

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ТЕКТОНОСФЕРЫ В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ ЯПОНОМОРСКОЙ ВПАДИНЫ С МАТЕРИКОВЫМ ОБРАМЛЕНИЕМ

В.М. Никифоров, И.В. Дмитриев

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Поступила в редакцию 11 января 2007 г.

Приводятся новые данные о глубинном геоэлектрическом строении тектоносферы в зоне сочленения Япономорских и материковых структур. Для численного моделирования геоэлектрического разреза использованы уникальные данные по мониторингу вариаций естественного электрического поля с использованием подводного трансяпономорского кабеля связи JASC и отрезков континентальных кабелей связи Приморья. Мониторинг проводится синхронно с регистрацией вариаций геомагнитного поля на обсерваториях VLA, КНВ, ММВ и стационарном пункте наблюдения РРІ. Кроме того, использованы данные точечных магнитотеллурических зондирований в 80-ти пунктах на территории Ханкайского массива и Сихотэ-Алинской складчатой области.

Ключевые слова: геоэлектрический разрез, подводный кабель связи JASC, континентальный кабель связи, магнитотеллурическое зондирование, тектоносфера, астеносфера, электропроводность, глубинные разломы, Японское море.

ВВЕДЕНИЕ

Продолжающийся уже более десяти лет эксперимент по регистрации разностей потенциалов на концах подводного коаксиального кабеля (Japan Sea Cable – JASC), пересекающего Японское море в направлении Находка-Наоэцу, привел к появлению уникального по продолжительности и качеству непрерывного ряда данных теллурического поля в окраинном море. Предварительные результаты обработки и анализа позволили высоко оценить эти данные для изучения геоэлектрического строения тектоносферы. Обоснована методика определения интегрального сопротивления литосферы Японского моря [3]. Установлена роль глубинных разломов при изучении литосферы с помощью подводного кабеля [5], оценено возможное искажающее влияние водных масс [10]. Исследования показали, что математическое геоэлектрическое моделирование тектоносферы Японского моря возможно только как части более обширного региона, включающего континентальное обрамление и океан, то есть с учетом источников нарушения однородности геомагнитного и теллурического полей. Поэтому начиная с 2002 г. сеть наблюдений расширена за счет вовлечения в эксперимент участков континентальных кабелей связи,

точечных пунктов с прокладкой ортогональных измерительных диполей длиной до 2 км и мониторинга вариаций геомагнитного поля на обсерваториях “Владивосток” (код по международной классификации VLA) и “Хабаровск” (КНВ). Схема системы наблюдения вариаций геомагнитного и теллурических полей для построения геоэлектрического разреза по профилю I–Г показана на рис. 1.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Теллурическое поле регистрировалось с помощью электрических линий различной длины в том числе и с применением телекоммуникационных кабелей связи. Коаксиальный телефонный кабель, пересекающий Японское море, после введения в действие оптоволоконной связи, с 1996 г. используется в научных целях. У российского и японского берегов установлены титановые заземления в точках с координатами 42°48' с.ш. и 132°49' в.д. (бухта Отрада вблизи г. Находки) и 37°40' с.ш. и 137°59' в.д. (в 150 км от г. Наоэцу). С помощью длинного коаксиального кабеля и короткого четырехжильного кабеля дальние и ближние заземления подключены к измерительной аппаратуре, установленной на береговой станции РОСТЕЛЕКОМ в г. Находке (в 5 км от береговой линии). В эксперименте, продол-

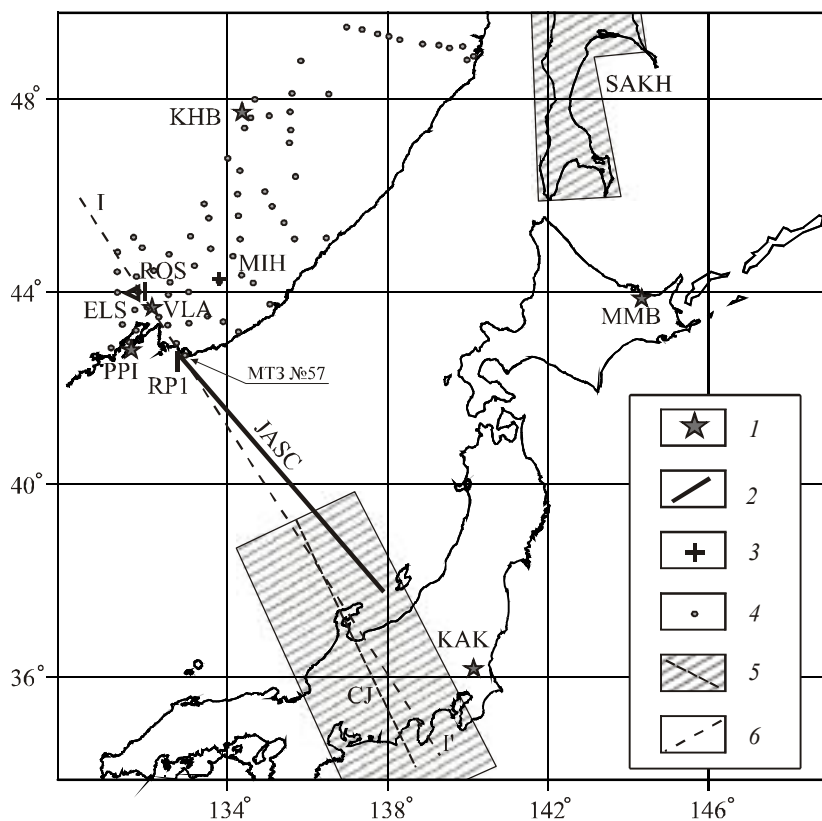


Рис. 1. Схема расположения пунктов регистрации вариаций магнитного и теллурического полей.

I – магнитные обсерватории: КНВ – Хабаровск; VLA – Владивосток; ММВ – Мемамбецу; КАК – Какиока; РР1 – магнитовариационный пункт ТОИ ДВО РАН на о. Попова; 2 – кабели связи: JASC – подводный кабель Находка-Наоэцу; RP1 – часть подводного кабеля до заземления первого репитера; ELS – континентальные кабели связи ООО “Электросвязь”; ROS – континентальный кабель связи РОСТЕЛЕКОМ; 3 – долговременный пункт наблюдения теллурического поля “Михайловка”; 4 – точечные пункты МТЗ 2002–2006 гг.; 5 – участки работ предыдущих лет: SAKH – на Сахалине; CJ – в Японии; 6 – линия геоэлектрического разреза I-I’.

жающемся более десяти лет, принимают участие Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток), Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва), Институт изучения землетрясений Токийского университета (г. Токио).

Первоначально использовалось регистрирующее устройство японского производства, представляющее собой одноканальный цифровой вольтметр типа 7561 Yokogata, модель 75102 с диапазоном измерений 0.0001–100 В. После 2002 г. параллельно включено четырехканальное измерительное устройство E-24, работающее в диапазоне ± 2.5 В с уровнем квантования 10^{-6} В. Это позволило дополнительно регистрировать разность потенциалов между ближним электродом (бух. Отрада) и заземлением первого репитера (RP1), удаленного от береговой станции на расстояние 26 км и в результате провести зондирование RP1 на шельфе Японского моря (рис. 1). Кроме того, один из измерительных каналов подключался с помощью двух жил короткого кабеля к штыревым электродам ближнего заземления, разнесенным между собой на расстояние 15 см. Такая измерительная установка позволила оценить шумовые характеристики участка кабеля от береговой линии до береговой станции РОСТЕЛЕКОМ, где установлена регистрирующая аппаратура. Разности потенциалов во

всех измерительных диполях измерялись с частотой один раз в секунду. Синхронизация измерений осуществлялась по кварцевым часам или GPS-clock.

В период с 2002 по 2004 гг. измерение и регистрация теллурического поля проводились в действующих кабелях связи ООО “ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ” вблизи г. Усурийска [12]. Заземления, в качестве которых использовались свинцовые электроды размером 20 см \times 20 см \times 0.5 см, располагались в пунктах с координатами 43°51.214' с.ш. и 131°57.028' в.д. (пос. Тимирязевское), 43°45.207' с.ш. и 131°56.908' в.д. (с. Утесное), 43°49.925' с.ш. и 131°53.377' в.д. (с. Доброполье) (рис. 1). Измерительная аппаратура, представленная аналогово-цифровым преобразователем E-24 и компьютером, располагалась в аппаратурном зале ООО “ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ” (г. Усурийск).

С 2004 г. по настоящее время теллурическое поле изучается с помощью работающего магистрального кабеля связи “Хабаровск–Находка” РОСТЕЛЕКОМ. Для исследований выделен участок с координатами 43°57.333' с.ш. и 132°01.165' в.д. и 43°43.165' с.ш. 132°00.135' в.д. Измерительная аппаратура, представленная аналогово-цифровым преобразователем E-24 и компьютером, расположена в аппаратурном зале РОСТЕЛЕКОМ в г. Усурийске. К измерительной установке подключены концы кабелей, соединяющие заземления, в качестве которых используются стандарт-

ные для всех НУП системы заглубленных железных штанг длиной 3 м, эксплуатирующихся уже более 40 лет.

В 2006 г. начаты долговременные наблюдения теллурического поля в пункте МН с координатами 44° 17.460' с.ш. и 133° 50.558' в.д. Здесь аналогичная измерительная аппаратура подключена к измерительным диполям длиной 1.5 км, проложенным на местности в направлении север-юг и запад-восток. Подобным образом проводилась регистрация теллурического поля во всех пунктах, указанных на схеме (рис. 1), где длительность сеансов регистрации составляла 2–7 суток.

Вариации геомагнитного поля регистрировались на российских магнитных обсерваториях КНВ и VLA (рис. 1). Кварцевые компонентные магнитометры от магнитотеллурической станции ЦАИС-1 конструкции ОКБ ИЗМИРАН перед установкой на постаменты обсерваторий КНВ и VLA устанавливались на проверку идентичности записей. По результатам сопоставления записей магнитного поля обсерваторскими магнитометрами в диапазоне периодов 10–20000 секунд разброс значений составил менее 10 %, что соответствует паспортным данным. Частота опроса составляет 1 Гц с возможностью переключения на 10 Гц.

Для обработки наблюдений использовались также магнитные данные, полученные на японских обсерваториях “Мемамбецу” (ММВ) и “Какиока” (КАК).

Для построения геоэлектрической модели Японского региона использовались данные магнитотеллурических зондирований на о. Сахалин, Японском море и Тихом океане, полученные в предыдущие годы по методике, подробно рассмотренной в работах [6, 17].

ОБРАБОТКА НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка данных осуществлялась с помощью программ [4, 13], выполняющих цифровую узкополосную фильтрацию компонент МТ-поля и последующий расчет компонент тензора импеданса:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

где Z_{xy}, Z_{yx} – основные компоненты тензора импеданса; Z_{xx}, Z_{yy} – дополнительные компоненты тензора импеданса; E_x, E_y – горизонтальные компоненты электрического поля для некоторого периода; H_x, H_y – горизонтальные компоненты магнитного поля для некоторого периода.

Значениям компонент импеданса соответствует трансформация кажущегося сопротивления:

$$\rho_k = 0.2 \cdot T \cdot |Z|^2 \quad (1a)$$

где Z – любая из компонент импеданса.

Важной особенностью рассматриваемого комплекса является вращение магнитного поля в горизонтальной плоскости, что, как будет показано ниже, позволяет реализовать методику определения главных направлений тензора импеданса в сложных геоэлектрических условиях. Определенный объем данных обрабатывался с помощью комплекса программ, разработанного Дж. Ларсеном [15].

Вследствие того, что магнитные компоненты в применяемой нами методике исследований регистрировались только на магнитных обсерваториях, то есть в нескольких пунктах, пространственно удаленных от пунктов регистрации теллурического поля, рассчитанные по формуле (1) компоненты тензора импеданса имеют практическое значение только при условии однородности горизонтального магнитного поля. Для проверки этого условия нами рассчитывались коэффициенты линейной связи между одноименными горизонтальными компонентами магнитного поля по записям, синхронно регистрируемым на различных обсерваториях.

На рис. 2 показаны соотношения между коллинеарными компонентами горизонтального магнитного поля по результатам обработки синхронных наблюдений на обсерваториях КНВ, VLA, ММВ в секторе азимутов 0°–90°. Как видно из рис. 2а магнитное поле между Владивостоком и Хабаровском достаточно однородное в диапазоне периодов 20–10000 с. В этом диапазоне отмечается в целом плоская частотная характеристика, а среднее значение коэффициента связи, равное 0.9, возможно, характеризует затухание магнитного поля в южном направлении. Зависимость между горизонтальными компонентами на обсерваториях КНВ и ММВ более сложная. В короткопериодной части (20–100 с) разброс достигает 40 % и по мере увеличения периодов сокращается до 15 %. В целом же частотная характеристика не имеет особенностей, способных существенно изменить форму кривой кажущегося сопротивления в любом пункте исследования между рассматриваемыми обсерваториями. Об этом же свидетельствует сопоставление фрагмента кривой кажущегося сопротивления, рассчитанной по записям теллурического поля, полученных с помощью кабеля JASC и данным магнитных обсерваторий VLA и ММВ (рис. 2в). Как видно, форма обоих вариантов кривой ρ_k практически совпадает, но уровень кажущегося сопротивления кривой ρ_k , полученной с использованием магнитных данных VLA, несколько ниже, чем с данными ММВ. Предварительный анализ позволяет принять

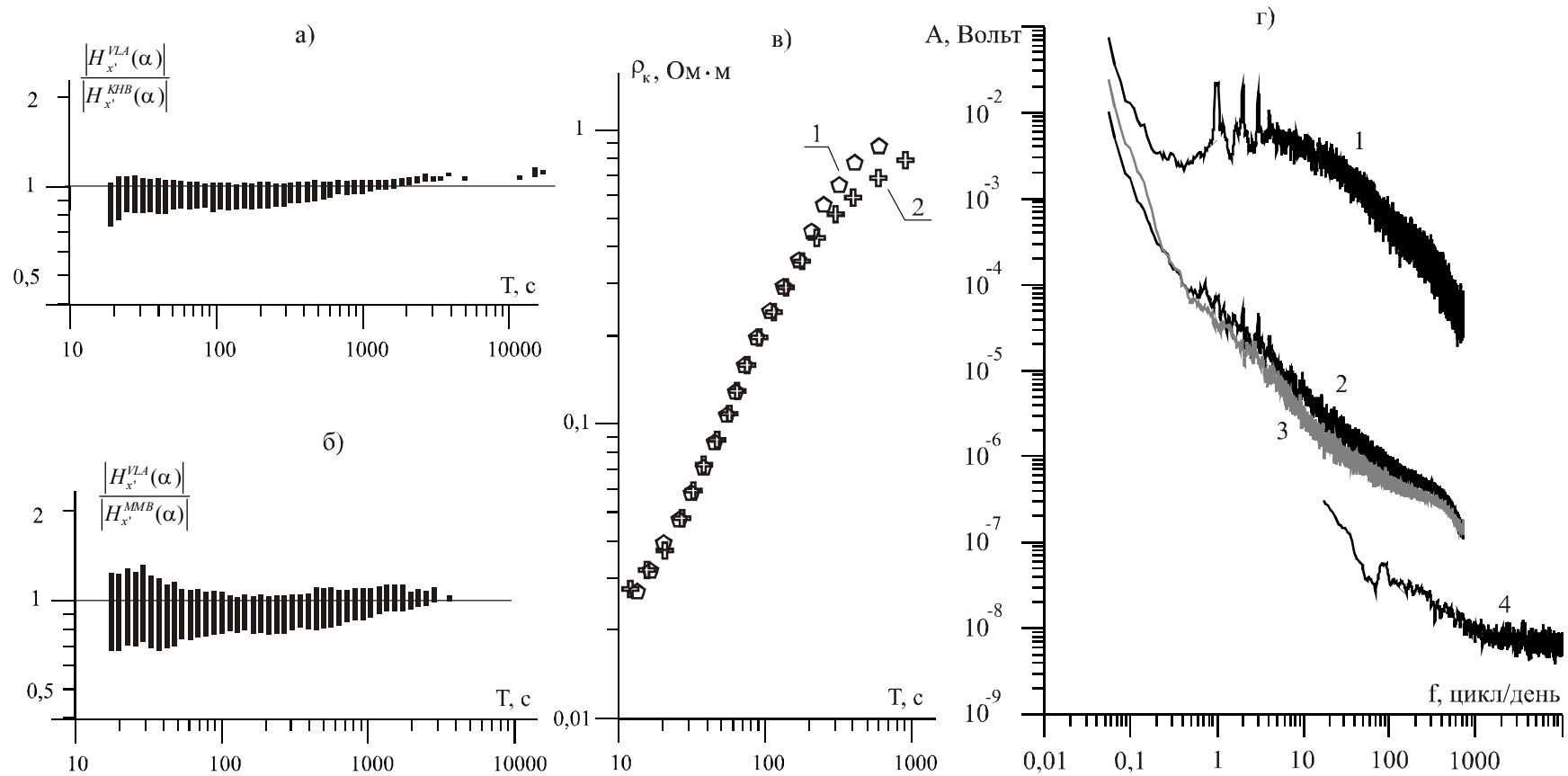


Рис. 2. Исследование шумов магнитотеллурического поля.

а) отношение модулей коллинеарных горизонтальных векторов $H(\alpha)$ в секторе азимутов $0-90^\circ$ для обсерваторий “Владивосток” и “Хабаровск”; б) амплитуда соотношения коллинеарных горизонтальных компонент H_i в секторе азимутов $0-90^\circ$ для обсерваторий “Владивосток” и “Мемамбецу”; в) фрагмент кривых кажущегося сопротивления по кабелю JASC, полученных с использованием данных магнитных обсерваторий “Мемамбецу” (1) и “Владивосток” (2), угол поворота горизонтальных компонент 45° ; г) амплитудные спектры напряжения на кабеле JASC (1) и разностей потенциалов на первой (2) и второй (3) парах штырей прибрежного электрода. Четвёртый график представляет спектр шума аналого-цифрового преобразователя.

допущение об однородности горизонтального магнитного поля в исследуемом районе. При этом мы считаем целесообразным использовать для расчета кажущегося сопротивления JASC магнитные данные обсерватории MMB.

В дополнение к описанному выше эксперименту были проведены исследования стабильности собственных потенциалов морского прибрежного электрода кабеля JASC. Этому способствовали его конструктивные особенности. Данный электрод состоит из 4-х титановых стержней, расположенных на расстоянии ~15 см один от другого и закрепленных на изолирующем основании. Каждый стержень соединен медной жилой диаметром 2 мм с береговой станцией, удаленной на расстояние ~5 км от побережья. Подробно конструкция электрода описана в работе [16]. Стабильность электрода оценивалась путем одновременной регистрации разностей потенциалов с кабеля JASC, когда в качестве ближнего электрода использовался один из стержней прибрежного заземления, и разностей потенциалов с двух пар стержней ближнего электрода. Регистрация осуществлялась в течение 70 дней, с дискретностью 1 сек. Спектры полученных реализаций представлены на рис. 2г [16]. Как видно, на периодах вариаций до 2–3 дней шум электродов примерно на 3 порядка меньше по сравнению с уровнем сигнала, регистрируемого с кабеля JASC. В длиннопериодной области при периодах вариаций, превышающих 5 дней, шум электродов соизмерим с уровнем полезного сигнала, что указывает на то, что импедансы магнитотеллурического поля в этой частотной области будут определяться с большими погрешностями.

Кабель JASC проложен таким образом, что его азимут, равный 143°, составляет с региональной береговой чертой угол 80°–90°, и это является предпосылкой считать кажущееся сопротивление близким к поперечной моде. Отсутствие в Японском море записи теллурического поля в других азимутах лишает возможности рассчитать полярные импедансные диаграммы и на этом основании сделать известными методами [2] оценку степени неоднородности исследуемого геоэлектрического разреза. Но все-таки это можно сделать, исходя из следующих рассуждений. Если вариации геомагнитного поля регистрируются во взаимно-перпендикулярных направлениях Ox и Oy (ось Ox повернута на угол α относительно магнитного меридиана против часовой стрелки), а теллурическое поле регистрируется в ином направлении Ox' , составляющим угол β относительно оси Ox , справедливо соотношение:

$$E_{x'} = b_{x'x} \cdot E_x(\alpha) + b_{x'y} \cdot E_y(\alpha); \quad (2)$$

где $b_{x'x}$ и $b_{x'y}$ – коэффициенты связи, в общем случае комплексные числа.

Используя (1) и (2), после соответствующих преобразований, можем записать:

$$E_{x'} = (b_{x'x} \cdot Z_{xx} + b_{x'y} \cdot Z_{yx}) \cdot H_x(\alpha) + (b_{x'x} \cdot Z_{xy} + b_{x'y} \cdot Z_{yy}) \cdot H_y(\alpha). \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$b_{x'x} \cdot Z_{xx} + b_{x'y} \cdot Z_{yx} = Z_{x'x}(\alpha); \quad (4)$$

$$b_{x'x} \cdot Z_{xy} + b_{x'y} \cdot Z_{yy} = Z_{x'y}(\alpha). \quad (5)$$

Тогда соотношение между напряжением, действующем в неподвижном диполе, и взаимно-перпендикулярными компонентами магнитного поля для любого направления α выразятся:

$$E_{x'} = Z_{x'x}(\alpha) \cdot H_x(\alpha) + Z_{x'y}(\alpha) \cdot H_y(\alpha). \quad (6)$$

Последовательно вращая магнитное поле построим семейство кривых $\rho_k(\alpha)$, рассчитанных по значениям $Z_{x'y}(\alpha)$ (рис. 3а).

Обратим внимание, что в этом семействе максимальное положение занимает кривая $\rho_k(\alpha)$, при $\alpha = +45^\circ$, то есть в положении, при котором магнитное поле почти ортогонально направлению кабеля JASC. Экстремальное положение кривой $\rho_k(+45^\circ)$ требует выполнение условия:

$$\frac{d(b_{x'x} \cdot Z_{yx} + b_{x'y} \cdot Z_{yy})}{d\alpha} = 0. \quad (7)$$

В морской воде вследствие однородности ее электрического сопротивления коэффициенты связи имеют простой вид:

$$b_{x'x} = \cos(\beta); b_{x'y} = \sin(\beta). \quad (8)$$

С учетом этого условие (7) записывается:

$$\sin(\beta) \cdot Z'_{yx}(\alpha) + \cos(\beta) \cdot Z'_{yy}(\alpha) = 0 \quad (9)$$

Так как в нашем случае угол β близок к 90° получим:

$$Z'_{yx}(\alpha) \approx 0. \quad (9a)$$

Как известно [2] условие равенства нулю производной по азимуту полярной диаграммы для двумерной среды выполняется в плавных направлениях. Таким образом, есть основание считать, что кабель JASC проложен в оптимальном направлении и с его помощью определяется кажущееся сопротивление в одном из главных направлений. Очевидно, минимальная кривая семейства (рис. 3а), полученная для направления $\alpha = -45^\circ (+135^\circ)$, то есть в направлении размотки кабеля, соответствует дополнительному импедансу Z_{xx} . Этот вывод подкрепляется и максимальным несоответствием формы экстремальных кривых $\rho_k(+45^\circ)$ и $\rho_k(-45^\circ)$.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В работе [3] теоретически обоснован способ определения интегрального сопротивления литосферы.

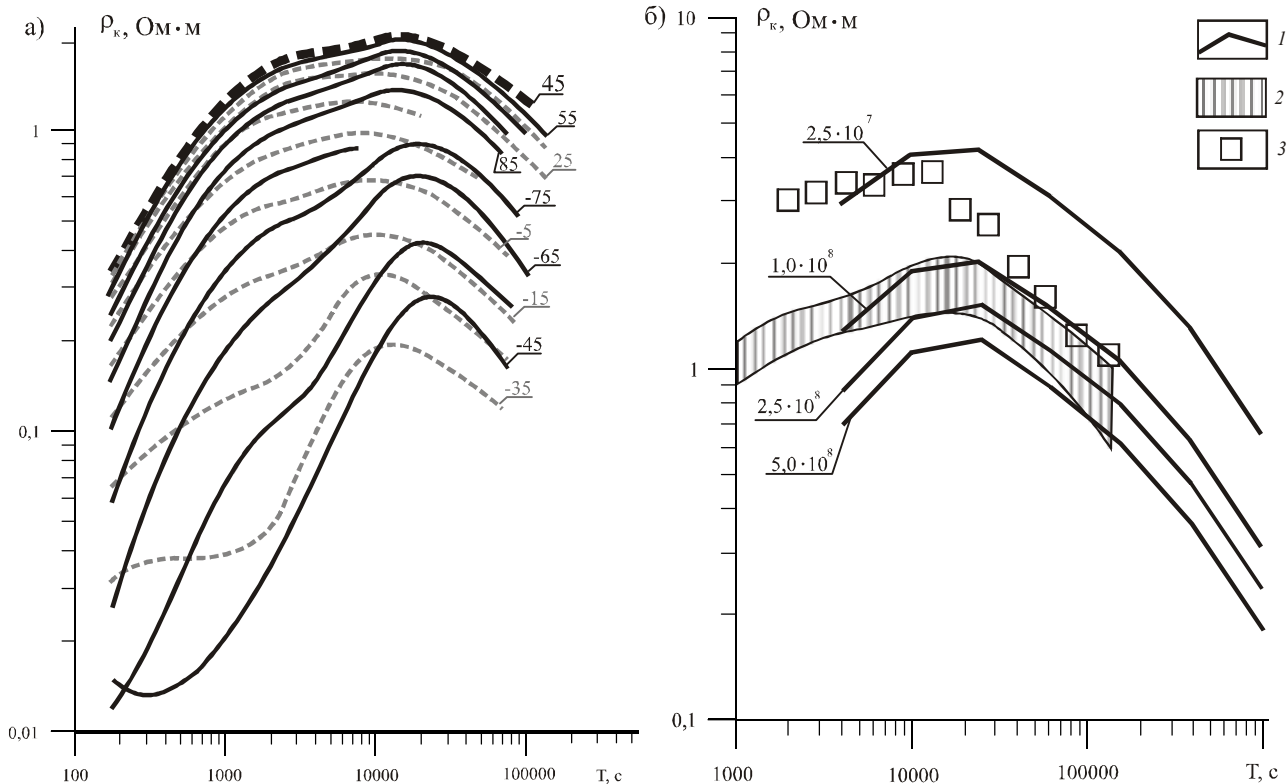


Рис. 3. Кривые кажущегося сопротивления в Японском море.

а) семейство кривых кажущегося сопротивления для кабеля JASC (шифр кривых – угол поворота магнитного поля против часовой стрелки); б) сопоставление кривой кажущегося сопротивления JASC с теоретическими кривыми, рассчитанными для различного интегрального сопротивления литосферного слоя: 1 – теоретические кривые, рассчитанные для различных значений суммарного поперечного сопротивления высокоомного литосферного слоя (Ваньян, 1999; шифр кривых – сопротивление литосферного слоя в $\text{Ом}\cdot\text{м}^2$); 2 – область значений кривой кажущегося сопротивления, рассчитанная по результатам измерений на кабеле JASC, 2002–2006 г; 3 – предварительная кривая кажущегося сопротивления по кабелю JASC.

Показано, что отличительной чертой ТМ-моды является наличие вертикальных токов в литосфере, обеспечивающих повышенную разрешающую способность.

Сравнивая кабельное кажущееся сопротивление с семейством ТМ-моды, рассчитанным для набора интегрального сопротивления литосферы, можно оценить его величину и перейти к удельному сопротивлению литосферного вещества. На рис. 3б показано семейство модельных кривых для геоэлектрического разреза, в котором литосфера мощностью 50 км имеет переменное интегральное сопротивление от $2.5 \cdot 10^7$ до $5 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Литосфера подстилается астеносферой с интегральной проводимостью 5000 См. На этом семействе помещены также варианты кабельных кривых кажущегося сопротивления, полученные по результатам предварительной обработки [3], и данные настоящих исследований. Заметное расхождение вариантов кри-

вых, особенно в диапазоне периодов 1000–20000 с объясняется тем, что предварительный вариант рассчитывался с использованием данных о вариациях магнитного поля на магнитной обсерватории КАК без анализа его однородности. В настоящем варианте использовались магнитные данные магнитной обсерватории ММВ, находящейся, судя по вышеприведенному анализу, в области однородного магнитного поля. Согласно последним данным, интегральное сопротивление литосферы составляет $1.75 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. При мощности литосферы 50 км удельное ее сопротивление, вероятно, составляет 3500 $\text{Ом}\cdot\text{м}$ (ранее оценка составляла 1000 $\text{Ом}\cdot\text{м}$). Изменение оценки удельного сопротивления литосферы в сторону его повышения вынуждает нас пересмотреть ранее сделанные предположения о широком развитии глубоких флюидонасыщенных разломов в литосфере Японского моря [5], обуславливающих низкое сопротивление.

Разумеется, интегральное сопротивление литосферы далеко не исчерпывает всей информации о глубинной электропроводности. Численное моделирование совокупности данных, включая наблюдения на континенте, позволяет значительно расширить представление о геоэлектрической структуре тектоносферы.

Однако, континентальные кабельные кривые на пунктах ELS, ROS, полученные с помощью отрезков кабеля связи длиной 7–30 км, проложенных в различных азимутах, оказались плохо сопоставимыми даже между собой. Попытка пересчитать их в главные направления с использованием стандартной [2] методики привела так же к противоречивым результатам. В регионе не удалось найти единого направления, даже выполнив более 70 точечных зондирований: каждая точка при небольших перемещениях на площади давала свое “главное направление”. В поисках способов получения информации о глубинном строении трехмерной среды мы предположили, что изучаемая среда может быть аппроксимирована в виде региональной двумерной модели, перекрытой относительно тонкой, резко неоднородной по электрическому сопротивлению, пленкой (поймы рек, гидросеть, разрывы и т.д.). Согласно (3) для двух взаимно-перпендикулярных диполей, проложенных на дневной поверхности, справедливы выражения:

$$\begin{aligned} E_{x'} &= (b_{x'x'} \cdot Z_{xx} + b_{x'y'} \cdot Z_{yx}) \cdot H_x(\alpha) + \\ &+ (b_{x'x'} \cdot Z_{yx} + b_{x'y'} \cdot Z_{yy}) \cdot H_y(\alpha); \\ E_{x''} &= (b_{x''x'} \cdot Z_{xx} + b_{x''y'} \cdot Z_{yx}) \cdot H_x(\alpha) + \\ &+ (b_{x''x'} \cdot Z_{yx} + b_{x''y'} \cdot Z_{yy}) \cdot H_y(\alpha); \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты $b_{x'x'}$, $b_{x'y'}$, $b_{x''x'}$, $b_{x''y'}$ – физически характеризуют перераспределение теллурического тока в приповерхностном слое.

Как видно, для обоих диполей выражения в скобках, стоящие перед $H_x(\alpha)$, представляют линейную комбинацию импедансов Z_{xx} и Z_{yx} , а перед $H_y(\alpha)$ – линейную комбинацию импедансов Z_{yx} и Z_{yy} .

В условиях эллиптической поляризации теллурического поля наиболее интересным оказывается случай, возникающий при совпадении направления магнитных компонент с главным направлением регионально двумерной среды, перекрытой электрически неоднородной пленкой. Так как в главных направлениях дополнительные импедансы Z_{xx} и Z_{yy} стремятся к нулю [2], выражение (10) примет вид:

$$\begin{aligned} E_{x'} &= b_{x'x'} \cdot Z_{yx} \cdot H_x(\alpha) + Z_{xy}(\alpha) \cdot b_{x'y'} \cdot H_y(\alpha); \\ E_{x''} &= b_{x''x'} \cdot Z_{yx} \cdot H_x(\alpha) + Z_{xy}(\alpha) \cdot b_{x''y'} \cdot H_y(\alpha); \end{aligned} \quad (11)$$

Это означает, что только в главных направлениях кривые $\rho_k(\alpha)$ при любом расположении измерительного диполя окажутся конформными, и будут различаться лишь смещением уровня, определяемого коэффициентами $b_{x'x'}$, $b_{x'y'}$, $b_{x''x'}$, $b_{x''y'}$. Пример нахождения

кривых кажущегося сопротивления в главных направлениях показан на рис. 4. Данный критерий позволяет не только определить главные направления, но и оценить, на сколько среда в конкретном пункте может быть аппроксимирована двумерной региональной моделью. Так в 22 из 80 пунктов МТЗ, выполненных в пределах Сихотэ-Алинской складчатой зоны, ни при каких азимутах α не оказалось совпадающих кривых $\rho_k(\alpha)$. Другими словами в этих пунктах реальная среда не отвечает сделанному нами предположению о ее строении. По этой причине кривые МТЗ в этих пунктах не интерпретировались.

Используя рассмотренную методику к данным наблюдений на точках МТЗ, показанных на рис. 1, нами выявлены зоны относительно повышенной электропроводности в верхней части земной коры в интервале глубин 7–15 км.

Аномальная проводимость этих зон составляет 100–300 См. На рис. 5 показана схема расположения аномально проводящих зон. В геоэлектрическом отношении важно отметить то, что главные направления тензоров импедансов в континентальной части находятся в полном соответствии с простираем выделенных аномальных зон. Важен и геологический аспект интерпретации: на рис. 5 показано соотношение выделенных нами в материковой части аномально электропроводящих зон с зонами коровых разломов, выделенных по данным гидромагнитной съемки в Японском море Ю.В. Шевалдиным [14]. Как видно, меридиональные и северо-западные системы разломов, выделенные в коре Японского моря, четко протягиваются вглубь континента. Система разломов северо-восточного направления на континенте параллельна таковой в Японском море. Анализ схемы разломов дает основание для следующих выводов:

- кабель JASC на всем своем протяжении проложен параллельно системе северо-западных коровых разломов, прослеживающихся от Наоэцу до Находки, что является одним из благоприятствующих условий глубинного зондирования.

- эта система коровых разломов прослеживается в материковой части от Находки до оз. Ханка.

- главные направления тензора импеданса согласуются с направлением северо-западной системы коровых разломов.

Исходя из выше изложенного, есть основания считать линию профиля I-I' для численного моделирования геоэлектрического разреза тектоносферы региона наиболее оптимальной. При этом кривые кажущегося сопротивления должны рассматриваться в направлениях вдоль выбранного профиля I-I' и вкост него.

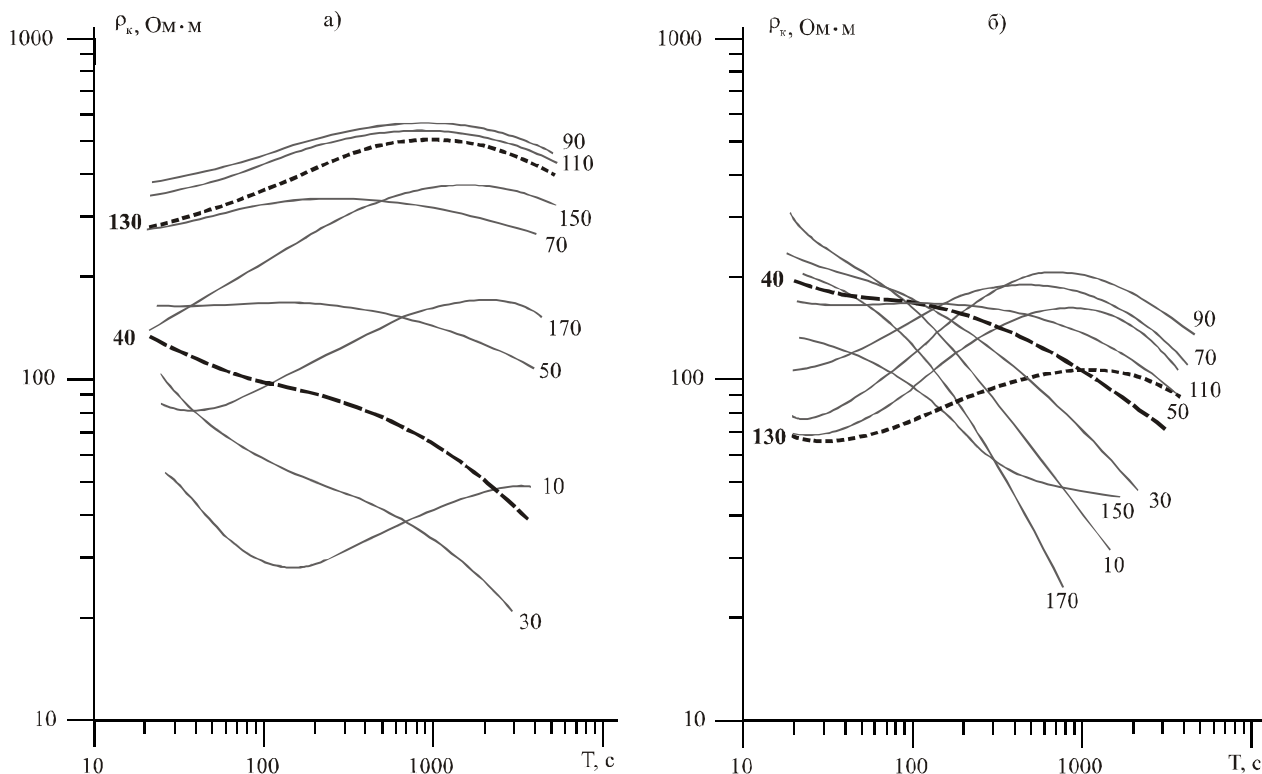


Рис. 4. Пример поиска кривых кажущегося сопротивления в главных направлениях на пункте МТЗ 57.

а) полученные с измерительной линии север-юг, б) полученные с измерительной линии запад-восток. Шифр кривых – азимут (α) магнитной компоненты $H_x(\alpha)$ в градусах. Жирными линиями выделены конформные кривые кажущегося сопротивления в азимутах $\alpha = 40^\circ$ и $\alpha = 130^\circ$, отождествляемые как кривые в главных направлениях.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЯПОНСКОГО РЕГИОНА

Численное моделирование проводилось путем последовательного приближения расчетных амплитудных кривых к экспериментальным. Фазовые кривые не использовались в связи с недостаточным качеством синхронизации записей теллурических и магнитных полей. Прогнозная геоэлектрическая модель вдоль профиля I-I' (рис. 1) пересекающей континентальные структуры, окраинное Японское море, остров Хонсю, построенная нами с учетом имеющихся данных МТЗ по материковой части [1, 7–9, 11], Сахалину [6], Японии [17, 18], а также сейсмических и геотермических данных, представлена на рис. 6а. Шкала расстояний имеет начало (нулевую отметку) у бух. Отрада, где расположено ближнее заземление кабеля JASC. Глубина Японского моря в модели достигает 3.5 км, принятое удельное сопротивление воды 0.3 Ом·м. Под водным слоем расположены рыхлые осадки мощностью до 1.5 км с удельным сопротивлением 10 Ом·м. На глубине 80–140 км помещена астеносфера мощностью 60 км. В материковой ее части интегральная проводимость составля-

ет 1500 См, а под Японским морем 5000 См. Высокоомная кора и подкорковая литосфера, разбитая системой флюидонасыщенных низкоомных разломов ($\rho = 10$ Ом·м), повсеместно характеризуется удельным электрическим сопротивлением 300 Ом·м. Для верхней части земной коры Ханкайского массива принято более высокое значение удельного сопротивления – 1000 Ом·м. Распределение глубинной электропроводности под о. Хонсю и глубоководной впадиной заимствовано из работы [17].

Расчеты проводились по программе двумерного моделирования [19] В.А. Кузнецовым (ИО РАН). Кажущееся сопротивление по кабелю JASC сопоставлялось с результатом интегрирования модельных расчетов на участке Находка-Наоэцу.

На континентальной части расчетные данные сопоставлялись с кажущимся сопротивлением, полученным по кабелям ELS, ROS, с кажущимся сопротивлением на пункте наблюдения МН, а также на девяти полевых пунктах наблюдения вдоль профиля I-I' на участке мыс Поворотный–Турий Рог. В континентальной части использовалось кажущееся сопротивление для направлений вдоль и поперек профиля.

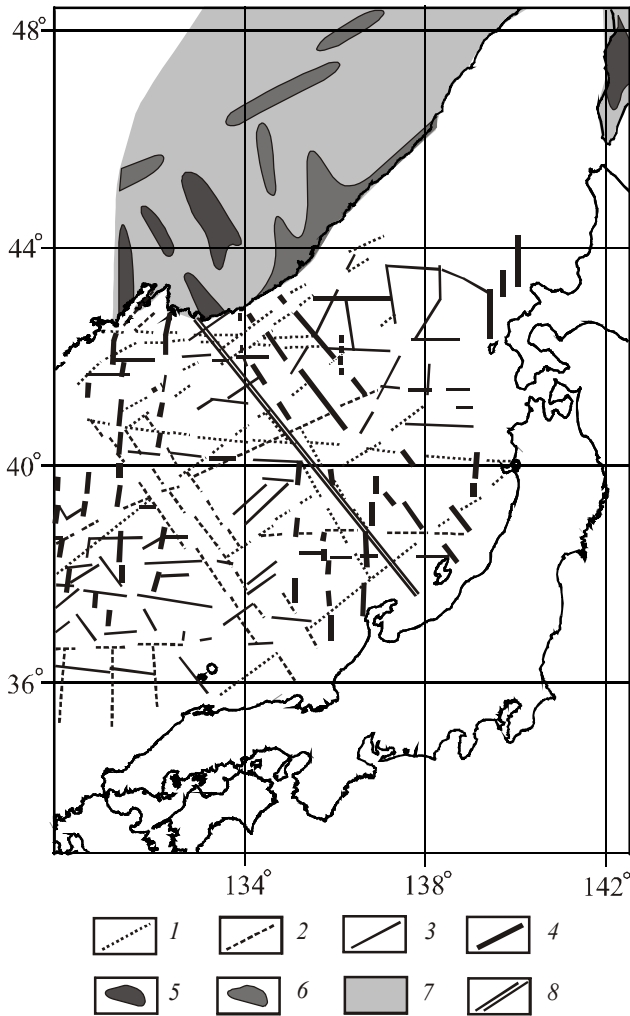


Рис. 5. Схема неоднородностей в земной коре региона (коровые разломы приведены по Ю.В. Шевалдину, 1978 г.).

1 – глубинные разломы позднекайнозойские, 2 – то же, допозднекайнозойские, 3 – коровые разломы, 4 – коровые разломы, сонаправленные с зонами повышенной проводимости, выделенными по результатам МТЗ, 5 – зоны повышенной проводимости в средней коре $S > 200$ См, 6 – зоны повышенной проводимости в средней коре $S < 200$ См, 7 – район наземных исследований, 8 – кабель JASC.

Для достижения цели максимального соответствия результатов расчета эксперименту нами изменялись параметры отдельных элементов прогнозной модели. Прежде всего, для обнаружения наиболее глубоких геоэлектрических горизонтов, в которых уже может намечаться различие между окраинным морем и континентом, вводились неоднородности в слой на глубине 290–460 км. Варьируя расположением относительно контакта суша–море, размерами и уровнем электрического сопротивления (2–50 Ом·м), нам не удалось приблизиться к экспериментальным

кривым по всему профилю I-I' лучше, чем при параметрах прогнозной модели слоя с $\rho = 30$ Ом·м. Наиболее ощутимо расчетные кривые подвергались изменению под влиянием неоднородностей, включаемых в высокоомную подкоровую часть литосферы. Причем изменения кажущегося сопротивления в окраинном море и на континенте происходят по-разному. На рис. 6в показана кабельная кривая JASC в сопоставлении с различными вариантами расчетов. Цифрами 1, 2, 3 обозначены теоретические кривые для JASC, соответствующие прогнозной модели, если предусмотрены в ней глубинные разломы, соединяющие астеносферный слой с осадочной толщей, принимали значения 1 Ом·м, 10 Ом·м, 100 Ом·м соответственно. Как видно, при понижении электрического сопротивления разломов, кабельная кривая МТЗ должна смещаться вверх. Теоретическая кривая рассчитана для варианта сплошной, не разбитой проницаемыми разломами подкоровой части литосферы, характеризующейся сопротивлением $\rho = 3500$ Ом·м (в соответствии со сделанной выше оценкой). В этом варианте уровень расчетной кривой, как и следовало ожидать, совпал с уровнем экспериментальной кривой JASC. Для достижения более полного сходства формы в диапазоне периодов 1000–10000 с в прогнозируемую модель пришлось внести изменение значения интегральной проводимости 10000 См. Прогнозная модель со сквозьлитосферными разломами, параллельными береговой линии, не подтверждается и в континентальной части, по крайней мере в пределах Ханкайского массива, который пересекает линия профиля I-I'. В качестве примера этому утверждению на рис. 6г показана кривая МТЗ (3) на пункте ROS для направления 40° с.в., соответствующая продольной кривой исследуемой модели в точке “-120 км”. Расчетная кривая (1) соответствует варианту прогнозной модели, содержащей глубинные разломы $\rho = 10$ Ом·м. Кривая (2) соответствует модели без глубинных разломов. Не вызывает сомнения, что второй вариант лучше согласуется с экспериментальными исследованиями. Аналогичное, но менее показательное из-за ограниченности низких частот, соотношение между расчетными и экспериментальными кривыми имеет место на всех девяти пунктах МТЗ вдоль профиля МТЗ I-I'.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований изучены особенности электропроводящей структуры тектоносферы в зоне сочленения окраинного Японского моря и Сихотэ-Алинской складчатой области – восточной окраины Азиатского континента. Полученные новые геофизические данные свидетельствуют о

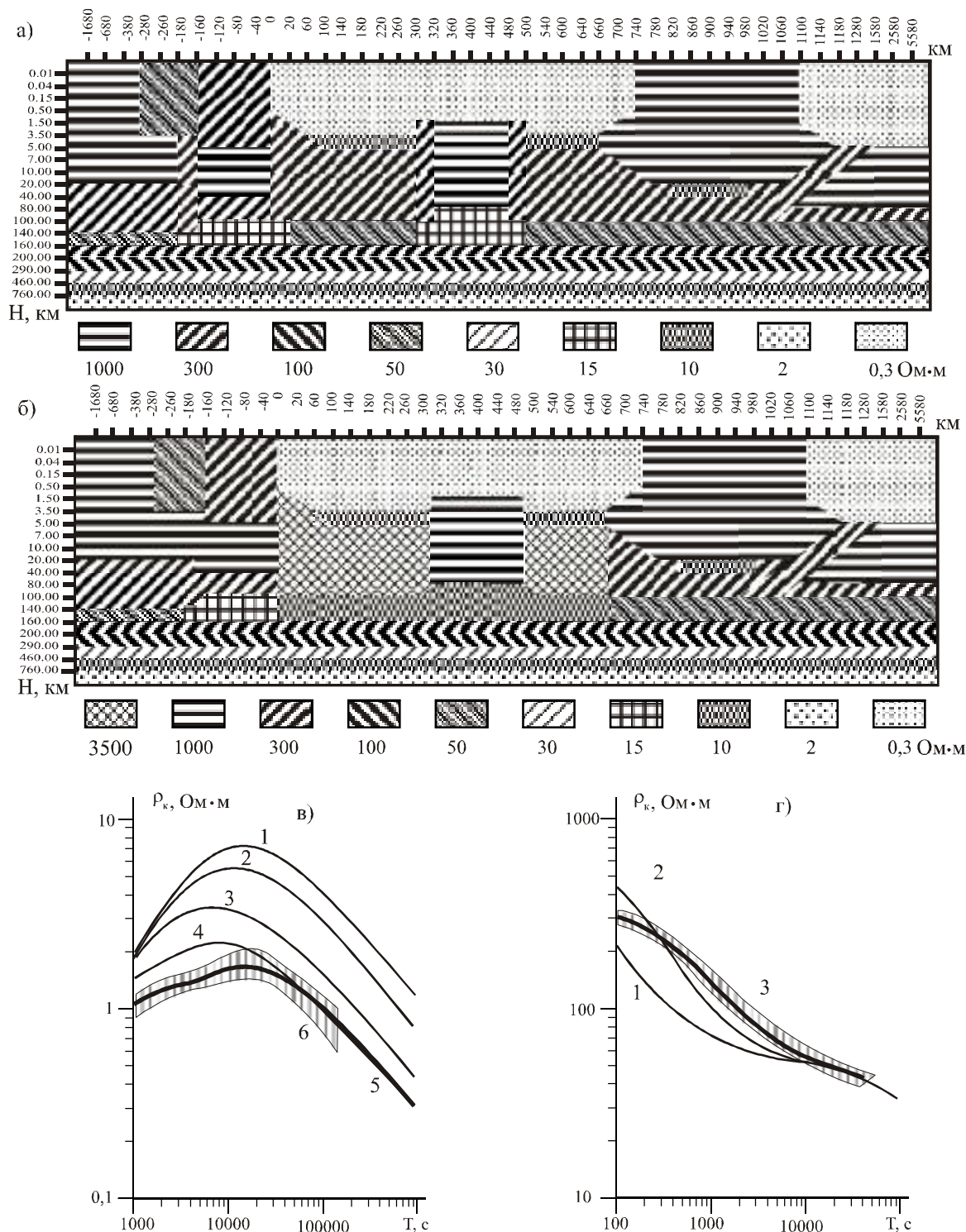


Рис. 6. Геоэлектрический разрез тектоносферы по профилю I-I'.

а) прогнозная геоэлектрическая модель; б) модель с учетом экспериментальных данных 2002–2006 гг.; в) сопоставление расчетных кривых кажущегося сопротивления с экспериментальной кривой JASC по окраинному морю при условиях расчета: 1, 2, 3 – сопротивление сквозлитосферных разломов 1, 10, 100 Ом·м соответственно; 4 – удельное сопротивление литосферы 3500 Ом·м и отсутствие литосферных разломов; 5 – то же, при интегральной проводимости 10000 См; 6 – кривая кажущегося сопротивления по JASC; г) сопоставление расчетных кривых кажущегося сопротивления с экспериментальными по континенту при условиях расчета: 1 – сопротивление литосферных разломов 10 Ом·м; 2 – литосферные разломы отсутствуют; 3 – кривая кажущегося сопротивления по ROS (г. Уссурийск, РОСТЕЛЕКОМ, на модели кривой соответствует точка с координатой “-120”).

том, что на глубинах свыше 300 км сглаживаются различия в электрических характеристиках континента и окраинного моря, структура приближается к горизонтально-слоистой, соответствующей стандартному планетарному разрезу. Существенное отличие геоэлектрических характеристик отмечается в астеносфере и вышележащей литосфере. Интегральная проводимость астеносферы под Японским морем составляет не менее 10000 См, а под Сихотэ-Алинской складчатой зоной – 2000–1000 См, уменьшаясь в северо-западном направлении. В этом же направлении происходит, очевидно, погружение кровли астеносферного слоя.

Литосфера под Японским морем характеризуется удельным электрическим сопротивлением около 3500 Ом·м, а под континентом – 500–300 Ом·м, увеличиваясь в отдельных блоках Ханкайского массива до 1000 Ом·м. По линии профиля I–Г, пересекающего Японское море и Ханкайский массив, не обнаружено низкоомных крутопадающих зон, отождествляемых с проницаемыми зонами, соединяющими электропроводящую астеносферу с рыхлыми осадочными образованиями. Судя по величине электрического сопротивления можно предположить, что литосфера под Японским морем более “сухая” чем под континентом, и это может рассматриваться, как довод в пользу ее эклогитизации.

Установлена однотипность системы разломов в средней и верхней части земной коры Японского моря и континентального обрамления. Выделенные по результатам гидромагнитной съемки системы разломов северо-западного и меридионального направлений по данным магнитотеллурических зондирований продолжают вглубь материка в виде зон повышенной проводимости (до 300 См) шириной 15–20 км в интервале глубин 7–15 км.

Системы разломов северо-восточного направления, выделенные по данным МТЗ в континентальной части, с такой же периодичностью развиты в Японском море. Вместе с тем, разломные системы широтного направления, надежно прослеживаемые в Японском море, в материковой части нами не обнаружены, что, отражает особенности ее флюидного режима.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-05-64457 и 01-05-64655.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахмадулин В.А., Талтыкин Ю.В. Геологическая модель юга Буреинского массива // Глубинные магнитотеллурические зондирования Дальнего Востока. Владивосток, 1977. С. 32–37.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастушан В.В. Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ, 1997. 161с.
3. Ваньян Л.Л., Пальшин Н.А., Никифоров В.М. и др. Изучение теллурического поля с использованием кабеля, пересекающего Японское море // Физика Земли. 1999. № 7. С. 17–26.
4. Дмитриев И.В. Методика решения переопределенных систем линейных уравнений: Труды Междунар. конф. “Математические методы в геофизике”. Ч. I. Новосибирск: Изд-во. ИВМиМГ СО РАН, 2003. С. 310–314.
5. Кузнецов В.А., Никифоров В.М., Старжинский С.С. Роль глубинных разломов при изучении литосферы Японского моря с использованием подводного кабеля Находка–Наоцу // Физика Земли. 2001. № 4. С. 74–76.
6. Никифоров В.М., Старжинский С.С. О влиянии вертикальных проницаемых зон на повышение чувствительности МТ-зондирований на Сахалине // Материалы годичной сессии 1994 г. (Тихоокеанский океанологический ин-т). Владивосток, 1997, С. 172–181.
7. Никифоров В.М., Старжинский С.С., Дмитриев И.В. и др. Геоэлектрическая структура тектоносферы юга Дальнего Востока и некоторые особенности ТЕ-моды в сверхнизкочастотном диапазоне // Второй всероссийский симпозиум “Сейсмоакустика переходных зон”. Владивосток, 2001. С. 43–49.
8. Никифоров В.М., Старжинский С.С., Дмитриев И.В. и др. Геоэлектрическое районирование юга Дальнего востока России и сопредельных площадей // Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии: IV Косыгинские чтения, 21-23 января 2003 г. Хабаровск: Дальнаука, 2003. С. 164–180.
9. Никифоров В.М., Дмитриев И.В., Топорова Е.Н. Геоэлектрическое строение тектоносферы Приморья // Закономерности строения и эволюции геосфер: VI междунар. симпоз. Хабаровск, Россия, 23-26 сентября 2003. Хабаровск: Дальнаука, 2004. С. 209–216.
10. Никифоров В.М., Пальшин Н.А., Старжинский С.С., Кузнецов В.А. Трехмерный береговой эффект в Приморье // Физика Земли. 2004. № 8. С. 56–69.
11. Старжинский С.С. О геологическом разрезе Южного Приморья по данным магнитотеллурических исследований // Тихоокеан. геология. 1983. № 3. С. 18–22.
12. Старжинский С. С., Никифоров В.М. Опыт использования телефонных линий для целей магнитотеллурического зондирования // Геофизический журнал. 2005. Т. 27, № 4. С. 636–645.
13. Талтыкин Ю.В., Никифоров В.М. Обработка магнитотеллурических зондирований на ЭВМ // Тихоокеан. геология. ДВО АН СССР, деп. в ВИНТИ 20.07.90, № 108-В90. 16 с.
14. Шевалдин Ю.В. Аномальное магнитное поле Японского моря. М.: Наука, 1978. 78 с.
15. Larsen, J.C., Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismic-induced signals // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1997. V. 49. P. 1257–1265.
16. Starjinsky S. S. and Nikiforov V. M. // On the submarine communication cable JASC ground self-potential stability // Earth Planets Space. 2005. V. 57. P. 903–906.
17. H. Utada, Y. Hamano and J. Segawa: “Conductivity anomaly around the Japanese Islands”, in “Geology and Geophysics of

- the Japan Sea (Japan-USSR Monograph series)" / Ed. N. Isezaki et al, Terra Sci. Pub. 1996. P. 103–149.
18. Vanyan L., Utada H., Shimizu H. et. al. Studies on the lithosphere and the water transport by using the Japan Sea submarine cable (JASC): 1. Theoretical consideration // Earth Planets Space. 1998. 50. P. 35–42,
19. Wannamaker, P.E., Booker, J.R., Jones A.G. et. al. Resistivity Cross Section Through the Juan de Fuca Subduction System and its Tectonic Implication // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, B10, 14127–14144.

Рекомендована к печати Р.Г. Кулиничем

V.M. Nikiforov, I.V. Dmitriev

Geoelectrical section of tectonosphere in the junction zone of the Sea of Japan depression and continental framing

New data on the deep geoelectrical structure of tectonosphere in the junction zone of the Sea of Japan and continental structures are demonstrated. Digital modeling of the geoelectrical section was performed on the basis of the unique data set which was obtained via monitoring of electrical field variations in the JASC underwater telecommunication cable and in land cables in the Primorye region. The data were collected simultaneously with the registration of geomagnetic variations at VLA, KHB and MMB observatories and at a PPI stationary site. Additionally, data from 80 field MTS sites at the Khanka massif and Sikhote-Alin fold area were used.

Key words: geoelectrical section, JASC underwater communication cable, continental communication cable, magnetotelluric sounding, tectonosphere, asthenosphere, electrical conductivity, deep faults, Sea of Japan.