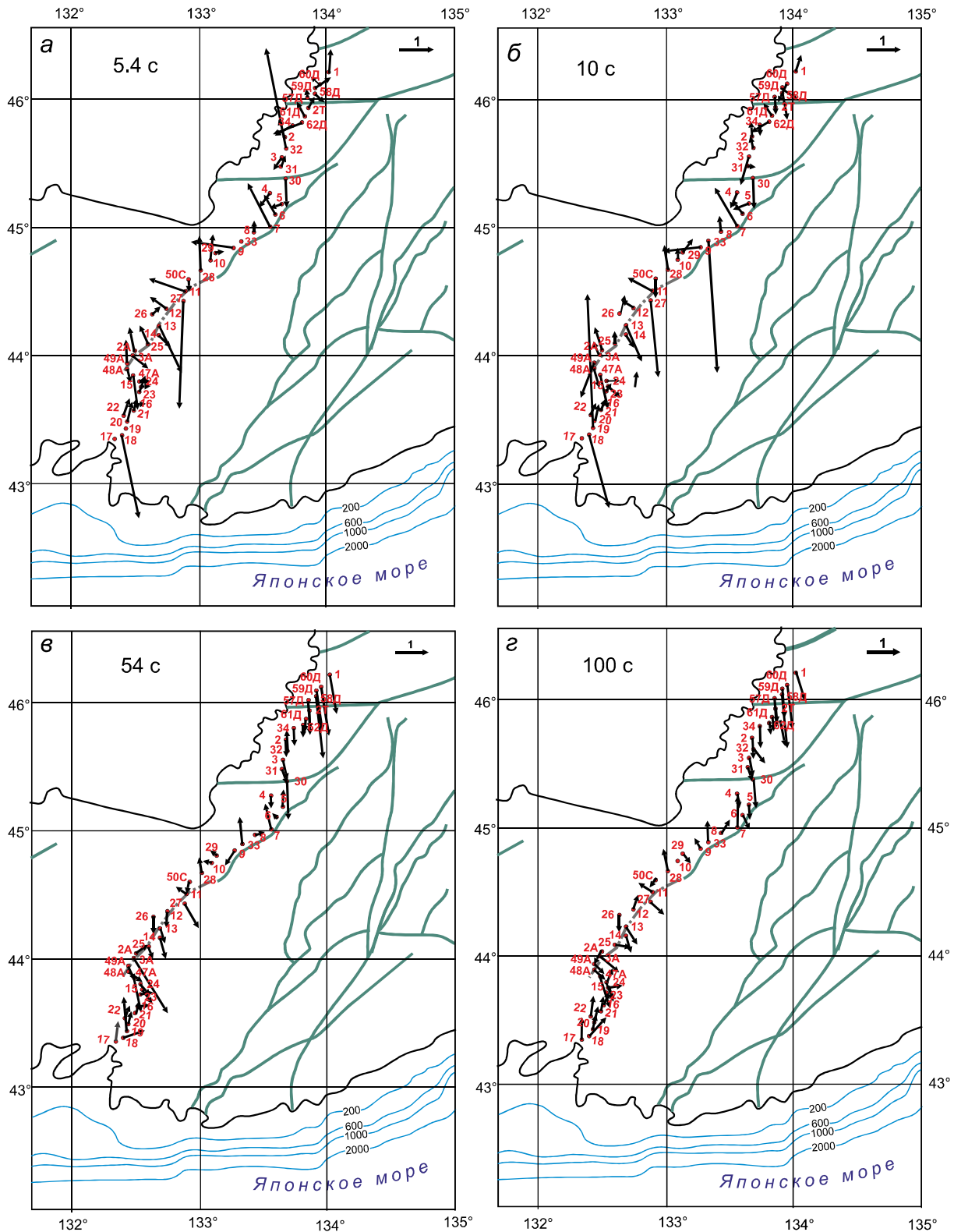


Рис. 4. Вещественные векторы Визе для различных периодов. Схема разломов взята из работы [10]. Штрихпунктирной линией показано предполагаемое положение разлома, выделенное по ориентации векторов Визе.

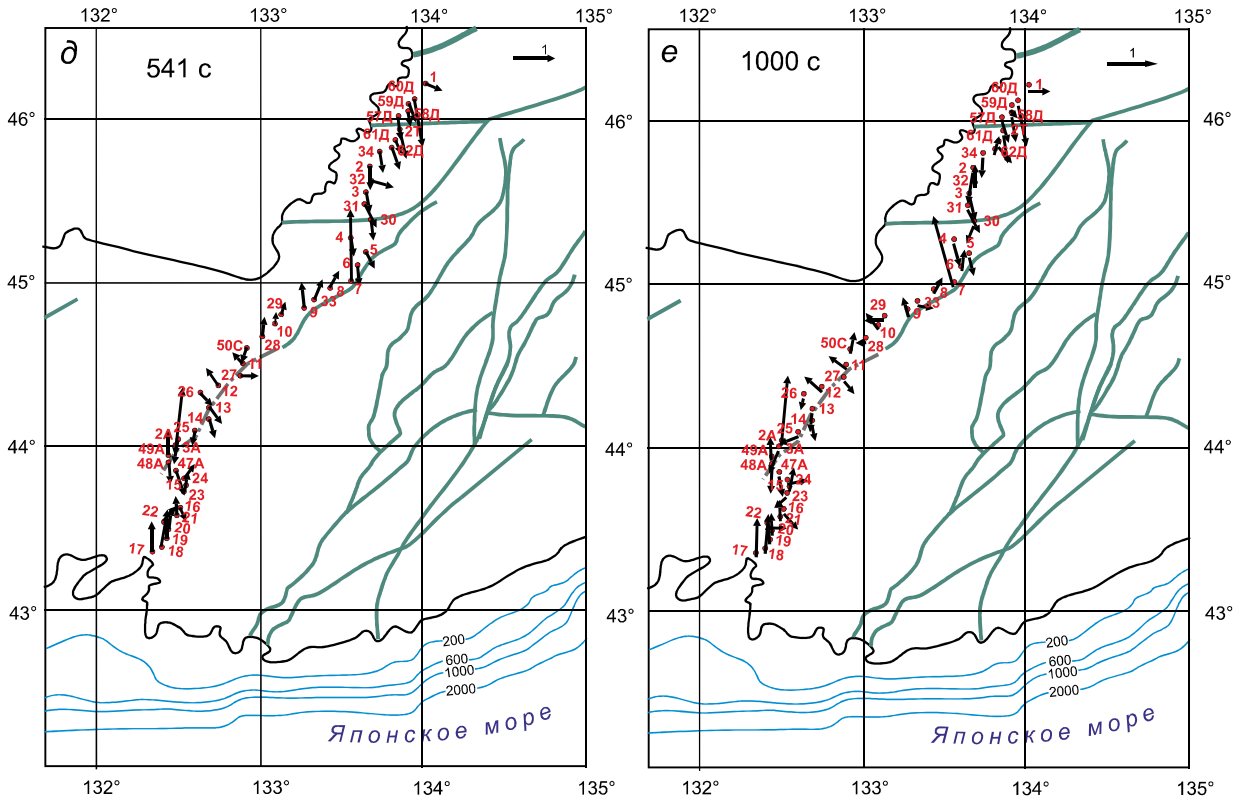


Рис. 4. (Продолжение). Вещественные векторы Визе для различных периодов. Схема разломов взята из работы [10].

ется хаотичное направление векторов. Таким образом, из анализа рис. 5 можно сделать вывод, что на поведение векторов оказывают влияние два проводника, первый из которых расположен севернее начала профиля, а второй – к востоку от его окончания.

Анализ величины вещественного вектора типпера по профилю в зависимости от периода (рис. 6.) показывает, что наибольшие его значения наблюдаются в ограниченном диапазоне периодов от 0.1 до 10 с в отдельных локальных зонах. В прибрежной зоне максимальная величина вектора отмечается лишь на расстоянии около 30 км, а затем его величина резко уменьшается до менее 0.2. Из рис. 6 видно, что на периодах свыше 100 с величина типпера в основном не превышает 0.2, что соответствует фоновому уровню [27].

Таким образом, можно сделать вывод, что береговой эффект слабо проявлен на амплитудных кривых магнитотеллурических зондирований и хорошо выражен в поведении индукционных стрелок вещественного вектора типпера в прибрежной 30-километровой зоне.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Для интерпретации данных магнитотеллурических зондирований был произведён расчёт трёх-

мерной инверсии в программе ModEM [29]. Для выполнения расчётов использовались вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН» [23]. В качестве базовой модели бралось полупространство сопротивлением 500 Ом·м. Для учёта влияния моря в базовую модель были включены блоки сопротивлением 0.3 Ом·м, мощностью согласно батиметрии, и максимально точно воспроизводилась линия берега. Сетка базовой модели включала 170 блоков по оси X (на север), 71 – по Y (направленной на восток), 27 – по Z (направлена вниз). Шаг горизонтальной сетки в основной зоне модели составляет 2.5 км, вертикальной – постепенно увеличивается, начиная с 50 м. Всего для расчёта использовались данные со 119 точек с учетом данных пунктов ранее выполненных профилей [13–15] в диапазоне периодов от 0.0001 с до 1000 с. Общее количество периодов, взятое в расчеты, – 50. Уровень ошибки был взят 5 % $|Z_{xy}Z_{yx}|^{1/2}$ для основного импеданса, 50 % для дополнительного и 5 % для типпера.

Расчёт производился в два этапа. На первом этапе инверсия выполнялась по данным типпера. В результате была получена модель со среднеквадратической ошибкой $rms = 3.19$. На втором – она была использована в качестве базовой для расчета по данным импеданса. Итогом стала модель с $rms = 3.18$ (рис. 7).

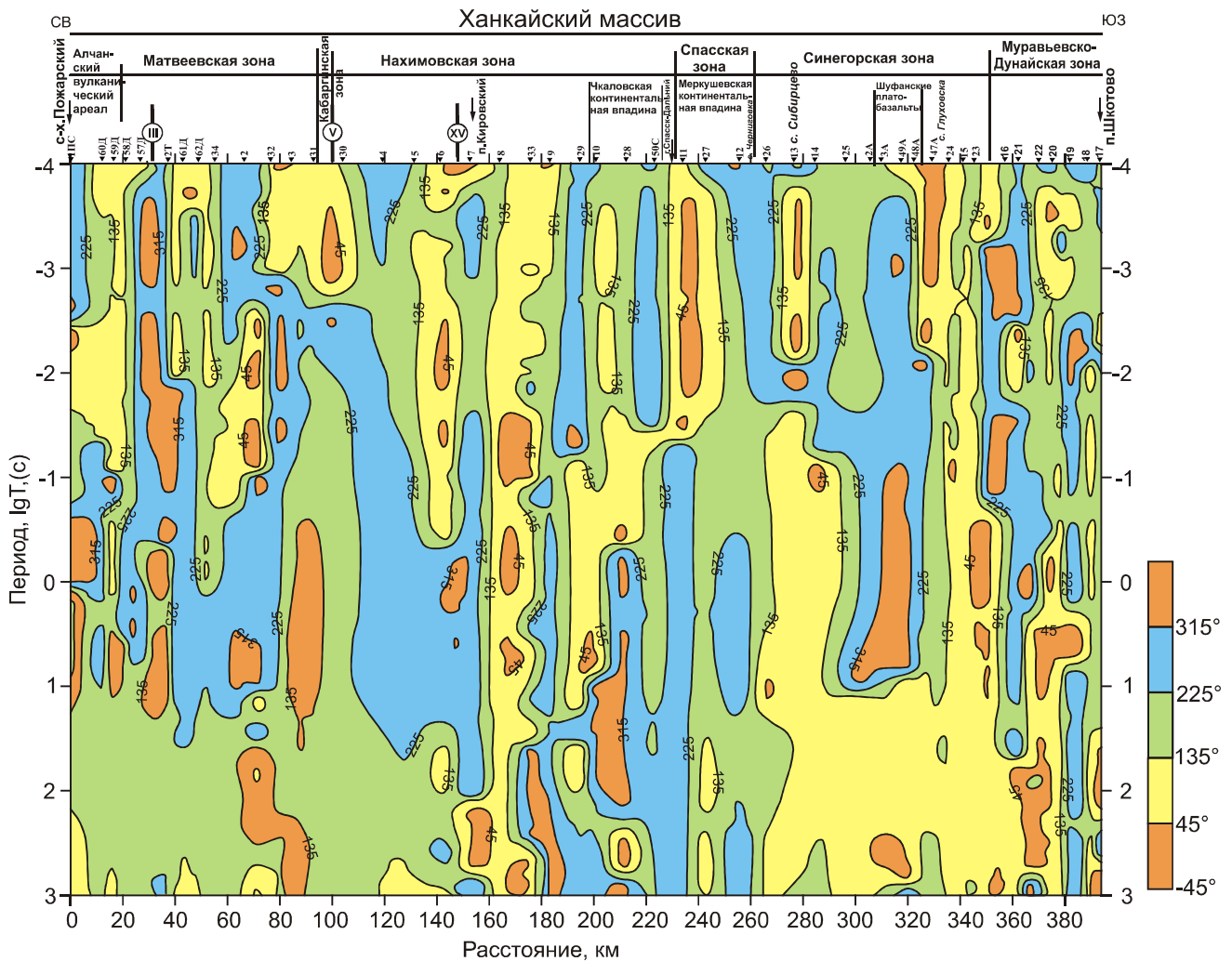


Рис. 5. Азимуты вещественного вектора типпера по профилю в зависимости от периода регистрации электромагнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Характерной особенностью геоэлектрического разреза профиля с. Пожарское – п. Шкотово (рис. 7) является разделение его на две части по уровню ЭС – северную и южную, граница между которыми проходит примерно по северной границе Спасской зоны.

Северная часть разреза характеризуется более низкими значениями ЭС верхней мантии, величина которых не превышает 400–450 Ом·м, а в южной части составляет в основном 500–750 Ом·м. Это согласуется с величинами ЭС подкоровой литосферы южной части Ханкайского массива, равными 500–1000 Ом·м на глубинах до 160 км [19], и с нашими результатами, полученными при изучении южной части Сихотэ-Алинской складчатой системы и сопредельного с ней Ханкайского массива [13–15]. Северная часть разреза включает в себя Матвеевскую

и Нахимовскую зоны Ханкайского массива. Матвеевская зона на севере представлена блоком высокого ЭС 1000–10000 Ом·м мощностью около 40 км, а на юге его мощность уменьшается до 10–15 км, имеет неоднородное строение и подстилается блоком пониженного ЭС 200–300 Ом·м, погружающемся в верхнюю мантию до глубины 60 км. Вблизи её границы с Кабаргинской зоной в земной коре выделяется субвертикальный блок низкого ЭС менее 100 Ом·м, названный нами *Матвеевской зоной низкого ЭС*. На геоэлектрическом разрезе не выделяются глубинные корни Алчанского вулканического ареала, что свидетельствует об его наложении на Матвеевскую зону Ханкайского массива и согласуется с геологическими данными о том, что его северная граница проходит по Алчанскому разлому [9]. Кабаргинская зона выделяется на геоэлектрическом разрезе блоком высокого ЭС, уходящем своими корнями в верхнюю мантию.

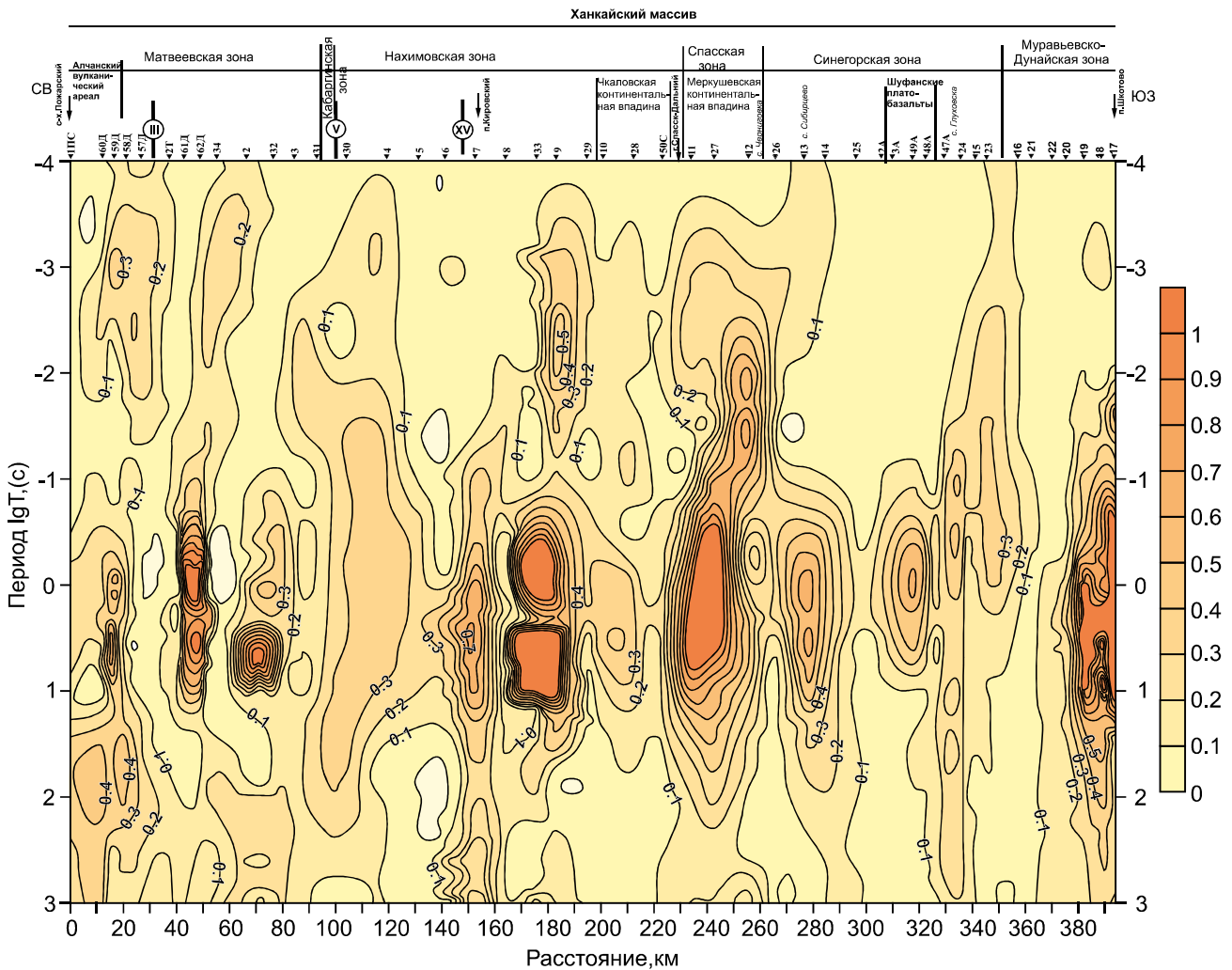


Рис. 6. Величина вещественного вектора типпера по профилю в зависимости от периода регистрации электромагнитного поля.

Нахимовская зона характеризуется блоком высокого ЭС 1000–10 000 Ом·м и более, мощностью от 30 до 40 км. К югу, под Чкаловской впадиной и до границы со Спасской зоной, его мощность сокращается до 15–20 км. Под Чкаловской впадиной расположена зона низкого ЭС менее 100 Ом·м, названная нами *Чкаловской*, которая погружается в верхнюю мантию в северном направлении до глубины 85 км с понижением ЭС до 200–300 Ом·м. Южная часть этой проводящей зоны выделялась нами при проведении исследований по профилю г. Спасск-Дальний – бух. Зеркальная [13], была названа *Спасской* и имела восточное падение до глубины около 50 км. Это несоответствие связано с тем, что при предыдущих исследованиях мы выявили лишь восточный край *Чкаловской* аномалии, который имеет незначительное падение в восточном направлении. Настоящие исследования позволили уточнить размеры и форму аномалии низкого ЭС в пределах

Нахимовской зоны Ханкайского массива. Большая часть верхней мантии северной части разреза характеризуется средними значениями сопротивления 400–450 Ом·м.

Южная часть геоэлектрического разреза имеет ширину около 150 км и представлена в земной коре тремя блоками высокого ЭС свыше 1000 Ом·м, разделенными субвертикальными зонами низкого ЭС менее 100 Ом·м. Первый блок включает в себя Спасскую зону и северную часть Синегорской зоны. Мощность его составляет около 50 км. Второй блок сопротивлением свыше 10 000 Ом·м занимает южную часть Синегорской зоны, перекрытую Шуфанскими платобазальтами. Его подошва опускается до глубины 70 км и сопротивление составляет свыше 10 000 Ом·м. С севера и с юга он ограничен субвертикальными зонами низкого ЭС, названными нами *Ивановской* и *Синегорской*, соответственно. Третий блок соответствует

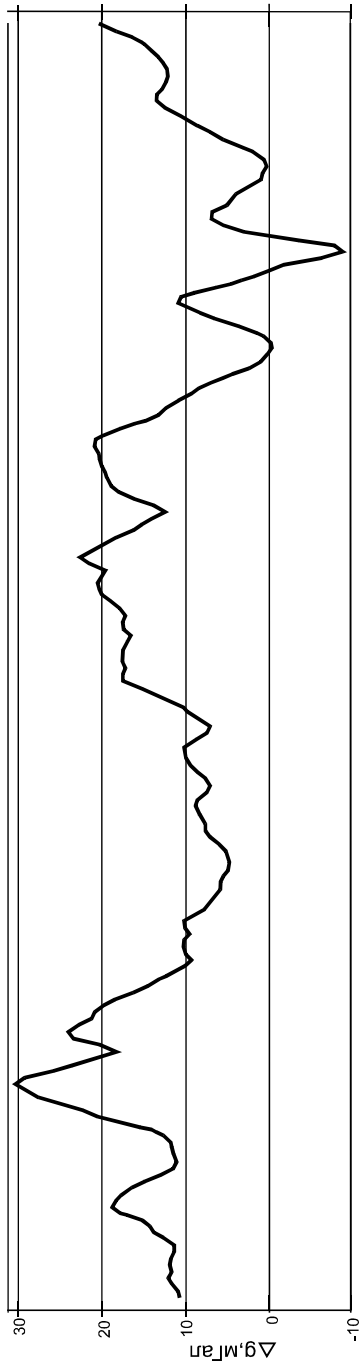
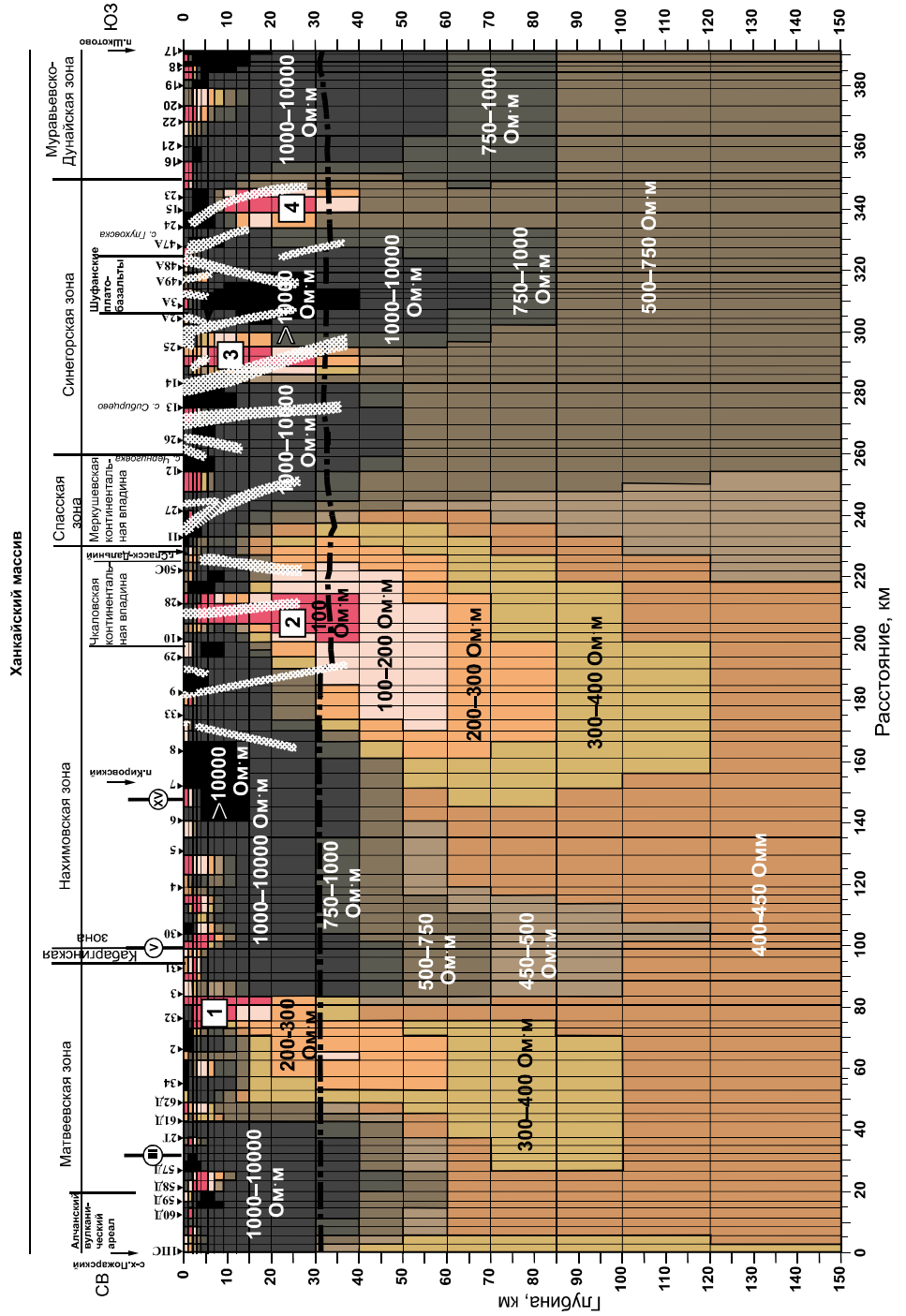


Рис. 7. Геоэлектрический разрез по профилю с. Пожарское – п. Шкотово по данным магнитотеллурических зондирований. 1 – пункты МТЗ и их номера; 2 – основные разломы: П – Дальнереченский, V – Кабаргинский, XV – Среднеханкайский; 3 – подолша земной коры по данным ГСЗ [7]; 4 – разломные зоны по данным ГСЗ [7]; 5 – зоны аномально низкого электрического сопротивления: 1 – Матвеевская, 2 – Чкаловская, 3 – Ивановская, 4 – Синегорская.

Над разрезом показан график гравитационного поля в редукции Буге.



Муравьевско-Дунайской зоне Ханкайского массива, имеет сопротивления от 1000 до 10000 Ом·м и мощность до 60 км. Верхняя мантия южной части разреза имеет повышенные значения ЭС 500–750 Ом·м.

Сопоставляя блоковое строение геоэлектрического разреза с графиком гравитационного поля Δg (рис. 7), построенного по данным цифровой модели континентальной части Дальнего Востока (силы тяжести в редукции Бугэ), подготовленные сотрудниками ВСЕГЕИ по заказу ИТиГ ДВО РАН, можно отметить, что общий уровень поля северной части выше по сравнению с уровнем поля южной. Из графика видно, что для северной части разреза блоком высокого ЭС соответствует понижение уровня гравитационного поля, а для зон низкого ЭС – повышение уровня. Северная граница южной части разреза выделяется локальным минимумом, а сама она характеризуется воронкообразной аномалией с локальными минимумами и максимумами. Два локальных максимума соответствуют границам второго блока высокого ЭС с наложенными на него Шуфанскими платобазальтами, два локальных минимума совпадают с зонами низких ЭС – *Ивановской* и *Синегорской*. Третий локальный минимум, расположенный на восходящей ветви графика в южной части разреза, соответствует зоне низких ЭС в верхней части земной коры третьего блока. Таким образом, северная часть имеет более низкие значения ЭС верхней мантии и характеризуется повышенным уровнем гравитационного поля по сравнению с южной частью. Это может свидетельствовать или о различном составе верхней мантии северной и южной частей разреза или о различных Р-Т-условиях.

Сопоставление геоэлектрического разреза с результатами ГСЗ показывает, что мощность блоков высокого ЭС превышает мощность земной коры, однако, как и по данным ГСЗ, на геоэлектрическом разрезе отмечается увеличение мощности блоков в южной части разреза по сравнению с северной, хотя мощность земной коры, по данным ГСЗ, уменьшается к побережью до 30 км, а по данным МТЗ мощность верхних блоков высокого ЭС увеличивается до 60–70 км. По данным ГСЗ, скачок увеличения мощности земной коры происходит после разлома Белый, который примерно расположен в районе пункта МТЗ № 9. Разлом не отражается на геоэлектрическом разрезе, как и большинство основных разломов, которые расположены в пределах блоков высокого ЭС и лишь отмечаются низкими ЭС в самой верхней части земной коры. Однако некоторые второстепенные разломы совпадают с зонами низкого ЭС – *Чкаловской*, *Ивановской* и *Синегорской*. Таким образом, хотя нет

прямого соответствия между результатами ГСЗ и МТЗ, но наблюдается их косвенное совпадение, что свидетельствует об изменении физических параметров на выделенных границах.

Из результатов сопоставления геоэлектрического разреза с гравитационными и сейсмическими данными можно сделать вывод, что Ханкайский массив состоит из двух частей – северной и южной, которые отличаются друг от друга по своим физическим характеристикам, что может быть связано как с различным составом, так и с различными Р-Т-условиями пород верхней мантии.

Анализ поведения векторов Визе (рис. 4) показывает, что помимо воздействия моря на их ориентацию и величину оказывают влияние поверхностные и глубинные проводящие зоны. Так, например, в северной части профиля, начиная с периода 54 с, отмечается устойчивый разворот стрелок в южном направлении. Это свидетельствует о наличии в верхней мантии объекта с низким ЭС, расположенного севернее пунктов наблюдения. Возможно это проявление влияния проводящего слоя на глубине 30–80 км, выделенного в работе [11].

Анализ азимутов вещественного вектора типпера по профилю в зависимости от периода регистрации электромагнитного поля (рис. 5) показал, что на их поведение, помимо проводника, расположенного севернее профиля исследований, влияет еще и проводник, расположенный западнее. Косвенным подтверждением этого могут служить результаты МТЗ на сопредельной территории Китая [30], показывающие наличие высокопроводящего слоя на глубинах 80–90 км. Возможно это единый проводник, который расположен на территории Китая и протягивается в северо-восточном направлении под углом к профилю исследований.

Анализ величины и азимута направления вещественного вектора типпера (рис. 5 и 6) показывает, что влияние берегового эффекта имеет распространение лишь в прибрежной 30-километровой зоне, что может быть связано с влиянием других объектов аномальной проводимости или высокими электрическими сопротивлениями суши, не позволяющими проникать морским токам на континент [1].

Также отмечается противоположное направление стрелок по разные стороны основных разломов, особенно на коротких периодах. В южной части профиля, южнее окончания Среднеханкайского разлома, выделено подобное поведение векторов, что свидетельствует об его продолжении в юго-западном направлении. Это согласуется со схемами разломов, приведенных в работах [6, 25], и соответствует на

них Западно-Сихотэ-Алинскому разлому. Возможно, что подобное поведение векторов связано с наличием здесь в верхней части земной коры проводящей структуры северо-восточного простирания, выделенной С.С. Старжинским по результатам магнитовариационных исследований [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате магнитотеллурических зондирований Ханкайского массива в субмеридиональном направлении были получены следующие результаты.

1. Земная кора, выделяемая по данным ГСЗ, имеет в основном электрическое сопротивление, равное от 1000 до 10000 Ом·м. Иногда выделяются блоки с ЭС свыше 10000 Ом·м. Блоки разделены субвертикальными зонами с ЭС менее 100 Ом·м. Корни блоков высокого ЭС отмечаются в верхней мантии до глубины 60–70 км в южной части разреза.

2. Верхняя мантия массива делится на две части – северную и южную, примерно по границе между Нахимовской и Спасской зонами. Электрическое сопротивление верхней мантии северной части составляет около 400–450 Ом·м, а южной – 500–750 Ом·м.

3. В земной коре выделены четыре зоны аномально низкого ЭС, две из которых – *Матвеевская* и *Чкаловская* – расположены в северной части разреза и уходят своими корнями в верхнюю мантию, а две другие – *Ивановская* и *Синегорская* – расположены в южной части и прослеживаются лишь в пределах земной коры.

4. Основные разломы – Дальнереченский, Кабаргинский, Среднеханкайский – на разрезе выделяются субвертикальными зонами низкого ЭС лишь в пределах верхней части земной коры.

5. Выявлено резкое уменьшение влияния «берегового эффекта» на расстоянии свыше 30–40 км от берега моря.

6. Сопоставление геоэлектрического разреза с гравитационными и сейсмическими данными свидетельствует о том, что различие электрических характеристик северной и южной частей Ханкайского массива может быть связано или с различным составом, или различными Р-Т-условиями пород верхней мантии.

7. Выявлено продолжение Среднеханкайского разлома в юго-западном направлении.

8. По результатам анализа величины и азимута направления вещественного вектора типпера выявлено влияние глубинных объектов аномально высокой проводимости, расположенных на севере и западе за пределами профиля.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН ИТиГ ДВО РАН №075-00378-21-00.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердичевский М.Н., Жданова О.Н., Жданов М.С. Глубинная геоэлектрика в океане. М.: Наука, 1989. 80 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
3. Брянский Л.И. Стандартные гравитационные модели земной коры (на примере юга Дальнего Востока СССР). Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. 144 с.
4. Ваньян Л.Л., Мардерфельд Б.Е. Некоторые закономерности геомагнитных бухт на Сахалине // Геомагнетизм и аэронавигация. 1966. Т. 6, № 1. С. 165–166.
5. Ваньян Л.Л., Мардерфельд Б.Е. О влиянии местных геоэлектрических условий на внезапные начала магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. 1966. Т. 6, № 1. С. 163–165.
6. Геологическая карта Приамурья и сопредельных территорий. 1:2 500 000: Объясн. зап. Санкт-Петербург–Благовещенск–Харбин, 1999. 135 с.
7. Глубинное строение Приморья (по данным ГСЗ). М.: Наука, 1976. 92 с.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение) L-(52),53; (K-52),53 (оз. Ханка). СПб.: ВСЕГЕИ, 2011.
9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Лист (L-52), 53; (K-52), 53) оз. Ханка: Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 684 с. + 8 вкл.
10. Забродин В.Ю., Рыбас О.В., Гильманова Г.З. Разломная тектоника материковой части Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2015. 132 с.
11. Каплун В.Б. Результаты магнитотеллурических зондирований западной части Сихотэ-Алинской складчатой системы // Тихоокеан. геология. 1994. № 5. С. 141–152.
12. Каплун В.Б., Бронников А.К. Геоэлектрический разрез земной коры и верхней мантии Северного Сихотэ-Алия по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 4. С. 18–37.
13. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алия по профилю г. Спасск-Дальний – бух.Зеркальная по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2018. Т. 37, № 5. С. 31–47.
14. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алия по профилю г. Дальнереченск – с. Рошино – п. Пластун по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 5. С. 3–13.
15. Каплун В.Б., Бронников А.К. Строение земной коры и верхней мантии Южного Сихотэ-Алия по данным магнитотеллурических зондирований по профилю с. Абражеевка – п. Валентин // Тихоокеан. геология. 2020. Т. 39, № 4. С. 3–15.
16. Кулинич Р.Г., Толмачева Л.С., Жуковская А.В. Элементы тектоники Ханкайского массива и его обрамления по геофизическим данным // Геология и геофизика. 1967. № 1. С. 44–51.
17. Мардерфельд Б.Е. Береговой эффект в геомагнитных вариациях. М.: Наука, 1977. 80 с.
18. Никифоров В.М., Пальшин Н.А., Старжинский С.С., Куз-

- нецов В.А. Численное моделирование трехмерного берегового эффекта в Приморье // Физика Земли. 2004. № 8. С. 56–69.
19. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Старжинский С.С. Глубинная геоэлектрическая структура и сейсмичность Приморья (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25, № 4. С. 18–25.
20. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Шкабарня Г.Н. Геоэлектрическая структура тектоносферы на юге Дальнего Востока: связь с тектоникой, металлогенией, нефтегазоносностью // Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии: VII Косыгинские чтения: Материалы Всерос. конф., 12–15 сентября 2011, г. Хабаровск / Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Манилов. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2011. С. 289–293.
21. Никифорова Н.Н., Ахмадулин В.А., Порай-Кошиц А.М., Светов Б.С., Спивак В.А., Хализов А.А., Харин Е.П. Глубинные магнитотеллурические исследования в Хабаровском крае // Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 42–49.
22. Порай-Кошиц А.М., Ноздрин А.А., Хализов А.Л., Шимелевич М.И. Об интерпретации данных магнитовариационного профилирования в Приморском крае // Глубинные электромагнитные зондирования Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 124–126.
23. Сорокин А.А., Макогонов С.В., Королев С.П. Информационная инфраструктура для коллективной работы ученых Дальнего Востока России // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2017. № 12. С. 14–16.
24. Старжинский С.С. Результаты магнитовариационных исследований в Приморье // Физика Земли. 2004. № 7. С. 1–9.
25. Тектоника, глубинное строение и минерагения Приамурья и сопредельных территорий / Отв. ред. Г.А. Шатков, А.С. Вольский. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. 190 с.
26. Тектоническая природа геофизических полей Дальнего Востока. М.: Наука, 1984. 200 с.
27. Dosso H.W., Meng Z.W. The coast effect response in geomagnetic field measurements // Phys. Earth Planet. Inter. 70. P. 39–56.
28. Eggers D.E. An eigenstate formulation of the magnetotelluric impedance tensor // Geophysics. 1982. V. 47. P. 1204–1214.
29. Kelbert A., Meqbel N., Egbert G., Tandon K. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosci. 2014. V. 66. P. 40–53.
30. Zhong Q., Fang H., Yang P.-Y., Li L., Yuan Y.-Z., Pei F.-G. The relationship between high conductive layer in upper mantle and endogenous metallic ore and petroleum reservoir // Chinese J. Geophys. 201. V. 58, N 4. P. 404–421.

Рекомендована к печати Р.Г. Кулиничем
после доработки 22.06.2021 г.
принята к печати 21.07.2021 г.

V. B. Kaplun, A. K. Bronnikov

Geoelectric section of the lithosphere of the Khanka Massif along the Pozharskoye Village–Shkotovo Settlement profile from MT soundings.

The geoelectric section of the lithosphere is constructed down to a depth of 150 km based on the results of MT soundings carried out along the profile crossing the Khanka Massif from north to south. The crust and upper mantle structure of the massif is investigated. It has been found that the Khanka Massif is divided into the northern and southern parts bordered by the northern restriction of the Spassk Zone. A higher resistivity observed in the upper part of the section and the upper mantle is typical of the southern part of the massif. The northern part is characterized by two extended low-resistivity areas located beneath the southern boundaries of the Matveevka and Nakhimovka zones that penetrate from the upper mantle up to the surface. A comparison of the results obtained with the seismic prospecting and gravimetric data has shown their direct or indirect consistency.

Keywords: magnetotelluric soundings, deep structure, crust, upper mantle, deep faults, Khanka Massif, Far East of Russia.